

بررسی تغییرات مکانی غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ای معدن مس سونگون، آذربایجان شرقی

سمیه عقیلی^۱، عبدالرضا واعظی هیر*^۲، محمد رضا حسین زاده^۳، عادل ریحانی تبار^۴

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۴

^۱ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، گروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

^۲ استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

^۴ دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r.vaezi@tabrizu.ac.ir

چکیده

برای بررسی پراکندگی مکانی و تغییرات عمقی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ای معدن سونگون، دو مرحله نمونه‌برداری انجام شد. تعداد ۱۲ نمونه از رسوب رودخانه‌ای و باطله معدن در مرحله اول از عمق ۵-۰ سانتی‌متری و ۹ نمونه رسوب در مرحله دوم از سه عمق ۵۰-۰، ۱۰۰-۵۰ و ۱۵۰-۱۰۰ سانتی‌متری برداشت شد. نمونه‌های رسوب توسط اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال شسته شد و عصاره حاصل جهت تعیین غلظت فلزات Cu، Zn و Mn برای مرحله اول و Cu، Mn، Zn و Al برای مرحله دوم تجزیه گردید. برای نمونه‌های باطله از هضم به روش تیزاب سلطانی استفاده شد. شاخص‌های آلودگی در مرحله اول محاسبه و مشخص گردید که غلظت Cu در ۸۰٪ موارد موجب آلودگی است و نمونه برداشت شده از انتهای دره پخیر بالاترین تمرکز مس و روی را نشان داد. بیشترین غلظت Mn مربوط به نمونه‌های باطله می‌باشد که نتیجه آن افزایش غلظت در رسوبات پایین دست رودخانه با غلظت ۲۶/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. مقایسه نمودارهای غلظت فلزات در رسوب و آب نشان داد که رابطه مستقیمی بین غلظت در این دو محیط وجود دارد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین تمرکز فلزات در ۵۰ سانتی‌متر فوقانی می‌باشد که بیشترین کاهش غلظت مربوط به مس و کمترین کاهش مربوط به منگنز بوده که به دلیل کاهش غلظت عناصر در آب در طی حرکت عمودی در رسوب ایجاد شده است. همچنین فلزات سنگین در رسوبات درشت مجتمع نشده و به افق‌های پایین‌تر که دانه ریزتر هستند، آبشویی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، رسوبات رودخانه‌ای، رودخانه پخیر، فلزات سنگین، معدن مس سونگون

Investigation on Changes of Heavy Metals Concentrations in the Alluvial Sediments of Sungun Copper Mine, East Azerbaijan province, Iran

S Aghili*¹, AR Vaezi hir², MR Hosseinzadeh³, A Reyhanitabar⁴

Received: 21 November 2014

Accepted: 15 March 2015

¹- M.Sc. Student, Earth Sci. Dept., Faculty of Natural Sci., Univ. of Tabriz, Iran

²- Assist. Prof., Earth Sci. Dept., Faculty of Natural Sci., Univ. of Tabriz, Iran

³- Assoc. Prof., Earth Sci. Dept Faculty of Natural Sci., Univ. of Tabriz, Iran

⁴- Assist. Prof., Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding Author, Email: r.vaezi@tabrizu.ac.ir

Abstract

To investigate the spatial distribution and vertical changes of heavy metals in the alluvial sediments of Sungun copper mine, sampling was performed in two stages. In the first stage twelve samples of alluvial sediments and mine tailings from depth of 0-5 cm and in the second stage 9 sediment samples from three depths of 0-50, 50-100 and 100-150 cm were collected. The samples were washed out using 0.1 N chloridric acids to prepare the extract which then was analyzed for Cu, Zn and Mn and also for Cu, Zn, Mn Cd and Al in the first and second stages, respectively. The tailing samples were digested by Aqua Regia to get the extract. Evaluation of the pollution indices showed that Cu in 80% of the samples was the main cause of pollution and the most polluted sample was the one collected from the end of Pakhir valley. The highest concentration of Zn was also detected in the same sample. Analyzing the tailing samples showed the highest Mn concentration which represented the tailing impact on the accumulation of heavy metals in the downstream sediments with concentration of 26.5 mg/kg. The results also represented the highest concentration of the metal in 0-50 cm depth. The maximum decrease of concentration was for Cu and the minimum of it was for Mn which was due to decrease of concentration of the materials in water during vertical movements through the sediment. Also heavy metals didn't accumulate in coarse texture sediments and leached to the lower horizons and reached the finer grain sediments.

