

تصفیه رواناب سطحی با استفاده از سنگدانه‌های لایه‌های روسازی نفوذپذیر

امیر قاسمی مقدم^۱، نادر مختارانی^{۲*}، امیر کاووسی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳. دانشیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۴/۲۴]

mokhtarani@modares.ac.ir

چکیده - در این پژوهش تاثیر سنگدانه‌های مختلف در لایه‌های روسازی نفوذپذیر برای تصفیه رواناب شهری در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا پس از تهیه سنگدانه‌های سرباره‌ای، سیلیسی و سنگ‌آهکی و آماده‌سازی راکتورها، آزمایش‌ها در سیکل‌های متوالی به صورت پیوسته با استفاده از رواناب سنتزی انجام پذیرفت. کلیه آزمایش‌ها در راکتورهای استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر که ۵۰ سانتی‌متر از ارتفاع آن (۱۰ سانتی‌متر لایه فیلتر و ۴۰ سانتی‌متر لایه اساس) به وسیله‌ی مصالح پر شده بود انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده اگر چه هر سه نوع سنگدانه استفاده شده از توانایی قابل قبولی در تصفیه رواناب برخوردار بودند اما سرباره در مقایسه با سایر مصالح توانایی بالاتری در حذف آلاینده از خود نشان داد. در این پژوهش بیشینه میزان حذف COD، فسفر و جامدات از رواناب پس از گذشت ۳ ساعت به ترتیب به میزان ۶۰، ۵۹ و ۷۰ درصد بوده که پس از ۱۲۰ ساعت به ترتیب به ۹۸، ۹۶ و ۹۹ درصد افزایش یافت. همچنین در این پژوهش ظرفیت جذب بار آلی، فسفر و جامدات در ستون‌های حاوی سنگدانه سرباره‌ای، به ترتیب برابر با ۳/۴۳، ۰/۲۱ و ۲۲/۱۰ گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه برآورد شد. در ادامه داده‌های تجربی فرایند حذف بار آلی با مدل‌های سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و مدل سینتیکی پخش بین ذره‌ای مطابقت داده شد. بر اساس نتایج حاصل، فرایند حذف بار آلی به وسیله‌ی هر سه سنگدانه استفاده شده از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم تبعیت بیشتری داشته است.

کلمات کلیدی: روسازی نفوذپذیر، رواناب، COD، فسفر، جامدات کل، تصفیه

۱- مقدمه

اکوسیستم‌ها را می‌تواند تحت تاثیر قرار دهد. رواناب شهری به عنوان یک عامل اصلی کاهش کیفی آب‌های سطحی نیز مطرح است [۲]. همچنین گزارش‌هایی در خصوص آثار نامطلوب رواناب شهری بر سلامت عمومی و زندگی انسان منتشر شده است [۳]. یک راهکار مفید برای حل این مشکل، تصفیه رواناب شهری قبل از تخلیه به محیط‌های پذیرنده است. مدیریت و کنترل آلودگی رواناب شهری نیاز به درک درست از ترکیبات رواناب، منابع آلاینده و آثار آن دارد. دامنه بار آلودگی مستقل شده به حوزه‌های آبی با رواناب شهری در بعضی موارد قابل مقایسه با فاضلاب شهری تصفیه نشده است. لازم به گفتن است که

رواناب شهری از جریان یافتن آب از خیابان‌ها، پارکینگ‌ها، سقف‌ها، حیاط منازل و سایر سطوح غیر قابل نفوذ حاصل می‌شود [۱]. افزایش آلودگی رواناب‌های سیلابی، کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی، جوابگو نبودن ابعاد کانال‌های اطراف خیابان برای هدایت رواناب به خارج از شهر و به تبع آن آب‌گرفتگی معابر و آشکار شدن اهمیت محیط‌زیست و توسعه پایدار حساسیت بشر امروزی را در انتخاب و ابتکار روش‌های گوناگون برای کنترل و حذف آلاینده‌های مختلف رواناب برانگیخته است. زمانی که رواناب شهری به طور مستقیم و بدون نگهداری و تصفیه به محیط تخلیه شود تمام

نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین نیاز به استفاده از سنگدانه‌ای در این لایه‌ها است که بیشترین حذف آلاینده بین دیگر سنگدانه‌ها را دارد.

نتایج پژوهش بر آلودگی ناشی از رواناب آسفالت نفوذناپذیر و آسفالت متخلخل بیانگر کاهش قابل توجه میزان مواد جامد معلق (TSS)، نیتروژن کج‌لدال کل (TKN)، نیترات (NO_3^-)، آمونیاک (NH_4^+)، فلزات مس و روی در رواناب خروجی از آسفالت متخلخل در مقایسه با رواناب جاری روی آسفالت نفوذناپذیر بوده است [۱۱]. در پژوهش مشابهی پس از شبیه‌سازی ۱۷ سال بارش منطقه و عبور آن از روسازی نفوذپذیر غلظت مواد معلق، فسفر و نیتروژن رواناب به ترتیب به میزان ۱۰۰، ۳۰ و ۲۰ درصد کاهش یافته است [۱۵]. رسین و همکاران در سال ۲۰۱۲ کاهش غلظت فلز روی و جامدات معلق رواناب به ترتیب به میزان ۸۰ و ۹۴ درصد در عبور از روسازی آسفالتی متخلخل را گزارش نموده‌اند [۱۶]. در پژوهش دیگری افزایش نیترات رواناب خروجی از روسازی بتنی بلوکی در مقایسه با رواناب سطحی به دلیل قرار گرفتن در شرایط هوایی و انجام عمل نیتریفیکاسیون گزارش شده است [۱۷]. سرباره‌های حاصل از ذوب آهن و فولاد ظرفیت قابل ملاحظه‌ای برای جدا کردن ترکیبات مختلف از رواناب دارند. مواد یاد شده می‌توانند به عنوان مصالح ارزان قیمت و دوست‌دار محیط‌زیست به‌منظور حذف مواد مغذی (فسفر و نیتروژن)، فلزات و دیگر ترکیبات نامطلوب رواناب، استفاده شوند. این مواد هم‌اکنون به شکل موفقیت‌آمیزی، در ساختمان راه در برخی از کشورهای پیشرفته از جمله کانادا و آمریکا به‌منظور حذف مواد مغذی و فلزات سنگین از رواناب استفاده شده است [۱۸]. سنگدانه‌های تشکیل شده از مواد آهن‌دار نیز گزینه‌ای مناسب برای حذف آلاینده از رواناب می‌باشند. در پژوهشی حذف ۸۸ درصدی فسفات از رواناب، در اثر عبور از سنگدانه‌های حاوی ۵٪ اکسیدهای آهن گزارش شده است [۱۹]. با توجه به موارد بالا هدف اصلی از انجام این پژوهش بررسی تاثیر جنس سنگدانه‌های لایه‌های اساس و فیلتر روسازی نفوذپذیر در تصفیه رواناب سطحی تعیین شد. در این پژوهش ضمن مقایسه توانایی تصفیه رواناب به وسیله سنگدانه‌های مختلف ظرفیت جذب هر یک از سنگدانه‌های استفاده شده برآورد و سیستمیک فرایندهای مربوطه تعیین شد.

