

حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی با استفاده از سنگدانه‌های لایه‌های روسازی نفوذپذیر

امیر قاسمی مقدم، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

نادر مختارانی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امیر کاووسی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: mokhtarani@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷

چکیده:

رواناب شهری به طور معمول شامل مقدار قابل توجهی آلاینده از جمله فلزات سنگین است. این فلزات در اثر فرآیندهای مختلف صنعتی مانند ذوب، استخراج و تخلیص فلزات وارد محیط زیست می‌شوند. روشهای مختلفی جهت حذف آلاینده از رواناب وجود دارد. روسازی نفوذپذیر یکی از روش‌های نوین مدیریت شهری است که علاوه بر مزایای هیدرولوژیکی باعث بهبود کیفی رواناب نیز می‌شود. در این تحقیق تاثیر سنگدانه‌های مختلف در لایه‌های روسازی نفوذپذیر جهت تصفیه فلزات سنگین رواناب سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا پس از تهیه سنگدانه‌های سرباره‌ای، سیلیسی و سنگ-آهکی 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) توسط مصالح پر شده بود، انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده، از میان سنگدانه‌های مورد استفاده، سرباره در مقایسه با سایر مصالح توانایی بیشتری را در حذف آلاینده از خود نشان داد. در این تحقیق حداکثر میزان حذف فلز مس، روی و جامدات معلق از رواناب در طی ۴۲ ساعت اول فرآیند با استفاده از سنگدانه سرباره‌ای به ترتیب به میزان ۶۱، ۸۹ و ۸۲ درصد بود که پس از ۱۲۰ ساعت به ترتیب به ۷۲، ۹۵ و ۹۹ درصد افزایش یافت. همچنین در این پژوهش ظرفیت نگهداری مس، روی و ذرات معلق در ستون‌های حاوی سنگدانه سرباره‌ای، به ترتیب برابر با ۲۸، ۹۵ و ۱۵۴۸۵ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه برآورد شد. بر اساس نتایج به دست آمده، همچنین در کنار سرباره، سنگ‌آهک نسبت به سیلیس، از توانایی بیشتری در حذف آلاینده از رواناب برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: روسازی نفوذپذیر، رواناب، فلزات سنگین، آلاینده، تصفیه

۱. مقدمه

امروزه بخش مهمی از مهندسی آب‌های سطحی، مربوط به مدیریت رواناب‌های شهری است. رواناب شهری به صورت جریان یافتن آب، به دلیل توسعه یافتگی شهرها و آب سطحی‌بی که به زمین نفوذ نمی‌کند، تعریف می‌شود [Scholz, 2006]. رواناب‌های شهری به طور معمول شامل انواع ذرات جامد، فلزات سنگین، روغن و گریس، باکتری‌ها و مواد مغذی بوده که نیاز به حذف برای بهبود پارامترهای کیفی دارند. بسیاری از آلاینده‌های آب شهری سمی و پایدار بوده و قابلیت تجمع در بافت‌های جانوران را داشته و ممکن است اثرات زیست‌محیطی پیچیده‌ای ایجاد نمایند. زمانی که رواناب شهری به طور مستقیم و بدون نگهداری و تصفیه تخلیه شود، می‌تواند تمام اکوسیستم‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین این رواناب‌ها اثرات نامطلوب غیرقطعی بر سلامت عمومی و زندگی انسانها دارند [ASCE and WEF, 1998]. ترکیبات مضر از کودها و سموم مورد استفاده برای فضای سبز و باغ‌ها، مدفوع حیوانات و پرنده‌ها، فلزات سنگین حاصله از اجزا و سوخت وسایل نقلیه و آلودگی‌های سطح لایه رویه روسازی خیابانها ممکن است روی سیستم زهکشی منتشر شوند [Scholz and Grabowiecki, 2007]. تمایل زیاد فلزات سنگین به ماندگاری، چرخش و خاصیت تجمع‌پذیری در زنجیره غذایی از مهم‌ترین عواملی است که اهمیت آنها را دوچندان می‌کند. این فلزات در اثر فرآیندهای مختلف صنعتی مانند ذوب، استخراج و تخلیص وارد محیط زیست می‌شوند [Hmet-sar, 2008]. بعضی از فلزات سنگین (مانند روی و مس) برای رشد گیاهان و جانوران در مقادیر کم ضروری هستند. البته در غلظت‌های بیش از حد مجاز باعث سمیت می‌گردند. دیگر فلزات سنگین (مانند کادمیم و سرب) در هر غلظتی برای گیاهان و جانوران سمی هستند. طبق تعریف سازمان بهداشت جهانی (WHO) فلزات کروم، مس، روی، آهن، کادمیم و سرب بیشترین نگرانی را برای به خطر انداختن سلامتی انسان و محیط زیست بوجود می‌آورند [WHO, 1984]. تاکنون روش‌های مختلفی برای تصفیه فاضلاب‌های آلوده به فلزات مانند ترکیب شیمیایی

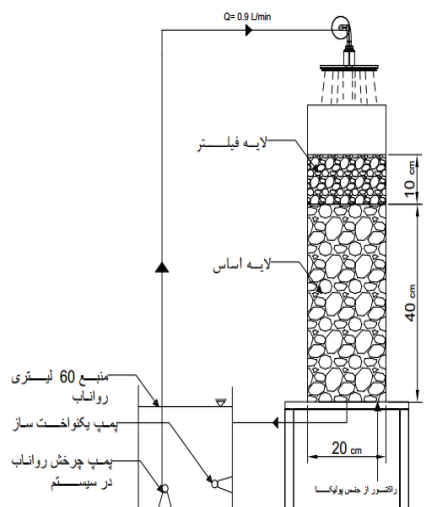
[Jüttner, et al, 2000 and Bose et al. 2002] انعقاد و لخته سازی [Shammas, 2004]، اسمز معکوس [Metcalf 2003] اولترافیلتراسیون [Eckenfelder, 2000]، الکترودیالیز [Met-calf, 2003]، شناورسازی [Jokela, and Keskitalo, 1999]، تبادل یونی [Eckenfelder, 2000] و فرآیندهای غشایی [Yang et al. 2001] مورد استفاده قرار گرفته است. هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و محدودیت‌هایی در عملکرد بوده، اما از میان آنها فرآیند جذب موثر، ارزان تر و آسان‌تر از بقیه معرفی شده است [Bhattacharya et al. 2006].

