نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۳، شماره ۲، ۱۴۰۰، صفحات ۲۴۵-۲۵۴

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 13, Issue 2, 2021, Pages 245-254
DOI: 10.22092/ijwmse.2020.114973.1340

بررسی فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق رواناب در حوزه آبخیز شهری بجنورد

حسن ایزانلو[۱]، کاکا شاهدی[۲*] و کریم سلیمانی[۳]

[۱] دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، [۲] دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و [۳] استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

چکیده

ارزیابی فلزات چسبیده به مواد معلق سیلاب‌های شهری، به مدیران اجازه می‌دهد تا اقداماتی در راستای بهبود کیفیت محیط شهری انجام دهند. در این پژوهش، به بررسی تغییرات مقدار غلظت فلزات سنگین سرب، روی و مس موجود در مواد معلق رواناب‌ها در حوزه آبخیز شهری بجنورد در دو فصل پاییز و بهار پرداخته شده است. به این منظور، تعداد ۵۲ نمونه رواناب تهیه شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، تفکیک رسوبات معلق با استفاده از کاغذ صافی واتمن و پس از توزین مقدار رسوبات موجود در رواناب، با استفاده از دستگاه جذب اتمی، مقدار فلزات سنگین محلول در رواناب و فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق بر حسب ppb اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مقدار وزنی رسوبات معلق در فصل بهار بیشتر از پاییز است. همچنین، نتایج حاکی از آن است که بیشینه غلظت فلزات سنگین غیرمحلول و چسبیده به رسوبات بیشتر از فلزات سنگین محلول در رواناب است. از سویی دیگر، نتایج بیانگر آن است که بیشینه میانگین غلظت فلزات روی و مس به‌جز سرب چسبیده به رسوبات در فصل بهار بیشتر از پاییز است و از نظر مکانی غلظت فلزات روی و مس در نمونه‌های رسوبات معلق رواناب مسیل صندل‌آباد (FC3S) بیشتر بوده است، این در حالی است که در خصوص فلز سرب در نمونه‌های معابر و شبکه انهار (FB2S) مقدار غلظت بیشتر بوده است. لکن تفاوت مکانی داده‌ها برای فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق از نظر آماری معنی‌دار نیست. همچنین، نتایج آزمون همبستگی پیرسون حاکی از آن است که همبستگی مثبت اما پایینی بین سرب و روی (r=۰/۱۶۶) در فصل پاییز و بین سرب و مس (r=۰/۲۷۱) در فصل بهار برقرار است. معنی‌داری این همبستگی با استفاده از تحلیل خوشه‌ای به روش سلسله مراتبی مورد تایید قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خوشه‌ای، سیلاب شهری، غلظت فلزات سنگین، مواد معلق، همبستگی پیرسون

مقدمه

امروزه تهیه اطلاعات تفصیلی و درک صحیح سامانه‌های آبخیز و نیز شرایط حاکم بر چرخه‌های هیدرولوژیکی از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر برای مدیریت یکپارچه و همه جانبه حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود (Kiani Harchegani و Sadeghi، ۲۰۱۱). در مدیریت موثر سیلاب شهری، نیاز به درک عمیقی از همه فرایندهای حاکم بر حوزه‌های آبخیز شهری است (Soller و همکاران، ۲۰۰۵). همگام با رشد صنعتی، اقتصادی و تولید انواع مختلف ترکیبات و مواد

* مسئول مکاتبات: kaka.shahedi@gmail.com

شیمیایی که بشر برای رفاه و آسایش خود به‌دست آورده، به‌طور ناخواسته موادی را به طبیعت وارد می‌کند که هم برای محیط اطراف و هم برای خود مشکلات و خطرات جدی به همراه دارد (Mirzaei و Solgi، ۲۰۱۵). از جمله این مواد که ممکن است، وارد محیط شود، انواع فلزات سنگین را می‌توان نام برد که به دو صورت محلول و غیرمحلول در سیلاب‌های شهری وجود دارند (Murakami و همکاران، ۲۰۰۷). وجود ماشین‌آلات در شهرها، روغن‌ریزی‌ها، اصطکاک تایر اتومبیل‌ها با سطح خیابان‌ها، سطوح آسفالت (Brown و Peake، ۲۰۰۶) و همچنین، وجود معادن متروکه و فعال در اطراف شهرها، کارگاه‌های فرزکاری و تراشکاری از جمله منابع آلایندگی فلزات سنگین هستند (Navarro و همکاران، ۲۰۰۸). این فلزات می‌تواند به‌وسیله باران در نواحی مختلف صنعتی، تجاری و مسکونی شهر، از سقف خانه‌ها، خیابان‌ها و سایر سطوح شسته شده (Brown و Peake، ۲۰۰۶) و از طریق زهکش‌های مربوط به رواناب‌های سطحی به درون منابع آب زیرزمینی و آب شرب نفوذ کند (Gallo و همکاران، ۲۰۱۲). لازم به ذکر است، آلودگی سیلاب شهری به فلزات سنگین به‌صورت محلول با غلظت پایین بوده، بیشتر آن‌ها به جذب کلوئیدی‌ها می‌شوند و انتقال می‌یابند (Parvinnia و همکاران، ۲۰۰۹) که در صورت تجاوز این آلودگی‌ها از حد مجاز می‌تواند باعث ایجاد مخاطراتی همچون مسمومیت‌ها و سرطان‌زایی و سایر بیماری‌ها برای آبخیزنشینان شود (Alidadi و همکاران، ۲۰۱۱).