بیشترین غلظت آلاینده‌های رواناب مربوط به "اولین بارش بعد از دوره گرما" است. معمولاً ترکیبات مضر ناشی از کودها و سموم مورد استفاده در کشاورزی، باغبانی و فضای سبز، مدفوع حیوانات و پرنده‌ها، فلزات سنگین حاصل از اجزا و سوخت وسایل نقلیه و همچنین آلودگی‌های مربوط به سطح لایه رویه روسازی خیابان‌ها همراه با آب (نزولات جوی) وارد سیستم زهکشی شهری می‌شود [۴].

در مدیریت نوین شهری، دیگر رواناب یک تهدید برای شهر نبوده و از آن به عنوان یک فرصت برای تامین آب شهری یاد می‌شود. بر همین اساس استفاده مجدد از رواناب و تغذیه آب‌خون‌ها از طریق آن در اولویت قرار گرفته است. از طرفی هزینه‌های بسیار زیاد احداث کانال‌ها و افزایش ابعاد آن‌ها برای خارج کردن رواناب از شهرها یک معضل اساسی برای شهرداری‌ها محسوب می‌شود. در این میان روسازی نفوذپذیر یکی از روش‌های مدیریت رواناب شهری است که علاوه بر کاهش احتمال سیلاب شهری به بهبود کیفیت رواناب به منظور استفاده از آن کمک شایانی می‌کند [۵-۷]. تاکنون گزارش‌های زیادی در خصوص بهبود کیفیت رواناب عبوری از روسازی‌های نفوذپذیر به چاپ رسیده است [۸-۱۲]. روسازی نفوذپذیر جایگزینی برای روسازی‌های بتنی و آسفالتی نفوذناپذیر در معابر با بار ترافیک متوسط و کم بوده که در آن فضاهای خالی در روسازی اجازه عبور آب به نواحی زیرین در بارش را می‌دهد [۱۳]. لایه‌های روسازی نفوذپذیر تقریباً شبیه به واحد فیلتراسیون تصفیه‌خانه آب و فاضلاب عمل می‌کند و سازکارهای مشابهی در حذف آلاینده‌ها دارند. لازم به گفتن است که نرخ حذف آلاینده در این نوع سیستم‌ها به میزان زیادی به مصالح استفاده شده در رویه، اساس، لایه‌های زیرین روسازی و فضای خالی در رویه بستگی دارد [۱۴].

روسازی‌ها اغلب از چندین لایه تشکیل می‌شوند. لایه‌های مشترک میان تمام روسازی‌ها شامل لایه رویه، لایه فیلتر، لایه اساس و لایه زیراساس است. معمولاً حجم زیادی از مصالح سنگدانه‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس قرار می‌گیرند. برای جلوگیری از فرسایش و تداخل، بهتر است از یک نوع مصالح در لایه‌های فیلتر، اساس و زیراساس استفاده شود. در استفاده از سنگدانه‌های مصرفی در لایه‌های روسازی در کنار مسائل اقتصادی، مسائل زیست‌محیطی

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ روش کار

دبی ۰/۹ لیتر بر دقیقه از بالا وارد ستون شده و پس از عبور از لایه-های فیلتر و اساس از قسمت پایین آن خارج و مجدداً از طریق پمپ موجود در منبع رواناب وارد راکتور شد. این گردش رواناب چندین بار تکرار و در فواصل زمانی مشخص از آن نمونه‌گیری بعمل آمده و آنالیز شد.

لازم به گفتن است که در روسازی‌های متداول آسفالتی، قشرهای آسفالت که روی لایه اساس قرار می‌گیرند به دلایلی چون نقص در مخلوط و لایه‌ها (وجود ترک و فضای خالی زیاد) و یا استفاده از مخلوط‌های آسفالت متخلخل، آب را از خود عبور داده و به قشر اساس منتقل می‌کنند. هدف اصلی از این پژوهش نیز ارزیابی میزان تغییرات آلودگی رواناب در هنگام عبور از لایه‌های روسازی بوده که با تعبیه لایه‌های آسفالت متخلخل روی قشر اساس امکان پذیر می‌شود. اما به دلیل عدم وجود امکانات آزمایشگاهی مناسب برای ایجاد لایه‌های آسفالتی مورد نیاز در راکتور استفاده شده، تصمیم بر آن شد تا به جای لایه‌های متداول آسفالتی، قشری به عنوان فیلتر روی لایه اساس تعبیه شود تا عملاً رواناب با عبور از آن بخشی از مواد جامد معلق خود را از دست داده و بقیه به لایه اساس نفوذ نماید.

در این پژوهش در ابتدا عملکرد سیستم در کاهش بار آلی (COD)، فسفر و جامدات کل رواناب بررسی شد و در ادامه توانایی هر یک از سنگدانه‌های استفاده شده در حذف سایر پارامترهای رواناب با یکدیگر مقایسه شده است. در پایان نیز سیتیک حذف بار آلی از رواناب به وسیله سنگدانه‌های مختلف تعیین شده است.

کلید مواد استفاده شده در این پژوهش از نوع آزمایشگاهی و از طریق شرکت‌های معتبر تهیه شد. در این پژوهش غلظت فلزات روی و مس با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل AA-670 ساخت شرکت Shimadzu اندازه‌گیری شد. سایر پارامترهای مورد نیاز نیز مطابق دستورالعمل‌های مندرج در کتاب "روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب" اندازه‌گیری شد [۲۰]. لازم به گفتن است کلید آزمایش‌ها حداقل دو بار تکرار و متوسط میزان اندازه‌گیری به عنوان نتیجه ارائه شده است.