امروزه افزایش آلودگی رواناب‌ها، کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی، جویگونی نبودن ابعاد کانال‌های اطراف خیابان برای هدایت رواناب به خارج از شهر و به تبع آن آب‌گرفتگی معابر و حساسیت بیشتر به حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار، حساسیت بشر امروزی را در انتخاب و ابتکار روش‌های گوناگون برای کنترل و حذف آلاینده‌های مختلف رواناب برانگیخته است. در صورت حذف آلاینده‌ها از رواناب، دیگر رواناب یک تهدید برای شهر شناخته نشده، بلکه می‌توان به آن به عنوان یک فرصت برای تامین بخشی از آب شهری نگاه کرد. بر همین اساس استفاده مجدد از رواناب و تغذیه آب‌خوانها از طریق آن در اولویت قرار می‌گیرد. از طرفی هزینه‌های بسیار زیاد احداث کانال‌ها و افزایش ابعاد آنها جهت خارج کردن رواناب از شهرها یک معضل اساسی بشمار می‌رود. 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. چرا که این روش می‌تواند از طریق حذف بخشی از آلاینده‌های رواناب، در بهبود کیفیت آبی که به لایه‌های خاک زیرین نفوذ می‌کند موثر باشد.

روسازی نفوذپذیر جایگزینی برای روسازی‌های بتنی و آسفالتی نفوذ ناپذیر در معابر با بار ترافیک متوسط و کم بوده که در آن فضاهای خالی در روسازی اجازه عبور آب به نواحی زیرین طی بارش را می‌دهد. لایه‌های روسازی نفوذپذیر تقریباً شبیه به واحد فیلتراسیون تصفیه‌خانه آب و فاضلاب عمل می‌کند و

حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی با استفاده از سنگدانه‌های لایه‌های روسازی نفوذپذیر

تنظیم شد که از انباشتگی رواناب بر روی سنگدانه‌ها جلوگیری به عمل آید. براساس دانه بندی اجرا شده میزان نفوذپذیری دو لایه مورد استفاده در کنار هم به میزان ۳۲۵۰ سانتی متر بر ساعت برآورد شد.



شکل ۱. پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده

به دلیل وجود مواد جامد معلق در رواناب مورد استفاده و احتمال ته‌نشین شدن ذرات در کف منبع رواناب و همچنین برای یکنواخت ماندن رواناب در داخل منبع، از یک دستگاه پمپ به منظور اختلاط استفاده شد. جهت در معرض قرار گرفتن تمام سطح سنگدانه‌های راکتور اصلی با رواناب، در بخش ورودی رواناب به ستون از یک افشانک استفاده شد. همچنین، جهت جلوگیری از تبخیر رواناب، سطح راکتور به صورت کامل مسدود شد.

در تمام آزمایش‌ها، ۶۰ لیتر رواناب سنتزی به صورت پیوسته با دبی ۰/۹ لیتر بر دقیقه از بالا وارد ستون شده و پس از عبور از لایه‌های 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 شده و در فواصل زمانی مشخص از آن نمونه‌گیری به عمل آمد. برای نمونه‌برداری، از ظروف ۱۰۰ میلی‌لیتری درب‌دار استفاده شد. همچنین برای جلوگیری از تغییر کیفیت رواناب، ظروف نمونه تا زمان انجام آزمایش‌ها در درون

مکانیسم‌های مشابهی در حذف آلاینده‌ها دارند.

بر اساس پژوهش‌های انجام پذیرفته، غلظت فلزات سنگین و ذرات معلق رواناب در هنگام عبور از روسازی‌های نفوذپذیر به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [James, Pratt et al. 1989]. در تحقیقی، نرخ حذف آلاینده‌های Cd, Cu, Pb, Zn از رواناب در عبور از نوع روسازی نفوذپذیر [Fach and Geiger, 2005]. گزارش شده است ۴۳/۴ تا ۹۹/۸٪. در پژوهشی دیگر، حذف کامل هیدروکربن‌های نفتی، فلز روی و جامدات معلق از رواناب در هنگام عبور از روسازی آسفالتی نفوذ پذیر گزارش شده است [Roseen et al. 2012]. لازم به ذکر 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 [Pratt et al. 1989].

با توجه به موارد فوق، هدف اصلی از انجام تحقیق حاضر بررسی تاثیر جنس سنگدانه‌های لایه‌های اساس و فیلتر روسازی نفوذپذیر در حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی تعیین شد. در این پژوهش ضمن مقایسه توانایی حذف فلزات سنگین از رواناب توسط سنگدانه‌های مختلف ظرفیت جذب هر یک از سنگدانه‌های مورد استفاده نیز برآورد شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ روش کار

این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از رواناب سنتزی انجام پذیرفت. نمایی از راکتور مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. ستون مورد استفاده در این پژوهش متشکل از استوانه‌ای با قطر ۲۰ و ارتفاع ۶۰ سانتیمتر از جنس پولیکای نیمه قوی بوده که توسط 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. جهت تکمیل چرخه رواناب در ستون از یک دستگاه پمپ مستغرق با دبی ۰/۹ لیتر بر دقیقه استفاده شد. دبی پمپ طوری

یخچال و در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد.

لازم به ذکر است که در روسازی‌های متداول آسفالتی، قشرهای آسفالت که بر 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 آنرا به قشر اساس منتقل می‌کنند. هدف اصلی از این تحقیق نیز ارزیابی میزان تغییرات آلودگی رواناب در هنگام عبور از لایه‌های روسازی بوده که با تعبیه لایه‌های آسفالت متخلخل بر روی قشر اساس امکان‌پذیر می‌شد. اما به دلیل نبود امکانات آزمایشگاهی مناسب برای ایجاد لایه‌های آسفالتی مورد نیاز در راکتور مورد استفاده، تصمیم بر آن شد تا به جای لایه‌های متداول آسفالتی، قشری به عنوان فیلتر روی لایه اساس تعبیه شده تا عملاً رواناب با عبور از آن بخشی از مواد جامد معلق خود را از دست داده و مابقی به لایه اساس نفوذ کند.

کلیه مواد استفاده شده در این تحقیق 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. لازم به ذکر است در این تحقیق کلیه پارامترها مطابق دستورالعمل‌های مندرج در کتاب "روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب" اندازه‌گیری شد [APHA, 2005].

