

بررسی آلودگی عناصر بالقوه سمی در مخزن سد لتیان، با نگرشی به نقش رسوبات در کنترل آلاینده‌ها

اعظم سرهنگی^۱، سروش مدبری^۲، سیدرضا موسوی حرمی^۳ و مریم زیبایی^۱

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۲۴

چکیده

آلودگی‌های انسان‌زاد و یا زمین‌زاد مهم‌ترین تهدیدکننده‌های منابع آبی هستند که ارتباط مستقیم با سلامت عمومی جامعه دارد و توسعه انسانی منابع آب را به شدت تهدید می‌کند. مخزن سد لتیان، یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب تهران است که در این نوشتار، مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی همزمان آب و رسوب در آن مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور ۸ ایستگاه در سطح دریاچه انتخاب و نمونه‌برداری آب (برای دو فاز معلق و حل شده) و رسوبات سطحی بستر بر اساس استانداردها و دستورالعمل‌های معتبر انجام گرفت. نتایج تجزیه ژئوشیمیایی انجام شده به روش ICP-OES، بر روی نمونه‌های برداشت شده از آب و رسوب مخزن سد لتیان، نشان داد که غلظت عناصر بالقوه سمی در بیشتر نمونه‌ها زیر حد آشکارسازی دستگاه و در حد استانداردهای EPA برای آب آشامیدنی است و نمونه‌های رسوب برای بیشتر عناصر جزو آرسنیک و سرب که تأثیرات مضر برای گونه‌های زیستی دارند، در محدوده مجاز معیارهای کیفی قرار گرفته است. همچنین ضریب EF و شاخص I_{geo} حالت بدون آلودگی نمونه‌های رسوبی را نشان داد. غنی‌شدگی فلزی بسیار شدید رسوبات نسبت به آب در این محدوده در مقایسه با مطالعات انجام شده در دیگر نقاط جهان نشانگر نقش آشکار و چشمگیر فرایندهای جذب سطحی در جذب آلاینده‌ها از آب و نیز خطر احتمالی برگشت عناصر از رسوب به ستون آب باشد.

کلیدواژه‌ها: فلزات سنگین، عناصر بالقوه سمی، جذب سطحی، مخزن سد لتیان، آلودگی رسوب، آلودگی آب، رودخانه جاجرود.

*نویسنده مسئول: اعظم سرهنگی

E-mail: sarhangi_az13am63@yahoo.com

۱- پیش‌گفتار

و غنی‌شدگی بسیار کم نسبت به کروم گزارش کرد. (Forstner (2010 از رسوبات به‌عنوان ابزاری مهم برای ارزیابی آلودگی در حوضه آبریز رود Barigui در برزیل استفاده کردند (Hursthouse & Kawalczyk (2009 با یک دیدگاه بررسی آلاینده از منبع (source) تا مسیرهای انتقال (pathway) و پذیرنده (receptor) حمل و نقل و دینامیک انتقال آلاینده‌ها را در منابع آب بررسی کرده و به اثرات آنها بر سلامت انسان پرداختند.

در این نوشتار، برای نخستین بار مطالعه همزمان آب و رسوب از دید آلاینده‌های فلزی در مخزن سد لتیان صورت پذیرفت. با توجه به این موضوع که سرشاخه‌هایی که به دریاچه سد لتیان می‌ریزند، از سازندهای زمین‌شناختی عبور کرده‌اند، عناصر می‌توانند به صورت معلق و یا محلول حمل و با تغییرات فیزیکی‌وشیمیایی محیط وارد فاز رسوب شوند. شاخه لوارک در محلی که به دریاچه وارد می‌شود، از عضو دوم سازند کرج به سن میوسن یعنی توف‌ها و دیگر وابستگان عضو توف میانی این سازند عبور می‌کند. سرشاخه افجه از مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی قدیمی که غالباً شامل سازند کهریزک است، عبور کرده است و آبرفت‌های سست گستره‌های سیلابی عهد حاضر در سرشاخه جاجرود دیده می‌شوند. همچنین در محل ورود شاخه برگ جهان (لوارک)، زمین‌لغزش، سنگ‌ریزش و روانه‌های سنگی وجود دارد (وحدتی، ۱۳۷۶). وجود پادگان و کشتارگاه لشکرک و همچنین رستوران‌ها، مناطق مسکونی و دیگر مراکز در مسیر رودخانه جاجرود که مهم‌ترین سرشاخه منتهی به سد است و آلودگی ناشی از تخلیه پساب این مراکز در رودخانه می‌تواند در ایجاد و انتقال آلاینده‌ها به مخزن سد لتیان سهم باشد.

هدف از این نوشتار، تحلیل غلظت عناصر بالقوه سمی موجود در آب و رسوبات سطحی مخزن سد لتیان و تعیین نقش این رسوبات در جذب عناصر بالقوه سمی و همچنین بررسی احتمال رهاسازی عناصر از رسوب و ورود آنها به آب به‌عنوان عامل تهدیدکننده است که در توسعه راهبردی این حوضه باتوجه به حفظ کیفیت آب

عناصر بالقوه سمی مانند سرب، جیوه، روی، نیکل، کروم، کادمیم و غیره با توجه به توسعه شهری و صنعتی، بیشتر از طریق دفع نادرست و غیر بهداشتی فاضلاب شهری و پساب صنعتی وارد محیط زیست می‌شوند. وجود این فلزات در غلظت بیش از استاندارد در آب شرب باعث عوارض و بیماری‌های مختلف در انسان می‌شود. رسوب در طرح‌های سدسازی و انتقال آب اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. از یک سو رسوب باعث پرشدن و کوتاه شدن عمر مفید سدها شده و از سوی دیگر با توجه به ترکیب کانی شناختی خود می‌تواند عناصر و آلاینده‌ها را جذب کرده و از سرشاخه به پایین‌دست انتقال دهد و به عبارتی غلظت آنها را در آب کنترل کند (Miller, 2007). جذب سطحی و واجذب مواد آلی و غیر آلی توسط ذرات، نقش مهمی در توزیع آنها در محیط دارند. به طور کلی هر چه اندازه ذره کوچکتر باشد، نسبت سطح به حجم بزرگتر می‌شود. مساحت سطح ذره، در فرایندهای جذب سطحی - واجذب عاملی اساسی است، زیرا پیوندهای شکسته شده در سطح یافت می‌شوند و این جایی است که ذرات در معرض محلول پیرامونی بار الکتروستاتیکی خالص دارند. این بار سطحی، ناشی از جایگزینی کاتیون‌های با بار کمتر به جای کاتیون‌های با بار بیشتر در ساختار بلور یا واکنش‌های دربرگیرنده گروه‌های عاملی موجود در سطح کانی و یون‌های موجود در محلول است (Eby, 2004).