Keywords: Alluvial sediments, Contamination, Heavy metals, Pakhir River, Sungun Copper Mine

مقدمه

کانی‌های سولفیدی در نهشته‌های پورفیری اکسید خواهد شد و در عدم حضور کانی‌های بافرکننده، آب-های اسیدی حاوی فلزات کمیاب و سولفات، شبه فلزات و غیرفلزات مثل سلنیوم تولید می‌شود (پلاملی ۱۹۹۹). رسوبات در سیستم رودخانه‌ای، مخازنی برای عناصر مختلف هستند و به‌عنوان منابع تامین و اضافه کردن عناصر به ستون آب عمل می‌کنند. هنگامی که مواد شیمیایی به رودخانه وارد می‌شوند، این مواد در طول مهاجرت متحمل واکنش‌های تعاملی با آب از طریق

استخراج و فرآوری مواد معدنی به خصوص معادن فلزی نقش مهمی در تخریب و آلودگی محیط زیست دارند. معدنکاری و گداختن سنگ معدن سولفیدی، باعث بسیاری تاثیرات زیست محیطی به‌علت حضور مقادیر بالای فلزات می‌شود که می‌توانند در طول دوره بهره برداری و پس از توقف فعالیت‌های معدنی به درون محیط وارد شوند (کاپیونز و همکاران ۲۰۰۵). به‌علت فعالیت‌های انسان زاد، مجموعه‌ای از

غنی‌شدگی^۵ و زمین‌انباشت^۶ محاسبه شدند. با توجه به مطالعاتی که بر روی منابع رسوب رودخانه‌های منطقه سونگون انجام شد مشخص شده است که میزان آلودگی رسوبات در محدوده کانسار مس سونگون در حد کم تا متوسط می‌باشد و در رودخانه سونگون چای بیش از سایر رودخانه‌های منطقه است و به طور نقطه-ای در اثر عوامل طبیعی و انسان زاد تشدید می‌شود. نتایج نشان داد که سهم عوامل انسان‌زاد در تمرکز عناصر در رسوبات رودخانه‌های منطقه نسبت به عوامل طبیعی (هوازگی کانی‌های سولفیدی و ماهیت واحدهای زمین‌شناختی منطقه) کمتر بوده و تنها در رسوبات سونگون چای تأثیر بیشتری داشته‌اند. بر اساس مطالعات شاهی و همکاران (۱۳۹۱)، تعداد ۵۶ نمونه از باطله‌های معدنی انباشته شده در محدوده معدن مس سونگون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که باطله‌ها از عناصر As, Cu, Mo, Pb, Se و Zn غنی شده‌اند که غنی‌شدگی عناصر Mo, Se, Cu و As نسبت به سایر عناصر بیشتر می‌باشد.

در این پژوهش سعی شده است که با نمونه-برداری از رسوبات محدوده رودخانه‌های پخیر و سونگون، تغییرات مکانی غلظت عناصر در رسوبات این دو رودخانه در امتداد مسیر جریان و تغییرات عمقی غلظت آلاینده‌ها در چند پروفیل عمودی رسوب رودخانه‌ای بررسی شود. همچنین با استفاده از شاخص‌های آلودگی، تأثیر عوامل انسان‌زاد و زمین‌زاد، میزان آلودگی در هر ایستگاه نمونه‌برداری مورد بررسی قرار گرفته است.