۲-۲ رواناب مورد استفاده

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

تهیه رواناب سنتزی، در ابتدا اقدام به نمونه‌برداری از رواناب سطحی شهر تهران در دو مقطع زمانی مختلف و تعیین حدود غلظت آلاینده‌های آن شد. سپس با توجه به اطلاعات به دست آمده در خصوص غلظت فلزات روی و مس و همچنین میزان جامدات معلق موجود در آن نسبت به ساخت رواناب سنتزی اقدام شد. مشخصات رواناب شهر تهران (متوسط اندازه‌گیری در دو مقطع زمانی مختلف) و رواناب سنتزی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در این تحقیق به منظور ساخت رواناب از سولفات مس و سولفات روی به ترتیب به عنوان منشاء فلزات مس و روی که قابل حل در آب هستند، استفاده شد. مواد معلق رواناب سنتزی نیز از اختلاط مواد جامد جمع‌آوری شده از حاشیه یکی از بزرگراه‌های تهران (عبوری از الگ ۲۰۰) با آب تامین شد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه انجام پذیرفته (در این مقاله ارائه نشده)، غلظت آلاینده‌ها بیش از مقدار آن در رواناب شهر تهران انتخاب شد.

۲-۳ سنگدانه‌های مورد استفاده

در این پژوهش از سه نوع سنگدانه سیلیسی، سنگ‌آهکی و سرباره‌ای با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ به عنوان لایه فیلتر و اساس استفاده شد. علت انتخاب دو نوع سنگدانه اول متداول بودن استفاده از آنها در پروژه‌های راه‌سازی کشور بوده و سنگدانه سرباره‌ای که محصول جانبی کارخانه‌های ذوب‌آهن است و به مقدار قابل توجه در کارخانجات مربوطه تولید می‌شود نیز به

جدول ۱. غلظت آلاینده‌های رواناب شهری و سنتزی

نوع رواناب	آلاینده	TSS (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)
رواناب شهر تهران (نقطه اول)	۴۸۰	۰/۰۱۷۰	۰/۰۳۳۳	
رواناب شهر تهران (نقطه دوم)	۴۰۰	۰/۰۳۹۱	۰/۲۰۷۳	
رواناب سنتزی	۱۰۷۰	۲/۵	۶/۵	

حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی با استفاده از سنگدانه‌های لایه‌های روسازی نفوذپذیر

در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد حذف ذرات معلق در لحظات ابتدایی آزمایش با شیب بیشتری انجام پذیرفته و پس از آن از شدت آن کاسته شده و در نهایت تقریباً پس از گذشت ۱۲۰ ساعت به حداکثر مقدار خود رسیده است. علت شدت حذف بیشتر در ابتدای آزمایش این است که سطوح سنگدانه تمیز بوده و در نتیجه جذب بیشتری صورت می‌پذیرد، اما در ادامه با اشباع شدن سطوح سنگدانه از قدرت جذب آنها کاسته می‌شود. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده هر سه سنگدانه مورد استفاده عملکردی مشابه در حذف ذرات معلق داشته‌اند. در این تحقیق بیشترین و کمترین درصد حذف TSS به ترتیب به سربراه و سیلیس اختصاص داشته است. در این آزمایش درصد حذف TSS برای سنگدانه سربراه‌ای، سنگ‌آهکی و سیلیسی پس از گذشت ۳ ساعت به ترتیب برابر ۶۶، ۶۵ و ۵۷ درصد بوده که پس از ۱۲۰ ساعت به ترتیب به ۹۸، ۹۹ و ۹۶ درصد افزایش یافته است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده زمان ۱۲۰ ساعت به عنوان مینا جهت انجام آزمایش‌های بعدی مد نظر قرار گرفت.

جدول ۲. مشخصات سنگدانه‌های سیلیسی، سنگ‌آهکی و سربراه‌ای مورد استفاده

نتایج آزمایش				روش آزمایش	شرح
مصالح سربراه‌ای	مصالح سنگ‌آهکی	مصالح سیلیسی	مصالح سربراه‌ای		
۱۲-۵	۲۵-۱۲				
۲۱/۲	۲۵/۵	۲۹	۲۰	ASTM C131	سایش به روش لس آتجلس (درصد)
۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۶	۰/۶۲	ASTM C88	افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (درصد)
-	-	۱۰۰	۹۱	ASTM D5821	درصد شکستگی
-	-	۹	۲۵	ASTM D4791	درصد سنگدانه‌های پهن و دراز
-	-	۲/۶۴۸	۲/۴۶۸	ASTM C127	وزن مخصوص واقعی (g/cm ³)
۲/۷۵	۲/۶۱	۲/۶۹۱	۲/۶۲۸	ASTM C127	وزن مخصوص ظاهری (g/cm ³)
۴/۴۷	۴/۱۳	۲/۱۰	۱/۲۰	ASTM C127	درصد جذب آب

دلیل دارا بودن پتانسیل مناسب در این خصوص مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق ضخامت لایه فیلتر و اساس به ترتیب برابر با ۱۰ و ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای آنکه پژوهش حاضر جنبه کاربردی‌تری داشته باشد، دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده براساس آئین‌نامه‌های ASTM No.57 و ASTM No.8 به ترتیب برای لایه اساس و لایه فیلتر به شرح جدول ۳ انجام پذیرفت.