از مشکلات استراتژیک محیطی و انسانی شهر بجنورد می‌توان به وجود رودخانه‌ها در حاشیه شهر و مسیل‌ها در درون شهر، محدودیت زهکشی در بخش‌هایی از شهر، گسترش کالبدی شهر و نابودی فیلتر زیست‌محیطی شهر، روند رو به تزاید بافت‌های فرسوده شهری، ضعف خودپالایی هوا، استقرار صنایع آلاینده و مزاحم همچون واحدهای سنگ‌شکن و آسفالت در بخش‌هایی از شهر، وجود کانون آلاینده‌های آب و خاک همچون گورستان و بیمارستان بر روی رسوبات کم‌نفوذ غرب و جنوب شهر، ازدحام ترافیک و تردد بی‌رویه وسایل نقلیه و نبود ابزارها و برنامه‌های مدرن مدیریت شهری و افزایش شدت سیلاب‌ها اشاره کرد که با توجه به مورفولوژی کاسه مانند دشت بجنورد و نارسایی شبکه معابر و خیابان‌های شهر و ناکافی بودن کشش انهار سبب شده است تا سامانه دفع آب‌های سطحی نامطلوب باشد. لذا، با توجه به آلاینده‌های موجود و ماندگاری سیلاب در سطح شهر بجنورد و امکان آلوده بودن رواناب شهری به آلاینده‌های آب و خاک (Kazemian و همکاران، ۲۰۱۰) بالاخص مواد معلق، مواد فرار، مواد آلی، هیدروکربن‌ها و فلزات سنگین وجود دارد.

امروزه محققین بسیاری بر روی مطالعات در زمینه آلودگی رواناب‌های شهری و رسوبات به فلزات سنگین تمرکز داشته‌اند.

در بررسی تغییرات فصلی غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های آب و رسوب حوضچه سامانه تخلیه زباله شهر بلفورت فرانسه در طی دو فصل تابستان و پاییز ۲۰۱۱، BenSalem و همکاران (۲۰۱۴) بیان می‌کنند که این نمونه‌ها برای هر فصل در طول دو هفته نمونه‌برداری شده و به روش ICP-OES[1] اندازه‌گیری شده است. نتایج حاکی از آن است که مقدار غلظت فلزات در نمونه‌های مربوط به آب در فصل تابستان بیشتر بوده است. در حالی‌که مقدار غلظت فلزات در نمونه‌های مربوط به رسوب در فصل پاییز به استثنای سرب بیشتر بوده است.

برای درک بهتر از رابطه بین فلزات سنگین رسوبات سطح خیابانی و ذرات شسته شده به داخل انهار، با استفاده از باران شبیه‌سازی شده، برای کنترل آلودگی رواناب‌های شهری، Zhao و Li (۲۰۱۳) تحقیقاتی را در اطراف شهر پکن چین انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که غلظت فلزات مس، روی، سرب، نیکل و کروم در ذرات شسته شده، بین ۱۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از رسوبات سطح خیابانی بوده است.

در بررسی منشاء فلزات سنگین (سرب، روی و مس) و هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک (PAH)[2] بر روی واریزه‌های به‌جا مانده از سطح جاده‌های شهری و رسوبات معلق سیلاب در دو آبخیز شهری و روستایی از

[1] Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy
[2] Polycyclic Aromatic Hydrocarbon

شهر دوندین نیوزیلند کرده، Brown و Peake (۲۰۰۶) به این نتیجه رسیدند که مقدار غلظت فلزات سنگین و هیدروکربن‌ها در سیلاب شهری بیشتر از سیلاب روستایی است.

در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز، Rastmanesh و همکاران (۲۰۱۵) به این نتیجه رسیدند که فلزات سنگین سرب، روی و مس ارتباط معنی‌داری با کربن آلی دارند و احتمالاً به‌طور عمده از فاضلاب خانگی و پساب صنعتی ناشی می‌شوند. در مقابل، کروم، آرسنیک و نیکل با آهن و منگنز همبستگی دارند که احتمالاً ناشی از منابع طبیعی یا کشاورزی است. در بررسی غلظت فلزات سنگین در آب و رسوب رودخانه تمبی مسجد سلیمان، قبل و بعد از ورود فاضلاب و رواناب‌های سطح شهر، Shanbehzadeh و همکارن (۲۰۱۳) به این نتیجه رسیدند که استفاده از آب رودخانه تمبی برای اهداف تفریحی، شستشو، ماهیگیری و برای سلامت انسان و محیط زیست مناسب نیست و لازم است که نسبت به کنترل فاضلاب و تصفیه آن قبل از ورود به این رودخانه اقدامات جدی صورت گیرد و کیفیت آب و رسوبات این رودخانه متناسب با اهداف بهره‌برداری مدیریت شود.

در بررسی کیفیت سیلاب شهری و رسوبات حاوی فلزات سنگین در حوضچه تزریق سیلاب شهری شیراز، Parvinnia و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که آلودگی سیلاب شهری به فلزات سنگین به‌صورت محلول با غلظت پایین بوده و بیشتر آن‌ها به مواد معلق جذب شده و انتقال می‌یابند.

بنابراین، با درک بهتر مقدار مواد معلق رواناب شهری از حیث رابطه بین فلزات سنگینی همچون روی، سرب و مس (Zhao و Li، ۲۰۱۳) در فصول مختلف (BenSalem و همکاران، ۲۰۱۴)، می‌توان به مدیران شهر در مدیریت کیفیت سیلاب شهری و بهینه‌سازی استراتژی‌های کنترلی آن کمک شایانی نماید (Soller و همکاران، ۲۰۰۵).

