

تأثیر ذرات رسوبی در حمل عناصر سنگین در بازه میانی رودخانه دز

محمود عرب‌خدری^{۱*}، فریدون سلیمانی^۲، سعید نبی‌بی لشکریان^۳، فریدون سلطانی^۴

۱ و ۳. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز

۴. سازمان آب و برق خوزستان، اهواز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۰۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۵/۱۸)

چکیده

این پژوهش با هدف پایش و شناسایی وضعیت رسوب معلق و عناصر سنگین حمل‌شده در قسمتی از رودخانه دز پایین‌تر از سد دز تا محل اتصال شطیپ و سهم جریانات ورودی از دو سرشاخه آن در استان خوزستان انجام گرفت. در مجموع، ۳۸ نمونه در سه زمان شامل یک دوره کم‌آبی و دو رویداد سیلاب از ایستگاه‌های دوکوهه روی بالارود، دهنوبافر روی کهنک و دزفول و حرمله روی دز برداشت شد. پس از جداکردن رسوب، تعدادی از نمونه‌ها به آزمایشگاه ارسال و عناصر سنگین با استفاده از دستگاه پلاسمای جفتی انتقالی اندازه‌گیری شد. نتایج بیان‌کننده آن است که هیچ‌یک از عناصر از دیدگاه کشاورزی آلاینده نیست؛ ولی از دیدگاه حفاظت محیط زیست، نمونه‌های رسوب معلق آنالیزشده از نظر سه فلز سنگین کروم، کبالت و نیکل به ترتیب با دامنه مقادیر ۸۸-۹۶، ۲۰-۲۲ و ۷۶-۹۱ قسمت در میلیون آلودگی داشتند. غلظت عناصر سنگین یادشده در ایستگاه پایاب حرمله بیش از سرشاخه‌ها بود که احتمالاً ناشی از ترسیب ذرات درشت‌تر رسوب بوده است. به‌عنوان نتیجه کلی می‌توان گفت که رسوب معلق بازه‌های بین ایستگاه دوکوهه تا حرمله و دهنوبافر تا حرمله از نظر سه فلز یادشده آلوده بوده‌اند.

کلیدواژگان: آلاینده‌های غیرنقطه‌ای، رسوب معلق، فلزات سنگین، مدیریت رسوب.

مقدمه

فلزات سنگین از مهم‌ترین ترکیبات آلوده‌کننده محیط زیست از جمله رودخانه‌ها محسوب می‌شوند. منشأ آلودگی آب‌های جاری را می‌توان به دو دسته نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تقسیم کرد [۱]. مقدار فلزات سنگین محلول با منشأ نقطه‌ای تابع مقدار زهاب‌ها و فاضلاب‌های ورودی است که انتظار می‌رود در مناطق پرجمعیت، که اصول حفاظت محیط زیست کمتر رعایت می‌شود، گسترده‌تر باشد. به‌طور مثال، باباپور مفرد و همکارانش [۲] پنج فلز سنگین Ni، Cd، Pb و Co و V موجود در آب ۱۷ ایستگاه منتخب از کارون و دز در دشت خوزستان تا ورود به دریا را در چهار فصل پایش کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد به‌طور کلی با حرکت به سمت پایین، عناصر یادشده روندی افزایشی دارند. این در حالی است که مقایسه چهار فلز سنگین در دو سرشاخه در مقایسه با ایستگاه پایین‌دست زاینده‌رود نشان‌دهنده کاهش غلظت آلاینده‌های محلول است [۳].

آلاینده‌های غیرنقطه‌ای ذرات خاک هستند که از سطح اراضی فرسایش می‌یابند [۴]. چنانچه خاک بدون پوشش گیاهی کافی باشد، در معرض فرسایش بادی و آبی قرار می‌گیرد و به مناطق دیگر منتقل می‌شود. فرسایش سطحی در سطح خاک و فرسایش شیاری در عمق کمتر از ۳۰ سانتی‌متر رخ می‌دهد [۵]. اگرچه ذرات شسته‌شده خاک سطحی که به منابع آب وارد می‌شوند، به‌عنوان رسوب معلق مهم‌ترین آلاینده آب‌های جاری هستند، وجود آلودگی‌های مختلف مانند فلزات سنگین جذبی، خطرهای آنها را دوچندان می‌کند. عناصر سنگین که به سطح خاک اضافه می‌شوند، به‌دلیل جذب توسط ذرات ریز خاک، در لایه چند سانتی‌متری سطحی تجمع می‌کنند. رحمانی و همکارانش در پژوهشی [۶] ملاحظه کردند که بیشترین غلظت سرب در لایه پنج‌سانتی‌متری سطح خاک است. به‌عنوان مثالی دیگر، رادیوایزوتوپ‌های فلزی سنگین که از جو به سطح خاک می‌رسند، در عمق کمتر از ۳۰ سانتی‌متر از سطح خاک تثبیت می‌شوند [۷].

همبستگی زیاد بین محتوای لای و رس (اجزای کوچک‌تر از ۶۳ میکرومتر) رسوبات معلق و مقدار انتقال برخی از فلزات سنگین جذبی در رودخانه کجور توسط کیانی هرچگانی و صادقی [۸] اثبات شده است که تأییدکننده تأثیر ذرات ریز خاک در جذب این عناصر است. رجب‌زاده سکه و