۳. بحث و نتایج

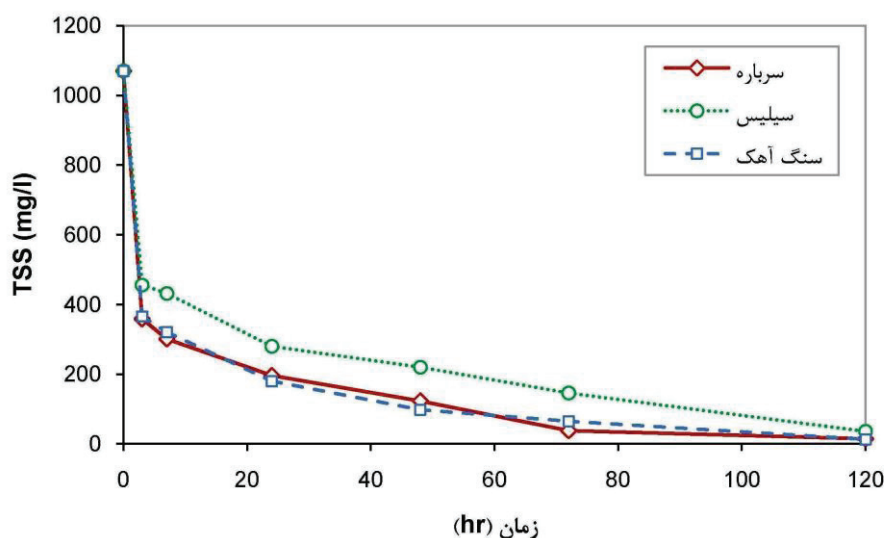
از آنجایی که گرفتگی ناشی از مواد معلق موجود در رواناب یکی از مشکلات ناشی از بهره‌برداری از روسازی‌های نفوذ پذیر است، بنابراین در این بخش ابتدا تغییرات جامدات معلق رواناب در سیستم مورد بررسی قرار گرفته و سپس نتایج مربوط به حذف فلزات روی و مس از رواناب ارائه شده است.

۳-۱ حذف مواد جامد معلق

عملکرد سنگدانه‌ها در حذف ذرات معلق از رواناب سنتزی

جدول ۳. استاندارد مورد استفاده جهت دانه بندی لایه اساس و لایه فیلتر

لایه فیلتر (ASTM No.8)		لایه اساس (ASTM No.57)	
درصد عبوری از الک (%)	شماره الک	درصد عبوری از الک (%)	شماره الک
۱۰۰	$\frac{1}{2}$	۱۰۰	$1 \frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$
۸۵-۱۰۰	$\frac{3}{8}$	۹۵-۱۰۰	1
۱۰-۳۰	No.4	۲۵-۶۰	$\frac{1}{2}$
۰-۱۰	No.8	۰-۱۰	No.4
۰-۵	No.16	۰-۵	No.8



شکل ۲. تغییرات غلظت TSS در رواناب در طی زمان

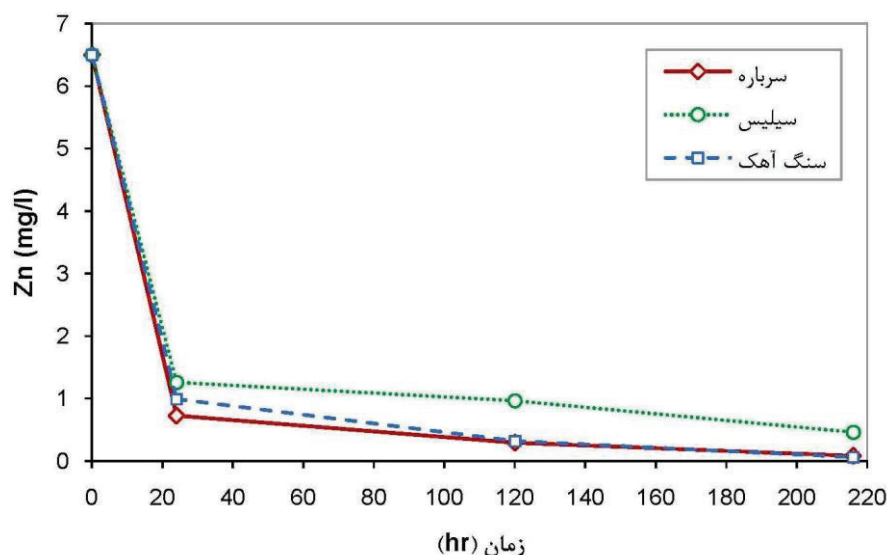
مورد بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در کاهش غلظت فلز روی در طی آزمایش های مختلف، هر سه سنگدانه رفتاری مشابه داشته اند. درصد حذف روی برای سنگدانه های سرباره ای، سنگ آهکی و سیلیسی پس از ۲۴ ساعت به ترتیب برابر ۸۹، ۸۵ و ۸۱ درصد بوده که پس از ۱۲۰ ساعت به ترتیب به حدود ۸۵، ۹۵ و ۹۶ درصد افزایش یافته است بنابراین بیشترین حذف فلز روی مربوط به سنگدانه سرباره ای و کمترین آن مربوط به سیلیس است. همچنین مشاهده می شود که میزان حذف فلز روی توسط سنگدانه سرباره ای تا حد زیادی با سنگدانه سنگ آهکی تشابه دارد. همانگونه که مشاهده می شود به دلیل تمیز بودن سطوح سنگدانه در ابتدای آزمایش میزان حذف با شدت بیشتری انجام پذیرفته، اما در ادامه با اشباع شدن سطوح سنگدانه از سرعت آن کاسته شده است.

در تحقیقی مشابه در مقیاس آزمایشگاهی حذف ۹۵ درصدی مواد معلق از رواناب توسط روسازی نفوذپذیر شامل لایه اساس، فیلتر و لایه رویه گزارش شده است [Kadurupokune and Jayasur- iya, 2009] در تحقیقی دیگر تصفیه رواناب توسط ۳ نوع روسازی نفوذپذیر مورد بررسی قرار گرفته و حذف ۱۰۰ درصدی ذرات معلق گزارش شده است [Yong et al. 2008]. نتایج سایر پژوهش ها، نیز حذف بیش از ۹۰٪ مواد معلق رواناب عبوری از روسازی نفوذپذیر را نشان داده اند [Pratt et al. 1995; James and Shahin, 1998; Brattebo and Booth, 2003; Collins et al. 2008].

۲-۳ حذف فلزات روی و مس

میزان حذف فلز روی از رواناب سنتزی نسبت به زمان در سیستم

حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی با استفاده از سنگدانه‌های لایه‌های روسازی نفوذپذیر



شکل ۳. تغییرات غلظت فلز روی در رواناب در طی زمان

می‌گردد، در این مورد نیز عملکرد سنگدانه سرپاره‌ای در حذف فلز مس تا حد زیادی مشابه عملکرد سنگدانه سنگ آهکی بوده است.

در تحقیقی مشابه حذف ۴۳/۴ تا ۹۹/۸٪ فلزات روی و مس از رواناب در عبور از روسازی‌های نفوذپذیر گزارش شده است [Fach and Geiger, 2005].