پژوهش‌های متعدد آلودگی آلاینده‌های مختلف در فاز آب یا رسوب به منظور تعیین پتانسیل آلودگی رودخانه‌ها و دریاچه‌ها در ایران و دیگر نقاط جهان در حال انجام است. (Tao (2004 پتانسیل به حرکت درآوردن فلزات سنگین در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها را مطالعه کرد. (Ghrafat et al. (2010 رسوبات سد آل‌عرب را نسبت به منگنز، آهن و مس غیر آلوده و توسط روی و کادمیم بسیار آلوده گزارش کردند و علت آن را منابع انسانی نزدیک سد مانند کودها، آفت‌کش‌ها و پساب مراکز درمانی شهر ایربید اعلام کردند. (Cevik et al. (2008 آلودگی فلزی رسوبات سطحی دریاچه سیهان در ترکیه را بررسی و نتیجه آن را غنی‌شدگی شدید نسبت به کادمیم

رساندن میزان خطا در مورد نمونه‌های آب از ظروف پلی‌اتیلنی درب‌دار با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتری، که قبلاً اسیدشویی شده و با آب مقطر آبکشی شده بود استفاده شد. همچنین پیش از پر کردن ظرف سه بار در آب دریاچه شستشو و سپس به مدت چند دقیقه در همان آب غوطه‌ور مانده تا احتمال آلودگی ناشی از ظروف برداشت نمونه به حداقل برسد. بعد از این مرحله با فرو بردن بطری زیر آب، نمونه‌برداری انجام شد. در هر یک از ایستگاه‌های منتخب یک نمونه رسوب در ظروف پلاستیکی ۲ کیلوگرمی برداشت شد، نمونه‌های نواحی رودخانه‌ای و حواشی دریاچه توسط بیلچه پلاستیکی و نمونه‌های دریاچه نیز توسط نمونه‌بردار رسوب (Grab) از ژرفاهای ۵۰ تا ۳ متر انجام شد. سپس نمونه‌ها به صورت زیر آماده‌سازی شدند:

نمونه‌های آب: به نمونه اول که برای اندازه‌گیری فلزات جزئی در نظر گرفته شده، بلافاصله پس از برداشت، به نسبت ۱ به ۱۰۰ اسیدنیتریک غلیظ مرکب اضافه شد تا از واکنش‌های بعدی میان عناصر پیشگیری شود و در واقع نمونه تثبیت شود. نمونه دوم برای اندازه‌گیری کاتیون‌ها و آنیون‌ها بلافاصله پس از برداشت توسط یخچال صحرایی حمل و به آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای تهران ارسال شد.

نمونه‌های رسوب: نمونه‌های رسوب پس از انتقال از منطقه به آزمایشگاه، ابتدا خشک و مواد اضافی مانند شاخ و برگ از آن جدا شدند. سپس ذرات بالای غربال ۱۰ مش برای دانه‌بندی به روش غربال خشک استفاده شد. رسوبات زیر غربال ۱۰ مش به اندازه ۵ گرم برای دانه‌بندی به روش هیدرومتری استفاده شد. برای این آزمایش ۵۰ گرم از رسوب با ۱۲۵ میلی‌لیتر از محلول استوک (محلول ۴٪ نرمال دگزامتاسفات سدیم) مخلوط شده و حجم محلول را با آب مقطر به یک لیتر رسانده و پس از انتقال به مزون در زمان‌های ۱۵ ثانیه، ۳۰ ثانیه، ۱ دقیقه، ۲ دقیقه، ۴ دقیقه، ۸ دقیقه، ۱۵ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۴ ساعت و ۲۴ ساعت قرائت کرده و پس از اعمال تصحیح‌های حرارتی، منیسک و صفر، همه رسوب روی الک ۲۰۰ شسته و در آون خشک و دوباره دانه‌بندی شده است (Folk, 1980). ۵۰ گرم از رسوبات زیر غربال ۲۰۰ مش برای عناصر اصلی و جزئی در آزمایشگاه هضم و مورد تجزیه ژئوشیمیایی قرار گرفت. همه تجزیه‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های آب و رسوب در آزمایشگاه شرکت معدنی زرا‌آزما توسط روش ICP-OES انجام گرفت.

۴- بحث

در یک سیستم دریاچه‌ای، فلزات بین فاز محلول (ستون آب و آب بین ذرات رسوب)، فاز جامد (معلق و رسوب کرده)، جانوران و گیاهان آبی توزیع و همواره بین فازهای مختلف مبادله می‌شوند که این تبادلات، در محیط‌های مختلف یکنواخت و یکسان نیست (Wetrich & Forstner, 2007).

بیشتر فلزات قابل حل در آب، به صورت کاتیون محلول در آب است مانند کلسیم، سدیم و غیره در حالی که برخی از عناصر بیشتر به صورت آنیون در آب حمل می‌شوند مانند گوگرد و کربن (حسینی پاک، ۱۳۶۲).

طبق نتایج کاتیونی و آنیونی نمونه‌های آب مخزن سد لتیان، تغییرات کاتیون‌های نمونه‌های آب دریاچه لتیان از روند $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Ca^{2+}$ و تغییرات غلظت آنیون‌ها نیز از روند $CO_3^{2-} > Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ پیروی می‌کند (جدول ۱) و پس از رسم کردن نمونه‌ها توسط نرم‌افزار Rock work 14 روی نمودار پایپر (شکل ۲) که رایج‌ترین نمودار برای تعیین نوع نمونه‌های آب است، از نظر کاتیونی، کلسیم و از نظر آنیونی، بیکربنات یون غالب در نمونه‌های آب هستند، بنابراین نوع آب مخزن لتیان بی‌کربنات کلسیم گزارش شد. از دید دسته‌بندی که Stallard & Edmond (1983) برای شیمی آب‌ها پیشنهاد کردند، آب‌های دریاچه مورد مطالعه در رده‌ای هستند که هوازگی سنگ غالب است زیرا غلظت Ca و Mg، با توجه به زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به دلیل حضور رسوبات حاوی کربنات که از سازندهای حاوی آهک منشأ می‌گیرد، قابل ملاحظه است و نوع سنگ منشأ رسوبات دریایی، کربنات‌ها،

شرب و بهداشتی شهروندان تهرانی و همچنین حوضه‌های آبریز مشابه در دیگر نقاط کشور اهمیت بالایی دارد تا با استفاده از نتایج به‌دست آمده از این مطالعه برنامه‌های مدیریتی لازم در توسعه پایدار و حفظ محیط زیست این حوضه و همچنین آب شرب سالم اجرایی شود.