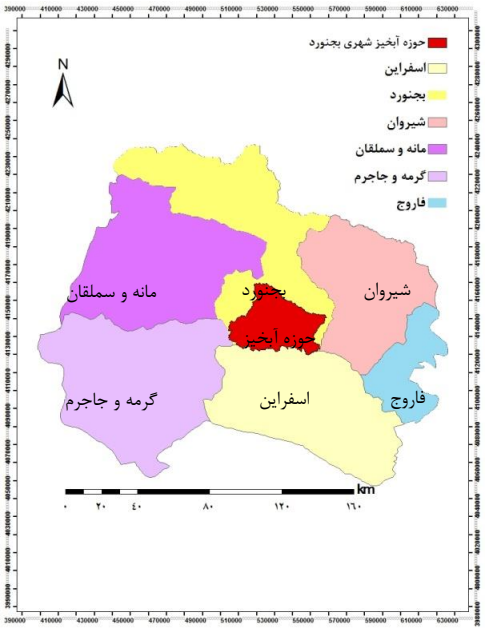
مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز شهری بجنورد (شکل ۱) با اقلیم نیمه‌خشک و متوسط بارندگی ۲۹۵ میلی‌متر و با مساحت ۱۲۳۸/۷ کیلومتر مربع و در داخل دشت ناودیسی بجنورد در محدوده زون کپه‌داغ در جهت شمال غرب–جنوب شرق امتداد یافته است. از مهمترین رودخانه‌های این حوزه آبخیز می‌توان به رودخانه فیروزه، درصوفیان و چناران اشاره داشت که عمده سیلاب‌های آن از مسیر کال پسته و ملکش وارد محدوده شهری بجنورد می‌شود (Izanloo و Solaimani، ۲۰۱۴). شیب عمومی حوزه آبخیز از یک تا پنج درصد متغیر بوده، دبی بیشینه لحظه‌ای رودخانه‌های فیروزه، درصوفیان و چناران با استفاده از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا به‌ترتیب ۱۹۱، ۱۲۰ و ۱۸۸ متر مکعب بر ثانیه در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله گزارش شده است. سازندهای زمین‌شناسی حوزه آبخیز از تراس‌های آبرفتی قدیم و جدید نئوژن کواترنری، ماسه‌سنگ و مارن شمشک و آهک‌های اربیتولین‌دار کرتاسه تیرگان و شوریجه و سنگ آهک ضخیم مزدوران ژوراسیک تشکیل شده است. دشت بجنورد از خاک‌های آبرفتی با بافت‌های متنوع لسی، رسی، شنی و رسی شنی تشکیل شده است. حداقل ارتفاع در خروجی حوزه آبخیز و در محل ایستگاه هیدرومتری باباامان ۸۱۱ متر و بیشینه ارتفاع در قله سالوک ۲۶۷۰ متر از سطح دریا است.

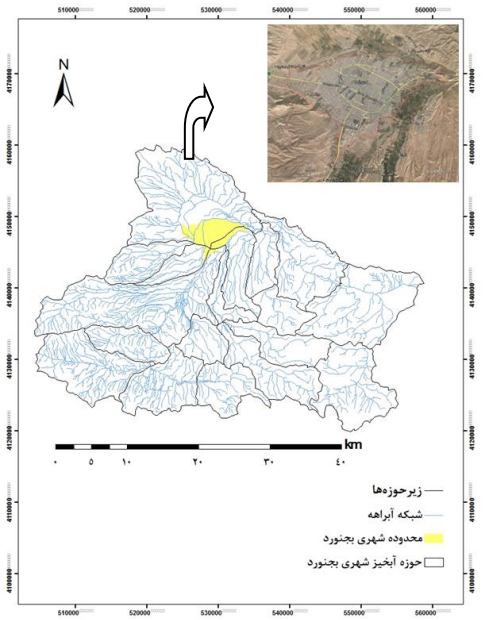
محدوده قانونی شهر بجنورد (شکل ۲) با جمعیتی بیش از ۲۰۰ هزار نفر و با مساحت ۲۷/۱۱ کیلومتر مربع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز واقع شده است. جهت کلی شیب شهر از سمت جنوب غرب و جنوب به سمت شمال غرب و شمال است. بافت شهری بجنورد در سال‌های مختلف دچار دگرگونی‌های زیادی شده و در طی مراحل توسعه ادواری خود بر مساحت آن افزوده شده است که منجر به تغییر کاربری اراضی در این محدوده و افزایش پتانسیل سیلخیزی آن شده است (Izanloo و Solaimani، ۲۰۱۴).

ابنیه اصلی و مهم شهر همچون مجتمع‌های دانشگاهی و بیمارستان‌ها در بخش جنوبی شهر، مناطق تاریخی در مرکز شهر، استادیوم ورزشی و فرودگاه بجنورد در شمال و شمال غرب محدوده شهر و همچنین، شهرک‌های صنعتی در غرب شهر واقع شده‌اند. بیشترین میزان ترافیک در خیابان‌های طالقانی و امام خمینی و بلوار نیروگاه است که در جهت شرقی-

غربی گسترش یافته‌اند و از مرکز ثقل شهر عبور می‌کنند (Kazemian و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز شهری بجنورد در استان



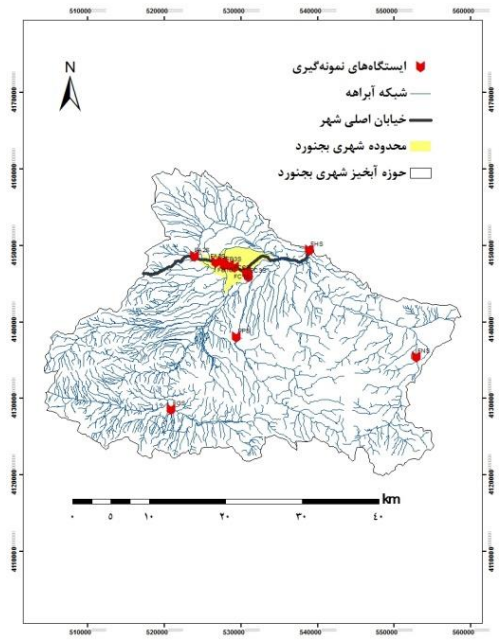
شکل ۲- موقعیت محدوده شهر بجنورد در حوزه آبخیز

روش پژوهش: در این مطالعه، برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی عناصر سنگین چسبیده به مواد معلق رواناب، با بررسی نقشه جامع شهر و شرایط طبیعی حوزه آبخیز، محل سایت‌های نمونه‌گیری (جدول ۱) به شکل تصادفی سامانه اتیک مشخص و با دستگاه GPS (شکل ۳) ثبت شد (Biasiolia و همکاران، ۲۰۰۶).