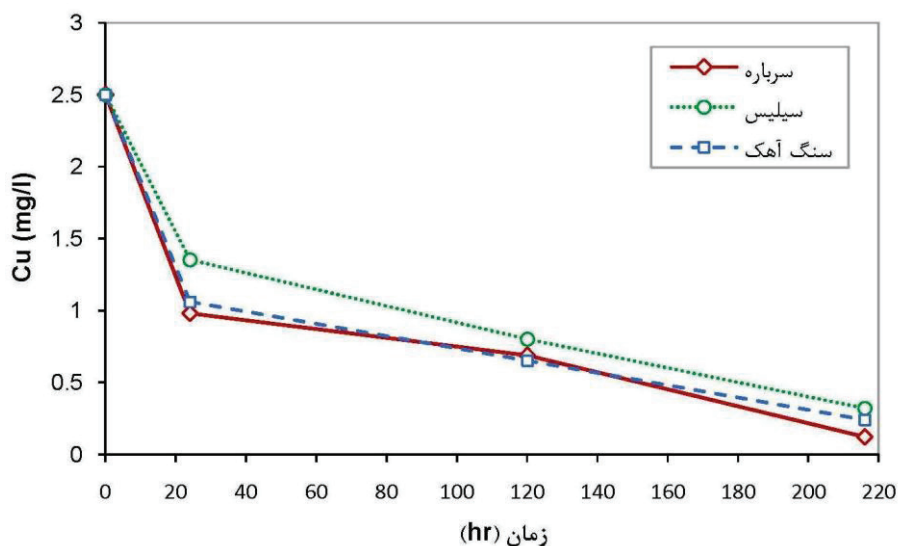
نتایج آزمایش‌ها در این بخش نشان داد که هر سه نوع سنگدانه مورد استفاده در این تحقیق عملکرد مناسبی در حذف فلزات روی و مس از رواناب داشته و قابلیت استفاده در روسازی نفوذپذیر را دارا هستند. همچنین با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که درصد قابل توجهی از فلزات مذکور طی ۲۴ ساعت اول فرآیند حذف شده و پس از آن میزان حذف دارای شیب ملایم‌تری است. با این حال، با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده در خصوص حذف ذرات معلق زمان ۱۲۰ ساعت به عنوان مبنا جهت انجام آزمایش‌های بعدی انتخاب شد.

۳-۳ ظرفیت سیستم برای حذف آلاینده از رواناب

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 گردد، تکرار شد.

در یک کار تحقیقاتی مشابه نیز میزان حذف فلزات سنگین توسط فیلتر ماسه‌ای تند تحت pHهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه شده که این سیستم تحت pH خنثی، قابلیت حذف فلز روی و مس به ترتیب به میزان ۴۰٪ و ۳۵٪ را از درون آب آلوده دارا است [Aulenbach and Chan, 1988]. همچنین در تحقیقی دیگر حذف فلز روی از رواناب به میزان تقریبی ۱۰۰ درصد به عنوان عملکرد روسازی آسفالت نفوذ پذیر گزارش شده است [Roseen et al. 2012].

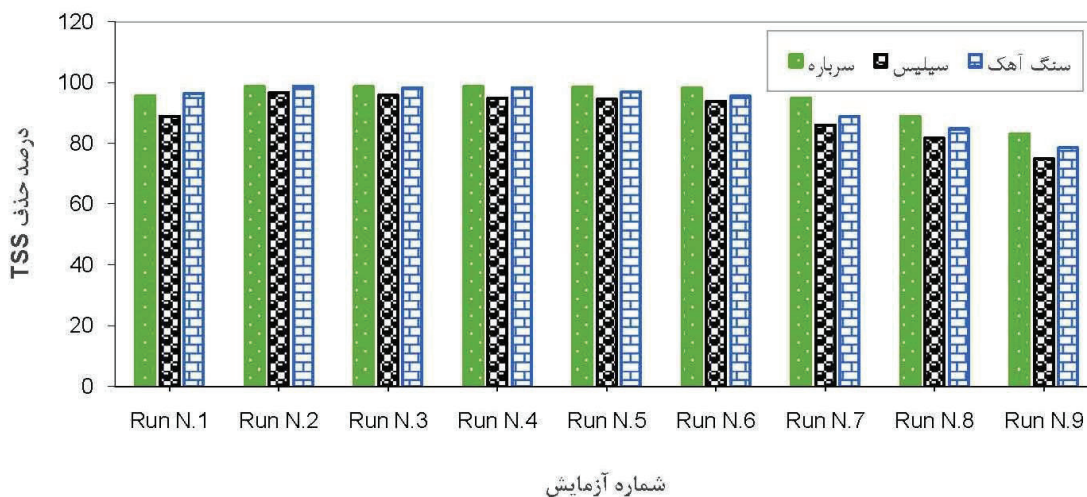
در تحقیق حاضر غلظت فلز مس موجود در رواناب سنتزی نیز در عبور از هر سه سنگدانه دارای کاهش غلظت قابل توجه بوده است. بر اساس شکل ۴، در این خصوص نیز بیشترین میزان حذف مربوط به سنگدانه سرپاره‌ای و کمترین آن مربوط به سنگدانه سیلیسی بوده است (درصد حذف مس برای سنگدانه‌های سرپاره‌ای، سنگ آهکی و سیلیسی پس از ۲۴ ساعت به ترتیب برابر ۶۱، ۵۸ و ۴۶ درصد بوده که پس از ۱۲۰ ساعت به ترتیب به حدود ۷۲، ۷۴ و ۶۸ 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. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده



شکل ۴. تغییرات غلظت فلز مس در رواناب در طی زمان

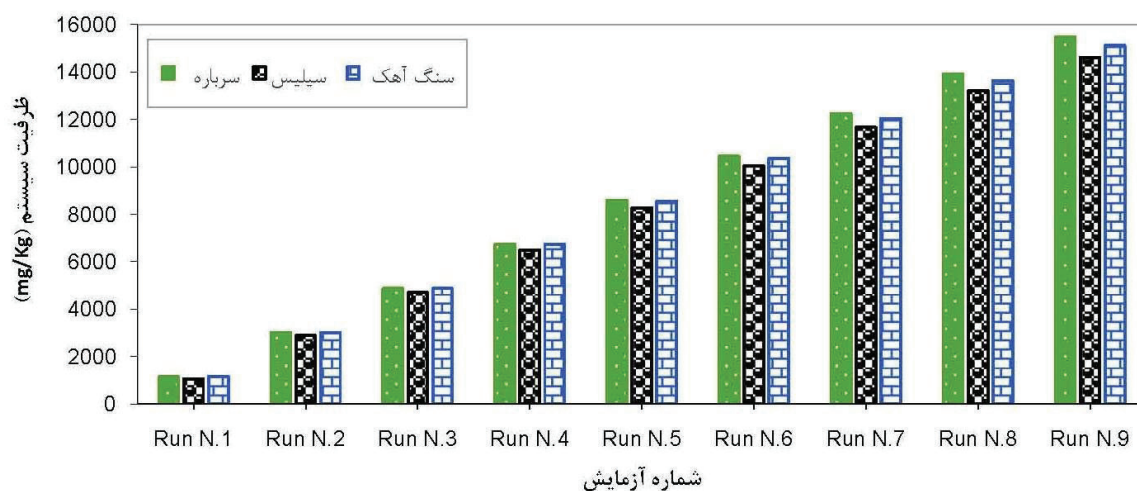
سیکل نهم با گرفتگی ستون، عملاً آزمایش‌ها متوقف شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد به صورت کلی بیشترین درصد حذف ذرات معلق از رواناب به ترتیب مربوط به ستون حاوی سنگدانه سرباره‌ای، سنگ‌آهکی و سیلیسی بوده است. در شکل ۶ نیز مقادیر جامدات معلق حذف شده از رواناب سنتزی طی ۹ سیکل متوالی نشان داده شده است. با توجه به این شکل ظرفیت نگهداری ذرات معلق در ستون‌های حاوی سنگدانه سرباره‌ای، سیلیسی و سنگ‌آهکی به ترتیب برابر ۱۵۴۸۵، ۱۴۶۲۵ و ۱۵۱۲۷ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه برآورد شده است.

نتایج مربوط به درصد حذف جامدات معلق رواناب سنتزی در اثر عبور ۵۴۰ لیتر رواناب (۶۰ لیتر در هر سیکل) از سنگدانه‌های مورد استفاده در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد تا آزمایش ششم میزان حذف جامدات معلق در هر سه سنگدانه مورد استفاده تقریباً ثابت بوده است. از آزمایش شماره هفت به بعد مقداری افت در میزان حذف TSS مشاهده 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 نهایت نیز در



شکل ۵. درصد حذف ذرات معلق در انتهای سیکل‌های ۱۲۰ ساعته

حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی با استفاده از سنگدانه‌های لایه‌های روسازی نفوذپذیر



شکل ۶. ظرفیت سیستم در حذف ذرات معلق

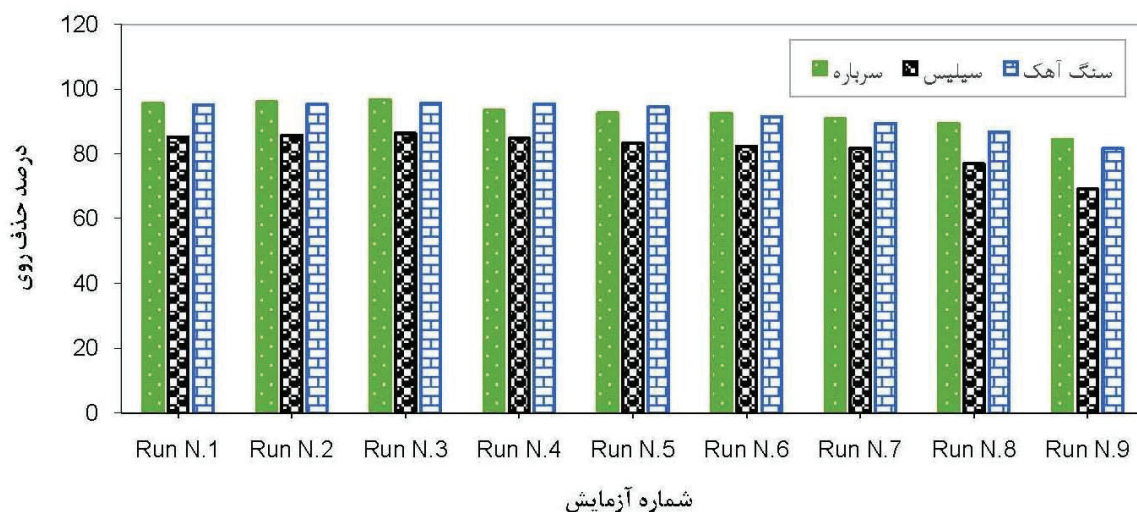
تفاوت چندانی ندارند.

در شکل ۸ نیز مقدار تجمعی فلز روی در هر یک از سنگدانه‌های مورد استفاده با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان جذب فلز روی برای سرباره، سنگ‌آهک و سیلیس بعد از ۹ آزمایش پی در پی به ترتیب برابر با ۹۵، ۹۴ و ۸۴ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه بوده است.

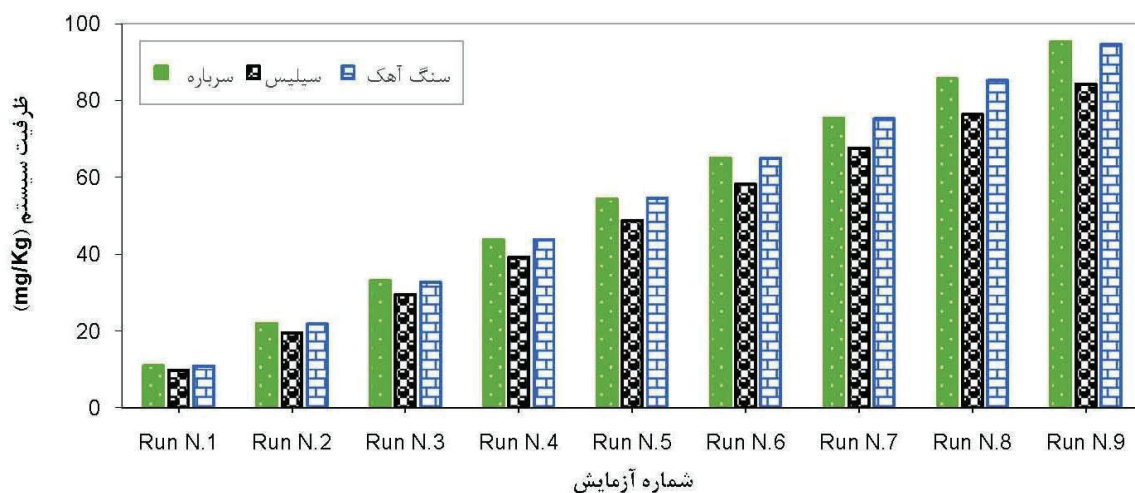
با توجه به شکل ۹ در خصوص درصد حذف مس در سیستم‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود که در این مورد نیز درصد حذف تا آزمایش شماره ۷ برای هر یک از سنگدانه‌ها تقریباً یکسان بوده است. اما از آزمایش‌های شماره ۷ به بعد درصد حذف برای سنگدانه سیلیسی به شدت کاهش یافته به طوری که مقدار آن