مجموعه‌ای از فرآیندها از جمله انحلال، ته‌نشینی، رسوبگذاری و لخته شدن دوباره شده و در نهایت به عنوان رسوبات بستر ته‌نشین می‌شوند (لی و همکاران ۲۰۰۳). از طرف دیگر فلزات سنگین باقی‌مانده در رسوبات آلوده می‌توانند در ریز اندامگان از جمله زیا و گیا تجمع یافته و در نتیجه به زنجیره غذایی راه پیدا کرده و در نهایت ممکن است حیات موجودات زنده و بوم سامانه را به خطر بیندازد (اسماعیلی و مر ۱۳۹۰). فلزات سنگین در رسوبات می‌توانند در شکل‌های شیمیایی مختلفی حضور داشته باشند. سمیت و تحرک فلزات سنگین در رسوبات، نه تنها به غلظت کل آن‌ها، بلکه به فرم شیمیایی خاص و حالت پیوند آن‌ها برای مثال فرم‌های قابل حل در آب، فرم قابل تعویض، فرم در تجمع با کربنات، اکسیدهای آهن-منگنز و مواد آلی و یا حالت ته‌نشین شده، بستگی دارد (لی و همکاران ۲۰۰۳). تعیین غلظت فلزات سنگین در رسوبات برای ارزیابی کیفیت محیط زیست ضروری است. تعدادی از روش‌ها برای مقایسه، ارزیابی، پایش و مدیریت آلاینده‌ها، بر اساس غلظت کل آن‌ها در رسوبات وجود دارد. اگرچه، به‌طور جداگانه و منفرد هرکدام از این روش‌ها اطلاعاتی در مورد اجزای شیمیایی، حلالیت و زیست‌فراهمی^۱ و یا دانش کمی در مورد اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی یا سمیت عناصر بالقوه خطرناک نمی‌دهند (لوپز-سانچز و همکاران ۱۹۹۶، ویز و همکاران ۲۰۰۰، چاکرابارتی و همکاران ۱۹۹۴).

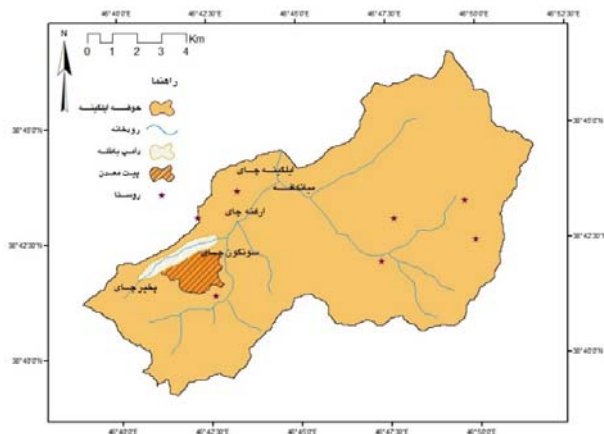
اسماعیلی و مر (۱۳۹۱) میزان غنی‌شدگی^۲ و آلودگی برخی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌های محدوده کانسار مس سونگون را با استفاده از پارامترهای کیفی و آماری تعیین کردند. نمونه‌ها از عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متر برداشت شدند. پس از اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها، ذرات کوچکتر از ۰/۶۳ میکرون توسط الک جدا و برای تجزیه عناصر سنگین از دستگاه ICP-MS استفاده کردند. ضرایب آلودگی^۳، بار آلودگی^۴،

- 1 . Bioavailability
- 2 . Enrichment
- 3 . Contamination factor
- 4 . Pollution load index

