



مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیستم، شماره اول، ۱۳۹۲

http://jwsc.gau.ac.ir

## تغییرات مکانی ارتباط بین انتقال فلزات سنگین و توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق

محبوبه کیانی هرچگانی<sup>۱</sup> و \* سیدحمیدرضا صادقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، نور،

<sup>۲</sup> آستاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، نور

تاریخ دریافت: ۹۰/۸/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۳/۹

### چکیده

توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق، نقش به‌سزایی در درک تغییرات فرآیندهای زیست‌محیطی، مدل‌سازی و انتقال رسوبات و آلودگی‌های همراه رسوبات مثل فلزات سنگین، مواد غذایی، رادیونوکلوئیدها و آفت‌کش‌ها در سیستم‌های رودخانه‌ای دارد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات مکانی ارتباط بین انتقال فلزات سنگین آهن، کروم، نیکل و روی همراه رسوبات معلق به‌وسیله توزیع اندازه رسوبات معلق در حوزه آبخیز آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس با مساحت حدود ۵۰۰۰۰ هکتار انجام گرفت. در این مطالعه ۲۲ نمونه رسوب معلق از ابتدا و انتهای بازه‌ای به طول ۷۰۰ متر طی دی‌ماه ۱۳۸۶ تا اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۷ برداشت شد. سپس نمونه‌ها هضم شیمیایی و در نهایت فلزات سنگین آن‌ها توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق نیز با استفاده از قانون استوکس و به روش پیپت اصلاح شده اندازه‌گیری شد. سپس ارتباط بین دانه‌بندی رسوب معلق و فلزات سنگین همراه رسوب معلق با استفاده از رگرسیون دومتغیره بررسی و برترین روابط تهیه شده براساس شاخص‌های آماری انتخاب شدند. نتایج به‌دست آمده از پژوهش نشانگر برقراری ارتباط بسیار خوب فلزات سنگین (آهن، کروم، نیکل و روی) با لای و رس (اجزاء کوچک‌تر از ۶۳ میکرومتر) در ابتدا و انتهای بازه با حدود اعتماد ۹۵ درصد و ضریب همبستگی بالای ۷۱ درصد بود. ولی تغییرپذیری نوع و کیفیت ارتباطات در دو نقطه مطالعاتی نیز به‌خوبی مورد تأیید قرار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** حوزه آبخیز جنگلی کجور، غلظت فلزات سنگین، توزیع اندازه رسوبات معلق، مدل‌های رگرسیونی، غلظت رسوبات معلق

\* مسئول مکاتبه: sadeghi@modares.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر آگاهی از اهمیت زیست‌محیطی انتقال بار رسوبی معلق به‌وسیله نهرها و رودخانه‌ها و همچنین شناخت دینامیک رسوبات معلق و اهمیت آن‌ها در انتقال مواد غذایی و آلودگی‌ها مانند فسفر، آفت‌کش‌ها، فلزات سنگین<sup>۱</sup> و عوامل بیماری‌زا رشد زیادی نموده است (والینگ و همکاران، ۲۰۰۰؛ کارآموز و عراقی‌نژاد، ۲۰۰۵؛ ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۸). به‌همین دلیل مطالعه توزیع اندازه ذرات آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

تغییرپذیری فلزات سنگین همراه رسوبات معلق با توزیع اندازه ذرات رسوبات پژوهش‌هایی توسط ژائو و همکاران (۱۹۹۹) در دشت سیلابی سورن<sup>۲</sup> انجام شد. آن‌ها به مطالعه توزیع فلزات سنگین و ارتباط آن‌ها با توزیع اندازه ذرات رسوبی در مقیاس مکانی پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر برقراری ارتباط بین اندازه ذرات رسوبی و غلظت فلزات سنگین بود که فلزات سنگین سرب، روی، مس و کبالت با لای و رس ارتباط بسیار خوبی برقرار کرده ولی کادمیوم هیچ ارتباط معنی‌داری با توزیع اندازه ذرات برقرار نکرد. جین و شارما (۲۰۰۱) برای بررسی آلودگی و توزیع فلزات روی، کادمیوم، سرب، آهن، منگنز، کروم و نیکل در آب و رسوبات معلق و بستر رودخانه هیندون<sup>۳</sup> انجام دادند. آن‌ها با آنالیز رسوبات به این نتیجه رسیدند که مقدار زیادی از فلزات سنگین با مواد آلی و رسوبات ریزدانه و هیدروکسید منگنز و آهن همراه هستند و غلظت فلزات سنگین با اندازه رسوبات رابطه عکس دارد. مارتین (۲۰۰۴) به بررسی منابع فلزات سنگین در رسوبات نزدیک کانال در رودخانه لاهن<sup>۴</sup> پرداخت و به این نتیجه رسید که هیچ ارتباط معنی‌داری بین فلزات سنگین و درصد رس و مواد آلی وجود ندارد و غلظت فلزات سنگین توسط منابع بالقوه آلوده‌کننده کنترل می‌شود. وودوارد و والینگ (۲۰۰۷) نیز به بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و انتقال ذرات رسوبی معلق ترکیبی در سیستم‌های رودخانه‌ای پرداختند. آن‌ها پس از تعیین توزیع اندازه ذرات رسوبی (مؤثر<sup>۵</sup> و مجزا<sup>۶</sup>) با استفاده از دستگاه WEA<sup>۷</sup> و SEM<sup>۸</sup> و آنالیز داده‌ها در ۴ رودخانه حوزه آگزه<sup>۹</sup> به این نتیجه رسیدند که

- 1- Heavy Metal
- 2- Severn
- 3- Hindon
- 4- Lahn
- 5- Effective Particle Size Distribution
- 6- Absolute Particle Size Distribution
- 7- Water Elutriation Apparatus
- 8- Scanning Electron Microscopy
- 9- Exe