تعداد نه سایت نمونه‌گیری در نواحی صنعتی، فضای مسکونی و تجاری شهر و فضای مسکونی باز و بایر (Brown و Peake، ۲۰۰۶)، در محدوده شهر بجنورد از سطوح نفوذناپذیر کانال‌های زهکشی مربوط به سطح خیابان‌ها و شبکه معابر، مسیل‌های موجود در شهر و در نهایت پشت بام ساختمان‌ها (Mendez و همکاران، ۲۰۱۱) و سه سایت نمونه‌گیری در مهمترین رودخانه‌های حوزه آبخیز و در بالادست شهر بجنورد به نام‌های رودخانه فیروزه در موقعیت روستای گریوان، رودخانه درصوفیان در موقعیت روستای پاقلعه و رودخانه چناران در موقعیت روستای نوده و همچنین، یک سایت نمونه‌گیری در خروجی حوزه آبخیز شهری و در محل ایستگاه هیدرومتری باباامان مشخص شد. در نهایت، ۵۲ نمونه رواناب در طی دو رگبار و در دو فصل (Soller و همکاران، ۲۰۰۵) پاییز ۹۴ و بهار ۹۵ پس از وقوع بارش و جاری شدن رواناب شهری و جریان سیلابی رودخانه‌ها، نمونه‌گیری لحظه‌ای انجام شد.

لازم به ذکر است، کلیه وسایل و ظروف نمونه‌برداری قبل از نمونه‌گیری و برای جلوگیری از آلودگی بیرونی، مورد عمل اسیدشویی با اسید نیتریک ۱۰ درصد قرار گرفته و با آب مقطر شستشو شدند. پس از مشخص کردن زمان و مکان نمونه‌ها بر روی بطری‌ها، نمونه‌های جمع‌آوری شده در بطری‌های پلاستیکی (PVC) ۲۰۰ میلی‌لیتری با اسید نیتریک ۶۵ درصد به مقدار شش میلی‌لیتر (BenSalem و همکاران، ۲۰۱۴)، برای جلوگیری از ته‌نشینی فلزات سنگین، اسیدی شده (pH کمتر از دو) و در یخدان و در دمای کمتر از چهار درجه سانتی‌گراد، به آزمایشگاه منتقل شدند. برای صاف کردن نمونه‌های رواناب، از کاغذ صافی واتمن ۰/۴۵ میکرومتر استفاده شد تا رسوبات معلق از مواد محلول رواناب جدا شود (Ciszewski، ۲۰۰۱). پس از خشک شدن رسوبات معلق در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت، رسوبات معلق با ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم گرم توزین شد (Kiani Harchegani و Sadeghi، ۲۰۱۳). پس از توزین رسوبات، برای هضم شیمیایی نمونه‌های رسوب، بازای هر یک گرم رسوب، ۱۵ میلی‌لیتر مخلوط دو به یک اسید نیتریک غلیظ و اسید کلریدریک را با احتیاط به نمونه‌ها اضافه کرده، پس از

گذشت دست‌کم ۱۲ ساعت به‌منظور انجام عمل هضم مقدماتی در دمای اتاق، نمونه‌ها برای هضم کامل بر روی دستگاه صفحه داغ در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و به‌مدت سه ساعت قرار گرفت (BenSalem و همکاران، ۲۰۱۴). سپس، با استفاده از هاون چینی و اضافه کردن دو میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد و حل‌کردن نمونه‌های رسوب و کاغذ و عبور مجدد از کاغذ صافی و به‌دست آمدن محلول تقریباً شفاف (عصاره‌گیری)، در نهایت، نمونه‌ها را با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده، تا زمان تزریق به دستگاه جذب اتمی در دمای کمتر از چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. کلیه عملیات مذکور در آزمایشگاه آب و فاضلاب شهری بجنورد انجام گرفت. سپس، غلظت فلزات سنگین سرب و روی موجود در عصاره به‌دست آمده و فلزات سنگین محلول در رواناب، با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی مدل SHIMADZO ساخت ژاپن به‌ترتیب به روش کوره گرافیت و شعله در محل آزمایشگاه آب و فاضلاب روستایی مشهد و مقادیر فلز مس با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل GBC ساخت استرالیا به روش کوره گرافیت در آزمایشگاه پارک علم و فناوری مشهد بر حسب ppb اندازه‌گیری شد (Franz و همکاران، ۲۰۱۴). از میانگین داده‌های دو رگبار ۹۴/۷/۲۵ و ۹۴/۸/۹ مقادیر متوسط داده‌های پاییز ۹۴ به‌دست آمد و از میانگین داده‌های دو رگبار ۹۵/۱/۲۸ و ۹۵/۲/۳۱ مقادیر متوسط داده‌های بهار ۹۵ به‌دست آمد. با استفاده از نرم‌افزار SPSS، توزیع نرمالیتی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های غیرنرمال به روش تبدیل سینوسی (NazeriTahrudi و همکاران، ۲۰۱۴) نرمال شدند و در محاسبه‌های بعدی از تبدیل داده‌ها استفاده شد.