- 5 . Enrichment factors
- 6 . Geoaccumulation index

مواد و روش‌ها

معدن سونگون در ۳۵ کیلومتری شمال ورزقان در شمال استان آذربایجان شرقی، قرار داشته و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۰۰ تا ۲۷۰۰ متر می باشد (شکل ۱). میزان بارش سالانه آن ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد ولی به دلیل وجود بارش‌های مخفی (مه بارش) میزان بارندگی افزایش چشمگیری می‌یابد (حدود ۷۵۰ میلی‌متر) که در نتیجه با وجود قرار داشتن منطقه در بالادست حوضه، میزان آبدهی رودخانه قابل توجه می‌باشد (ملاپیری لیواری و همکاران ۱۳۹۲). کانسار سونگون، درون توده‌ای نیمه‌ژرف، با ترکیب میکروموزونیت پورفیری جای گرفته است. این توده نفوذی با سری سنگ‌های برش ولکانیکی، با ترکیب داسیتی و توف‌های آن و افق‌هایی از گدازه‌های آندزیتی گستره‌ای بزرگ را پدید می‌آورند که بسوی شمال تا مرز ارس و آن سوی آن گسترده می‌شود (خویی و همکاران ۱۳۷۸).



شکل ۲- موقعیت پیت معدن و دامپ باطله‌ها در حوضه ایلگینه.

در تحقیق ملاپیری (۱۳۹۲)، از ۸ ایستگاه آب سطحی واقع در رودخانه پخیر و سونگون نمونه‌برداری و مورد تجزیه قرار گرفت که با توجه به نتایج به دست آمده غلظت عناصر Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni, Ag, Al, Mn, Zn و B در این نمونه‌ها بالا بود؛ به‌طوری که در دو نمونه که متعلق به رودخانه پخیر بودند (پایین دست باطله‌ها) غلظت همه عناصر به جز Zn و B و Ag بالاتر از استاندارد EPA (۲۰۱۲) و یا استاندارد آب شرب ایران (۱۳۸۸) بود. همچنین ملاپیری (۱۳۹۲) گزارش کرد وجود سنگ‌های آهکی در منطقه مورد مطالعه و ورود قطعات و واریزه‌های آن به بستر رودخانه باعث افزایش طبیعی pH در مسیر رودخانه و ترسیب لایه‌های آبی رنگ سولفات مس بر روی رسوبات شده است. بنابراین در تحقیق حاضر سعی بر آن شد که پراکندگی مکانی غلظت فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه و همچنین تغییرات غلظت آن‌ها در نیمرخ عمودی رسوبات مورد بررسی قرار گیرد.

در این تحقیق برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین و رسوبات منطقه معدن مس سونگون نمونه برداری در دو مرحله و در هر مرحله با هدفی مجزا انجام شد.

نمونه‌برداری مرحله اول، با هدف بررسی پراکندگی مکانی فلزات Cu, Zn و Mn انجام شد. در تاریخ ۱۵ مهرماه ۱۳۹۲ تعداد ۱۲ نمونه از ۱۱ نقطه (از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون.

رسوبات پیشنهاد شد (ونگ و همکاران ۲۰۱۳). این روش قادر به نشان دادن اثرات آلاینده‌های مختلف و ظاهر کردن اثرات جامع چندین آلاینده در یک محیط خاص است. در حال حاضر، روش هاگانسون علمی-ترین و جامع‌ترین رویکرد برای ارزیابی آلاینده‌های فلزات سنگین در خاک است. این روش شامل ضریب آلودگی منفرد، اندازه‌گیری آلودگی فاکتور واکنش سمی برای فلزات سنگین و یک شاخص پتانسیل ریسک زیست محیطی است. در این مطالعه دو فاکتور ضریب آلودگی و درجه آلودگی از میان فاکتورهای ارائه شده توسط هاگانسون محاسبه شد.

- **ضریب آلودگی و درجه آلودگی:** ضریب آلودگی (CF) از رابطه ۱ و از تقسیم غلظت فلز در نمونه برداشت شده به غلظت همان فلز در نمونه شاهد به دست می‌آید (ونگ و همکاران ۲۰۱۳):

$$CF = C_S / C_B \quad [1]$$

در کل می‌توان گفت که اگر $CF > 1$ باشد نشان-دهنده وجود آلودگی است و اگر $CF < 1$ باشد نشان-دهنده این است که آلودگی عنصری وجود ندارد (جدول ۲).