رس نقش کنترلی در تشکیل و پایداری ذرات مرکب و آلودگی‌های هم‌پیوند با رسوب دارد. ژاٹو و همکاران (۲۰۱۰) نیز به بررسی انتقال فلزات سنگین کادمیم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی با توزیع اندازه ذرات رسوب در روان‌آب حوزه آبخیز شهری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین غلظت فلزات سنگین منتقله توسط ذرات کوچک‌تر از ۴۴ میکرومتر (لای و کوچک‌تر) بوده است. حال آن‌که در زمینه تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق می‌توان به پژوهش‌های والینگ و همکاران (۲۰۰۰) و ویلیامز و همکاران (۲۰۰۸) در مقیاس مکانی و زمانی در رودخانه‌های توود<sup>۱</sup> و آگزه و صادقی و همکاران (۲۰۱۲) در رودخانه کجور اشاره نمودند. با توجه به تغییرپذیری خصوصیات رسوبات معلق و توانایی متفاوت آن‌ها در انتقال آلاینده‌ها و نیز محدودیت مطالعات انجام شده در خصوص ارزیابی فنی این بحث، این پژوهش با هدف بررسی تغییرات مکانی ارتباط انتقال فلزات سنگین (آهن، کروم، نیکل و روی) همراه رسوبات معلق به‌وسیله توزیع اندازه رسوبات معلق در حوزه آبخیز جنگلی کجور به‌واسطه امکان دسترسی و وجود مطالعات پیش‌نیاز انجام پذیرفت.

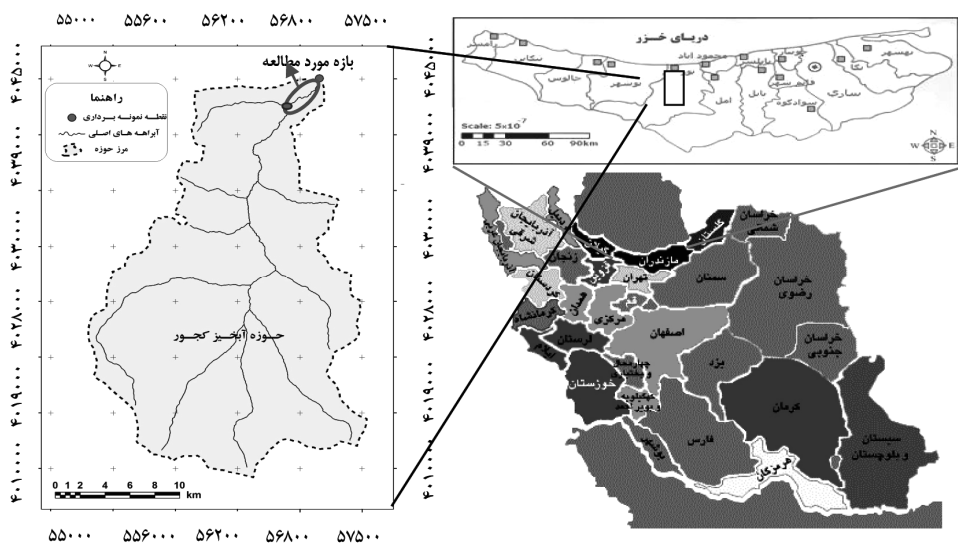
### مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس (کجور) یکی از زیرحوزه‌های بیش‌تر جنگلی شماره ۴۶ البرز مرکزی در ارتفاعات جنگلی کجور در جنوب‌شرقی شهرستان نوشهر با مساحت ۵۰۰۰۰ هکتار در حدواسط طول‌های ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه و ۰ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۵۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه شرقی و عرض‌های ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه و ۰ ثانیه شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوزه آبخیز از شمال با دریای خزر و از جنوب با بخش کجور مجاور است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه به‌ترتیب ۱۵۰ و ۲۶۵۰ متر از سطح آب‌های آزاد و به‌طور عمده در طبقه شیب ۶۰-۴۰ درصد واقع شده است. حدود ۹۰ درصد از سطح حوزه موردنظر به دوران دوم زمین‌شناسی تعلق دارد. نوع خاک منطقه تکامل‌نیافته راندزین تا راندزین شسته‌شده و خاک قهوه‌ای جنگلی با pH قلیایی و خاک قهوه‌ای شسته‌شده تا پسدوگلی و با بافت لومی شنی ارزیابی شد (صادقی و سعیدی، ۲۰۱۰؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۲). برای انجام این پژوهش، مراحل مختلف زیر انجام گرفت.

نمونه‌برداری رسوب معلق: برای انجام پژوهش، تعداد ۲۲ نمونه به‌طور مساوی از بالادست و پایین‌دست بازه‌ای به طول تقریبی ۷۰۰ متر حد فاصل محل ایستگاه هیدرومتری آبخیز تا بالاترین نقطه قابل

1- Tweed

دسترس به‌طور هم‌زمان در حد واسط دوره زمانی دوم دی‌ماه ۱۳۸۶ تا بیست و چهارم اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۷ جمع‌آوری گردید. حداقل و حداکثر دما در شرایط نمونه‌برداری به ترتیب ۱۵ و ۲۳ درجه سانتی‌گراد و دبی ۰/۱۸ و ۱/۵۶ مترمکعب بر ثانیه بوده است. ابتدا ظروف نمونه‌برداری پلاستیکی ۲ لیتری شسته شد، سپس به روش انتگرالسیون عمقی و در امتداد قائم رودخانه به‌صورت تصادفی از بالادست و پایین‌دست بازه نمونه‌برداری شد (ادوارد و گلیسون، ۱۹۹۹)، سپس نمونه‌های هر مقطع به آزمایشگاه منتقل و در ۲ بشر ۱ لیتری ریخته شد.



شکل ۱- موقعیت، بازه مورد مطالعه و حوزه آب‌خیز کجور در استان مازندران و کشور.