۲- معرفی منطقه و راه‌های دسترسی

سد لتیان بر روی رودخانه جاجرود بین طول جغرافیایی $51^{\circ}22'$ تا $51^{\circ}50'$ خاوری و عرض جغرافیایی $35^{\circ}45'$ تا $36^{\circ}5'$ شمالی در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال خاوری شهر تهران و ۵ کیلومتری جاجرود قرار دارد. رودبار قصران، بزرگ‌ترین حوضه آبریز سد لتیان با ۵۰۰ کیلومتر مربع مساحت و یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب تهران است و در حال حاضر حدود ۳۰ درصد کل منابع آب شرب را تأمین می‌کند. این سد در محلی که رودخانه برگ جهان به جاجرود می‌ریزد و در دره‌ای در میان کوه جاجرود و کوه بندک ساخته شده و در شمال آن کوه آلون قرار دارد. دو پارک جنگلی به نام‌های لتیان و تلو دریاچه این سد را احاطه کرده‌اند (شکل ۱). روستاهای بسیاری در شمال دریاچه سد لتیان قرار گرفته‌اند. همچنین به دلیل قرار گرفتن این منطقه در زون البرز مرکزی شرایط آب و هوایی آن، به طور کلی متأثر از وضعیت آب و هوایی البرز است. دمای سالانه در مرداد گرم‌ترین فصل سال، با حداقل ۱۰ درجه و حداکثر ۲۷ درجه و دی ماه، سردترین ماه سال با حداقل ۸- درجه سانتی‌گراد است و سهم نسبی آورد سالانه هریک از شاخه‌ها عبارت است از جاجرود ۶۰٪، لوارک ۳۰٪، افجه ۳٪ و گلندوک ۷٪. شیب در این حوضه زیاد است به گونه‌ای که در بسیاری از نقاط از جمله دامنه جنوبی دریاچه لتیان احتمال رخداد زمین‌لغزش وجود دارد (خطیبی، ۱۳۸۲).

برای دسترسی به منطقه (از شهر تهران)، از بزرگراه بابایی به سمت جاده تلو و پس از سه‌راه لشگرک به سمت لواسان امکان‌پذیر است و برای دسترسی به محل سد و دریاچه لتیان، می‌تواند از جاده دماوند سپس ورودی جاده سد لتیان، به محل سد لتیان استفاده کرد.

۳- مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری یکی از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌های پایش کیفیت منابع آب و تخلیه‌های فاضلاب است و هرگونه سهل‌انگاری یا اشتباه در این بخش می‌تواند نتایج تجزیه‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های انجام شده را با ابهام جدی مواجه سازد (ANZECC, 2000; USEPA, 2000).

نمونه‌برداری در هر ایستگاه بر اساس استانداردهای تعریف شده در مراجع معتبر بین‌المللی، دستورالعمل ملی نمونه‌برداری منتشر شده توسط USGS، از آب و رسوبات دریاچه سد لتیان، در شهریور ۱۳۹۰ به منظور بررسی‌های رسوب‌شناسی و زیست‌محیطی انجام شد (Krauskopf & Bird, 1976; Forstner, 2004a & b; Kabata-pendias & Mukherjee, 2007; Nriagu & Wong, 1986; Smol, 2002; Perry & Taylo, 2007).

به این منظور ۸ ایستگاه برای نمونه‌برداری انتخاب شد، ۲ ایستگاه در انتهای رودخانه جاجرود که مهم‌ترین تأمین‌کننده آب سد لتیان است، یکی در محل پل لشگرک به دلیل وجود پادگان و گشتارگاه لشگرک و دیگری در محل ورودی به دریاچه، یعنی جایی که بار رسوبی اصلی رودخانه نهشته می‌شود و بقیه ایستگاه‌ها، در محل ورود هر شاخه به دریاچه و یک ایستگاه نیز پشت سد در نظر گرفته شد (شکل ۱). در هر ایستگاه ۲ نمونه آب سطحی به منظور اندازه‌گیری عناصر جزئی، کاتیون‌ها و آنیون‌ها، با روشی به نام غوطه‌ور کردن یا نمونه‌برداری ساده که همان پر کردن ظرف در کمترین فاصله از سطح آب است، استفاده شد. برای دسترسی به ۵ ایستگاه انتخاب شده در وسط دریاچه از قایق استفاده شد. برای به حداقل

در نمونه‌های آب و رسوب دریاچه لتیان بسیار بالاست به طوری که غنی‌شدگی آرسنیک، مس، روی و سرب نمونه‌های رسوب ۱۰۰ هزار بار نسبت به آب بیشتر است. همچنین غنی‌شدگی کادمیم ۱۰ هزار بار، غنی‌شدگی آهن در رسوبات ۱ میلیون بار بیشتر از آب است. احتمالاً در این ناحیه فلزات موجود در رسوب، از آب ته‌نشین شده و وارد فاز رسوب شده‌اند. همان‌طور که قبلاً نیز در این مطالعه اشاره شد عناصری که در فاز رسوب قرار دارند می‌توانند دوباره وارد ستون آب شوند. بنابراین آب دریاچه سد لتیان می‌تواند به فلزات بالقوه سمی آلوده شود.

نتایج دانه‌بندی نمونه‌های رسوبی نشان می‌دهد بیشترین رسوبات دریاچه را رس و سیلت‌ها تشکیل داده‌اند، بنابراین می‌تواند سهم بالایی در ایجاد جذب فلزی داشته باشد. رسوبات ایستگاه‌های رودخانه‌ای ماسه‌ای است بنابراین رودخانه ذرات درشت را در ابتدا برجای گذاشته و ذرات ریزتر را با خود حمل کرده و در دریاچه ته‌نشین می‌کند (جدول ۶). با وجودی که ریزترین دانه‌ها در کناره بدنه سدها ته‌نشین می‌شود اما در این مخزن بیشترین رس‌ها مربوط به ایستگاه سوم (پارک جنگلی تلو) است، زیرا شیب دیواره جنوبی بالاست و زمین‌لغزش باعث ورود رسوبات بیشتر به دریاچه می‌شود.

بیشترین غلظت سرب رسوبات مخزن لتیان مربوط به ایستگاه ششم نمونه‌برداری است. در دامنه جنوبی دریاچه صنایعی مانند باتری‌سازی استقرار دارند. سرب می‌تواند به صورت ذرات معلق وارد رسوبات مخزن شود. همچنین غنی‌شدگی بالای رسوب نسبت به آب که در حدود ۱۰۰ هزار برابر است خطر ورود آن را به آب بیان می‌کند (شکل ۳).