سعیدی [۹] قدرت رسوبات تهیه‌شده از چند ایستگاه در مسیر رودخانه جاجرود برای جذب سه فلز سنگین کادمیوم، مس و روی را در شرایط آزمایشگاهی ارزیابی کردند. در این پژوهش رسوبات حاوی مواد آلی، قدرت جذب بیشتری داشتند که نشان‌دهنده اثر سطح ویژه بر جذب است. صادقی و همکارانش [۳] سهم آب و رسوب معلق در حمل فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل و کروم را در سه ایستگاه روی رودخانه زاینده‌رود بررسی و ملاحظه کردند که بیشتر این فلزات به‌صورت جذب مواد معلق حمل می‌شوند و سهم حمل به‌صورت محلول برای چهار فلز یادشده حدود ۵ تا ۳۰ درصد مقادیر حمل‌شده با ذرات رسوب است. در پژوهشی دیگر، Sadeghi و همکارانش [۱۰] مقدار فلز سنگین آهن محلول و جذبی در رودخانه کجور را بررسی کردند و نشان دادند مقدار آهن در رسوب تقریباً ۲۶ برابر مقدار آن در جریان بوده است. Alves و همکارانش [۱۱] نیز به‌چندبرابری غلظت فلزات سنگین در شکل ذره‌ای در مقایسه با حالت محلول تأکید کرده‌اند. Sadeghi و همکارانش [۱۰] مقدار چهار فلز سنگین آهن، نیکل، کروم و روی را در رسوب معلق رودخانه کجور در دبی‌های پایه و سیلابی بررسی کردند و در بیشتر موارد رابطه معناداری بین غلظت رسوب و مقدار فلزات سنگین به‌دست آمد. در این تحقیق مشخص شد غیر از نیکل، که غلظت آن در جریان‌های پایه دو برابر مقدار موجود در رسوب جریان‌های سیلابی بود، غلظت متوسط سه فلز دیگر در جریان‌های پایه و سیلابی تقریباً با هم مساوی‌اند. با این‌همه، از آنجا که بیشتر رسوب در دبی‌های سیلابی انتقال می‌یابد و جریان‌های پایه تأثیر کمی بر آن دارند [۱۲ و ۱۳]، می‌توان گفت که بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوب دوره‌های سیلابی اهمیت بیشتری دارد.

بخشی از ذرات رسوب معلق حاوی فلزات سنگین در مسیر آبراهه‌ها یا مخازن و دریاها نهشته می‌شوند و بستر را آلوده می‌کنند. فلزات سنگین محلول با منشأ نقطه‌ای نیز پس از ورود به یک منبع آبی به‌تدریج جذب رسوبات ریزدانه یا بقایای مواد آلی موجود در بستر می‌شوند [۱۴]. به این دلیل، بررسی آلودگی رسوبات بستر رودخانه، خور، دریاچه و دریاچه‌های آزاد مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار دارد و تعدادی در زمینه منشأ آلودگی تحقیق کرده‌اند. Sekabira و همکارانش [۱۵] آلودگی نمونه رسوبات بستر آبراهه Nakivubo در کلان‌شهر کامپالا، پایتخت اوگاندا، را از نظر

منطقه خوزستان از جمله دز [۱۹]، کارون [۲۰ و ۲۱] و اروندرود [۱۴] بوده است. مطابق گزارش‌های موجود [۲۲ و ۲۳]، دزفول و اندیمشک از مناطقی هستند که غلظت بیشتر برخی از فلزات سنگین در خاک اطراف آنها رؤیت شده است. آبی که از سد دز عبور می‌کند معمولاً زلال و بدون رسوب معلق است. در حالی که با حرکت به سمت پایین تا محل اتصال دو رودخانه دز و شطیپ بر گل‌آلودگی و غلظت رسوب معلق افزوده می‌شود [۲۴]. بخشی از این رسوب مربوط به ذرات معلق کنده‌شده از کنار و بستر رودخانه است. بخشی دیگر از مواد معلق در زمان سیلاب از فرسایش سطحی حوضه‌های فرعی تأمین می‌شود که در پایین دست دو شهر یادشده به رودخانه دز می‌ریزند. با توجه به اهمیت زیاد آلاینده‌های جذبی در مقایسه با محلول، هدف اصلی این پژوهش، تعیین غلظت عناصر سنگین در رسوبات معلق سرشاخه‌ها و رودخانه اصلی و شناسایی عناصر بیش از حد مجاز است. به علاوه، تغییرات غلظت عناصر در رودخانه اصلی در مقایسه با سرشاخه‌ها مقایسه و تحلیل خواهند شد.

مواد و روش‌ها

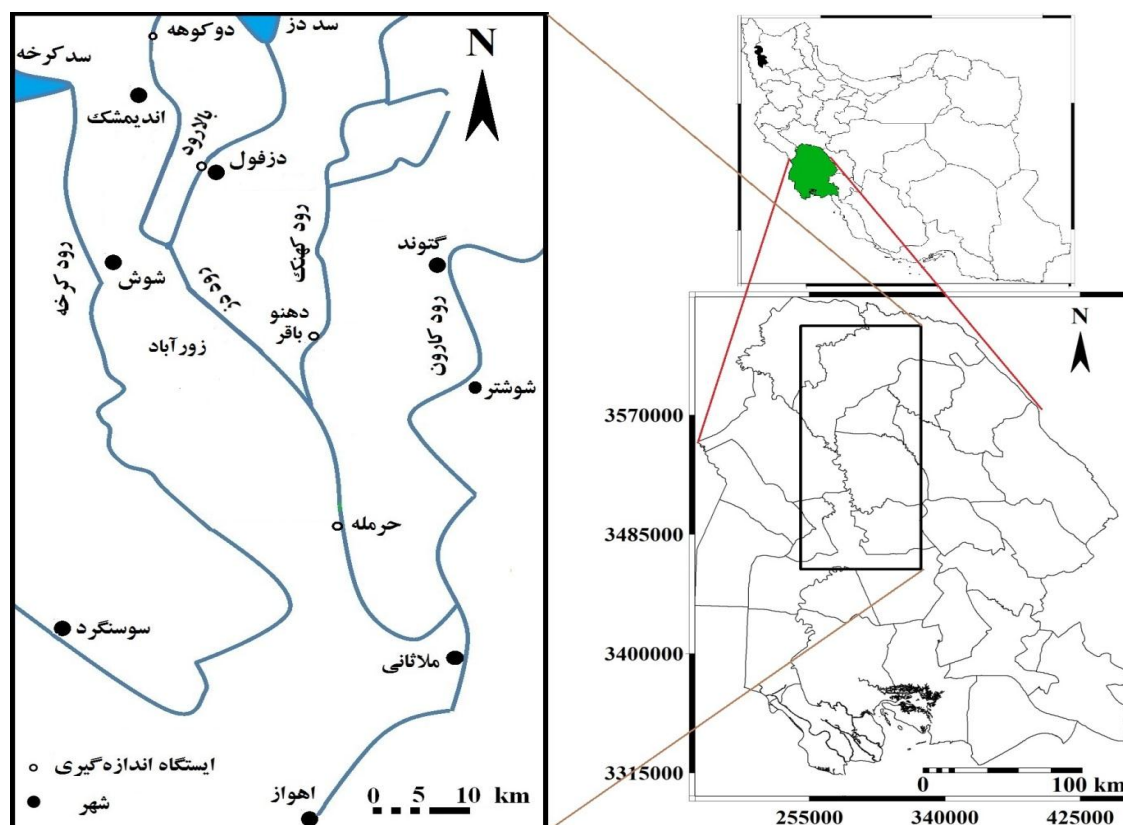
انتخاب منطقه: برای شناسایی اثر احتمالی فرسایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در بازه میانی رودخانه دز (پایین تر از سد دز تا قبل از اتصال به شطیپ)، دو سرشاخه مهم مشتمل بر بالارود و کهنک که پایین تر از سد دز و بالاتر از ملاثانی به رودخانه دز می‌ریزند (شکل ۱) انتخاب شدند که مساحت آبخیز آنها به ترتیب حدود ۷۷۵ و ۱۱۴۰ کیلومتر مربع است. بخش اعظم آبخیز این دو رودخانه را مناطق دشتی و تپه‌ماهوری تشکیل می‌دهد. رودخانه شطیپ در ملاثانی به دز متصل شده و کارون بزرگ تشکیل می‌شود. مطابق آمار گرفته‌شده از سازمان آب و برق خوزستان حدود سه هزار ایستگاه پمپاژ ثابت و متحرک در محدوده چهار شهرستان اندیمشک، دزفول، شوش و شوشتر وجود دارد که از رودخانه دز آبیگری می‌کنند. افزون بر ۹۰ درصد پمپ‌ها کاربری کشاورزی دارند و برای آبیاری بیش از ۶۰ هزار هکتار اراضی منطقه به کار می‌روند. باقی پمپ‌ها وظیفه تأمین آب شرب، استخرهای پرورش ماهی و صنایع مسیر این بازه را دارند.