اندازه‌گیری فلزات سنگین همراه رسوب معلق: نمونه درون یکی از بشرها از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده و رسوبات معلق از نمونه آب جدا شدند. مواد معلق باقی‌مانده روی فیلتر در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت خشک شدند. رسوبات خشک شده با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت یک‌هزارم گرم وزن گردید. سپس رسوبات خشک شده را در ظروف پلی‌اتیلنی ریخته و برای آنالیز شیمیایی نمونه‌ها، ۱۵ میلی‌لیتر مخلوط ۲ به ۱ اسید نیتریک و اسید کلریدریک اضافه گردید. البته قابل ذکر است با هر ۵ نمونه یک نمونه به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد، سپس به مدت ۳-۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد روی حمام آبی حرارت داده شد و پس از هضم کامل نمونه‌ها، آن‌ها را از کاغذ

صافی واتمن ۴۲ گذرانده و در نهایت با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی لیتر رسانده و در ظروف پلی اتیلنی برای اندازه گیری با دستگاه جذب اتمی نگهداری شد (کیانی هرچگانی و همکاران، ۲۰۱۰). برای اندازه گیری غلظت فلزات سنگین موجود در نمونه های رسوب و شاهد از دستگاه جذب اتمی فیلیپس مدل PU-۹۴۰۰ استفاده گردید. سپس برای تجزیه و تحلیل نمونه ها توسط دستگاه جذب اتمی ابتدا با توجه به محدوده غلظت مورد نیاز و همچنین اطمینان کامل از خطی بودن منحنی واسنجی در محدوده انتخاب شده غلظت، محلول های استاندارد ساخته شده و با دستگاه اندازه گیری شد. پس از اندازه گیری جذب محلول های استاندارد، منحنی واسنجی رسم شد. سپس نمونه ها به ترتیب تزریق و میزان جذب اندازه گیری شدند و بعد با استفاده از منحنی واسنجی، غلظت نمونه ها محاسبه شد (خراسانی و همکاران، ۲۰۰۶). در نهایت چون مقادیر فلزات مدنظر در این مطالعه در نمونه شاهد به قدری ناچیز بود که توسط دستگاه جذب اتمی قابل تشخیص نبودند، بنابراین مقادیر فلزات سنگین موجود در رسوبات معلق مقادیر واقعی و بدون خطا تلقی شد (کیانی هرچگانی و همکاران، ۲۰۱۰).

**اندازه گیری توزیع اندازه رسوبات معلق:** نمونه های بشر دیگر به مدت ۴۸ ساعت به صورت یکنواخت قرار داده شدند تا عمل ته نشینی رسوبات صورت پذیرد. بعد از دو روز آب روی نمونه ها را خالی نموده و باقی مانده رسوبات را با آب مقطر شست و شو داده در داخل ظروفی آلومینیومی با وزن اولیه مشخص ریخته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک شدند (صادقی و همکاران، ۲۰۰۶؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۲). رسوبات خشک همراه با ظروف آلومینیومی با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم گرم وزن و در نهایت از وزن اولیه ظروف کسر و وزن رسوبات یادداشت شد.

برای دانه بندی رسوبات معلق، چون بیش تر کربنات ها، نمک های محلول و مواد آلی براساس پژوهش های به عمل آمده با ذرات ریز به خصوص رس ترکیب می شوند (گاسپاراتو و همکاران، ۲۰۰۳؛ و وودوارد و والینگ، ۲۰۰۷) و مسلماً اندازه ذره ترکیبی بزرگ تر از اندازه واقعی خود ذره خواهد بود بنابراین برای از بین بردن خطا در تعیین اندازه ذرات اقدام به حذف آن ها شد. ابتدا مبادرت به حذف کربنات ها و نمک های محلول نموده (گاولوک و همکاران، ۲۰۰۳) و در ادامه، پس از حذف مواد آلی و اکسیدهای آهن (صادقی و کیانی هرچگانی، ۲۰۰۹)، آماده سازی نهایی نمونه ها برای پیروی از قانون استوکس (ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۸) و شیوه پیپت اصلاح شده صورت گرفت. برای حذف کربنات ها و یا نمک های محلول در پیش تیمارها، نمونه رسوب خشک شده را در لوله های سانتریفوژ ۵۰ میلی لیتر

ریخته و ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه و ۱ میلی‌لیتر استات سدیم یک مولار (pH=۵) اضافه، مخلوط و نمونه‌های تهیه شده سپس به مدت ۱۵ دقیقه در سانتریفوژ با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس محلول روی آن خالی نموده و رسوبات به دست آمده به درون مزورهای با حجم ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شدند. برای حذف مواد آلی، ۱۰ میلی‌لیتر از آب دیونیزه و ۵ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ( $H_2O_2$ ) اضافه گردید و بعد نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه برای تسریع در انجام عمل جداسازی مواد آلی از رسوبات درون شیکر با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه و در دمای محیط قرار داده شدند (صادقی و کیانی‌هرچگانی، ۲۰۰۹؛ کیانی‌هرچگانی و صادقی، ۲۰۱۱).

در مرحله بعد برای خارج کردن اکسیدهای آهن، ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۳ مولار سترات سدیم و بی‌کربنات پتاسیم به پیش‌نمونه‌ها اضافه و در آب با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده و به‌طور متناوب هم‌زده شد. سپس ۱/۵ میلی‌لیتر از محلول کلرید سدیم ۱۰ درصد اضافه و در صورت قهوه‌ای شدن رنگ نمونه‌ها، سترات سدیم و بی‌کربنات سدیم به نمونه‌ها اضافه شد. ولی اگر نمونه‌ها به رنگ خاکستری متمایل به سبز در می‌آمدند محلول ۱۰ درصد کلرید سدیم اضافه می‌گردید. در نهایت بعد از حدود ۱-۰/۵ ساعت و دوبخشی شدن نمونه، محلول رویی به رنگ آجری و نشانگر جدایش اکسیدهای آهن از رسوبات معلق و انحلال آن‌ها با دقت تمام تخلیه می‌گردید (گاولوک و همکاران، ۲۰۰۳).