نتایج بیانگر این است که غلظت آرسنیک در ایستگاه هشتم (لوارک) زیر حد آشکارسازی دستگاه بوده در حالی که در بقیه ایستگاه‌ها بالاتر از حد آشکارسازی دستگاه گزارش شده، این در حالی است که رسوبات ایستگاه هشتم بالاترین غلظت آرسنیک (۲۷/۵ ppm) را نشان می‌دهند، بنابراین آرسنیک که توسط آب شاخه لوارک حمل می‌شود بلافاصله پس از ورود به دریاچه در رسوبات ته‌نشین می‌شود (شکل ۴).

۵- نتیجه‌گیری

غلظت عناصر بالقوه سمی در آب در حد استاندارد EPA و برای رسوب در بیشتر ایستگاه‌ها در حد معیارهای زیست‌محیطی کانادا قرار دارد. اما غنی‌شدگی رسوب نسبت به آب بالاست که این موضوع می‌تواند نشانگر نقش فعال رسوب در زدودن عناصر از آب باشد که البته در اثر هرگونه تغییرات فیزیوشیمیایی محیط ممکن است دوباره به ستون آب برگردد.

غلظت عناصر آهن، منگنز و آلومینیم در نمونه‌های رسوب بالاست، بنابراین فازهای کلویدی اکسی-هیدروکسی‌های آهن، منگنز و آلومینیم به عنوان فازهای اصلی انتقال‌دهنده عناصر به شمار می‌روند که بیشتر به صورت کلویدی در محیط رودخانه وجود داشته و در دریاچه سد ته‌نشین و وارد فاز رسوب می‌شوند.

با توجه به اینکه رسوبات ایستگاه سوم دریاچه (تلو) رسی هستند، میزان عناصر فلزی کادمیم، آهن، مس، کروم، آلومینیم و نیکل در این ایستگاه، بالاترین میزان غلظت را نسبت به دیگر ایستگاه‌های نمونه‌برداری دارد و نشانه رابطه‌ای مستقیم با سطح جذب کانی‌های رسی است.

میزان بالاتر سرب در ایستگاه ششم نسبت به بقیه ایستگاه‌ها، ممکن است به علت حمل این عنصر توسط سرشاخه افجه به علت صنایع بالادست به دریاچه باشد. همچنین به علت تمرکز بالای سرب در کانی‌هایی مانند ارتوکلاز (در سنگ‌های اسیدی تا متوسط)، زیرکن و فلدسپارهای پتاسیم، احتمال دارد میزان بالای این عنصر در ایستگاه ششم، به علت فرسایش سازندهای بالادست دریاچه به‌ویژه توفیت‌های کرج باشد.

پیریت و اندکی تبخیری است و میزان TDS بین ۴۰ تا ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد. بر اساس نتایج آمده از تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌های آب برای عناصر Cu, Fe, Pb, Zn (جدول ۲)، بیشتر عناصر جزئی زیر حد آشکارسازی دستگاه هستند و تنها در برخی ایستگاه‌ها آهن و آرسنیک کمی بالاتر از این حد گزارش شده‌اند اما آن هم در حد مجاز واقع شده است.

تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌های رسوب مخزن لتیان برای ۲۶ عنصر اصلی و جزئی انجام شد (جدول ۳) و مقایسه نتایج آن با معیارهای کیفی زیست‌محیطی کانادا (جدول ۴) نشان می‌دهد بیشتر عناصر در نمونه‌ها در حد مجاز قرار گرفته‌اند، تنها آرسنیک و سرب، حد اثر احتمالی (TEL و PEL) بالاتری را نشان می‌دهند و می‌تواند تأثیرات مضر را بر روی گونه‌های زیستی داشته باشد. TEL پایین‌ترین غلظتی است که تأثیرات زیست‌شناسی مضر، انتظار می‌رود به ندرت اتفاق بیفتد و PEL بالاترین غلظتی است که تأثیرات زیست‌شناسی مضر، انتظار می‌رود به طور مکرر اتفاق بیفتد (Modabberi, 2004).

تحلیل خوشه‌ای عناصر یک روش تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی است که بیشتر به منظور طبقه‌بندی عناصر مورد بررسی در گروه‌ها و یا زیر گروه‌ها است، به گونه‌ای که همبستگی بین عناصر در هر گروه و یا یک گروه با گروه دیگر حداکثر شود. در این مطالعه برای طبقه‌بندی از میانگین عناصر و برای فاصله از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. تحلیل خوشه‌ای رسوبات دریاچه سد لتیان نشان می‌دهد Sc و Co و Al از دید ژئوشیمیایی بسیار به هم نزدیک هستند. همچنین Cr و Fe و V ارتباط نزدیکی دارند و محصول سازندهای بالادست به‌ویژه سنگ‌های بازیک حاوی پیروکسن و مگنتیت موجود در سازندهای آتشفشانی منطقه مانند توفیت‌های سازند کرج هستند. عناصر La و Ce, Ca, Mn, Y و Li, Ca, Mn نیز ارتباط نزدیکی را از لحاظ ژئوشیمی نشان می‌دهند و Ag, Sb, Cd نیز ارتباط نزدیکی دارند. وجود این عناصر در رس‌ها و ترکیبات آهن و منگنز ممکن است دلالت بر وجود یا تمرکز آنها در سنگ‌های اطراف داشته باشد (شکل ۵).

تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌تواند داده‌های استاندارد شده فلزات سنگین را در کل ایستگاه‌ها با یک مقایسه یکپارچه ترکیب کند و توسط حداقل عوامل، اجزای اصلی را معرفی و سپس ویژگی‌های فلزی سنگین را تعیین کند. مؤلفه اول رسوبات دریاچه سد لتیان توسط نرم‌افزار SPSS شامل عناصر La, Mn, Cu و فلزات Al, Ce, Co, Li, Sc است و عمدتاً نشانگر گروه عناصر لیتوفیل‌ها هستند و مؤلفه دوم شامل Ag, As, S, Sb است که جزو کالکوفیل‌ها هستند (جدول ۵).

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تشخیص و تحلیل آلودگی رسوبات، به کارگیری ضریب غنی‌شدگی با استفاده از رابطه ۱ است. ضریب غنی‌شدگی نشان‌دهنده مقدار افزایش غلظت یک عنصر نسبت به غلظت طبیعی آن در پوسته، سنگ بستر یا خاک است که در این مطالعه اسکندیم به عنوان عنصر مرجع در نظر گرفته شده و بقیه عناصر نسبت به آن بهنجار شدند. نتایج به‌دست آمده، نشان‌دهنده غنی‌شدگی کم ($EF < 3$) برای عناصر نقره، آرسنیک، سلنیم، لانتانیم، منگنز، فسفر، سرب، گوگرد، وانادیم و روی است.

رابطه ۱

همچنین شاخص زمین‌انباشت مولر (رابطه ۲) که از دیگر معیارهای تشخیص

آلودگی است، بیانگر فقیرشدگی برای بیشتر عناصر موجود در رسوبات مخزن سد لتیان است و تنها سرب در ایستگاه ششم آلودگی کم تا متوسط ۰/۶ را نشان داد.