شکل ۳- موقعیت سایت‌های نمونه‌گیری در حوزه آبخیز شهری

جدول ۱- مختصات جغرافیایی (UTM) سایت‌های نمونه‌گیری رواناب

ردیف	نمونه	موقعیت نمونه‌گیری	کد نمونه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	رواناب رودخانه فیروزه	روستای گریوان	FGS	۵۲۰۹۰۷	۴۱۲۸۶۱۸
۲	روناب رودخانه درصوفیان	روستای پاقلعه	FPS	۵۲۹۳۸۸	۴۱۳۸۰۹۶
۳	رواناب رودخانه چناران	روستای نوده	FNS	۵۵۲۸۵۰	۴۱۳۵۴۳۰
۴	رواناب پشت بام در ناحیه صنعتی	خیابان هجرت	FA1S	۵۲۷۶۰۱	۴۱۴۷۹۳۱
۵	رواناب معابر در ناحیه صنعتی	ورودی شهرک صنعتی	FA2S	۵۲۳۹۷۲	۴۱۴۸۶۱۱
۶	رواناب مسیل در ناحیه صنعتی	مسیل پسته (چهار راه دوبرار)	FA3S	۵۲۶۶۹۸	۴۱۴۷۸۵۶
۷	رواناب پشت بام در ناحیه مسکونی و تجاری	میدان فردوسی	FB1S	۵۲۸۵۲۷	۴۱۴۷۴۴۲
۸	رواناب معابر در ناحیه مسکونی و تجاری	میدان کارگر	FB2S	۵۲۹۱۸۵	۴۱۴۷۲۴۰
۹	رواناب مسیل در ناحیه مسکونی و تجاری	مسیل ملکش (پارک آفرینش)	FB3S	۵۲۷۸۴۷	۴۱۴۷۴۷۰
۱۰	رواناب پشت بام در ناحیه فضای مسکونی باز	خیابان پردیس	FC1S	۵۳۰۷۲۵	۴۱۴۶۵۸۰
۱۱	رواناب معابر در ناحیه فضای مسکونی باز	خیابان ولیعصر	FC2S	۵۳۰۷۴۷	۴۱۴۶۳۸۱
۱۲	رواناب مسیل در ناحیه فضای مسکونی باز	مسیل صندل‌آباد	FC3S	۵۳۰۹۳۷	۴۱۴۵۹۱۹
۱۳	رواناب رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری	پارک باباامان	FHS	۵۳۸۹۰۱	۴۱۴۹۴۱۰

نتایج و بحث

در جداول ۲ و ۳ به‌ترتیب آمار توصیفی پارامتر وزن رسوبات معلق و غلظت عناصر سنگین موجود در عصاره حاصل از هضم شیمیایی رسوبات معلق موجود در رواناب پاییز ۹۴ و بهار ۹۵ آمده است.

نتایج حاصل از مطالعه نشان می‌دهد که مقدار پارامتر بیشینه وزن رسوبات معلق در فصل پاییز ۱۱۰۱/۲۵ میلی‌گرم در لیتر واقع در میدان کارگر FB2S و در فصل بهار ۱۵۷۰۸/۷۵ میلی‌گرم در لیتر واقع در مسیل صندل‌آباد FC3S است (جدول ۲).

جدول ۲- آمار توصیفی وزن رسوبات معلق در نمونه‌های رواناب برحسب میلی‌گرم در لیتر

زمان نمونه‌گیری	چولگی	انحراف معیار	میانه	میانگین	بیشینه	کمینه	تعداد
پاییز ۹۴	۱/۷۷	۲۶۹/۳۹	۳۰۹/۲۵	۴۰۷/۱۹	۱۱۰۱/۲۵	۱۹۳	۱۳
بهار ۹۵	۱/۶۹	۵۳۹۸/۷۰	۸۶۳/۲۵	۳۵۸۹/۱۷	۱۵۷۰۸/۷۵	۱۱۵/۷۵	۱۳

جدول ۳- آمار توصیفی فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق رواناب

زمان نمونه‌گیری	عنصر(ppb)	چولگی	انحراف معیار	میانه	میانگین	بیشینه	کمینه	تعداد
	Pb	۳/۵۷	۱۱۶۱/۳۶	۲۰۵	۴۹۰/۸۵	۴۳۴۵/۲	۹/۹	۱۳
پاییز ۹۴	Zn	۲/۲۶	۲۶۴/۳۷	۵۸۸	۶۴۸/۷۷	۱۴۱۲	۳۸۲	۱۳
	Cu	۱/۰۵	۱۱۹/۴۹	۱۴۲	۱۷۶/۰۲	۴۳۴	۴۱/۴	۱۳
	Pb	۱/۹۵	۳۳۰/۰۲	۵۰/۲	۲۰۵/۰۵	۹۴۳/۶	۱۰	۱۳
بهار ۹۵	Zn	۱/۴۸	۸۰۰/۹۶	۷۰۴	۱۰۶۳/۵۴	۲۹۴۶	۴۴۲	۱۳
	Cu	۱/۵۱	۱۹۷/۹۳	۱۶۸	۲۱۸/۰۱	۶۸۴	۵۱/۴	۱۳

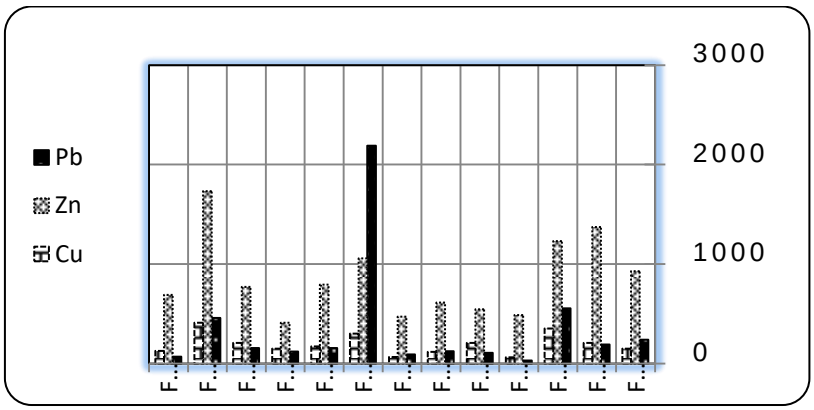
همچنین، بیشینه آلودگی فلزات روی و مس چسبیده به رسوبات معلق به‌جز سرب، در فصل بهار بیشتر از پاییز است (جدول ۳). این در حالی است که در تحقیق حاضر بیشینه غلظت فلزات سرب، روی و مس محلول در رواناب در فصل پاییز بیشتر از بهار است (جدول ۴). تغییرات زمانی مقادیر فلزات، به‌وسیله BenSalem و همکارانش (۲۰۱۴) نیز به اثبات رسیده است. از طرفی، نتایج حاکی از آن است، مقدار بیشینه غلظت فلزات سرب، روی و مس چسبیده به رسوبات معلق بیشتر از فلزات محلول در رواناب است (جدول ۴). نتایج اخیر به‌وسیله Parvinnnia و همکاران (۲۰۰۹) به اثبات رسیده است. در مطالعات Kiani Harchegani و Sadeghi (۲۰۱۳) نیز بیان شده است که انتقال فلزات سنگین همراه رسوبات معلق ارتباط بسیار معنی‌داری با توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق در مقیاس مکانی دارد.