در مرحله آخر، ۴۰ میلی‌لیتر هگزا متافسفات سدیم به نمونه‌ها اضافه و در شیکر به مدت ۱۶ ساعت قرار داده تا مواد معدنی اولیه به‌صورت کامل از هم جدا شدند (چادهری و همکاران، ۲۰۰۸). بعد از ۱۶ ساعت عمل شیکر، با دست مزورها را تکان داده تا پراکنش ذرات به‌منظور ته‌نشست صورت پذیرد. سپس زمان نمونه‌برداری اول و دوم در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد با استفاده از قانون استوکس که براساس تأثیر غلظت در سقوط ذرات در آب بنا شده است و اندازه ذرات لای و رس (۶۳ و ۲ میکرون) و طول جابه‌جایی (عمق پیپت: ۲/۵ سانتی‌متر) به ترتیب ۶ ثانیه و ۱۰۶ دقیقه محاسبه شد (موسوی‌حرمی، ۲۰۰۴؛ ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۸). در نهایت دو نمونه از ۲/۵ سانتی‌متری بالای مزور به آرامی و به‌وسیله پیپت ۲/۵ میلی‌لیتری پس از گذشت ۶ ثانیه و ۱۰۶ دقیقه به ترتیب برای اندازه‌گیری محتوی رسوبی کوچک‌تر از ابعاد لای و رس برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده سپس در درون ظروف فویلی توزین شده ریخته و در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه خشک و دوباره توزین شدند (گاولوک و همکاران، ۲۰۰۳). از اختلاف وزن دو توزین صورت گرفته، وزن ماسه ریز و رس در ۲/۵ میلی‌لیتر نمونه به دست آمد. سپس با توجه به نسبت‌های حجمی مورد استفاده درصد ماسه ریز، لای و رس در حجم ۴۰ میلی‌لیتر محاسبه گردید (صادقی و کیانی‌هرچگانی، ۲۰۰۹).

مدل‌سازی رابطه‌ها: در ادامه تهیه مدل‌های رگرسیونی بین درصد وزنی توزیع اندازه ذرات رسوبی (ماسه، لای و رس) به‌عنوان متغیر مستقل ( $X$ ) و نیز غلظت فلزات سنگین (آهن، کروم، نیکل و روی) بر حسب میلی‌گرم بر گرم به‌عنوان متغیر وابسته ( $Y$ ) در دو منطقه در بازه‌ای به‌طول تقریبی ۷۰۰ متر با استفاده از انواع روابط رگرسیونی دو متغیره (خطی، معکوس، درجه ۲، درجه ۳، توانی، رشد، نمایی، S شکل و ترکیبی) و باتغییر شکل داده‌ها در محیط نرم‌افزار SPSS 13.5 انجام پذیرفت. برای ارزیابی کارایی روابط تهیه شده از معیارهای ضریب تبیین و سطح معنی‌داری کم‌تر از ۵ درصد، خطای تخمین<sup>۱</sup> و مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> و ضریب کارایی<sup>۳</sup> استفاده شد. برای تهیه و تحلیل روابط از تقسیم‌بندی داده‌ها به دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی به‌نسبت دو سوم و یک‌سوم استفاده شد. در نهایت مدل‌های با خطای تخمین کم‌تر، مجذور میانگین مربعات خطای کم‌تر و ضریب کارایی مثبت و ترجیحاً بالای ۶۰ درصد به‌عنوان مدل‌های برتر انتخاب گردید (آسلمان، ۲۰۰۰؛ داس، ۲۰۰۰؛ هورویتز و همکاران، ۲۰۰۱؛ کارآموز و عراقی‌نژاد، ۲۰۰۵؛ صادقی و همکاران، ۲۰۰۷؛ صادقی و همکاران، ۲۰۰۸).

## نتایج و بحث

**نتایج به‌دست آمده از آماره‌های توصیفی:** نتایج به‌دست آمده از آنالیزهای یاد شده در قالب آماره‌های توصیفی در جدول ۱ خلاصه شده است. دقت در جدول ۱ تغییر در مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه برخی پارامترهای آماره‌های توصیفی بالا و پایین‌دست را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که نتایج کاربرد آزمون  $t$  غیرجفتی به مجموعه داده‌های به‌دست آمده نیز به‌طور مشخص دلالت بر اختلاف معنی‌دار ذرات ماسه ( $P=0/05$ ) و نبود اختلاف معنی‌دار مقادیر رس ( $P=0/55$ ) و لای ( $P=0/07$ ) در دو مقطع مورد بررسی داشته است. همچنین نداشتن اختلاف معنی‌دار در مقادیر آهن ( $P=0/52$ )، کروم ( $P=0/39$ )، نیکل ( $P=0/74$ ) و روی ( $P=0/76$ ) در دو مقطع مورد بررسی مشاهده شد.

اختلاف معنی‌دار بین درصد وزنی ماسه در بالا و پایین‌دست بازه و نبود اختلاف معنی‌دار در درصد وزنی لای و رس بیانگر برجستگی رسوبات با اندازه بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون (ماسه) به‌واسطه کاهش توان و قدرت جریان و همچنین کاهش شیب هیدرولیکی در طول بازه بوده است. حال آن‌که

- 1- Relative Error
- 2- Root Mean Square of Error
- 3- Coefficient of Efficiency

ذرات با اندازه کوچک‌تر از ۶۳ میکرون (لای و رس) به دلیل داشتن وزن کم‌تر به آسانی و با حداقل نیروی جریان آب منتقل و در پایین دست بازه نیز تغییر محسوسی را نشان نداده‌اند. همچنین نبود اختلاف معنی‌دار در مقادیر فلزات سنگین گویای انتقال فلزات سنگین هم‌پیوند با ذرات ریز به خصوص رس دارد که با یافته‌های وودوارد و والینگ (۲۰۰۷) در مورد نقش کنترلی رس در تشکیل و پایداری ذرات مرکب و آلودگی‌های هم‌پیوند با رسوب مطابقت دارد.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق (درصد) و غلظت فلزات سنگین همراه رسوبات معلق (میلی‌گرم بر گرم) در بازه‌ای از رودخانه کجور.