رابطه ۲

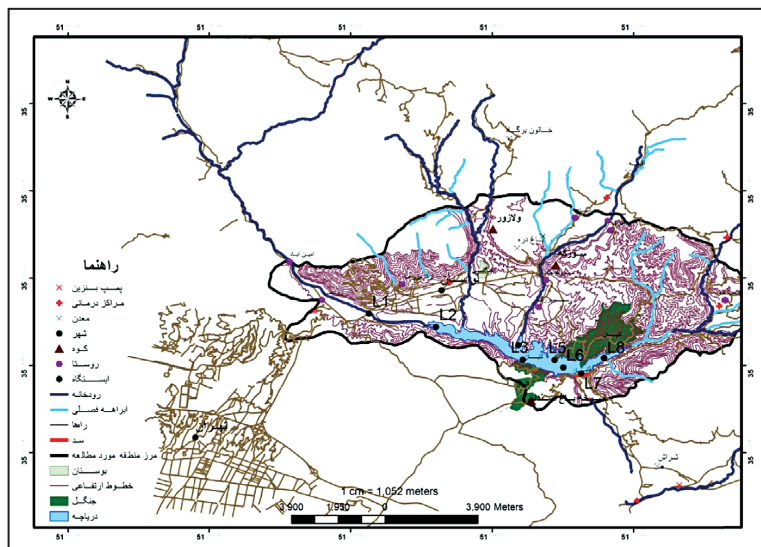
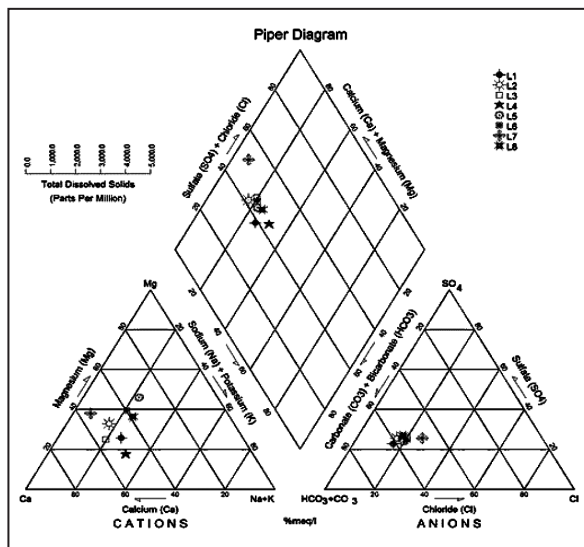
هرچند آب دریاچه نسبت به فلزات بالقوه سمی در حد آلودگی نیست ولی نقش رسوبات دریاچه در تمرکز فلزات قابل توجه است. غنی‌شدگی رسوب نسبت به آب

نتایج حاصل از ضرب غنی‌شدگی نشان داد رسوبات بستر مخزن لتیان با عناصر نقره، آرسنیک، سلنیم، لانتانیم، منگنز، فسفر، سرب، گوگرد، وانادیم و روی غنی‌شدگی کم ($EF \leq 3$) دارند.

نتایج حاصل از شاخص زمین‌انباشت مولر نشان داد رسوبات بستر مخزن لتیان نسبت به بیشتر عناصر فقیرشدگی دارند و تنها رسوبات ایستگاه ششم کمی با سرب آلوده است.

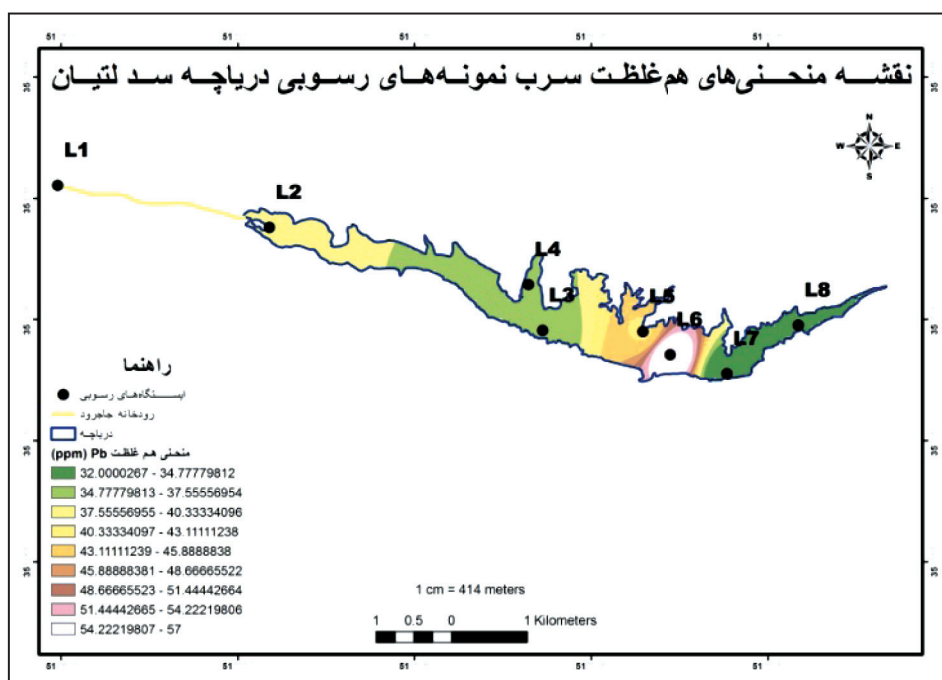
آرسنیک که توسط شاخه لوآرک حمل می‌شود بلافاصله در رسوبات این بخش از دریاچه ته‌نشین شده است و منشأ آن می‌تواند سازندهای آتشفشانی به‌ویژه توفیت‌های کرج باشد.

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد این عناصر از سازندهای موجود در بالادست مانند ماسه‌سنگ‌های زاگون، لالون و توفیت‌های سازند کرج جدا و وارد فاز رسوب شده‌اند.