وجود شش فلز سنگین با دو منشأ کارخانه و خودروها بررسی کردند. در این پژوهش مشخص شد که مقدار سرب، کادمیوم و روی به سمت پایین دست افزایش می‌یابد و بیش از حد مجاز است. مقدار عناصر یادشده در بستر این رودخانه قبل از ورود به شهر کمتر از حد مجاز اندازه‌گیری شد که نشانه اثر منابع نقطه‌ای در آلوده‌کردن رسوبات است. Shafie و همکارانش [۱۶] آلودگی رسوبات با فلزات سنگین بستر رود Langat مالزی به طول حدود ۱۲۰ کیلومتر از کوهستان تا دریا در ۲۲ نقطه را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بیشتر آلودگی‌ها در قسمت‌های پایین دست رودخانه در اسکله‌ها و مسیر حرکت کشتی تا اقیانوس تجمع دارد. Bagheri و همکارانش [۱۷] با نمونه‌برداری از رسوبات در ۱۰ نقطه در بستر سرشاخه‌ها و رود اصلی گرگان‌رود، وضعیت آلودگی فلزات سنگین را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که آلودگی‌ها سه منشأ شهری، کشاورزی و صنعتی دارند. Dadolahi Sohrab و Nazarizadeh Dehkordi [۱۸] با نمونه‌برداری از رسوب بستر دریا در نه سایت واقع در نوار نزدیک ساحل در استان هرمزگان محتوی چهار آلاینده فلزی مشتمل بر سرب، کادمیوم، نیکل و مس را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد برخی از سایت‌ها آلوده و برخی غیرآلوده‌اند و از نظر ترتیب اهمیت، سرب، نیکل، مس و کادمیوم قرار دارند. به‌علاوه، بررسی فصلی نمونه‌ها، بیان‌کننده بیشتر بودن غلظت آلاینده‌ها در دو فصل گرم‌تر بهار و تابستان است. خیرور و دادالهی سهراب [۱۴] درباره چهار فلز سنگین در رسوبات بستر اروندرود تحقیق کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میزان سرب، نیکل و کادمیوم در رسوب، بیشتر از استانداردهای جهانی است. Alves و همکارانش [۱۱] آلودگی رسوبات بستر رود Ave و شش سرشاخه آن در پرتغال را پس از مدیریت ورود آلاینده‌ها بررسی کردند و دریافتند که در مقایسه با ارقام ثبت‌شده در پژوهش پیشین، آلاینده‌ها روند نزولی قابل توجهی داشته‌اند و در حال حاضر فقط دو عنصر کروم و روی تا حدی از آستانه بالاترند.

ترکیبات رسوبات اهمیت زیادی در محیط‌های آبی دارند و بر حیات آبزیان تأثیر می‌گذارند [۱۸]. فلزات سنگین موجود نهشته‌شده در بستر مستقیم یا غیرمستقیم (از طریق بی‌مهرگان کف‌زی) به ماهی‌ها انتقال می‌یابد [۱۴]. ارتباط آلودگی رسوبات و تجمع آلودگی در بدن ماهی‌ها مورد توجه پژوهشگران متعددی در رودخانه‌های

ایستگاه حرمله روی رودخانه دز بالاتر از محل اتصال شطیپ و دز به‌عنوان نماینده محل‌های مصرف آب شرب و کشاورزی در نظر گرفته شد (شکل ۱ و جدول ۱).

سه ایستگاه آب و رسوب‌سنجی مشتمل بر دزفول روی دز، ایستگاه دوکوهه روی بالارود و دهنوبافر روی رودخانه کهنک در بالادست به‌عنوان مقاطع ورودی رسوب و



شکل ۱. نقشه موقعیت رودها و ایستگاه‌های اندازه‌گیری در منطقه مطالعه‌شده

مخزنی دز و سد تنظیمی دزفول است و انتظار نمی‌رود که در شرایط عادی تغییرات زیادی در غلظت آن ایجاد شود. نمونه‌برداری در ایستگاه حرمله: با اندازه‌گیری فواصل دو ایستگاه دوکوهه و دهنوبافر با ایستگاه پایاب حرمله، فاصله زمانی جریان از ایستگاه‌های یادشده تا حرمله به ترتیب حدود ۳۱ و شش ساعت به‌دست آمد. سپس، با توجه به وضعیت وقوع سیلاب در ایستگاه‌های دوکوهه و دهنوبافر، برنامه نمونه‌برداری حرمله با فواصل مساوی طوری تنظیم شد که تعداد نمونه از پنج مورد تجاوز نکند. آماده‌سازی نمونه‌های رسوب: با توجه به برنامه، ۳۸ نمونه به شرح جدول ۲ تهیه شد. پس از برداشت نمونه‌ها و الصاق برچسب اطلاعات لازم (محل نمونه‌برداری، تاریخ نمونه‌برداری، ساعت و دقیقه نمونه‌برداری، ثبت اشل، ثبت دما و اسیدیتته جریان و وضعیت دبی سیلابی یا پایه)، در آزمایشگاه به روش استاندارد غلظت رسوب تعیین شد [۲۵].