۲-۲ رواناب مورد استفاده

به دلیل ثابت نبودن غلظت آلاینده‌ها در رواناب در بارش‌های مختلف، در این پژوهش از رواناب سنتزی استفاده شد. به منظور

این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از رواناب سنتزی انجام پذیرفت. نمایی از راکتور استفاده شده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. ستون استفاده شده در این پژوهش متشکل از استوانه‌ای با قطر ۲۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از جنس پولیکا نیمه قوی بوده که به وسیله سنگدانه‌های لایه اساس و فیلتر به ضخامت به ترتیب ۴۰ و ۱۰ سانتی‌متر پر شده است. همچنین در کنار ستون، از یک منبع رواناب با ظرفیت ۶۰ لیتر استفاده شد. برای تکمیل چرخه رواناب در ستون از یک دستگاه پمپ مستغرق با دبی ۰/۹ لیتر بر دقیقه استفاده شد. دبی پمپ طوری تنظیم شد که از انباشتن رواناب بر روی سنگدانه‌ها جلوگیری به عمل آید. براساس دانه‌بندی اجرا شده میزان نفوذپذیری دو لایه استفاده شده در کنار هم به میزان ۳۲۵۰ سانتی‌متر بر ساعت برآورد شد. به دلیل وجود مواد جامد معلق در رواناب استفاده شده و احتمال ته‌نشین شدن ذرات در کف منبع رواناب، از یک دستگاه پمپ به منظور اختلاط استفاده شد. برای در معرض قرار گرفتن تمام سطح سنگدانه‌های راکتور اصلی با رواناب، در بخش ورودی رواناب به ستون از یک افشانک استفاده شد. همچنین، برای جلوگیری از تبخیر رواناب، سطح راکتور به صورت کامل مسدود شد.

شکل (۱) پابلوت آزمایشگاهی مورد استفاده

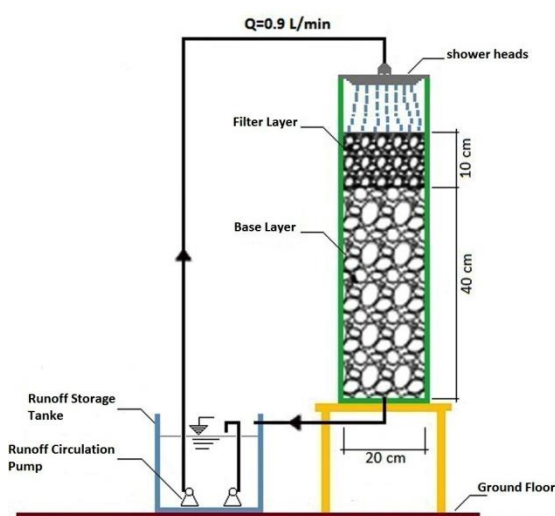


Fig. 1. Schematic sketch of the studied system

در کلید آزمایش‌ها ۶۰ لیتر رواناب سنتزی به صورت پیوسته با

استفاده شد. علت انتخاب دو نوع سنگدانه اول متداول بودن استفاده از آنها در پروژه‌های راه سازی کشور بوده و سنگدانه سرباره‌ای که محصول جانبی کارخانه‌های ذوب آهن است و به مقدار قابل توجه در کارخانجات مربوطه تولید می‌شود نیز به دلیل دارا بودن پتانسیل مناسب در این خصوص استفاده شده است [۱۸]. همان‌گونه که اشاره شد در این پژوهش ضخامت لایه فیلتر و اساس به ترتیب برابر با ۱۰ و ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای آنکه این پژوهش جنبه کاربردی‌تری داشته باشد، دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده شده براساس آئین‌نامه‌های ASTM No.57 و ASTM No.8 به ترتیب برای لایه اساس و لایه فیلتر انجام پذیرفت.

جدول (۱) مشخصات رواناب ستیزی مورد استفاده

Parameter	Quantity	Unit
COD	250	(mg/L)
P-PO ₄	15	(mg/L)
Zn	6.5	(mg/L)
Cu	2.5	(mg/L)
TSS	1070	(mg/L)
TS	1500	(mg/L)

Table 1- Specifications of used runoff

تهیه رواناب ستیزی، در ابتدا اقدام به نمونه‌برداری از رواناب سطحی شهر تهران در دو مقطع زمانی مختلف (بهار و پاییز) و تعیین حدود غلظت آلاینده‌های آن شامل: نیترات، فسفات، روی، مس، COD، TPH، هدایت الکتریکی، جامدات معلق و جامدات کل شد. سپس با توجه به اطلاعات به دست آمده در خصوص غلظت آلاینده‌های موجود در آن، نسبت به ساخت رواناب ستیزی اقدام شد. مشخصات رواناب ستیزی استفاده شده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به گفتن است که در این پژوهش به منظور ساخت رواناب از سولفات مس، سولفات روی و پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات به ترتیب به عنوان منشاء فلزات مس، روی و فسفر استفاده شد. بار آلی (COD)، مواد معلق و مواد محلول رواناب نیز از طریق مواد جامد جمع‌آوری شده از حاشیه یکی از بزرگراه‌های تهران (عبوری از الگ ۲۰۰) تامین شد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه (در این پژوهش ارائه نشده)، میزان بیشتر پارامترهای رواناب ستیزی بیش از مقدار آن در رواناب شهر تهران انتخاب شد.

۲-۳ سنگدانه‌های استفاده شده

در این پژوهش از سه نوع سنگدانه سیلیسی، سنگ‌آهکی و سرباره-ای با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) به عنوان لایه فیلتر و اساس

جدول (۲) مشخصات سنگدانه‌های مورد استفاده

description	Test procedure	The test results			
		slag aggregates		limestone	silica
		5-12	12-25		
Los Angeles abrasion test (%)	ASTM C131	21.2	25.5	29	20
Sodium sulfate weight loss (%)	ASTM C88	0.36	0.25	0.60	0.62
Percentage of Fractured Particles	ASTMD5821	-	-	100	91
Percentage of Flat and Elongated Particle	ASTM D4791	-	-	9	25
Effective specific gravity (g/cm ³)	ASTM C127	-	-	2.648	2.468
Bulk specific gravity (g/cm ³)	ASTM C127	2.75	2.61	2.691	2.628
Water absorption	ASTM C127	4.47	4.13	2.10	1.20

Table 2- Specifications of used aggregates (silica, limestone and slag)

۳- نتایج و بحث

همانطور که اشاره شد در این پژوهش به بررسی حذف آلاینده‌های رواناب از طریق سنگدانه‌های مختلف در لایه‌های اساس و فیلتر روسازی نفوذپذیر پرداخته شده که نتایج حاصل در ادامه ارائه شده است.

۳-۱ حذف جامدات کل

از آنجایی که گرفتگی ناشی از جامدات موجود در رواناب یکی از مشکلات ناشی از بهره‌برداری از روسازی‌های نفوذ پذیر است پس در این بخش ابتدا تغییرات جامدات رواناب در سیستم بررسی شد. تغییرات جامدات کل رواناب در عبور از سنگدانه‌های مختلف در یک سیکل ۱۲۰ ساعته در شکل (۲) ارائه شده است.