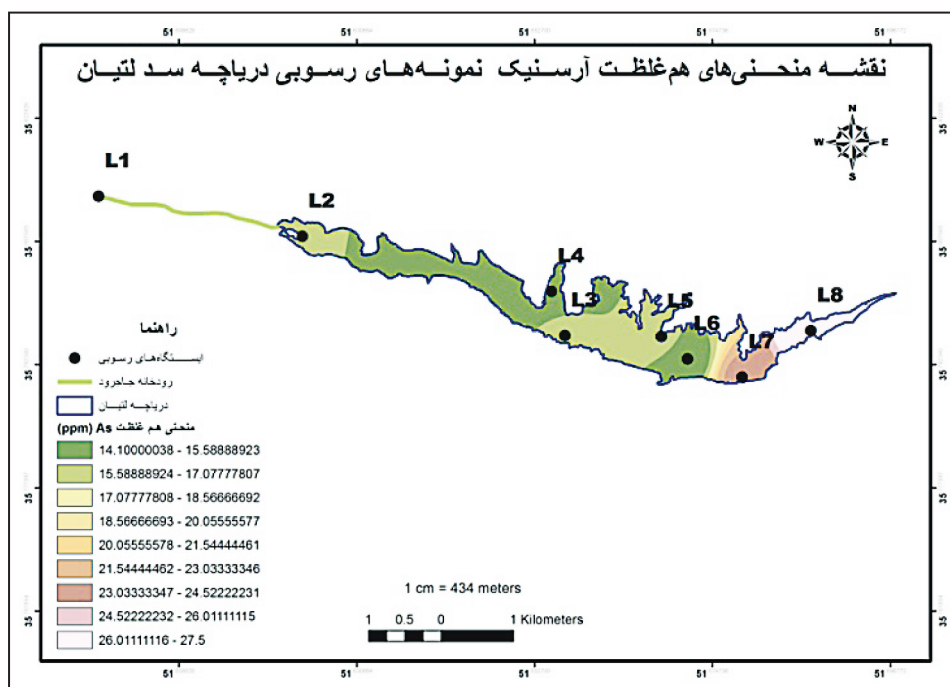


شکل ۲- تپ نمونه‌های آب مخزن لتیان بر روی نمودار پایپر (Rock Works 14).

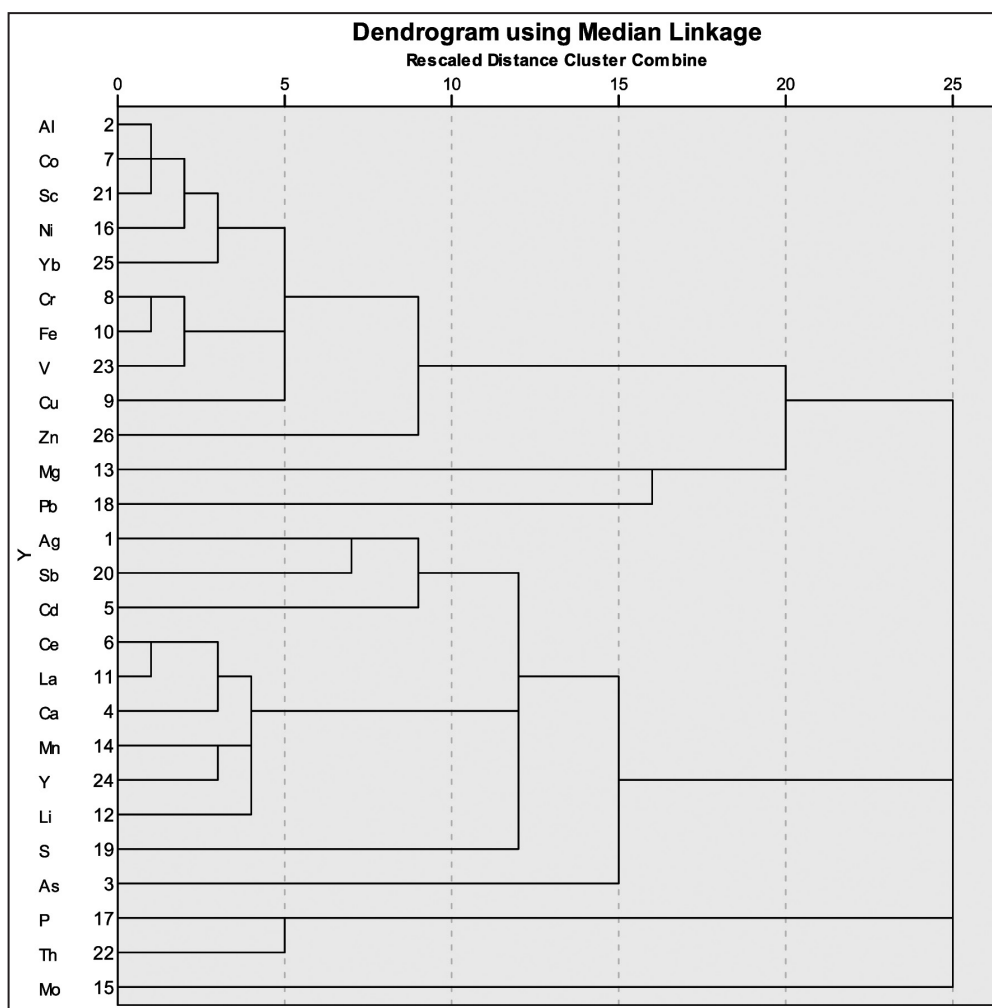
شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌ها در نقشه محدوده مورد مطالعه (خروجی نرم‌افزار Arc GIS).



شکل ۳- منحنی‌های هم‌غلظت دو عنصر آرسنیک و سرب در نمونه‌های رسوبی (خروجی نرم‌افزار Arc GIS).



شکل ۴- منحنی‌های هم‌غلظت دو عنصر آرسنیک و سرب در نمونه‌های رسوبی (خروجی نرم‌افزار Arc GIS).



شکل ۵- نمودار خوشه‌بندی عناصر دریاچه سد لتیان (توسط نرم‌افزار SPSS19).

جدول ۱- نتایج تجزیه آنیون‌ها و کاتیون‌ها در نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه (واحد تمام پارامترها ppm).