جدول ۴- بیشینه غلظت فلزات محلول در رواناب (ppb)

	Cu	Zn	Pb
پاییز ۹۴	۱۵۲	۳۹۴	۴۳/۶
بهار ۹۵	۵۰/۵	۱۹۱	۳۱/۵

با توجه به مطالعاتی که بر روی مقادیر غلظت فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق موجود در رواناب حوزه آبخیز شهری بجنورد صورت گرفت، نتایج نشان می‌دهد که مقدار میانگین غلظت سرب بر حسب ppb در میدان کارگر (FB2S=۲۱۹۰/۴)، رودخانه چناران در موقعیت روستای نوده (FNS=۵۵۶/۶) و مسیل صندل‌آباد (FC3S=۴۶۰/۹۵) دارای بیشترین مقدار است. مقدار میانگین روی بر حسب ppb در مسیل صندل‌آباد (FC3S=۱۷۳۴)، رودخانه درصوفیان در موقعیت روستای پاقلعه (FPS=۱۳۷۴)، رودخانه چناران در موقعیت نوده (FNS=۱۲۳۴) و میدان کارگر (FB2S=۱۰۵۸) دارای بیشترین مقدار است. همچنین، مقدار میانگین مس بر حسب ppb در مسیل صندل‌آباد (FC3S=۴۱۳)، رودخانه چناران در موقعیت روستای نوده (FNS=۳۵۶/۲) و میدان کارگر (FB2S=۳۰۴/۵) دارای بیشترین مقدار است. این در حالی است که مقادیر فلز سرب و مس بر حسب ppb در نواحی پشت بام ساختمان در خیابان هجرت به‌ترتیب ۳۴/۱ و FA1S=۶۴/۳ و مقادیر روی در نواحی پشت بام ساختمان در خیابان پردیس (FC1S=۴۱۲)

دارای کمترین مقدار است. مقدار میانگین غلظت فلزات سرب، روی و مس در ایستگاه هیدرومتری باباامان بر حسب ppb به‌ترتیب ۷۲/۷، ۶۹۴ و ۱۳۰ بوده است (شکل ۴).



شکل ۴- میانگین غلظت فلزات سرب، روی و مس بر حسب ppb در ایستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در رسوبات معلق رواناب

پس از بررسی همگنی واریانس عناصر با استفاده از آزمون لون[1] (SobhaniLari، ۲۰۰۹) و ناهمگن بودن داده‌ها برای عناصر سرب، روی و مس، با انجام آزمون ناپارامتریک کروسکال والیس[2] (SobhaniLari، ۲۰۰۹) مشخص شد که اختلاف میانگین سرب، روی و مس در نمونه‌ها اختلاف معنی‌داری نیست.

در نهایت، می‌توان گفت که از نظر مکانی غلظت فلزات روی و مس چسبیده به رسوبات معلق رواناب، در مناطقی همچون مسیل صندل‌آباد (FC3S) و بالادست حوزه آبخیز همچون رودخانه‌های چناران، درصوفیان و فیروزه در مواقع سیلابی بیشتر بوده است. به‌دلیل این‌که نمونه‌ها پس از بارندگی و وقوع سیلاب تهیه شده و نظر به این‌که در این شرایط مقدار بار رسوبی بالا است و به‌تبع آن، تمایل حضور فلزات سنگین به شکل چسبیده به رسوبات معلق و غیرمحلول بیشتر از محلول سیلاب‌ها است.

این در حالی است که در خصوص عنصر سرب، رفتار متفاوتی داشته، در نواحی مسکونی و تجاری و در نمونه‌های معابر و شبکه انهار (FB2S) مقدار غلظت آن بیشتر بوده است. این امر ممکن است، ناشی از تردد بالای خودروها در داخل محدوده شهری باشد. لکن، تفاوت مکانی داده‌ها برای فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق از نظر آماری معنی‌دار نیست.

تجزیه و تحلیل همبستگی: نتایج حاصل از تحلیل ضرایب همبستگی غلظت فلزات سنگین سرب، روی و مس با استفاده از روش پیرسون در جدول ۵ در نمونه‌های فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق رواناب پاییز ۹۴ و بهار ۹۵ آمده است. همبستگی بالا به معنی ورود مشترک آلاینده از یک منبع مشترک، وابستگی متقابل و رفتار یکسان در طول حمل و نقل است. مقادیر نزدیک به صفر بیانگر عدم ارتباط بین دو متغیر است و مقادیر منفی نشان‌دهنده ارتباط معکوس بین آن‌ها است. نتایج حاکی از آن است که همبستگی مثبت اما پایین، بین عنصر سرب و روی (r=۰/۱۶۶)، همبستگی منفی بین عنصر سرب و مس (r=-۰/۲۰۶) و همبستگی منفی بین عنصر روی و مس (r=-۰/۱۰۹) در نمونه‌های پاییز ۹۴ وجود دارد و نشان از منشاء آلودگی متفاوتی است. این در حالی است که در فصل بهار ۹۵ نیز، همبستگی مثبت اما پایین، بین عنصر سرب و مس (r=۰/۲۷۱)، همبستگی مثبت اما پایین، بین عنصر روی و مس (r=۰/۱۳۲) و همبستگی منفی بین سرب و روی (r=-۰/۴۳۳) برقرار است و نشان از تغییرات زمانی همبستگی عناصر علاوه بر منشاء متفاوت آلودگی‌ها است.