شکل (۲) تغییرات غلظت جامدات کل رواناب در سیکل ۱۲۰ ساعته اول

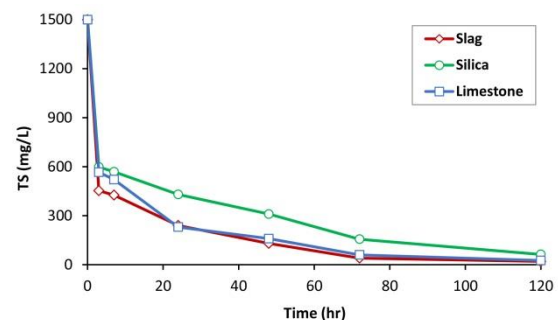


Fig. 2. Runoff total solids concentration change during the first 120 hour run

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود حذف جامدات در لحظات ابتدایی آزمایش با شیب بیشتری انجام پذیرفته و پس از آن از شدت آن کاسته شده و در پایان تقریباً پس از گذشت ۱۲۰ ساعت به بیشینه مقدار خود رسیده است. علت حذف بیشتر جامدات در ابتدای آزمایش را می‌توان به تمیز بودن سطوح سنگدانه مرتبط دانست. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده هر سه سنگدانه استفاده شده عملکردی مشابه در حذف جامدات داشته‌اند. در این پژوهش درصد حذف جامدات برای سنگدانه‌های سرباره‌ای، سنگ‌آهکی و سیلیسی در پایان ۱۲۰ ساعت به ترتیب برابر ۹۷، ۹۶ و ۹۱ درصد بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با وجود اختلاف در نتایج درصد حذف جامدات در ابتدای آزمایش، میزان حذف در انتهای آزمایش توسط هر سه سنگدانه تا حد زیادی به هم نزدیک شده است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده زمان ۱۲۰ ساعت به عنوان

مبنا برای انجام آزمایش‌های بعدی مد نظر قرار گرفت.

در پژوهش مشابهی در مقیاس آزمایشگاهی حذف ۹۵ درصدی مواد معلق از رواناب به وسیله‌ی روسازی نفوذپذیر شامل لایه اساس، فیلتر و لایه رویه گزارش شده است [۲۱]. در پژوهش دیگری در تصفیه رواناب (با دبی ۳/۹ میلی‌متر در ساعت معادل متوسط بارندگی ۶۵۰ میلی‌متر در سال) و با غلظت اولیه مواد معلق به میزان ۲۷۱ میلی‌گرم در لیتر به وسیله‌ی ۳ نوع روسازی نفوذپذیر حذف ۱۰۰ درصدی ذرات معلق گزارش شده است [۱۵].

در این پژوهش برای به دست آوردن ظرفیت سیستم ابتدا آزمایش‌ها در سیکل‌های ۱۲۰ ساعته برای هر سنگدانه تا آنجایی که سیستم دچار گرفتگی شده و یا روند حذف آلودگی متوقف شود تکرار شد. نتایج مربوط به درصد حذف جامدات رواناب سنتزی در اثر عبور ۵۴۰ لیتر رواناب (۶۰ لیتر در هر سیکل) از سنگدانه‌های استفاده شده در شکل (۳) ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد حذف جامدات رواناب تا سیکل هفتم برای سنگدانه‌های سنگ‌آهکی و سرباره‌ای و سیکل ششم برای سنگدانه سیلیسی ثابت بوده اما در ادامه با کاهش همراه شد که علت آن را می‌توان به اشباع تدریجی سطح سنگدانه‌ها مرتبط دانست. همچنین در این خصوص تاثیر تنش برشی ناشی از چرخش رواناب در جدا شدن ذرات معلق چسبیده به سطح سنگدانه‌ها را نمی‌توان نادیده گرفت. در پایان نیز در سیکل نهم با گرفتگی ستون، عملاً آزمایش‌ها متوقف شد.

شکل (۳) درصد حذف جامدات در انتهای سیکل‌های ۱۲۰ ساعته

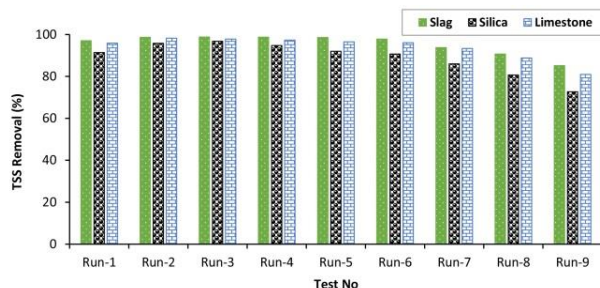


Fig. 3. Total solids removal efficiency at the end of 120-hour runs

بر اساس شکل (۳) بیشترین و کمترین درصد حذف جامدات در طی ۹ سیکل بهره‌برداری از سیستم به ترتیب به سنگدانه‌های سرباره‌ای و سیلیسی به میزان ۹۸/۸ و ۷۲/۷ درصد اختصاص داشته است. در این آزمایش بیشترین میزان حذف جامدات کل در لایه-

در اثر عبور از روسازی نفوذپذیر گزارش شده است [۲۳]. برای به دست آوردن ظرفیت سیستم در این خصوص نیز آزمایش‌ها در سیکل‌های ۱۲۰ ساعته برای هر سه نوع سنگدانه تا آنجایی که سیستم دچار گرفتگی شده و یا روند حذف آلودگی متوقف شود تکرار شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت COD در انتهای سیکل‌های ۱۲۰ ساعته برای پایلوت‌های حاوی سنگدانه سرباره، سیلیس و سنگ‌آهک در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود درصد حذف COD در شش آزمایش اول برای هر سه نوع سنگدانه مورد استفاده تقریباً ثابت بوده است. از آزمایش ششم به بعد مقداری افت در درصد حذف COD مشاهده شد که می‌توان علت آن را با اشباع تدریجی سطح سنگدانه‌ها مرتبط دانست. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در آزمایش نهم درصد حذف COD به میزان قابل توجهی کاهش یافته اما از آنجایی که در این مرحله پایلوت‌ها دچار گرفتگی شده بودند دیگر عملاً امکان ادامه آزمایش‌ها وجود نداشت.

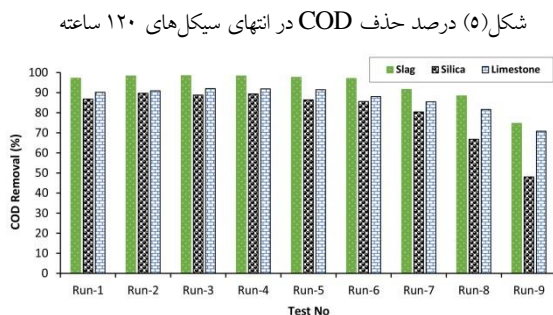


Fig. 5. COD removal efficiency at the end of 120-hour runs

همان‌گونه که در (شکل ۵) ملاحظه می‌شود در آزمایش‌های مختلف انجام شده در این بخش سرباره بیشترین درصد حذف COD از رواناب سنتزی را نسبت به دو سنگدانه دیگر دارا بوده و سنگدانه‌های سنگ‌آهکی و سیلیسی به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار داشته‌اند. در این آزمایش‌ها در مجموع طی ۹ سیکل ظرفیت سنگدانه‌های سرباره‌ای، سیلیسی و سنگ‌آهکی در حذف COD به ترتیب ۳۴۳۰، ۲۹۳۱ و ۳۱۸۹ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه برآورد شد.