نمونه‌برداری: مسئولیت پایش و نمونه‌برداری به تیمی از متصدیان چهار ایستگاه زیر نظر یک هماهنگ‌کننده واگذار شد. نمونه‌برداری زمان کم‌آبی در دوره بدون بارش انجام گرفت. نمونه‌برداری بین دو سیلاب (بر اساس اطلاعات پیش‌بینی وقوع بارش از سازمان آب و برق خوزستان) به شرح زیر طراحی شد.

نمونه‌برداری در ایستگاه‌های دوکوهه و دهنوبافر: نمونه‌برداری از ابتدای بالارفتن اشل و گل‌آلود شدن جریان شروع شد و با فاصله زمانی دو ساعت، تا پایان سیل یا حداکثر هفت نمونه (معادل ۱۲ ساعت، زمان تقریبی پایه^۱ هیدروگراف سیل در این دو ایستگاه) ادامه یافت.

نمونه‌برداری در ایستگاه دزفول: هم‌زمان با سیل بالارود ولی هر چهار ساعت یک‌بار (در مجموع سه نمونه) انجام گرفت. توضیح آنکه، این ایستگاه کاملاً تحت تأثیر سد

1. Base time

جدول ۱. برخی مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه‌شده و داده‌های موجود از دبی روزانه و اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق

ردیف	رودخانه	ایستگاه	کد	طول جغرافیایی (دقیقه درجه)	عرض جغرافیایی (دقیقه درجه)	سال تأسیس	سال‌های آماره موجود	تعداد اندازه‌گیری روزانه جریان	سال‌های آماره موجود	تعداد سال‌های آماره موجود	اندازه‌گیری غلظت
۱	دز	دزفول	۲۱۲۹۹	۴۸ ۲۴	۳۲ ۲۴	۱۳۳۰	۶۱	۲۰۳۸۷	۳۶	۶۲۳	
۲	دز	حرمه	۲۱۳۰۳	۴۸ ۳۳	۳۱ ۵۷	۱۳۴۲	۴۹	۱۷۵۷۶	۱۷	۳۱۳	
۳	بالارود	دوکوهه	۲۱۴۵۳	۴۸ ۱۷	۳۲ ۳۵	۱۳۶۲	۳۰	۹۲۲۲	۱۷	۲۴۹	
۴	کهنک	دهنوبافر	۲۱۴۵۵	۴۸ ۳۵	۳۲ ۰۲	۱۳۶۳	۲۸	۹۲۳۳	۱۷	۲۵۱	

جدول ۲. تعداد نمونه‌های برداشت‌شده و تاریخ شروع نمونه‌برداری به تفکیک ایستگاه‌های مطالعه‌شده

ایستگاه	دبی پایه ۱۳۹۲/۰۸/۰۴	سیل اول ۱۳۹۲/۰۸/۲۹	سیل دوم ۱۳۹۲/۰۹/۲۲	جمع	محدوده دما (°C)	محدوده pH
بالارود	۱	۶	۷	۱۴	۱۵-۲۳/۶	۷/۸-۸/۱
کهنک	۱	۰	۷	۸	۲۲/۶-۲۰/۲	۷/۲-۷/۸
دزفول	۱	۴	۳	۸	۱۵/۲-۲۱	۷/۳-۷/۹
حرمه	۱	۳	۴	۸	۱۸-۲۳/۹	۷/۴-۸
جمع	۴	۱۳	۲۱	۳۸	-	-

جدول ۳. برخی مشخصات نمونه‌های تجزیه‌شده با دستگاه ICP

شماره نمونه	ایستگاه	تاریخ	ساعت	توضیحات
۳۱۶۵	دهنوبافر	۹۲/۰۹/۲۲	۲۴:۰۰	زمان پیمایش تا حرمه، ۶ ساعت
۳۱۶۹	دوکوهه	۹۲/۰۹/۲۲	۱۲:۰۰	زمان پیمایش تا حرمه، ۳۱ ساعت
۳۱۷۵	حرمه	۹۲/۰۹/۲۳	۰۷:۰۰	متأثر از رسوب ساعت ۱ بامداد دهنوبافر
۳۱۷۷	حرمه	۹۲/۰۹/۲۳	۱۸:۰۰	متأثر از رسوب ساعت ۱۱ بامداد روز قبل دوکوهه

دوره‌های مهم از نظر حمل آلاینده تعیین شدند. در مرحله بعد، با مقایسه ارقام فلزات سنگین در رسوب معلق با مقادیر استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان محیط زیست ایران برای محیط زیست و کشاورزی [۲۷] در خاک‌های قلیایی (به دلیل pH قلیایی جریان)، آلاینده‌های بیش از آستانه مشخص شدند. در گامی دیگر، مقدار غلظت آلاینده در ایستگاه‌های دو سرشاخه بالارود و کهنک در مقایسه با مقادیر زمانی متناظر در ایستگاه پایین دست حرمه تحلیل شد.

نتایج و بحث

خصوصیات مهم درازمدت جریان و رسوب در ایستگاه‌های مطالعه‌شده

جدول ۴ برخی از مشخصات درازمدت مهم جریان و

تجزیه نمونه‌های رسوب: نمونه‌های منتخب دارای رسوب به آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران ارسال و مقدار ۱۲ عنصر سنگین (با وزن مخصوص بین ۵/۷ تا ۱۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) مشتمل بر نقره، آرسنیک، کادمیوم، روی، کبالت، کروم، مس، مولیبدن، نیکل، سرب، آنتیموان و وانادیوم با استفاده از دستگاه پلاسمای جفتی انتقالی^۱ (ICP) مطابق با دستورالعمل استاندارد [۲۶] اندازه‌گیری شد.