درجه آلودگی (DC) نیز بر طبق رابطه ۲ محاسبه شد:

$$DC = \sum CF \quad [2]$$

- **شاخص بار آلودگی:** برای به دست آوردن شاخص بار آلودگی (PLI) از رابطه ۳ استفاده شد:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n} \quad [3]$$

در صورتیکه PLI به عدد یک نزدیک و یا بیشتر از یک باشد، به این معنی است که غلظت فلزات سنگین به غلظت زمینه نزدیک است و در غیر این صورت رسوب آلوده است (شایسته فر و رضایی ۱۳۹۰).

یکی از نقاط دو نمونه برداشت شد) و از عمق ۵-۰ سانتی‌متری، توسط بیل از جنس فولاد ضد زنگ برداشت شده و در کیسه‌های پلی اتیلنی به آزمایشگاه زیست محیطی گروه علوم زمین دانشگاه تبریز منتقل شدند. نمونه‌های ۱۰a، ۱۰b و همچنین ۱۱ از دمپ باطله-های معدن، و نمونه‌های ۴ و ۹ به‌عنوان نمونه شاهد (BG) برداشت شدند (جدول ۱). نمونه‌ها در آزمایشگاه و در دمای اتاق به مدت ۴۸ ساعت هوا خشک شدند. معدن مس سونگون، به‌عنوان یک معدن سولفیدی قابلیت تولید زهاب اسیدی را داشته و با توجه با اینکه باطله-های این معدن در دره پخیر انباشته می‌شوند و رود پخیرچای از زیر باطله‌ها عبور می‌کند؛ منجر به ایجاد آلودگی در آب، خاک و رسوبات منطقه شده است.

جهت اندازه‌گیری غلظت فلزات در رسوبات، ۲ کیلوگرم از آن‌ها در ظرف‌های پلاستیکی ریخته شدند. ۲ لیتر اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال به نمونه‌های رسوب افزوده شد و به مدت ۴۸ ساعت در تماس قرار گرفت.

در هر ۱۲ ساعت ظرف‌ها به صورت دستی تکان داده شدند. پس از اتمام ۴۸ ساعت نمونه‌ها از صافی پلاستیکی ریز و سپس از کاغذ صافی ۱۲۵ میلی متری گذرانده شدند. این مرحله ۲ بار دیگر تکرار شد (در کل ۷۲ ساعت). عصاره‌های به‌دست آمده از هر مرحله شستشو، با هم مخلوط شدند. یک نمونه ۱۰۰ میلی لیتری از هر عصاره برای آزمایش‌های بعدی برداشت شد.

نمونه‌های باطله، به روش تیزاب سلطانی^۷ هضم شده و غلظت فلزات مورد نظر اندازه‌گیری شد (سو و همکاران ۲۰۰۲). اندازه‌گیری غلظت فلزات Zn، Cu و Mn با دستگاه جذب اتمی مدل شیمادزو (Shimadzu AA6300) انجام شد. با توجه به غلظت‌های بدست آمده شاخص‌های ضریب آلودگی، ضریب بار آلودگی و درجه آلودگی^۸ محاسبه شدند.

شاخص پتانسیل ریسک زیست محیطی، توسط هاگانسون از دیدگاه رسوب شناسی برای ارزیابی ویژگی‌ها و رفتار زیست محیطی فلزات سنگین در

7. Aqua Regia
8. Degree of contamination

جدول ۱- موقعیت و مختصات جغرافیایی نقاط نمونه برداری.