متغیرها	بالادست بازه		پایین دست بازه	
	کمینه	میانگین $\pm$ انحراف معیار	بیشینه	کمینه
ماسه	۶۷/۴۲	۸۱/۲۲ $\pm$ ۶/۸۷	۸۸/۹۳	۷۸/۷۵
لای	۰/۷۷	۶/۱۳ $\pm$ ۴/۷۵	۱۸/۵۶	۰/۴۵
رس	۱۰/۳۰	۱۴/۰۲ $\pm$ ۲/۶۲	۱۹/۳۹	۱۱/۹۷
آهن	۱/۹۸	۱۳/۱۴ $\pm$ ۸/۳۰	۲۶/۲۵	۰/۰۲۵
کروم	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱ $\pm$ ۰/۰۰۹	۰/۰۲	۰/۰۰۴
نیکل	۰/۰۱	۱۰/۰۳ $\pm$ ۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۰۰۴
روی	۰/۰۴	۰/۰۹۸ $\pm$ ۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۰۱
رسوب معلق (گرم در لیتر)	۰/۰۹	۰/۴۱ $\pm$ ۰/۴۲	۱/۴۹	۰/۰۸
pH	۸/۱۰	۸/۴۹ $\pm$ ۰/۲۱	۸/۷۸	۸/۰۰
تعداد داده	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱

نتایج به دست آمده از مدل‌سازی: نتایج به دست آمده از انتخاب بهترین روابط رگرسیون دومتغیره بین درصد وزنی ماسه، لای و رس و غلظت فلزات سنگین همراه رسوب معلق در جدول‌های (۲ و ۳) و شکل‌های مربوط به رابطه‌های آنها در شکل‌های (۲ تا ۹) ارایه شده است. دقت در مدل‌های نهایی برازش داده شده به داده‌های مورد بررسی (جدول‌های ۲ و ۳) نشان می‌دهد که شکل‌های غیرخطی (ترکیبی، توانی، رشد، درجه ۲، S شکل، معکوس و نمایی) معادله‌ها، در مجموع از عملکرد بهتری برخوردار بودند که بیانگر غلبه رابطه‌های غیرخطی بین متغیرهای هیدرولوژیک می‌باشد.



جدول ۲- نتایج به دست آمده از انتخاب بهترین روابط رگرسیون دو متغیره برازش داده شده بین غلظت فلزات سنگین موجود در رسوب معلق و درصد وزنی توزیع اندازه ذرات رسوب معلق در بالادست بازه‌ای از رودخانه کجور.

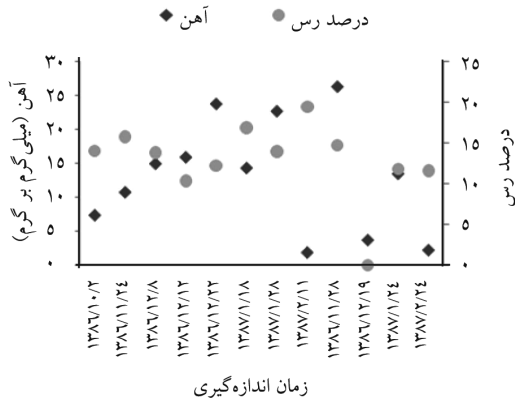
مجدور میانگین مربعات خطا	درصد خطا		ضریب کارایی	سطح معنی داری	ضریب همبستگی	رابطه	شماره
	تأیید	تخمین					رابطه
۰/۱۵	۳۰۶/۴۷	۴۹/۵۵	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۷۳	$Y = 243/12(0/81^X)$	۱ آهن و رس
۰/۱۵	۳۰۹/۲۹	۴۹/۸۳	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۷۳	$Y = 243/12e^{-0/11X}$	۲
۲/۸۶	۸۷/۶۳	۸۴/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۸۸	$Y = 3726826(0/23^X)$	۳ کروم و رس
۲/۵۹	۸۵/۷۴	۹۹/۰۹	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۸۸	$Y = 3726826e^{-1/46X}$	۴
۳۹/۶۰	۱۶/۹۷	۲۳/۳۷	۰/۹۹	۰/۰۳	۰/۷۳	$Y = 0/09(0/94^X)$	۵ نیکل و لای
						رابطه معنی داری برقرار نشد	- روی و اندازه ذرات

در رابطه‌های بالا Y و X به ترتیب نشانگر غلظت فلزات سنگین به میلی‌گرم در گرم و درصد اندازه خاص از رسوبات معلق است.

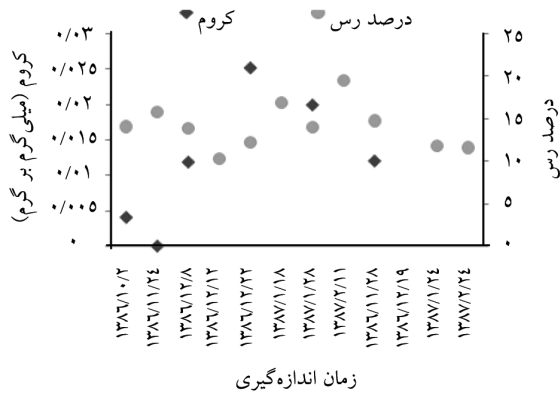
جدول ۳- نتایج به دست آمده از انتخاب بهترین روابط رگرسیون دو متغیره برازش داده شده بین غلظت فلزات سنگین موجود در رسوب معلق و درصد وزنی توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق در پایین دست بازه‌ای از رودخانه کجور.