تحلیل نتایج: ابتدا، نمودار تغییرات جریان آب و غلظت رسوب معلق به‌ازای زمان برای دو واقعه سیل در چهار ایستگاه ترسیم و تحلیل شد. سپس، با توجه به مقدار غلظت،

1. Inductively Coupled Plasma

احتمالاً به دلیل تأثیرپذیری از مدیریت سد مخزنی دز و سد تنظیمی دزفول است. غلظت در ایستگاه دزفول روند صعودی دارد و حداکثر به ۶۴۰ میلی گرم در لیتر می رسد که احتمالاً ناشی از ورود جریان های کوچک سیلابی حد فاصل سد تا شهر دزفول است. بیشترین غلظت در حرمه ۲۴۰۰ میلی گرم در لیتر ثبت شد که نشانه اثر رسوبات وارد شده توسط دو سرشاخه بالارود و کهنک است.

به دلیل ناچیز بودن وزن کلیه نمونه های رسوب خشک شده ایستگاه دزفول (همگی کمتر از یک گرم) و وزن کم رسوب نمونه های ایستگاه حرمه (فقط دو نمونه بیش از دو گرم در رویداد دوم) ناچار دو نمونه یاد شده از حرمه به علاوه دو نمونه از ایستگاه های دوکوهه و دهنوبافر (با در نظر گرفتن زمان پیمایش تا حرمه) مربوط به رویداد دوم انتخاب (جدول ۳) و برای تعیین عناصر به آزمایشگاه ارسال شد.

مقایسه داده های به دست آمده هنگام این پژوهش با مقادیر جدول ۴ اطلاعات ارزشمندی را ارائه می دهد. اگرچه دبی حداکثر ثبت شده دو سرشاخه بالارود و کهنک در پژوهش حاضر، در مقایسه با دبی های حداکثر تاریخی ناچیزند، غلظت های متناظر در حد غلظت های حداکثر تاریخی و حتی کمی بیشتر است. در دو ایستگاه دزفول و حرمه، غلظت اندازه گیری شده رسوب معلق در این پژوهش بسیار کمتر از غلظت حداکثرهای تاریخی است.

نتایج اندازه گیری عناصر و آلاینده ها و مقایسه غلظت در دو ایستگاه بالادست با حرمه

بررسی نتایج اندازه گیری ۱۲ عنصر یاد شده و مقایسه آن با استانداردهای کشاورزی و زیست محیطی بیان کننده آن است که مقدار نه عنصر از هر دو استاندارد سازمان محیط زیست ایران بسیار کمترند. شکل ۳ وضعیت مقادیر مشاهده ای و استانداردهای سه عنصر محدود کننده را نشان می دهد. ملاحظه می شود که مقدار دو عنصر کروم و نیکل به مقدار قابل توجهی بیش از آستانه حفاظت محیط زیست است و مقدار کبالت در شرایط مرزی قرار دارد (۲۰-۲۱ در برابر ۲۰). مطابق این شکل، هیچ یک از عناصر یاد شده از مقدار مجاز از دیدگاه کشاورزی بیشتر نیست. بنابراین، نباید نگرانی خاصی از این نظر داشت.

رسوب ایستگاه های مطالعه شده را که از داده های گرفته شده از سازمان آب و برق خوزستان استخراج شده است، نشان می دهد. ملاحظه می شود که دبی متوسط دو رودخانه بالارود و کهنک بسیار کمتر از جریان عبوری رود دز در ایستگاه های دزفول و حرمه است. با این همه بیشترین دبی روزانه مشاهده شده در دو سرشاخه که مربوط به زمان وقوع سیلاب ناشی از بارش های شدید است قابل توجه است و می تواند جریان رودخانه دز را تحت تأثیر قرار دهد. بیشترین غلظت رسوب معلق مشاهده شده چهار ایستگاه نسبتاً به هم نزدیک و حدود ۱۱ تا ۲۳ گرم در لیتر قرار دارند.

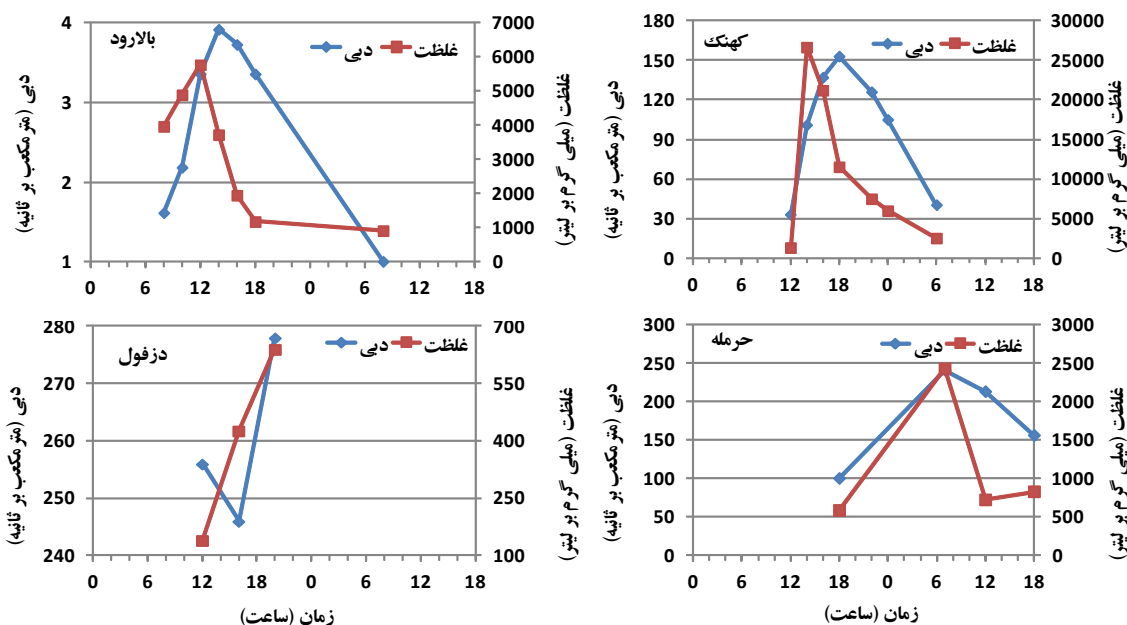
غلظت رسوب در نمونه های اندازه گیری شده در این پژوهش