۳-۳ حذف فسفات

روند کاهش غلظت فسفر- فسفاتی رواناب سنتزی در طی عبور از

های اساس و فیلتر به وسیله سنگدانه سرباره‌ای به میزان ۲۲/۱ - گرم به ازای هر کیلوگرم سرباره انجام پذیرفته است. همچنین، میزان تجمع ذرات جامد برای سنگدانه سیلیسی و سنگ‌آهکی به ترتیب برابر با ۲۰/۶ و ۲۱/۷ گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه برآورد شده است.

۲-۳ حذف مواد آلی

میزان مواد آلی (COD) پارامتری مهم برای ارزیابی کیفیت رواناب خروجی از روسازی و تخلیه به آب‌های زیرزمینی، سطحی و یا استفاده مجدد از آن است. (شکل ۴) تغییرات غلظت COD رواناب عبوری از سیستم‌های مختلف طی زمان را نشان می‌دهد.

شکل (۴) تغییرات میزان COD رواناب در سیکل ۱۲۰ ساعته اول

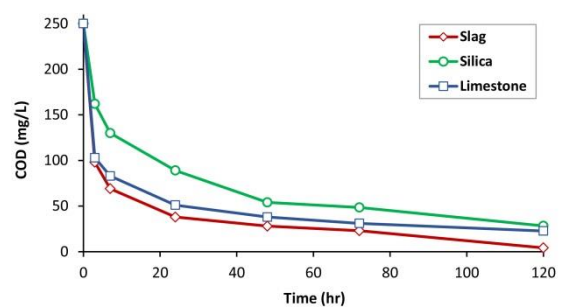


Fig. 4. Runoff COD change during the first 120 hour run

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، درصد حذف با آلی برای رواناب عبوری از سنگدانه‌های سرباره‌ای، سنگ‌آهکی و سیلیسی پس از ۳ ساعت به ترتیب برابر ۶۱، ۵۹ و ۴۱ درصد بوده که پس از ۱۲۰ ساعت به ترتیب به حدود ۹۸، ۹۰ و ۹۰ درصد افزایش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این مورد نیز از آنجایی که در زمان‌های ابتدایی انجام آزمایش سطح سنگدانه‌ها تمیز بوده، میزان حذف با شدت بیشتری انجام پذیرفته اما در ادامه با اشباع شدن سطوح سنگدانه از شدت آن کاسته شده است. بر اساس (شکل ۴) در این خصوص نیز بیشترین میزان حذف مربوط به سنگدانه سرباره‌ای و کمترین آن مربوط به سنگدانه سیلیسی بوده است.

در پژوهشی مشابهی کاهش ۸۸ درصدی COD رواناب (با COD اولیه ۱۴۶ میلی‌گرم در لیتر) در اثر عبور از لایه‌های روسازی نفوذپذیر در مقایسه با رواناب روسازی متعارف گزارش شده است [۲۲]. در پژوهش دیگری حذف COD رواناب به میزان ۸۰ تا ۹۰٪

مورد نیز در مرحله نهم پایلوت‌ها دچار گرفتگی شده و دیگر عملاً امکان ادامه آزمایش‌ها وجود نداشته است.

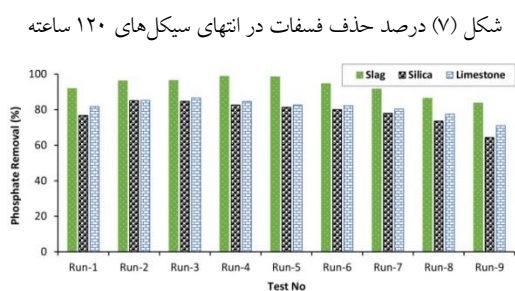


Fig. 7. Phosphate removal efficiency at the end of 120-hour runs

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود در این مورد نیز بیشترین درصد حذف فسفر به ترتیب مربوط به سرباره، سنگ‌آهک و سیلیس بوده است. در این آزمایش میزان تجمع فسفر برای پایلوت حاوی سیلیس، سنگ‌آهک و سرباره به ترتیب برابر با ۱۸۰، ۱۸۷ و ۲۱۴ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه برآورد شده است.

۳-۴ حذف سایر پارامترها

با توجه به نتایج به دست آمده و به منظور تعیین توانایی سیستم در حذف فلزات مس و روی و همچنین جامدات معلق که از اجزاء اصلی رواناب محسوب می‌شوند تعدادی آزمایش دیگر با استفاده از سنگدانه‌های مختلف انجام پذیرفت. نتایج مربوط به متوسط میزان حذف هر یک از پارامترهای رواناب (طی ۹ سیکل ۱۲۰ ساعته) در شکل (۸) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سنگدانه‌های مورد استفاده توانایی قابل قبولی در حذف جامدات معلق و محلول از رواناب داشته‌اند. در این پژوهش کمینه و بیشینه راندمان حذف فلز مس به ترتیب مربوط به سنگدانه‌های سیلیسی و سرباره‌ای به میزان ۶۲ و ۷۱ درصد بوده است.

شکل (۸) متوسط راندمان حذف پارامترهای رواناب طی ۹ سیکل ۱۲۰ ساعته

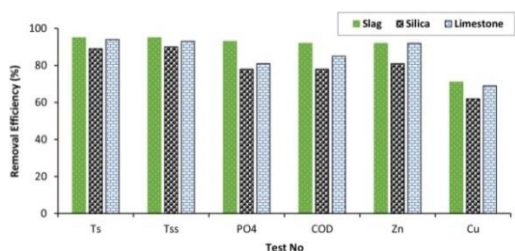


Fig. 8. The average removal efficiency of runoff parameters during the nine 120-hour run

لایه‌های اساس و فیلتر با سه سنگدانه سرباره‌ای، سیلیسی و سنگ‌آهکی در شکل (۶) آورده شده است. در این آزمایش‌ها به ترتیب بیشترین حذف فسفات به وسیله سنگدانه‌های سرباره‌ای، سنگ‌آهکی و سیلیسی مشاهده شد. در هر سه سیستم بررسی شده درصد حذف فسفر در ساعات اولیه با نرخ قابل توجهی انجام پذیرفته اما به مرور از نرخ آن کاسته شد. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، درصد حذف فسفات با استفاده از سرباره نسبت به دو سنگدانه دیگر اختلاف معناداری داشته است. در این آزمایش درصد حذف فسفات برای سنگدانه‌های سرباره‌ای، سنگ‌آهکی و سیلیسی پس از گذشت ۱۲۰ ساعت به ترتیب برابر ۹۶، ۸۵ و ۸۵ درصد بوده است.