Samples	Y	X	Location
I-S-۰۰۱	۴۲۸۵۹۴۸	۶۴۹۰۵۱	پخیر چای
I-S-۰۰۲	۴۲۸۶۰۰۶	۶۴۹۱۸۱	پخیر چای
I-S-۰۰۳	۴۲۸۶۱۳۶	۶۴۹۳۹۸	ارغنه چای
I-S-۰۰۴ (BG)	۴۲۸۶۱۸۴	۶۴۹۴۰۶	ارغنه چای
I-S-۰۰۵	۴۲۸۶۷۷۵	۶۴۹۸۴۲	ارغنه چای
I-S-۰۰۶	۴۲۸۷۶۰۶	۶۵۰۵۲۷	ارغنه چای تلاقی
I-S-۰۰۷	۴۲۸۶۰۳۰	۶۴۹۲۵۸	سونگون و پخیر چای
I-S-۰۰۸	۴۲۸۸۵۳۲	۶۵۱۲۴۸	ایلگینه چای
I-S-۰۰۹ (BG)	۴۲۸۸۵۳۲	۶۵۱۲۴۸	ایلگینه چای
I-S-۰۱۰a	۴۲۸۵۷۸۵	۶۴۸۱۹۴	دامپ باطله
I-S-۰۱۰b	۴۲۸۵۷۶۳	۶۴۸۲۱۹	دامپ باطله
I-S-۰۱۱	۴۲۸۵۹۴۸	۶۴۹۰۵۱	دامپ باطله

جدول ۲- درجات آلودگی مرتبط با شاخص‌های مربوطه (ونگ و همکاران ۲۰۱۳).

فاکتورهای آلودگی	شدت آلودگی			
	<۱	۱, ۲ < ۳	۳, ۴ < ۵	۳
CF	فاقد آلودگی	ملايم	متوسط	شدید
DC	<۸	۸, ۱۶ < ۳۲	۱۶, ۳۲ < ۶۴	بسیار بالا

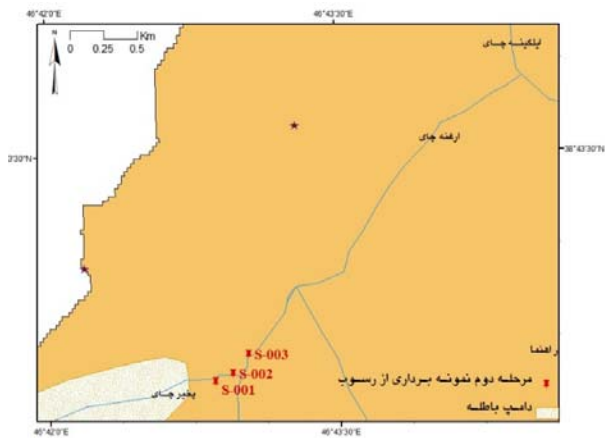
شد. برای این کار پس از تعیین نقاط و ثبت مختصات جغرافیایی آن‌ها، هر ایستگاه توسط بیل مکانیکی و به عمق ۱/۵ متر حفر شد. سپس با استفاده از بیل ضد زنگ نمونه‌هایی همگن از ۳ عمق یاد شده برداشت شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، دقیقاً شبیه آماده‌سازی نمونه‌های رسوب در مرحله اول، عمل شد. یعنی پس از هوا خشک کردن، رسوبات به مدت ۷۲ ساعت در معرض اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال قرار گرفتند. پس از گذراندن عصاره‌های آن‌ها از کاغذ صافی و مخلوط کردن عصاره‌های حاصل از هر مرحله، مقدار ۱۰۰

براساس گزارش ملاپیری (۱۳۹۲)، ایستگاه‌های ۶، ۷ و ۱۰ با ۳ ایستگاه نمونه برداری رسوب (۱، ۲ و ۸) در این تحقیق تقریباً به هم نزدیک بوده در نتیجه در یک نمودار تغییرات غلظت فلزات Zn, Cu و Mn با هم مقایسه گردید.