مجدور میانگین مربعات خطا	درصد خطا		ضریب کارایی	سطح معنی داری	ضریب همبستگی	رابطه	شماره
	تأیید	تخمین					رابطه
۰/۳۵	۸۴/۷۹	۱۸۰۴/۳	۰/۸۸	۰/۰۱	۰/۹۲	$Y = -19/2 + 24/5X - 4/2X^2$	۶ آهن و لای
۱۱۰/۵۶	۷۸/۱۸۲	۲۳/۱۲	۰/۹۹	۰/۰۴	۰/۸۹	$Y = e^{-3/68 + (-1/64 X)}$	۷ کروم و لای
۶۲/۰۱	۱۲۴/۳۷	۷۱/۶۸	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۷۱	$Y = 0/07 + (-0/05/X)$	۸
۵۴/۰۲	۷۱/۰۳	۶۳/۸۰	۰/۹۹	۰/۰۴	۰/۷۳	$Y = e^{-2/39 + (-2/02X)}$	۹ نیکل و لای
۴۶/۲۸	۱۲۶/۱۷	۴۴/۵۷	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۷۱	$Y = 4/57(0/72^X)$	۱۰
۲۱/۴۸	۹۶/۱۶	۹۷/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۷۱	$Y = e^{1/52(-0/32X)}$	۱۱ نیکل و رس
۴۶/۷۳	۱۳۰/۲۱	۴۸/۶۹	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۷۱	$Y = 4/57e^{-0/32X}$	۱۲
۰/۱۱	۳۷۲/۲۱	۶۷/۹۶	۰/۹۰	۰/۰۱	۰/۹۴	$Y = 927/8 - 125/9(\frac{Y}{X}) + 4/3(\frac{Y}{X})^2$	۱۳ روی و رس

در رابطه‌های بالا Y و X به ترتیب نشانگر غلظت فلزات سنگین به میلی‌گرم در گرم و درصد اندازه خاص از رسوبات معلق است.



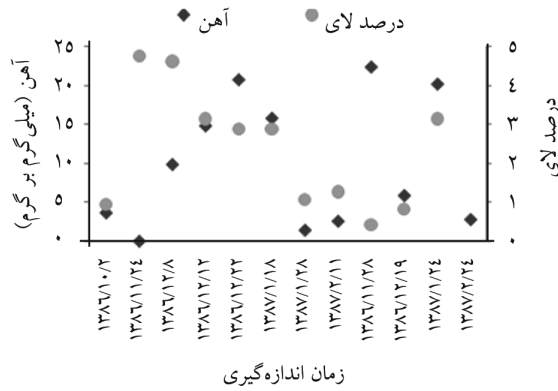
شکل ۲- الگوی تغییرات آهن با درصد رس در بالادست.



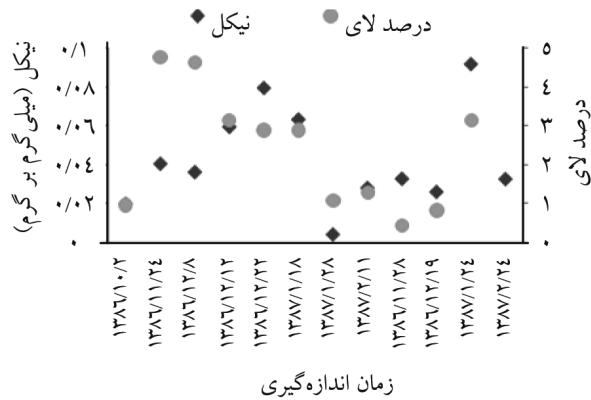
شکل ۳- الگوی تغییرات کروم با درصد رس در بالادست.



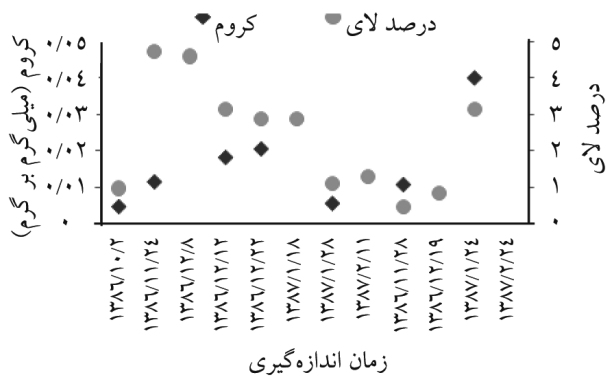
شکل ۴- الگوی تغییرات نیکل با درصد لای در بالادست.



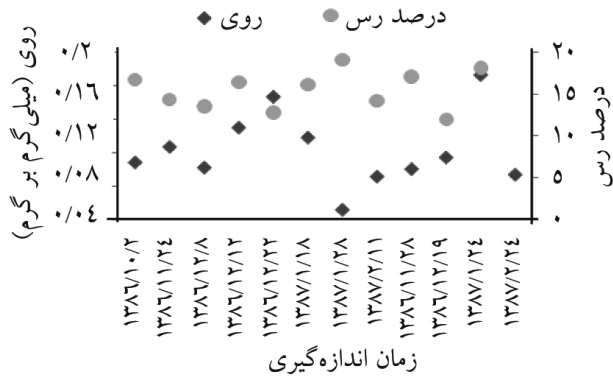
شکل ۵- الگوی تغییرات آهن و درصد لای در پایین دست.



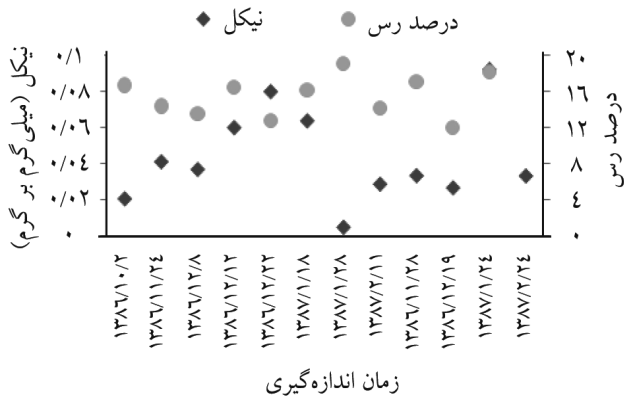
شکل ۶- الگوی تغییرات نیکل و درصد لای در پایین دست.



شکل ۷- الگوی تغییرات کروم و درصد لای در پایین دست.



شکل ۸- الگوی تغییرات روى و درصد رس در پایین‌دست.



شکل ۹- الگوی تغییرات نیکل و درصد رس در پایین‌دست.