شکل (۶) تغییرات غلظت فسفات رواناب در سیکل ۱۲۰ ساعته اول

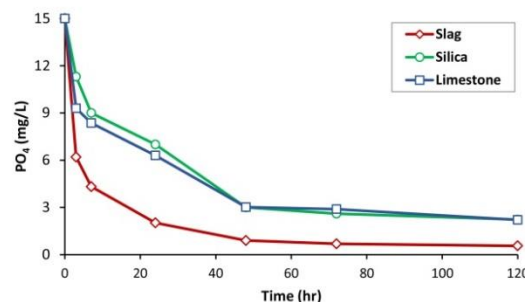


Fig. 6. Runoff phosphate concentration change during the first 120 hour run

در پژوهش مشابهی حذف TP (با غلظت اولیه معادل ۰/۳۵ میلی‌گرم در لیتر) طی عبور فاضلاب سنتزی از فیلتر سنگدانه‌ای شنی در محدوده ۵۳ تا ۸۳ درصد گزارش شده است [۲۴]. در پژوهشی دیگر حذف فسفر از رواناب (با غلظت اولیه ۱۰ تا ۱۵ میلی‌گرم در لیتر) به وسیله فیلتر ماسه‌ای حاوی ترکیبات اکسید آهن در محدوده ۷۰ تا ۹۰ درصد بوده است. در این پژوهش همچنین تاثیر pH رواناب بر عملکرد فیلتر ماسه‌ای بی اثر گزارش شده است [۲۵].

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان حذف غلظت فسفر در انتهای سیکل‌های ۱۲۰ ساعته برای سیستم‌های مورد بررسی در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان حذف فسفر به وسیله هر سه نوع سنگدانه تا آزمایش شماره ۷ تقریباً مقدار ثابتی بوده اما در ادامه آزمایش‌ها از نرخ حذف کاسته شده است.

دلیل اصلی سیر نزولی راندمان حذف در آزمایش‌های هشتم به بعد را می‌توان به اشباع تدریجی سطح سنگدانه‌ها مرتبط دانست. در این

ظرفیت جذب در زمان t و $K_1(1/hr)$ ، $K_2(g/mg.hr)$ و $K_3(mg/g.hr^{0.5})$ ثابت‌های سرعت مدل‌های مربوطه است. در مدل پخش درون ذره‌ای نیز I ثابتی وابسته به ضخامت لایه مرزی بوده که بر حسب (mg/g) بیان می‌شود.

(شکل ۹-۹) میزان هماهنگی واکنش‌های انجام شده با مدل سینتیکی شبه درجه اول در حضور سنگدانه‌های مختلف را نشان می‌دهد. میزان هماهنگی واکنش‌های انجام شده با مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم در حضور سنگدانه‌های مورد استفاده نیز در شکل (۱۰) ارائه شده است. بررسی سینتیک شبه درجه دوم نشان می‌دهد که در بیشتر موارد حذف مواد آلی از این مدل به خوبی تبعیت می‌کند. لازم به گفتن است که معادله شبه درجه دوم عموماً بر پایه ظرفیت جذب پایه‌گذاری شده و بیانگر این نکته است که فرایند جذب وابسته به غلظت ماده جذب شونده است [۲۸].

در شکل (۱۱) نیز میزان هماهنگی واکنش‌ها با مدل سینتیکی پخش بین ذره‌ای ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضریب R^2 در حذف بار آلی برای این مدل برای هر سه نوع سنگدانه استفاده شده نسبتاً پایین بوده که بیانگر غالب بودن نفوذ فیلمی بر نفوذ درون ذره‌ای (حرکت مولکول‌های جذب شونده از توده مایع بسوی سطح خارجی جاذب) است.

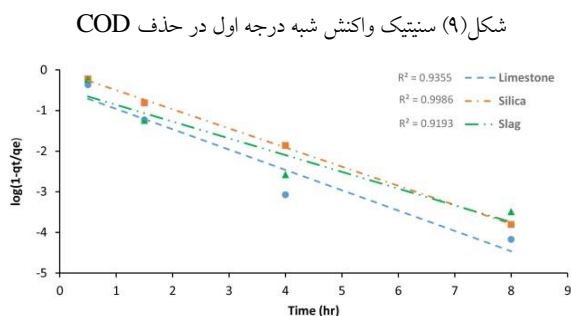


Fig. 9. Pseudo-first order reaction kinetic for the removal of COD

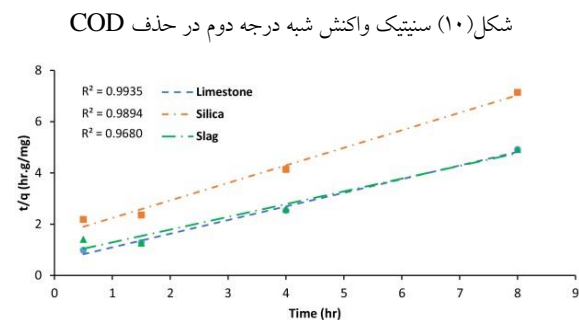


Fig. 10. Pseudo-second order reaction kinetic for the removal of COD

کمیته و بیشینه راندمان حذف فلز روی نیز به ترتیب به میزان ۸۱ و ۹۲ درصد به وسیله سنگدانه‌های سیلیسی و سرباره‌ای حاصل شده است. در پژوهش مشابهی حذف ۴۳ تا ۹۹ درصدی فلزات روی و مس از رواناب در عبور از روسازی‌های نفوذپذیر گزارش شده است [۲۶]. نتایج آزمایش‌ها در این بخش نشان داد که هر سه نوع سنگدانه مورد استفاده عملکرد مناسبی در حذف آلاینده از رواناب داشته و قابلیت استفاده در روسازی نفوذپذیر را دارد.

همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود در کلیه آزمایش‌ها بیشینه راندمان حذف آلاینده مربوط به سنگدانه‌های سرباره‌ای و پس از آن با اندکی اختلاف مربوط به سنگدانه‌های سنگ آهکی بوده است. کمیته راندمان حذف آلاینده از رواناب نیز به وسیله سنگدانه‌های سیلیسی حاصل شده است. بنابراین از لحاظ مسائل زیست‌محیطی توصیه می‌شود تا در نبود سرباره از سنگدانه‌های سنگ آهکی و در اولویت سوم از سنگدانه‌های سیلیسی در لایه‌های روسازی نفوذپذیر استفاده شود. لازم به گفتن است که سرباره محصول جانبی کارخانجات ذوب آهن بوده و چشم‌پوشی از توانایی آن در حذف آلاینده از رواناب، استفاده از آن به عنوان لایه اساس و فیلتر روسازی نفوذپذیر خود قدمی مثبت در حفظ محیط زیست و جلوگیری از مصرف بی رویه منابع است. همچنین خاطر نشان می‌سازد عبور این حجم رواناب (۵۴۰ لیتر) از راکتور مورد استفاده معادل ۵۷ سال بارندگی در منطقه‌ای با متوسط بارش ۳۰۰ میلی‌متر در سال است.