DO	TDS	pH	EC	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	No ₃	PO ₄	Sample No.
	۲۱۳	۸/۰۵	۴۷۹	۰	۳/۳۷	۰/۵۱	۰/۹۹	۲/۵۲	۰/۸۱	۱/۴۷	۰/۰۶	۰/۰۹۶	۰/۰۸۶	L1
	۲۰۸	۸/۰۳	۴۰۹	۰	۲/۷۴	۰/۴۴	۰/۹۵	۲/۴۳	۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۷۲	L2
۸/۹	۱۶۷	۸/۷۷	۳۲۸	۰/۳۱	۱/۶۹	۰/۵	۰/۸۷	۲/۰۵	۰/۵۶	۰/۷۹	۰/۰۷	۰/۰۴۸	۰/۱۷۷	L3
	۱۷۳	۸/۰۷	۳۴۰	۰	۲/۲۷	۰/۴۲	۰/۸۳	۱/۹۳	۰/۴	۱/۳۳	۰/۰۵	۰/۰۴۸	۰	L4
۸/۹	۱۶۷	۸/۲۸	۳۲۸	۰	۲/۱۵	۰/۴۳	۰/۷۲	۱/۲۴	۱/۱	۱	۰/۰۳	۰/۰۴۸	۰/۰۶۵	L5
۸/۹	۱۶۷	۸/۳	۳۲۹	۰	۲/۱۲	۰/۴۶	۰/۷۵	۱/۵۶	۰/۹۴	۰/۹	۰/۰۶	۰/۰۴۸	۰	L6
۸/۹	۱۶۸	۸/۳۲	۳۳۰	۰/۱۲	۱/۸	۰/۶۵	۰/۸۶	۲/۲۸	۰/۹۶	۰/۳۱	۰/۰۴	۰/۰۴۸	۰/۰۶۴	L7
۸/۹	۱۶۷	۸/۳	۳۲۹	۰	۲/۱۸	۰/۴۱	۰/۸۴	۱/۵۶	۰/۸۹	۱/۱۳	۰/۰۳	۰/۰۴۲	۰/۰۱۵	L8
۸/۹	۲۱۳	۸/۷۷	۴۷۹	۰/۳۱	۳/۳۷	۰/۶۵	۰/۹۹	۲/۵۲	۱/۱	۱/۴۷	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۷۷	Max
۸/۹	۱۶۷	۸/۰۳	۳۲۸	۰	۱/۶۹	۰/۴۱	۰/۷۲	۱/۲۴	۰/۴	۰/۳۱	۰/۰۳	۰/۰۴۲	۰	Min
	۱۹/۷۴	۰/۲۳	۵۵/۸۳	۰/۱۱	۰/۵۳	۰/۰۷۸	۰/۱۱۱	۰/۴۶	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۰۱۴	۰/۰۱۹	۰/۰۵۸	SD
۸/۹	۱۷۸/۷	۸/۲۶۵	۳۵۹	۰/۰۵	۲/۲۹	۰/۴۷	۰/۸۵	۱/۹۴	۰/۸۲	۰/۹۸	۰/۰۴۷	۰/۰۵۷	۰/۰۵۹	AVE

جدول ۲- نتایج تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌های آب دریاچه سد لتیان (توسط ICP-OES)، ۰۲ نمونه‌های فیلتر نشده و ۰۳ نمونه‌های فیلتر شده است.

Element	As	Fe
Unit	ppb	ppb
DI	0.01	0.02
L01-02	0.01>	0.47
L01-03	0.01>	0.02>
L02-02	0.01>	0.25
L02-03	0.021	0.02>
L03-02	0.016	0.03
L03-03	0.01>	0.02>
L04-02	0.01>	0.25
L04-03	0.015	0.02>
L05-02	0.01>	0.04
L05-03	0.01>	0.02>
L06-02	0.01>	0.03
L06-03	0.01>	0.02>
L07-02	0.015	0.04
L07-03	0.01>	0.02>
L08-02	0.01>	0.03
L08-03	0.01>	0.02>
حد مجاز در آب EPA	0.11-9.4	66

جدول ۳- نتایج تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌های رسوب برداشت شده از بستر دریاچه سد لتیان (توسط ICP-OES).

Element	Ag	Al	As	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	La	Li	Mg
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
DL	0.1	100	0.5	100	0.1	1	1	1	1	100	1	1	100
Method	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01
L1	0.33	40356	16.3	56855	0.27	50	11	49	25	28656	21	32	15613
L3	0.35	63247	16	76747	0.27	56	15	62	38	33139	23	45	15437
L4	0.38	52694	14.1	89466	0.29	55	13	55	31	30030	23	38	15763
L5	0.38	62698	15.9	86901	0.28	58	15	63	35	32983	24	47	16006
L6	0.36	58531	14.5	83349	0.27	57	14	55	38	31193	24	41	15756
L7	0.36	59748	23.4	94894	0.28	59	14	52	31	29932	25	51	14339
L8	0.39	51411	27.5	99173	0.28	60	13	45	28	27183	25	48	13337
Max	0.39	63247	27.5	99173	0.29	60	15	63	38	33139	25	51	16006
Min	0.33	40356	14.1	56855	0.27	50	11	45	25	27183	21	32	13337
STDEV	0.02	8093.09	5.12	14006.06	0.007	3.309	1.397	6.528	4.956	2180.7	1.39	6.5683	975.65
AVE	0.36	55526	18.24	83912.14	0.27	56.42	13.571	54.428	32.285	30445.1	23.57	43.14	15178.7
Element	Mn	Mo	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Th	V	Y	Yb	Zn
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
DL	5	0.5	1	5	1	50	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.2	1
Method	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01
L1	715	1.1	33	983	39	376	1.14	7.5	28.5	64	19	1.8	93
L3	1123	1.04	47	844	36	366	1.09	11.4	15.6	78	22	2.1	108
L4	892	1.15	40	920	37	385	1.19	9.6	16.7	70	22	2.1	112
L5	1264	1.05	50	915	43	423	1.2	11.3	17.4	80	24	2.2	115
L6	1099	1.09	43	884	57	376	1.15	10.6	16.1	73	23	2.1	98
L7	1167	1.08	45	884	32	427	1.16	10.2	16.4	71	23	2.1	103
L8	1190	1.11	41	889	33	407	1.23	8.9	17.5	65	23	2	94
Max	1264	1.15	50	983	57	427	1.23	11.4	28.5	80	24	2.2	115
Min	715	1.04	33	844	32	366	1.09	7.5	15.6	64	19	1.8	93
STDEV	192.60	0.037	5.498	43.26	8.521	24.533	0.045	1.3924	4.5421	6.0237	1.603	0.127	8.7123
AVE	1064	1.088	42.71	902.7	39.571	394.2	1.165	9.9285	18.314	71.571	22.28	2.057	103.28

جدول ۵- نتایج تحلیل فاکتوری فلزات سنگین نمونه‌های رسوب دریاچه سد لتیان

(خروجی نرم‌افزار spss).

Component Matrix*					
	Component				
	1	2	3	4	5
Ag	.552	.613	.454	-.163	.014
Al	.969	-.203	-.095	.014	-.061
As	.058	.880	-.440	.165	-.004
Ca	.670	.696	.156	-.155	-.116
Cd	.205	.528	.764	.157	-.254
Ce	.800	.568	-.141	-.120	.054
Co	.970	-.220	-.092	.031	-.029
Cr	.624	-.723	.202	.201	-.006
Cu	.767	-.540	-.098	-.328	-.050
Fe	.636	-.757	.059	.137	.025
La	.732	.625	-.139	-.160	.087
Li	.809	.456	-.302	.204	.012
Mg	-.015	-.872	.455	-.028	.161
Mn	.905	.269	-.228	.021	.207
Mo	-.512	.457	.554	-.374	-.258
Ni	.972	-.131	-.045	.165	.085
P	-.786	-.021	.406	.224	.405
Pb	.090	-.494	.083	-.687	.512
S	.418	.613	.136	.448	.409
Sb	.085	.772	.483	-.060	.343
Se	.931	-.361	-.023	-.023	-.047
Th	-.897	-.136	-.053	.280	.304
V	.811	-.551	.074	.152	.077
Y	.920	.293	.106	-.146	.189
Yb	.952	-.076	.278	-.053	-.020
Zn	.639	-.332	.582	.335	-.171

جدول ۴- معیارهای کیفیت رسوبی معرفی شده (ppm) بر پایه معیارهای کیفی زیست محیطی کانادایی (ANZECC, 2000; CEQG, 2003) و مقایسه محدوده غلظت برای رسوبات بستر دریاچه سد لتیان.