از مقایسه کلی رابطه‌های به‌دست آمده بین غلظت فلزات سنگین همراه رسوبات معلق و توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق (ماسه، لای و رس) در بالادست بازه رودخانه کجور (جدول ۲) با استفاده از همه شاخص‌های ارزیابی، نشانگر ارتباط بهتر آهن موجود در رسوب معلق با رس با ضریب همبستگی ۷۳ درصد ( $P < 0.03$ )، کروم موجود در رسوب معلق با رس با ضریب همبستگی ۸۸ درصد ( $P < 0.05$ ) و نیکل موجود در رسوب معلق با لای با ضریب همبستگی ۷۳ درصد ( $P < 0.03$ ) بوده است. در حالی که بین فلز روی با توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق ارتباطی وجود نداشت.

همچنین بررسی مدل‌های برازش داده شده بر ارتباطات حاکم بین غلظت فلزات سنگین همراه رسوبات معلق و توزیع اندازه رسوبات در پایین دست بازه رودخانه کجور (جدول ۳)، دلالت بر ارتباط بهتر آهن، کروم، نیکل و روی همراه رسوب به ترتیب با لای (ضریب همبستگی ۹۹ درصد و سطح معنی داری ۱ درصد)، لای (ضریب همبستگی بالای ۸۹ درصد و سطح معنی داری کم تر از ۵ درصد)، لای و رس (ضریب همبستگی بالاتر از ۷۱ درصد و سطح معنی داری کم تر از ۵ درصد) و رس (ضریب همبستگی ۹۴ درصد و سطح معنی داری ۱ درصد) دارد.

نتایج مدل‌سازی بین فلزات سنگین همراه رسوبات معلق با توزیع اندازه ذرات بیانگر انتقال این فلزات با لای و رس (ذرات کوچک تر از ۶۳ میکرومتر) است که با نتایج وودوارد و والینگ (۲۰۰۷) مبنی بر نقش کنترلی رس در تشکیل و پایداری ذرات مرکب و آلودگی‌های هم پیوند با رسوب مطابقت دارد همچنین با یافته‌های ژائو و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر انتقال فلزات با ذرات در حد لای و کوچک تر نیز هم خوانی دارد، ولی با یافته‌های مارتین (۲۰۰۴) در این خصوص مطابقت ندارد. همچنین از مقایسه رابطه‌ها بین فلزات سنگین موجود در رسوب معلق با توزیع اندازه ذرات در بالا و پایین دست بازه و نتایج آزمون t غیرجفتی می‌توان استنتاج نمود که اندازه ذرات به عنوان یک عامل مهم کنترلی در فراوانی فلزات سنگین در محیط‌های طبیعی اهمیت فراوانی دارد که با بیان‌ها و یافته‌های والینگ و همکاران (۲۰۰۰)، ژائو و همکاران (۱۹۹۹) هم خوانی دارد. از طرفی تغییرپذیری نوع و کیفیت ارتباطات در دو نقطه مطالعاتی و تفاوت رفتار هیدرولوژیکی و ارتباط متغیرهای مورد بررسی در آن‌ها مورد تأیید قرار گرفت.

### نتیجه گیری

کسب اطلاعات درباره تغییرات مکانی فلزات سنگین همراه رسوبات معلق و توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق یکی از اصول اساسی و مهم مورد نیاز برای تهیه مدل‌های انتقال فلزات همراه رسوبات در سیستم‌های رودخانه‌ای می‌باشد. بنابراین این پژوهش با توجه به نیاز به دانستن چنین اطلاعاتی و نبود مطالعه تغییرات مکانی فلزات سنگین همراه رسوبات معلق در داخل کشور و با هدف اصلی بررسی تغییرات مکانی ارتباط انتقال فلزات سنگین (آهن، کروم، نیکل و روی) همراه رسوبات معلق و توزیع اندازه رسوبات معلق در حوزه آب‌خیز جنگلی کجور انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد که انتقال فلزات سنگین همراه رسوبات معلق ارتباط بسیار معنی داری با توزیع اندازه ذرات رسوبات معلق (لای و رس، ذرات کوچک تر از ۶۳ میکرومتر) در مقیاس مکانی حتی در یک بازه کوچک دارد.

یافته‌های این پژوهش به‌طور مشخص بر انجام مطالعات مشابه در دامنه گسترده و تهیه اطلاعات در نقاط کنترلی موردنظر تأکید دارد. اگرچه انجام پژوهش‌های مشابه در سایر حوزه‌های آبخیز و حتی با روش‌های جدیدتر و با دقت بالاتر در حوزه آبخیز مشابه برای دستیابی به نتایج جامع و امکان‌ارایه جمع‌بندی نهایی به‌طور مشخص تأکید می‌شود.

#### منابع

1. APHA, AWWA, WEF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21<sup>st</sup> ed. Washington, DC, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Pp: 7-15.
2. Asselman, N. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. J. Hydrol. 234: 228-248.
3. Chaudhari, S.K., Singh, R., and Kundu, D.K. 2008. Rapid textural analysis for saline and alkaline soils with different physical and chemical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 72: 431-441.
4. Das, G. 2000. Hydrology and soil conservation engineering, Prentice-Hal of India Press, 486p.
5. Edwards, T.K., and Glysson, G.D. 1999. Field methods for measurement of fluvial sediment, USGS Open-file Report Book, 3: 2. 1-97.
6. Gasparotto, E., Malo, D.D., and Gelderman, R.H. 2003. Impact of organic matter removal on particle size analysis by pipette and hydrometer, Soil/Water Research. Available at [http://plantsci.sdstate.edu/soiltest/REPORTSPAGE\\_CATEGORY.cfm](http://plantsci.sdstate.edu/soiltest/REPORTSPAGE_CATEGORY.cfm).
7. Gavlok, R., Horneck, D., Miller, R.O., and Kotuby-Amacher, J. 2003. Soil, Plant and Water Reference Methods for the Western Region, WREP 125. 2<sup>nd</sup> Edition WCC-103 Publication (<http://cropandsoil.oregonstate.edu/wera103/Methods/WCC-103-Manual-2003-Soil%20Sand-Silt-Clay.PDF>).
8. Horowitz, A.J., Elrick, K.A., and Smith, J. 2001. Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basins: methodological considerations as applied to the NASQAN programme, Hydrol. Process, 15: 1107-1132.
9. Jain, C.K., and Sharma, M. 2001. Distribution of trace metals in the Hindon River system, India, J. Hydrol. 253: 81-90.
10. Karamouz, M., and Araghinejad, Sh. 2005. Advanced hydrology. Amirkabir University of Technology, Tehran Polytechnic Press, 464p. (In Persian)
11. Khorasani, N., Shayegan, J., and Karimi Shahri, N. 2006. A survey of heavy metal concentration in the upper sediment layers of Bandar Abbas coasts. Iranian J. Natur. Res. 58: 4. 861-869. (In Persian)
12. Kiani Harchegani, M., and Sadeghi, S.H.R. 2011. Particle Size Characteristics of Suspended Sediment Transported in River Base and Flood-Flows. Water and Wastewater J. 1: 114-117. (In Persian)