نتایج مربوط به درصد حذف فلز روی از رواناب سنتزی در سنگدانه‌های مورد استفاده در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود راندمان حذف فلز روی از رواناب در ۷ سیکل اول برای هر سنگدانه تقریباً یکسان بوده است. اما از سیکل هشتم روند کاهش راندمان حذف مشاهده شده که این روند در سنگدانه سیلیسی با شدت بیشتری رخ داده است. علت کاهش حذف در آزمایش‌های هفتم به بعد برای هر سه سنگدانه را می‌توان به اشباع تدریجی سنگدانه‌ها مرتبط دانست.

با توجه به شکل ۷ بیشترین و کمترین درصد حذف فلز روی مربوط به سنگدانه سرباره‌ای و سیلیسی بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد حذف بین سنگدانه سنگ‌آهک و سرباره



شکل ۷. درصد حذف فلز روی در انتهای سیکل‌های ۱۲۰ ساعته



شکل ۸. ظرفیت سیستم در حذف فلز روی

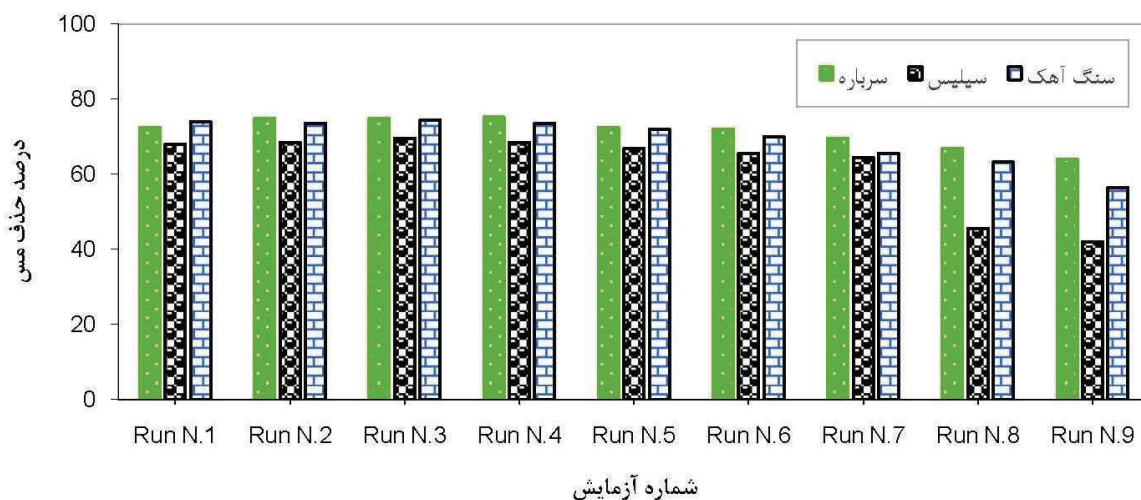
آزمایش پی در پی به ترتیب برابر با ۲۸، ۲۷ و ۲۵ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم سنگدانه بوده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر جنس سنگدانه‌های لایه‌های اساس و فیلتر روسازی نفوذپذیر در حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق که در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از سه نوع سنگدانه سنگ‌آهکی، سیلیسی و سربراه‌ای صورت پذیرفته به شرح زیر است:
- سنگدانه‌های استفاده شده در لایه اساس و فیلتر قادر به حذف جامدات معلق و فلزات سنگین (مس و روی) رواناب سنتزی به

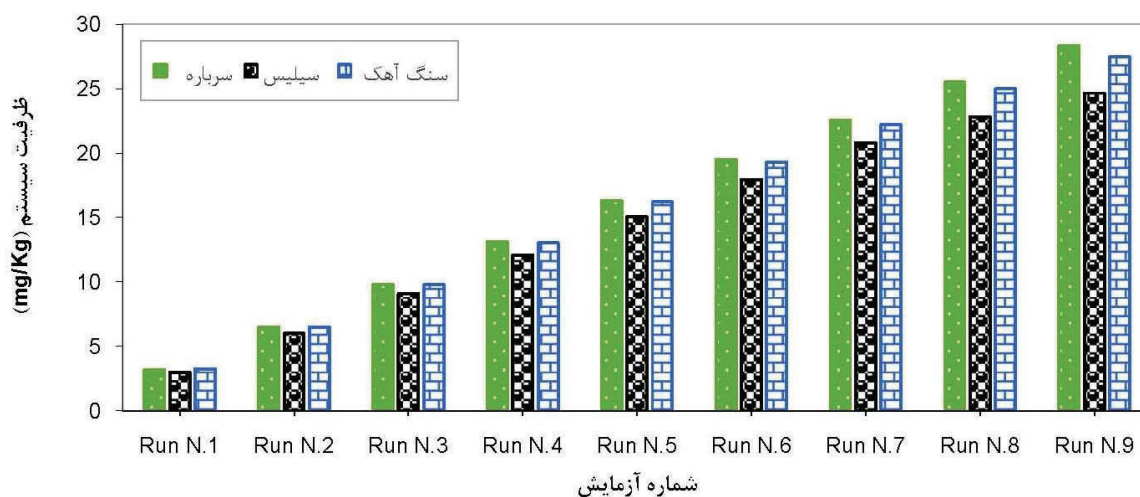
در آزمایش شماره ۸ به ۶۴ درصد و در آزمایش شماره ۹ به حدود ۴۵ درصد رسیده است. روند کاهش حذف مس از رواناب توسط دو سنگدانه دیگر نیز با شدتی کمتر از سنگدانه سیلیسی در آزمایش‌های ۸ و ۹ قابل مشاهده است. این کاهش درصد حذف در آزمایش‌های هفتم به بعد را نیز می‌توان به اشباع تدریجی سنگدانه‌ها مرتبط دانست.