با توجه به زلال بودن نسبی آب هر چهار ایستگاه و ناچیز بودن رسوب در دوره غیر سیلابی، اندازه گیری عناصر آلاینده در رسوب معلق جریان پایه از دستور کار خارج شد. در بارش نخست، دبی کهنک از نوع جریان پایه بود، بنابراین نمونه برداری از آن انجام نشد. در حالی که، به رغم دبی سیلابی کم بالارود (کمتر از پنج مترمکعب بر ثانیه)، آب نمود و رسوب نمود با اوج مشخص ثبت شده و غلظت جریان به بیش از ۱۹ گرم در لیتر رسیده است. در این رویداد، تغییرات غلظت و دبی در حرمه و دزفول ارتباط معناداری ندارند و مقدار غلظت نیز ناچیز است (به ترتیب ۱۵ < میلی گرم در لیتر و ۴۳ < میلی گرم در لیتر). به رغم غلظت زیاد جریان بالارود، دلیل غلظت ناچیز ایستگاه حرمه در رویداد نخست، دبی بسیار کم سرشاخه یاد شده است و به طبع اهمیت بار رسوبی در انتقال فلزات سنگین قابل توجه نیست.

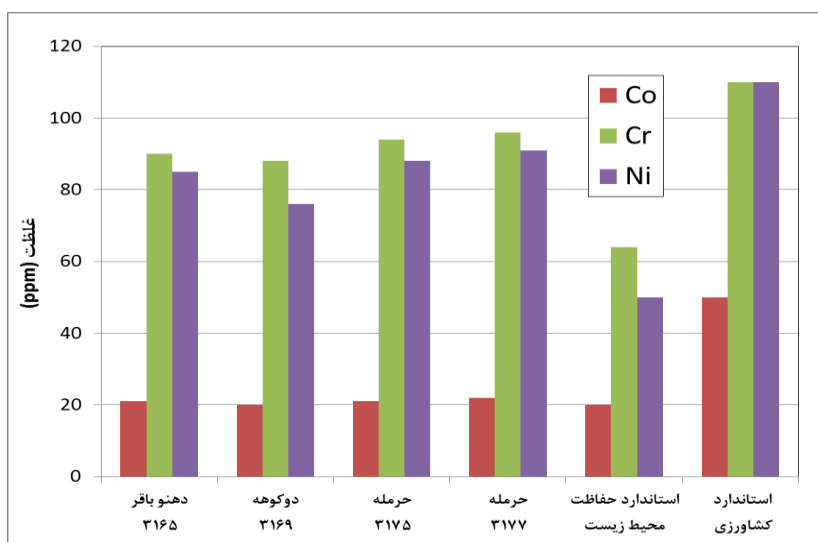
در بارش دوم، هر دو سرشاخه جریان سیلابی داشتند که سرشاخه کهنک با دبی ۱۵۳ مترمکعب در ثانیه شاهد غلظت حدود ۲۷ گرم در لیتر بود. نکته جالب در آب نمود و رسوب نمود سیل دوم دو ایستگاه دوکوهه و دهنوبافر (شکل ۲)، وقوع اوج غلظت رسوب قبل از اوج جریان است که در بسیاری از پژوهش ها به آن اشاره شده است [۲۸]. دلیل این موضوع وجود مواد آماده فرسایش در سطح زمین است که به تدریج با ادامه بارش، مقدار آن کم می شود [۲۹]. آب نمود ایستگاه دزفول شکل زنگوله ای ندارد که

جدول ۴. برخی مشخصات درازمدت مهم جریان و رسوب ایستگاه‌های مطالعه‌شده (مستخرج از داده‌های گرفته‌شده از سازمان آب و برق خوزستان)

ردیف	رودخانه	ایستگاه	دبی متوسط روزانه ($m^3 s^{-1}$)	کمترین دبی روزانهٔ مشاهده‌ای ($m^3 s^{-1}$)	بیشترین دبی روزانهٔ مشاهده‌ای ($m^3 s^{-1}$)	بیشترین دبی لحظه‌ای هم‌زمان با غلظت ($m^3 s^{-1}$)	بیشترین غلظت رسوب مشاهده‌ای (mgL^{-1})
۱	دز	دزفول	۲۳۲/۲	۲/۴	۳۲۸۸	۳۵۵۲	۱۰۷۷۲
۲	دز	حرمه	۲۳۵/۶	۳	۳۴۲۵	۱۳۶۲	۲۱۹۸۷
۳	بالارود	دوکوهه	۵/۶	۰/۰	۵۳۶	۴۴۷	۱۴۰۵۴
۴	کهنک	دهنوبافر	۱۸/۸	۰/۸	۴۶۶	۲۳۰	۲۲۶۶۷



شکل ۲. تغییرات دبی جریان و غلظت رسوب معلق در زمان طی رویداد دوم



شکل ۳. مقایسهٔ مقدار غلظت سه عنصر جذبی دارای آلاینده‌ها با استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران [۲۶] از دو دیدگاه کشاورزی و حفاظت محیط زیست

[۱۹]، اهمیت گل آلودگی کم و زلال بودن جریان رودخانه در این قسمت را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف بررسی وضعیت فلزات سنگین حمل‌شده با مواد معلق ناشی از منابع غیرنقطه‌ای (فرسایش خاک) مشتمل بر ذرات رسوبی ناشی از فرسایش از سطح اراضی و نیز فرسایش رودخانه‌ای در بازه‌ای از رود دز حد فاصل دزفول تا محل اتصال شطیپ انجام شد. ناچیز بودن مقدار رسوب در دوره غیرسیلابی (کمتر از ۷ میلی‌گرم در لیتر)، نشانه کم بودن فرسایش رودخانه‌ای است (حتی در ایستگاه حرمله با دبی ۹۶ مترمکعب بر ثانیه). در دوره سیلابی که بیشتر رسوبات معلق ناشی از فرسایش سطح حوضه است ملاحظه شد که غلظت رسوبات به حدود ۲۰ هزار میلی‌گرم بر لیتر نیز می‌رسد و اهمیت رسوبات ریزدانه در انتقال عناصر سنگین جذبی را روشن می‌کند.