13. Kiani Harchegani, M., Sadeghi, S.H.R., and Younesi, H.A. 2010. Comparison of heavy metals content in water and suspended sediment concentration, P 5. In: The 6<sup>th</sup> International Symposium on "Protection and Utilization of Ecosystems in Arid and Semi-Arid Regions", 2<sup>nd</sup>-6<sup>th</sup> October 2010, Karaj, Iran.
14. Martin, Ch.W. 2004. Heavy metal storage in near channel sediments of the Lahn River, Germany. *Geomorphology*, 61: 275-285.
15. Moussavi Herami, R. 2004. *Sedimentology*. Astan ghods razavi, Mashhad, 479p. (In Persian)
16. Sadeghi, S.H.R., Aghabeigi Amin, S., Vafakhah, M., Yasrebi, B., and Esmaeili Sari, A. 2006. Suitable drying time for suspended sediment samples, Iran, P 5. In: proceeding of International Sediment Initiative Conference, Khartoum, Sudan, 2006, Nov. 12-16: 71.
17. Sadeghi, S.H.R., Khaledi Darvishan, A.V., and Vafakhah, M. 2007. Study on channel hydraulic characteristic on morphology variation bed materials. *J. Hydr.* 1: 1. 1-10. (In Persian)
18. Sadeghi, S.H.R., and Kiani Harchegani, M. 2009. Temporal and Spatial Variations in Particle Size Distribution of Suspended Sediment in Kojour River. *Iran-Watershed Manag. Sci. and Engine.* 3: 8. 63-66. (In Persian)
19. Sadeghi, S.H.R., Kiani Harchegani, M., and Younesi, H.A. 2012. Suspended Sediment Concentration and Particle Size Distribution and their Relationship with Heavy Metals Contents, *J. Earth Sys. Sci.* 121: 1. 63-71.
20. Sadeghi, S.H.R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., Mizugaki, S., and Onda, Y. 2008. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma*, 144: 198-211.
21. Sadeghi, S.H.R., and Saeidi, P. 2010. Reliability of sediment rating curves for a deciduous forest watershed in Iran. *J. Hydrol. Sci.* 55: 5. 821-831
22. Walling, D.E., Owens, Ph.N., Waterfall, B.D., Leeks, G.J.L., and Wass, P.D. 2000. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments. *UK, Sci. Total Environ.* 251/252: 205-222.
23. Williams, N.D., Walling, D.E., and Leeks, G.J.L. 2008. An analysis of the factors contributing to the settling potential of fine fluvial sediment. *Hydrol. Process*, 22: 4153-4162.
24. Woodward, J.C., and Walling, D.E. 2007. Composite suspended sediment particles in river systems: their incidence, dynamics and physical characteristics. *Hydrol. Process*, 21: 3601-3614.
25. Zhao, Y., Marriott, S., Rogersa, J., and Iwugob, K. 1999. A preliminary study of heavy metal distribution on the floodplain of the River Severn, UK by a single flood event. *Sci. Total Environ.* 243/244: 219-231.
26. Zhao, H., Li, X., Wang, X., and Tian, D. 2010. Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China. *J. Hazard Mater.* 183: 203-210.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(1), 2013*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Spatial variations of relationship between heavy metals transportation and particle size distribution of suspended sediments**

**M. Kiani Harchegani<sup>1</sup> and \*S.H.R. Sadeghi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Watershed Management Engineering, Tarbiat Modares University, Noor, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Watershed Management Engineering, Tarbiat Modares University, Noor

Received: 11/02/2011; Accepted: 05/29/2012

### **Abstract**

The particle size distribution (PSD) of suspended sediment has fundamental importance in understanding its role in a variety of environmental processes, modeling the transport of sediment and sediment-associated contaminants including heavy metals, nutrients, radionuclide and synthetic organic compounds in river systems. This paper aimed to assess spatial variation of relationship between transport of heavy metals (iron, chromium, nickel and zinc) and PSD of suspended sediment. The study was conducted in Educational and Research Watershed of Tarbiat Modares University comprises some 50000 ha. Towards this attempt, twenty two sediment samples were collected from beginning and end of a study reach (700 m) during May 2007 to June 2008. The samples were then prepared through direct digestion and finally analyzed by atomic absorption spectrophotometer (AAS). The sediment samples were also analyzed for PSD determination based on Stokes' law with the help of modified pipette method after sample preparation. The relationship between PSD and heavy metals contents were thus evaluated applying bivariate regression models. Proposed models were then selected based on statistical criteria. The results showed a quite high correlation between iron, nickel, chromium and zinc content in suspended sediment and fine PSD (silt and clay) at confidence level of beyond 95% and with correlation coefficient greater than 0.71%. However, the variability of type and quality of relationships at two study points were also well proved.

**Keywords:** Forest Watershed of Kojur, Heavy metal concentration, Particle size distribution, Regression model, Suspended sediment concentration

---

\* Corresponding Author; Email: [sadeghi@modares.ac.ir](mailto:sadeghi@modares.ac.ir)