بر اساس شکل ۹ به ترتیب سربراه، سنگ‌آهک و سیلیس بیشترین درصد حذف فلز مس را داشته اند. در شکل ۱۰ نیز مقدار تجمعی فلز روی در خصوص هر سه سنگدانه مورد استفاده نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان جذب فلز روی بر سطح سنگدانه‌های سربراه، سنگ‌آهک و سیلیس بعد از ۹



شکل ۹. درصد حذف فلز مس در انتهای سیکل‌های ۱۲۰ ساعته

حذف فلزات سنگین از رواناب سطحی با استفاده از سنگدانه‌های لایه‌های روسازی نفوذپذیر



شکل ۱۰. ظرفیت سیستم در حذف فلز مس

۶. مراجع

- APHA, AWWA, WEF (2005) "Standard methods for the examination of water and wastewater", 21st ed. Amer. Public Health Assoc., Washington, DC.

- 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, Alexandria, USA.

- Aulenbach, D. B. and Chan, Y. (1988) "Heavy metals removal in a rapid infiltration sand column", Particulate Science and Technology, No. 6, pp. 467-481.

- Bhattacharya, A. K., Mandal, S. N. and Das, S.K. (2006) "Adsorption of Zn (II) from aqueous solution by using different adsorbents", Chem. Eng. J. Vol. 123, pp.43-51.

- Bose, P., Bose, M. A. and Kumar, S. (2002) "Critical evaluation of treatment strategies involving adsorption and chelation for wastewater containing copper, zinc, and cyanide", Adv. Environ. Res. Vol. 7, pp.179-195.

- Brattebo, B. O. and Booth, D. B. (2003) "Long-term storm water quantity and quality performance of permeable pavement systems", Water Research, vol. 37, pp. 4369-4376.

مقدار قابل توجهی هستند.

- ستون‌های حاوی سنگدانه سرباره‌ای، سیلیسی و سنگ‌آهکی به ترتیب قادر به حذف ۱۵۴۸۵، ۱۴۶۲۵ و ۱۵۱۲۷ میلی‌گرم مواد جامد معلق رواناب به ازای هر کیلوگرم سنگدانه بودند.

- درصد حذف روی برای سنگدانه سرباره‌ای، سنگ‌آهکی و سیلیسی پس از ۲۴ ساعت به ترتیب برابر با ۸۹، ۸۵ و ۸۱ درصد بود. همچنین درصد حذف مس در مدت زمان مشابه برای سرباره ۶۱ برای سنگ-آهک ۵۸ و برای سیلیس ۴۶ درصد به دست آمد.

- استفاده از سرباره به عنوان سنگدانه لایه اساس و فیلتر روسازی نفوذپذیر باعث بهبود کیفی موثر رواناب می‌شود. در کنار سرباره، سنگ‌آهک نسبت به سیلیس، آلاینده‌ها را به مقدار بیشتری حذف خواهد کرد. بنابراین از لحاظ مسائل زیست‌محیطی توصیه می‌گردد تا در نبود سرباره از سنگدانه‌های سنگ‌آهکی در لایه‌های روسازی نفوذپذیر استفاده شود.

۵. سپاسگزاری

از مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهرداری تهران به موجب حمایت از این پروژه سپاسگزاری می‌شود. همچنین از شرکت ریوا تحقیق به دلیل در اختیار قرار دادن سنگدانه‌های سرباره‌ای تشکر به عمل می‌آید.

- Pratt, C. J., Mantle, J. D. G., and Schofield, P. A. (1989) "Urban storm water reduction and quality improvement through the use of permeable pavements", *Water Science and Technology*, Vol. 21, pp.769-778.
- 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*, Vol. 138, No. 1, pp. 81-89.
- Scholz, M. (2006) "Wetland systems to control urban runoff", *Environmental Science and Technology*, Vol. 25, pp. 2542-2549.
- Scholz, M. and Grabowiecki, P. (2007) "Review of permeable pavement systems", *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 3830-3836.
- Shammass, N. K. (2004) "Coagulation and flocculation in Physicochemical treatment processes", edited by L.K. Wang, Y. T. Hung and N. K. Shammass, Humana Press, New Jersey, pp. 103-140.
- WHO. (1984) "World Health Organisation report, Guidelines for drinking water quality", Geneva, WHO.
- Yang, X. J., Fane, A. G. and MacNaughton, S. (2001) "Removal and recovery of heavy metals from wastewater by supported liquid membranes", *Water Science and Technology* Vol. 43, pp. 341-348.
- Yong, C. F., Deletic, A., Fletcher, T.D. and 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.
- Collins, K. A., Hunt, W. F. and Hathaway, J. M. (2008) "Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in Eastern North Carolina", *Hydrologic Engineering*, Vol. 13, pp. 1146-1157.
- Eckenfelder, W.W. (2000) "Industrial water pollution control", New York, McGraw-Hill, pp. 451-457.
- Fach, S. and Geiger, W. F. (2005) "Effective pollutant retention capacity of permeable pavements for infiltrated road runoffs determined by laboratory tests", *Water Science and Technology*, Vol. 51, pp. 37-45.
- Hmetsar A. (2008) "Biosorption of cadmium (II) from aqueous solution by red algae (*Ceramiumvirgatum*): Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 157, pp. 448-54.
- James, W. and Shahin, R. (1998) "Pollutants leached from pavements by acid rain", *Advances in Modeling the Management of Storm water Impacts*, vol.6, pp. 321-349.
- Jokela, P. and Keskitalo, P. (1999) "Plywood mill water system closure by dissolved air flotation treatment", *Water Science and Technology*, Vol. 40, Issue 11/12, pp. 33-41.
- Jüttner, K., Galla, U. and Schmieder, H. (2000) "Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry", *Electrochimica Acta*. Vol. 45, pp. 2575-2594.
- Kadurupokune, N. and Jayasuriya, N. (2009) "Pollutant load removal efficiency of pervious pavements: is clogging an issue", *Water Science and Technology*, Vol. 60, pp. 1787-1794.
- Metcalf and Eddy Co. (2003) "Wastewater engineering: treatment and reuse", McGraw Hill International Edition, New York. pp. 478-483.
- 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*, Vol. 32, pp. 63-69.