تحلیل خوشه‌ای: تجزیه و تحلیل خوشه‌ای یکی از مهمترین روش‌ها، برای طبقه‌بندی منابع محتمل آلودگی به فلزات سنگین است (Mico و همکاران، ۲۰۰۶). این روش یک ابزار میان‌بر برای تحلیل داده‌ها

[1] Leven
[2] Kruskal Wallis

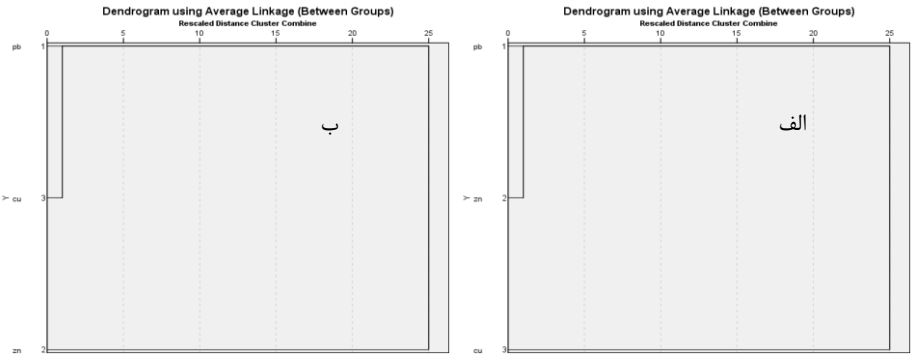
است که هدف از خوشه‌بندی داده‌ها آن است که مشاهدات را به گروه‌های متجانس تقسیم می‌کند، به‌طوری‌که مشاهدات هر گروه بیشترین شباهت و مشاهدات گروه‌های مختلف کمترین شباهت را با هم داشته باشند. در این تحقیق، از تحلیل خوشه‌ای به روش سلسله مراتبی استفاده شد (Rastmanesh و همکاران، ۲۰۱۵). دندروگرام تحلیل خوشه‌ای غلظت فلزات سنگین نشان می‌دهد که در فصل پاییز ۹۴، عناصر سرب و روی دارای رابطه مثبتی هستند (شکل ۵- الف). این در حالی است که در فصل بهار ۹۵، عناصر سرب و مس دارای رابطه مثبتی هستند (شکل ۵- ب). لازم به ذکر است، نتایج تحلیل خوشه‌ای با نتایج ضریب همبستگی پیرسون مطابقت دارد و نشان می‌دهد که عناصر دارای رابطه نزدیک‌تر، دارای عوامل کنترلی یکسان و معنی‌داری هستند. در مطالعه دندروگرام تحلیل خوشه‌ای فلزات سنگین رسوبات ساحلی جزیره هرمز به‌وسیله Gholamdokht و Rezaie (۲۰۱۵)، فلزات سرب، روی و مس در یک شاخه قرار گرفته و منشاء آن را انسانی بیان کرده‌اند. همچنین، تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی انجام شده برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری مورد اشاره نیز در جدول ۱، حاکی از آن است که دندروگرام فصل پاییز از دو شاخه اصلی تشکیل شده است و سایت‌های نمونه‌گیری دو تا ۱۳ در یک شاخه قرار گرفته است و سایت یک، به تنهایی در شاخه مجزای دیگری است (شکل۶- الف). از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که دندروگرام فصل بهار نیز از دو شاخه تشکیل شده است و سایت‌های نمونه‌گیری یک، دو، چهار، هفت، نه، ۱۰ و ۱۱ در یک شاخه بوده، سایر سایت‌ها شامل سه، پنج، شش، هشت، ۱۲ و ۱۳ در شاخه دیگر قرار دارند (شکل۶- ب). لذا، می‌توان بیان کرد که ایستگاه‌هایی که در یک شاخه قرار گرفته‌اند، دارای عملکرد مشابه بوده‌اند.

جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون غلظت فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق رواناب

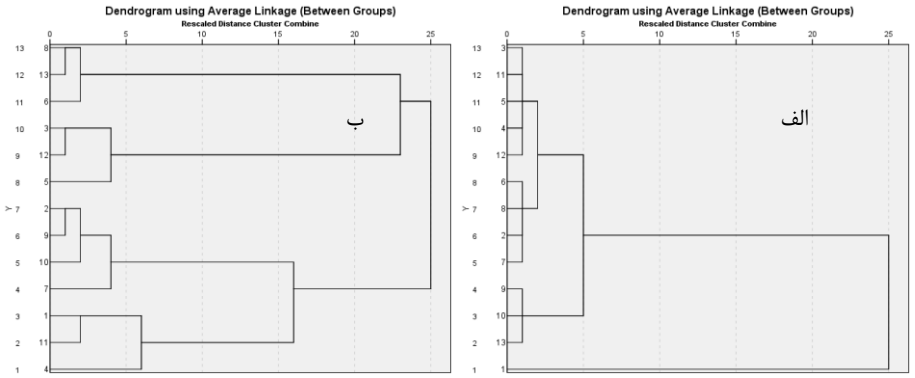
		Pb	Zn	Cu
پاییز ۹۴	Pb	۱		
	Zn	۰/۱۶۶	۱	
	Cu	-۰/۲۰۶	-۰/۱۰۹	۱
		Pb	Zn	Cu
بهار ۹۵	Pb	۱		
	Zn	-۰/۴۳۳	۱	
	Cu	۰/۲۷۱	۰/۱۳۲	۱

نتیجه‌گیری

مقادیر غلظت فلزات سنگین چسبیده به مواد معلق سیلاب‌ها، در حوزه‌های آبخیز شهری بیشتر از عناصر سنگین محلول در سیلاب‌ها است. مقدار این عناصر در نواحی مختلف حوزه‌های آبخیز شهری متفاوت بوده اما مقدار غلظت عنصر سرب چسبیده به رسوبات معلق سیلاب در محدوده شهری بیشتر از سایر سطوح حوزه آبخیز است. این رفتار سرب متفاوت از رفتار سایر فلزات سنگین همچون روی و مس است. می‌توان گفت، رفتار سرب ناشی از ترافیک شهری و تردد بالای خودروها در ایجاد آلودگی‌ها است. از نظر زمانی غلظت فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق روی و مس به‌جز سرب در فصل بهار بیشتر از پاییز است. روند کاهشی میانگین غلظت این عناصر در فصل پاییز Zn>Pb>Cu و در فصل بهار Zn>Cu>Pb است.