پرهزینه و پیچیده بودن نمونه‌گیری از چند ایستگاه با رعایت زمان پیمایش جریان و کم بودن غلظت آب در بسیاری از موارد، سبب محدود شدن نمونه‌های منتخب شد. آنالیز نمونه‌های رسوب یادشده نشان داد در مقایسه با «استاندارد حفاظت محیط زیست» سازمان حفاظت محیط زیست ایران، دو عنصر کروم و نیکل بیش از آستانه و مقدار کبالت در شرایط مرزی قرار دارد. مطابق «استاندارد کشاورزی» این سازمان، هیچ‌یک از عناصر از حد مجاز بیشتر نیستند. به این ترتیب می‌توان گفت که به دلیل غلظت کم رسوب، دوره‌های دبی پایه از نظر حمل فلزات جذبی اهمیت ندارند و دوره‌های سیلابی و گل‌آلود از نظر حفاظت محیط زیست، زمان بحرانی منظور می‌شوند. به احتمال زیاد، حداقل بازه‌های بین ایستگاه‌های دوکوهه - حرمله و زورآباد - حرمله در زمان سیلابی از نظر سه عنصر نیکل، کروم و کبالت آلوده است. امکان آلودگی آبریزان به‌ویژه ماهی‌ها با این فلزات وجود دارد و اثبات آن به تحقیقاتی جداگانه نیاز دارد. با توجه به کم بودن مقدار عناصر آلاینده مطالعه شده رسوبات جریان‌های گل‌آلود بالارود، کهنک و دز از مقادیر استاندارد کشاورزی، آبیاری اراضی زراعی و باغی مشکلی از این بابت به وجود نمی‌آورد. به‌رغم نتایج ارزشمند این تحقیق درباره آلوده بودن چند نمونه رسوب معلق رودخانه‌های دز، بالارود و کهنک در محل

غلظت سه عنصر جذبی کبالت، کروم و نیکل همراه نمونه‌های رسوب دو ایستگاه سرشاخه (یک نمونه از بالارود و یک نمونه از کهنک) به ترتیب ۴/۸، ۶/۵ و ۱۰/۶ درصد کمتر از ایستگاه حرمله (میانگین دو نمونه) در پایاب است. این در حالی است که صادقی و همکارانش [۳] روندهای متفاوتی بین غلظت سه عنصر کادمیوم، سرب و نیکل در دو ایستگاه سرشاخه و یک ایستگاه پایین دست در حوضه آبخیز زاینده‌رود مشاهده کردند. دلیل این موضوع احتمالاً تغییر و تحولات در مقدار آلودگی مانند جذب شدن به رسوبات ریزدانه و لجن بستر در مدت توقف در مخزن سد زاینده‌رود است. کیانی‌هرچگانی و صادقی [۸] نیز روند یکسانی برای چهار فلز جذبی بررسی شده در بالادست و پایین دست بازه ۷۰۰ متری تحقیق شده در رودخانه کجور به دست نیاوردند.

زیادتر بودن غلظت عناصر جذبی احتمالاً به نهشتن رسوبات درشت‌تر (در حد سیلت و ماسه ریز) در مسیر و افزایش سهم ذرات ریزتر رس در ایستگاه حرمله است. ذرات رس به دلیل سطح ویژه بالاتر [۳۰]، قدرت جذب بیشتر آلاینده‌ها را دارد. کیانی‌هرچگانی و صادقی [۸] ضریب همبستگی بین درصد رس با غلظت کروم و نیکل جذبی در رودخانه کجور را به ترتیب ۸۸ درصد و ۷۳ درصد محاسبه کردند.

مطابق گزارش چرخایی و همکارانش [۲۲] مقادیر مشاهده شده نیکل در لایه پنج سانتی‌متری بالای خاک منطقه دزفول و اندیمشک حدود ۶۰-۷۰ قسمت در میلیون است که بسیار به مقدار آن در رسوبات معلق اندازه‌گیری شده در این پژوهش (حدود ۷۰ قسمت در میلیون) نزدیک است. تشابه مقدار نیکل در رسوب و خاک سطحی منطقه، به معنای تأثیر فرسایش خاک سطحی در آلودگی آب است.

بیشتر بودن مقدار سه عنصر یادشده از حد مجاز زیست‌محیطی به این معناست که حداقل در سه ایستگاه دوکوهه، دهنوباقر و حرمله و به احتمال زیاد در مسیر جریان بین آنها در دوره سیلابی، ماهی‌ها و سایر آبریزان در معرض آلودگی قرار دارند. این موضوع با توجه به گزارش‌های موجود از رابطه آلودگی رسوبات و اندام ماهیان منطقی به نظر می‌رسد [۱۴ و ۱۸]. آلوده نبودن ماهی صید شده از رودخانه دز در داخل شهر دزفول به فلزات سنگین

- Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 2000; 4 (4): 31-42. [Persian]
- [7]. International Atomic Energy Association (IAEA). Guidelines for using FRNs to assess soil erosion and effectiveness of soil conservation strategies. IAEA TECDOC-1741. IAEA publication. 2014; 213 p.
- [8]. Kiani Harchegani M, Sadeghi SHR. Spatial variations of relationship between heavy metals transportation and particle size distribution of suspended sediments. Journal of Water and Soil Conservation. 2013; 20(1): 169-184.
- [9]. Rajabzadeh Sekkeh M, Saeedi M. The role of sediments and river suspended materials on absorbent of Copper, Zinc and Cadmium in laboratory scale-Case study: Jajroud river, The proceeding of the 4th Iranian civil engineering congress, University of Tehran, 2010; 8p. [Persian]
- [10]. Sadeghi SHR, Kiani Harchegani M, Younesi, HA. Suspended sediment concentration and particle size distribution and their relationship with heavy metals contents, Journal of Earth System Science. 2012; 121(1): 63-71.
- [11]. Alves CM, Boaventura RRAR, Soares HMVM. Evaluation of heavy metals pollution loadings in the sediments of the Ave river basin (Portugal), Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2009; 18 (5) 603-618.
- [12]. Walling DE. Measuring sediment yield from river basins, In: Lal, R. (Ed), Soil erosion research methods, Soil and water conservation society. 1994; 39-74.
- [13]. Arabkhedri M. Estimation of bed load to suspended load ratio in Dez and Minab Rivers. Journal of Watershed Engineering and Management, 2015; 6 (4): 4, 390-399. [Persian]
- [14]. Kheirvar N, Dadolahi Sohrab A. Heavy metal concentrations in sediments and Large Scaled Barb (*Barbus grypus*) from Arvand river. Environmental Science and Technology. 2010; 12(2): 123-131. [Persian]
- [15]. Sekabira K, Oryem Origa H, Basamba TA, Mutumba G, Kakudidi E. Assessment of heavy metal pollution in the urban stream sediments and its tributaries. International Journal of Environment Science Technology. 2010; 7 (3): 435-446.
- [16]. Shafie NA, Aris AZ, Haris H. Geoaccumulation and distribution of heavy metals in the urban river sediment. International Journal of Sediment Research, 2014; 29 (3): 368-377.
- ایستگاه‌های حرمله، دوکوهه و زورآباد به برخی از عناصر سنگین، نباید فراموش کرد که دبی اوج هر دو رویداد سیلابی بسیار کمتر از سیلاب‌های بزرگ تاریخی ثبت شده هستند و ممکن است در سیلاب‌های بزرگ که کل سطح آبخیز در تولید رسوب معلق مشارکت دارد؛ مقدار عناصر آلاینده حمل شده با رسوبات بیشتر یا کمتر باشد. بنابراین، توصیه می‌شود که در پژوهش‌های بعدی نمونه‌گیری از دبی‌های سیلابی بزرگ نیز انجام شود. ضرورت این موضوع با توجه به محدود بودن نمونه‌های تجزیه شده در این پژوهش بیشتر احساس می‌شود. بررسی تشابه یا تفاوت آلودگی رسوبات بستر رودخانه‌های یاد شده در مقایسه با آلودگی بار معلق نیز به درک بهتر فرایندهای مرتبط با رسوبگذاری کمک خواهد کرد.
- سپاسگزاری**
- این مقاله بخشی از نتایج طرح پژوهشی با عنوان «بررسی تغییرات مکانی و زمانی غلظت فلزات سنگین حمل شده توسط رسوبات معلق در بازه وسطی رودخانه دز» است که با اعتبار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در سال ۱۳۹۵ به پایان رسید.
- منابع**
- [1]. Environment Protect Agency (EPA). Technical guidance manual for developing total maximum daily loads, Book 2: Streams and rivers, Environmental Protection Agency, EPA 823-B-97-002. 1997.
- [2]. Babapour Mofrad A, Rostami S, Alanezhad M, Frozanfar M, Khaksar E, Ramezani Z. Determination of some heavy metals in Karoon and Dez rivers. Jentashapir Journal of Medical Science. 2013; Special Issue: 87-100 [Persian]
- [3]. Sadeghi SHR, Kiani Harchegani M, Saeedi P. Temporal and spatial variations of relationship between suspended load concentration and some contaminants of the Zayandeh-Rud River. Water Resources Engineering. 2015; 8 (25): 97-108. [Persian]
- [4]. Richards, RP. Estimation of pollutant loads in rivers and streams: A guidance document for NPS programs. US Environmental Protection Agency, Region VIII, Denver. 1998; 108 p.
- [5]. Refahi, H. Water erosion and its control. University of Tehran Publication, 6th edition. 2007; 671p. [Persian]
- [6]. Rahmani, HR, Kalbasi M and Hajrasuliha S. Lead-polluted soil along some Iranian highways.

- [17]. Bagheri H, Alinejad S, Darvish Bastami K. Heavy metals (Co, Cr, Cd, Ni, Pb and Zn) in sediment of Gorganroud river, Iran. *Research Journal of Environmental Toxicology*. 201; 15(2): 147-151.
- [18]. Dadolahi Sohrab A, Nazarizadeh Dehkordi M. Heavy metals contamination in sediments from the north of the Strait of Hormuz. *Journal of the Persian Gulf (Marine Science)*. 2013; 4 (10): 39-46.
- [19]. Musavi-Nadushan R, Salimi L, Zaheri-Abdehvand L. Determining the concentrations of Nickel, Lead and Cadmium in *Barbus grypus* of Dez river, Iran. *Journal of Mazandaran University of Medical Science*. 2014; 23(110): 232-36. [Persian]
- [20]. Velayatzadeh M, Abdollahi S. Study and comparison of Hg, Cd and Pb accumulation in the muscle and liver tissues of *Aspius vorax* in Karoon river, in winter season. *Journal of Animal Environment*. 2010; 2(4): 65-72. [Persian]
- [21]. Beheshti M, Askari Sari A, Velayatzadeh M. Assessment of heavy metals concentration of fish (*Liza abu*) in Karoon river, Khuzestan Province. *Water and Wastewater*, 2012; 3: 125-133. [Persian]
- [22]. Charkhabi AH, Mahdian MH, Saghafian B, Ashoorloo D, Ghiassi NG. Spatial Properties and Geostatistical Analysis of the Soil Parameters of the Shadegan Wetland as Related to Iraq-Kuwait War in 1991. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. Unpublished Report. 2011.
- [23]. Charkhabi AH, Mahdian MH, Gili R, Ashoorloo M, Iranmanesh F. Spatial properties and geostatistical analysis of the soil parameters of the Khuzestan Province as related to Iraq-Kuwait War in 1991. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. Unpublished Report. 2011.
- [24]. Mirabolghasemi H. The effect of dams on suspended sediment and erosion and sedimentation trend of rivers (Case study: Karoun river). MSc thesis, Tarbiat Modarres University. 1994. [Persian]
- [25]. American Standard and Testing Methods (ASTM). Standard test method for determining sediment concentration in water samples, ASTM D 3977-97. Annual Book of Standards, Water and Environmental Technology. Volume 11.02. West Conshohocken, Pennsylvania. 2006.
- [26]. American Standard and Testing Methods (ASTM). Standard practice for total digestion of sediment samples for chemical analysis of various metals, ASTM D 4698-92. West Conshohocken. 2013.
- [27]. Environmental Protection Organization of Iran. Soil quality standard and its related guides. Department of Human Environment, Office of Land and Water. 2014. [Persian]
- [28]. Williams GP. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*. 1989; 111(1-4): 89-106.
- [29]. Gomi T, Moore RD, Hassan MW. Suspended sediment dynamics of small forest streams of the Pacific Northwest. *Journal of the American Water Resources Association*. 2005; 41: 877-898.
- [30]. Baybordi M. Soil physics. University of Tehran Publication, 2nd edition. 1984; 523p. [Persian]