۳-۵ بررسی سینتیک واکنش‌ها

در این مطالعه به منظور تعیین مدل سینتیک حذف مواد آلی و سرعت ظاهری واکنش‌ها، در ابتدا مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و پخش درون ذره‌ای بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده مشابه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸ و ۲۷]. فرم نهایی مدل‌های گفته شده به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) ارائه شده است.

$$\log\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) = \log q_e - \left(\frac{k_1 t}{2.303}\right) \quad (1)$$

$$\left(\frac{t}{q_e}\right) = \left(\frac{1}{h}\right) + \left(\frac{1}{q_e}\right) * t \quad (2)$$

$$q_t = K_1 t^{0.5} + I \quad (3)$$

در این معادلات $h = K_2 \cdot q_e^2$ زمان واکنش بر حسب دقیقه، q_e و q_t (mg/g) و (mg/g) به ترتیب ظرفیت جذب در حالت تعادل و

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر جنس سنگدانه‌های لایه‌های اساس و فیلتر روسازی نفوذپذیر در تصفیه رواناب سطحی بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش که در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از سه نوع سنگدانه سنگ آهکی، سیلیسی و سرباره‌ای صورت پذیرفت نشان داد که هر سه نوع سنگدانه استفاده شده عملکرد مناسبی در حذف آلاینده از رواناب داشته و قابلیت استفاده در روسازی نفوذپذیر را دارد. در این پژوهش در کلیه آزمایش‌ها شدت حذف آلاینده در چند ساعت اولیه آزمایش با شدت بیشتری انجام پذیرفته اما پس از آن به مرور شیب منحنی حذف آلاینده با کاهش همراه بوده که دلیل آن را می‌توان به تمیز بودن سطوح سنگدانه‌ها در ابتدای کار و اشباع تدریجی آن به مرور زمان نسبت داد. براساس نتایج آزمایش‌ها، فرایند حذف بار آلی به وسیله هر سه نوع سنگدانه از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم در مقایسه با مدل سینتیکی شبه درجه اول و مدل سینتیکی پخش بین ذره‌ای تبعیت بیشتری داشته است. بر اساس نتیجه آزمایش‌ها همچنین مشخص شد که در تمام آزمایش‌ها بیشینه راندمان حذف آلاینده مربوط به سنگدانه‌های سرباره‌ای و پس از آن با اندکی اختلاف مربوط به سنگدانه‌های سنگ آهکی است. از آنجایی که سرباره محصول جانبی کارخانه‌های ذوب آهن است استفاده از آن به عنوان مصالح راه سازی می‌تواند قدمی مثبت در حفظ محیط زیست و جلوگیری از مصرف بی رویه منابع باشد.

۴- قدردانی و تشکر

بدین وسیله از اداره پژوهش دانشگاه تربیت مدرس و مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهرداری تهران برای حمایت تشویقی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود. از شرکت ریوا تحقیق به دلیل در اختیار قرار دادن سنگدانه‌های سرباره‌ای تشکر به عمل می‌آید.

References

- [1] Scholz, M. 2006 Wetland systems to control urban runoff. Environmental Science and Technology, **25**, 2542-2549.
 [2] Reeves, R.L., Grant, S.B., Mrse, R.D., Copil Oancea, C.M., Sanders, B.F. and Boehm, A.B. 2004 Scaling and management of fecal indicator bacteria in runoff from a coastal urban watershed in Southern California. Environmental Science and Technology, **38**, 2637-2648.
 [3] ASCE and WEF, 1998 Urban runoff quality management. American Society of Civil Engineers (ASCE) Manuals and Report of Engineering Practice No. 87, Reston, VA and Water Environment Federation (WEF), Manual of Practice No. 23,

شکل (۱۱) سینتیک واکنش پخش بین ذره‌ای در حذف COD

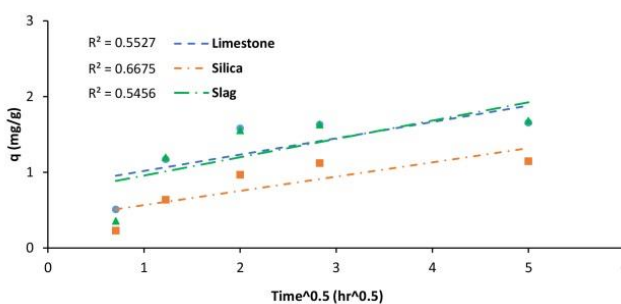


Fig. 11. Intra-particle diffusion reaction kinetic for the removal of COD

ثابت‌های سینتیک واکنش‌ها برای هر سه نوع سنگدانه مورد استفاده در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود بیشترین ضریب همبستگی برای حذف مواد آلی با استفاده از سنگدانه‌های مختلف به وسیله مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم حاصل شده است.

جدول (۳) ثابت‌های سینتیک واکنش‌های شبه درجه اول، شبه درجه دوم و پخش درون ذره‌ای در حذف COD

Pseudo-first order kinetic model

	K_1 (hr ⁻¹)	R^2
Limestone	1.18	0.93
Silica	1.08	0.99
Slag	0.95	0.92

Pseudo-second order kinetic model

	K_2 (g/mg.hr)	R^2
Limestone	0.31	0.99
Silica	0.30	0.99
Slag	0.31	0.97

intra-particle diffusion model

	I (mg/g)	K_i (mg/g.hr ^{0.5})	R^2
Limestone	0.72	0.24	0.55
Silica	0.38	0.19	0.67
Slag	0.74	0.24	0.55

Table 3- Pseudo-first order, Pseudo-second order and intra-particle diffusion reaction kinetic constants for the removal of COD