شکل ۵- دندروگرام تحلیل خوشه‌ای غلظت فلزات سنگین چسبیده به رسوبات معلق فصل پاییز (الف) و فصل بهار (ب)



شکل ۶- دندروگرام تحلیل خوشه‌ای ایستگاه‌های اندازه‌گیری مربوط به غلظت فلزات رسوبات معلق در فصل پاییز (الف) و بهار (ب)

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از زحمات و حمایت مسئولین و کارشناسان آزمایشگاه‌های آب و فاضلاب شهری بجنورد، آب و فاضلاب روستایی مشهد و پارک علم و فناوری مشهد تقدیر و تشکر می‌کنند.

منابع مورد استفاده

1. Alidadi, H., R. Peiravi, A.A. Dehghan, M. Vahedian, H. Moalemzade Haghighi and A.R. Amini. 2013. Survey of heavy metals concentration in Mashhad drinking water in 2011. Medical Sciences, 20(116): 27-34 (in Persian).
2. Ben Salem, Z., N. Capelli, X. Laffray, G. Elise, H. Ayadi and L. Aleya. 2014. Seasonal variation of heavy metals in water sediment and roach tissues in a landfill draining system pond (Etueffont, France). Ecological Engineering, 69: 25-37.
3. Biasiolia, M., R. Barberis and F. Ajmone-Marsan. 2006. The influence of a large city on some soil properties and metals content. Science of the Total Environment, 356: 154-164.
4. Brown, J.N. and B.M. Peake. 2006. Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban storm water runoff. Science of the Total Environment, 359: 145- 155.
5. Ciszewski, D. 2001. Flood-related changes in heavy metal concentrations within sediments of the Biała Przemsza River. Geomorphology, 40: 205-218.
6. Franz, C., F. Makeschin, H. Weib and C. Lorz. 2014. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment. Brasilia DF, Brazil, using the fingerprint approach. Science of the Total Environment, 466: 513-523.
7. Gallo, E.L., K.A. Lohse, P.D. Brooks, J.C. McIntosh, T. Meixner and J.E.T McLain. 2012. Quantifying the effects of stream channels on storm water quality in a semi-arid urban environment. Hydrology, 470: 98-110.
8. Gholamdokht Bandari, M. and P. Rezaie. 2015. Study of heavy metals contamination of coastal sediments of Hormoz Island and its origin. Oceanography, 6(22): 97-106 (in Persian).
9. Izanloo, H. and K. Solaimani. 2014. Investigating the impact of urban periodic development on urban flood generation capacity, case study: Bojnourd city of North Khorasan province center. The first National Conference on the Role of Urban Planning and Design on Urban Flood, Haraz University (in Persian).
10. Kiani Harchegani, M. and S.H.R. Sadeghi. 2013. Spatial variations of relationship between heavy metals transportation and particle size distribution of suspended sediments. Water and Soil Conservation, 20(1): 169-184 (in Persian).
11. Kiani Harchegani, M. and S.H.R. Sadeghi. 2011. Comparative analysis of heavy metals pollutant in urban and natural watersheds. 7th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering, Isfahan University of Technology (in Persian).
12. Mendez, C.B., J.B. Klenzendorf, B.R. Afshar, M.T. Simmons, M.E. Barrett, K.A. Kinney and M.J. Kirisits. 2011. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. Water Research, 45: 2049-2059.
13. Mico, C., L. Recatalá and J. Peris Mand Sánchez. 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of a European Mediterranean area by multivariate analysis. Chemosphere, 65: 863–872.
14. Mirzaei, M. and E. Solgi. 2015. Evaluation of heavy metals concentration (cadmium, copper, manganese, nickel, lead and zinc) in sediments of Zayandehrood River. Research in Environmental

Health, 1(4): 251-265 (in Persian).
15. Murakami, M., F. Nakajima and H. Furumai. 2007. The sorption of heavy metal species by sediments in soakaways receiving urban road runoff. Chemosphere, (73): 1-11.
16. Navarro, M.C., C. Pérez-Sirvent, M.J. Martínez-Sánchez, J. Vidal, P.J. Tovar and J. Bech. 2008. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals, a case study in a semi-arid zone. Geochemical Exploration, 96: 183-193.
17. Nazeri Tahrudi, M., K. Khalili, M. Abbaszade Afshar and Z. Nazeri Tahrudi. 2014. Compared to the normal mechanism becomes the normal monthly rainfall data from different regions of Iran. Water and Soil, 28(2): 365-372 (in Persian).
18. Parvinnia, M., G.R. Rakhshandehru and P. Monajjemi. 2009. Urban flood quality and sediments of heavy metal in Shiraz flood intake basin and investigate the performance of sorbent substances for reducing pollution. Environmental Studies, 35(49): 73-82 (in Persian).
19. Rastmanesh, F., A.R. Zarasvandi and M. Moslem. 2015. Evaluation of heavy metal pollution in surface sediments of Karun River in Ahvaz City. Advanced Applied Geology, 17: 11-22 (in Persian).
20. Shanbehzadeh, S., M. Vahid Dastjerdi, A. Hassanzadeh and T. Kiyanizadeh. 2013. Investigation of heavy metals in water and sediment on Massjed Soleyman Tembi River before and after of wastewater entrance. Health System Research, 9(10): 1108-1116 (in Persian).
21. Sobhani Lari, S. 2009. Parametric and nonparametric statistical trends of variance analysis in urban studies, case study: Lar City. Geography and Environmental Studies, 1(1): 70-112 (in Persian).
22. Soller, J., J. Stephenson, K. Olivieri, J. Downing and A.W. Olivieri. 2005. Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management. Environmental Management, 76: 309-318.
23. Zhao, H. and X. Li. 2013. Understanding the relationship between heavy metals in road-deposited sediments and wash off particles in urban stormwater using simulated rainfall. Hazardous Materials, 246: 267- 276.