محدوده مورد مطالعه	CCME (1999)		ANZECC (2000)		دریاچه لتیان
	TEL	PEL	ISQG-Low	ISQG-High	
آلاینده					
آنتیموان			۲	۲۵	۱/۰۹-۱/۲۳
آرسنیک	۵/۹	۱/۷	۲۰	۷۰	۱۴/۱-۲۷/۵
کادمیم	۰/۵۹۶	۳/۳۵	۱/۵	۱۰	۰/۲۷-۰/۲۹
کروم	۷۳/۳	۹۰	۸۰	۳۷۰	۴۵-۶۳
مس	۳۵/۷	۱۹۶/۶	۶۵	۲۷۰	۲۵-۳۸
سرب	۳۵	۹۱/۳	۵۰	۲۲۰	۳۲-۵۷
نیکل		۷۵	۲۱	۵۲	۳۳-۵۰
روی	۱۲۳/۱	۳۱۴/۸	۲۰۰	۴۱۰	۹۳-۱۱۵

جدول ۶- درصد فراوانی ذرات تشکیل دهنده رسوبات و تغییرات ارتفاع در مخزن سد لتیان

شماره نمونه	ارتفاع	ژرفا	رس %	سیلت %	ماسه %				گراول %	نامگذاری فولک
					ریز	متوسط	درشت	کل		
L1	۱۶۴۵	-	۷/۶۱	۱۴/۰۱	۳۲/۰۷	۲۳/۲۳	۱۷/۸۶	۷۳/۱۶	۵/۲۳	ماسه گلی گراولی
L2	۱۶۱۶	-	۵/۳۴	۳/۵۲	۴۸/۸۲	۳۲/۳۱	۲/۳۱	۸۳/۴۴	۷/۷۱	ماسه گراولی
L3	۱۵۸۴	۴۲	۷۳/۱۳	۲۶/۷۱	۰/۰۳	۰/۱۳	۰	۰/۱۶	۰	رس
L4	۱۶۱۸	۳	۳۴/۴۳	۵۴/۹۹	۶/۰۵	۴/۵۳	۰	۱۰/۵۸	۰	گل ماسه‌ای
L5	۱۵۸۰	۵۰	۶۱/۸۰	۳۶/۵۶	۰/۲۹	۱/۳۵	۰	۱/۶۴	۰	گل
L6	۱۵۸۴	۴۳	۵۷/۴۶	۴۲/۱۴	۰/۰۷	۰/۳۳	۰	۰/۴۰	۰	گل
L7	۱۵۸۴	۴۳-۳۲	۶۴/۸۸	۳۴/۰۰	۰/۲۰	۰/۹۲	۰	۱/۱۲	۰	گل
L8	۱۵۸۵	۲۵	۴۴/۹۱	۵۴/۹۵	۰/۰۳	۰/۱۱	۰	۰/۱۴	۰	گل

کتابنگاری

حسینی پاک، ع.، ۱۳۶۲- اصول و اکتشافات ژئوشیمیایی، انتشارات دانشگاه تهران.
خطیبی، ن.، ۱۳۸۲- جنگل‌های باستانی شمال در آستانه وداع، شرکت سهامی انتشار.
وحدتی، ف.، ۱۳۷۶- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه شرق تهران، ش ۶۳۶۱، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- ANZECC, 2000- Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume I, The guideline and Zealand Environment and Council, Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand.
- Cevik, F., Göksu, M. Z., Derici, O. B. & Fındık, O., 2008- An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152(1-4), 309-317.
- Eby, G. N., 2004- Principle of environmental Geochemistry., Thompson, 515 P
- Folk, R. L., 1980- Petrology of Sedimentary Rock. Hemphill Publishing, Austin, Tx. 182pp.
- Forstner, U., 2004a- Sediment dynamics and pollutant mobility in rivers: an interdisciplinary approach. *Lakes and Reservoirs: Research and Mangement* 9:25-40.
- Forstner, U., 2004b- Traceability of sediment analysis. *Trends in Analytical Chemistry* 23:217-236.
- Forstner, U., 2010- Sediment research, management and policy A decade of JSS.
- Ghrefat, H. A., Abu-Rukah, Y. & Rosen, M. A., 2010- Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafra Dam, Jordan. *Springer Science, Environ Monit Assess* (2011) 178:95-109.
- Hursthouse, A. & Kawalczyk, G., 2009- Transport and dynamics of toxic pollutants in the natural environment and their effect on human health: research gaps and challenge, *Environmental Geochemistry and Health - ENVIRON GEOCHEM HEALTH*, vol. 31, no. 2, pp. 165-187, 2009.
- Kabata-pendias, A. & Mukherjee, A. B., 2007- trace elements from soil to human. Springer- Verlag Berlin Heidelberg, pp.
- Krauskopf, K. P. & Bird, D. K., 1976- Introduction to Geochemistry, McGraw-Hill, 176P.
- Miller, J., 2007- Contaminated rivers, Springer Verlage, P418
- Modabberi, S., 2004- Analysis of Arsenic in soil and vegetation of a contaminated area in Zarshuran, Iran, *International Journal of phytoremediation* 12, 159-173.
- Nriagu, J. O. & Wong, H. K. T., 1986- What fraction of the total metal flux into lakes is retained in the sediments? *Water, Air and Soil Pollution* 31, 999-1006.
- Perry, C. Y. & Taylor, K., 2007- Environmental Sedimentology, Black well Publishing 109P.
- Smol, J. P., 2002- Pollution of Lakes and Rivers A Paleoenvironmental Perspective, Arnold, 107-109P.
- Stallard, R. F. & Edmond, J. M., 1983- Geochemistry of the Amazon:2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *J. Geophys. Res.* 88,9671-9688.
- Tao, F., 2004- Mobilization Potential Of Heavy Metals: A Comparison Between River And Lake Sediments
- USEPA, 2000- Guidelines for water sampling, Guidelines for Effluent sampline V.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1999- Standard Method.
- Westrich, B. & Forstner, U., 2007- Sediment Dynamics and Pollutant Mobility in Rivers, Springer.