- [16] Roseen, R. M., Ballesterro, T. P., Houle, J. J., Joshua F. B., and Houle, K. M. 2012 Water Quality and Hydrologic Performance of a Porous Asphalt Pavement as a Storm Water Treatment Strategy in a Cold Climate. *Journal of Environmental Engineering*, **138**, 81-89.
- [17] Bean, E.Z., Hunt, W.F., and Bidelsbach, D.A. 2007 Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **128**, 1124-1131.
- [18] Okochi N.C., McMartin D.W. 2011 Laboratory investigations of storm water remediation via slag: Effects of metals on phosphorus removal. *J Hazard Mater.*, **187**(1-3), 250-257.
- [19] Erickson, A. J., Gulliver, J. S., Weiss, P. T. 2012 Capturing phosphates with iron enhanced sand filtration, *water research*. **46**, 3032-3042.
- [20] *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 2005 21th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/ Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- [21] Kadurupokune, N. and Jayasuriya, N. 2009 Pollutant load removal efficiency of pervious pavements: is clogging an issue. *Water Science and Technology*, **60**, 1787-1794.
- [22] Berbee, R., Rijs, G., de Brouwer, R. and van Velzen, L. 1999 Characterization and treatment of runoff from highways in the Netherlands paved with impervious and pervious asphalt. *Water Environment Research*, **71**, 183-190.
- [23] Balades, J.D., Legret, M., and Madiec, H. 1995 Permeable pavements-pollution management tools. *Water Science and Technology*; **32**, 49-56.
- [24] Hatt, B. E., Fletcher, T. D., and Deletic, A. 2007 Treatment performance of gravel filter media: Implications for design and application of storm water infiltration systems. *Water Research*, **41**, 2513 – 2524.
- [25] Nielsen, J., Lynggaard-Jensen, A., and Hasling, A., 1994 Purification efficiency of Danish biological sand filter systems. *Water Science and Technology*, **28** (10), 89-97.
- [26] Fach, S., Geiger, W.F. 2005 Effective pollutant retention capacity of permeable pavements for infiltrated road runoffs determined by laboratory tests. *Water Science and Technology*, **51**, 37-45.
- [27] Liu, S. Y., Gao, J., Yang, Y. J. 2010 Adsorption intrinsic kinetics and isotherms of lead ions on steel slag, *J. Hazard. Mater*, **173**, 558–562.
- [28] Uzun A., 2006 Kinetics of the adsorption of reactive dyes by chitosan. *Dyes and Pigments*, **70**, 76-83.
- Alexandria, USA.
- [4] Scholz, M. and Grabowiecki, P. 2007 Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, **42**, 3830-3836.
- [5] Kazemi, F. and Hill, K. 2015 Effect of permeable pavement basecourse aggregates on stormwater quality for irrigation reuse. *Ecological Engineering* **77**, 189–195.
- [6] Bentarzia, Y., Ghenaima, A., Terfousa, A., Wankob, A., Feugeasc, F., Pouleta, J.B. and Moséb, R. 2015 Hydrodynamic behavior of a new permeable pavement material under high rainfall conditions. *Urban Water Journal*, 1-10, DOI: 10.1080/1573062X.2015.1024688
- [7] Imran, H.M., Akib, S., Karim M.R. 2013 Permeable pavement and stormwater management systems: a review. *Environmental technology*, **34**(17-20), 2649-56.
- [8] Pratt, C.J., Mantle, J.D.G. and Schofield, P.A. 1995 UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling storm water discharge quantity and quality. *Water Science and Technology*, **32**, 63-69.
- [9] Niemczynowicz, J. 1990 Swedish way to storm water enhancement by source control, In: *Urban Storm water Quality Enhancement: Source Control, Retrofitting, and Combined Sewer Technology*, pp. 156-158 New York, USA. American Society of Civil Engineers, 978-0-87262-759-8 / 0-87262-759-4 (print).
- [10] Colandini, V., Legret, M., Brosseau, Y., and Balades, J.D. 1995 Metallic pollution in clogging materials of urban porous pavements. *Water Science and Technology*, **32**(1), 57-62.
- [11] Brattebo, B.O., Booth, D.B. 2003 Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*, **37**, 4369-4376.
- [12] Aryal, R., Beecham, S., & Lee, B. K. 2015 Evaluation of Particle Transport in Permeable pavements under oil loadings. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 1-5. DOI 10.1007/s12205-015-0046-4
- [13] Eisenberg B., Lindow K.C., Smith D.R. 2015 Permeable pavements, ASCE, USA.
- [14] Pratt, C.J., Mantle, J.D.G., and Schofield, P.A. 1989 Urban stormwater reduction and quality improvement through the use of permeable pavements. *Water Science and Technology*, **21**, 769-778.
- [15] Yong, C.F., Deletic, A., Fletcher, T.D., Grace, M.R. 2008 The clogging behavior and treatment efficiency of a range of porous pavements. In: 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

The Application of Permeable Pavement Aggregate Layers in Runoff Water Treatments

A. Ghasemi Moghadam¹, N. Mokhtarani*², A. Kavousi³

1. M.Sc. Student, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University
2. Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University
3. Associate Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University

mokhtarani@modares.ac.ir

Abstract

Urban runoffs usually contain a large variety of pollutants such as heavy metals, organic compounds, nutrients, solids, and de-icing agents. These are normally accumulated on impervious urban surfaces over time. Hence, the runoff itself becomes a wastewater that could create substantial degradation of water quality in receiving area. There are many alternative management strategies for treating these contaminants. Most of the approved stormwater management measures are difficult to be implemented on a wide scale (due to infrastructure and space/cost constraints). Permeable pavement is one of the urban runoff management methods that are widely used in order to reduce storm runoff flow and volume, and minimize pollution conveyance to receiving waters. Pervious pavement systems consist of a permeable pavement surface layer and one or more underlying aggregate layers designed to temporarily store storm-water. Runoff treatment using three aggregate layers, namely steel slag, limestone and silica aggregates were applied both as filter and pavement base layers. The research was conducted at laboratory scale and in continuous mode. All the experiments were conducted in cylindrical reactors of 0.6 m height and 0.2 m diameter. Each column was filled up to an average depth of 0.5m (0.1 m for filter layer and 0.4 m for the base layer). In order to determine the lifespan of the media, synthetic runoff in successive cycles was injected into the column continuously. Results from the study showed that the base and the filter layers of the permeable pavement can reduce the total range of runoff pollutants effectively with high removal percentages. In all experiments the rate of pollutant removal at the initial time of reaction was faster. However, these were gradually decreased and after 120 hours approximately the maximum removal efficiency was achieved. Comparing the effects of the three aggregates types, the steel slag aggregates exhibited better performance. The treatment process showed that the maximum removal of COD, phosphate and total solids from runoff in 3 hours, were 61, 59 and 70 percent respectively. These were increased to 98, 96 and 99 percent after 120 hours. In addition, the total capacity of slag aggregates for removing COD, P-PO₄ and TS parameters were estimated to be 3.43, 0.21 and 22.10 g/Kg respectively. The testing results indicated that after the slag aggregates, limestone materials showed a high ability to remove pollutants from runoff waters as compared with the silica aggregates. The kinetic study resulted that the pseudo-second order kinetics equation, compared with the pseudo-first order and intra-particle diffusion models, described better the removal of organic compound absorption (COD removal) from the storm water. In this study the rate constant of the reaction (K) for the COD removal via steel slag, limestone and silica aggregates were estimated to be 0.31, 0.31 and 0.30 g mg⁻¹ min⁻¹ respectively. The correlation coefficients (R²) under different conditions were also calculated to exceed 97%. Since steel slag is a byproduct of steel production factories, its application as a road-building material, would be an appropriate alternative pavement layer in protecting the environment and conserving the natural resources.

Keywords: Permeable pavement, runoff, COD, phosphorus, total solids