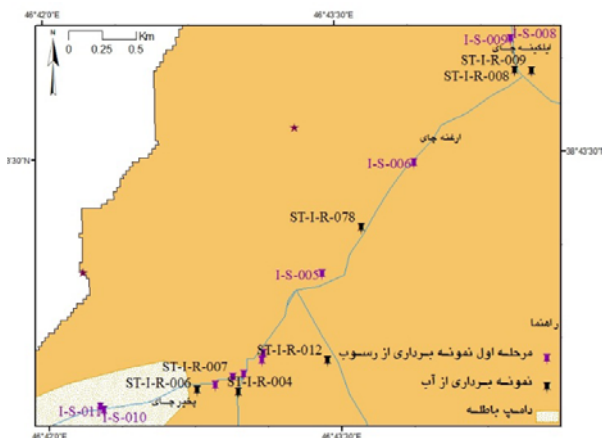
نمونه برداری مرحله دوم، با هدف تعیین تغییرات عمودی غلظت فلزات Cu, Zn, Mn, Cd و Al و در تاریخ ۱۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳ انجام شد. در این مرحله تعداد ۹ نمونه رسوب از ۳ ایستگاه و از اعماق ۰ تا ۵۰، ۵۰ تا ۱۰۰ و ۱۰۰ تا ۱۵۰ سانتی متری سطح زمین برداشت

مقایسه غلظت آلاینده‌ها در آب و رسوب از نتایج مطالعاتی که ملاپیری (۱۳۹۲) انجام داده است استفاده شد که موقعیت نقاط نمونه‌برداری از آب رودخانه و مرحله نمونه‌برداری از رسوب در شکل ۳ نشان داده شده است.

میلی لیتر جهت قرائت غلظت فلزات مورد نظر با دستگاه جذب اتمی مورد استفاده قرار گرفت. جهت تعیین بافت و ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های برداشت شده در مرحله دوم، رسوبات نمونه‌برداری شده، مورد آزمایش دانه بندی با الک و هیدرومتری قرار گرفتند (افتخاریان و همکاران ۱۳۸۰، اشوورت و همکاران ۲۰۰۱). به‌منظور



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری از رسوب (مرحله دوم).



شکل ۴- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری از آب و رسوب (مرحله اول).

موقعیت نقاط نمونه‌برداری مرحله دوم نیز در شکل ۴ آمده است.

نتایج و بحث

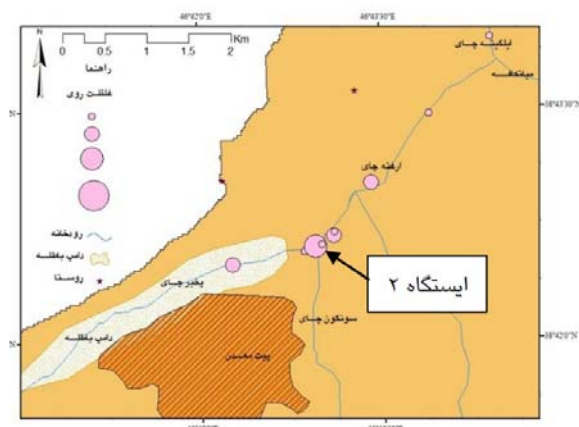
غلظت فلزات مورد نظر در نمونه برداری مرحله اول در جدول ۳ آمده است و با توجه به آن پراکندگی مکانی فلزات به دست آمد.

جدول ۳- غلظت فلزات مورد نظر در نمونه‌برداری مرحله اول (mg kg^{-1}).

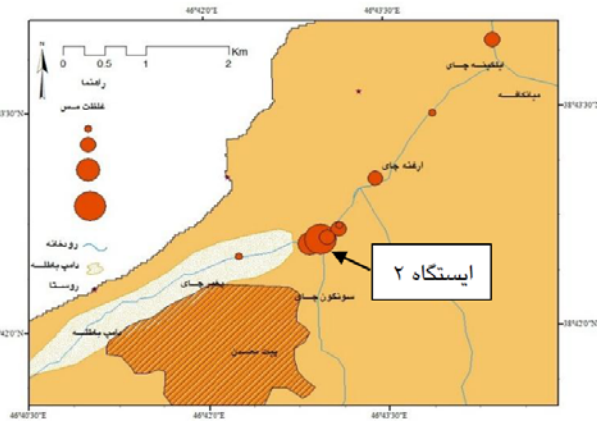
Cu	Zn	Mn	نمونه‌ها
۱۹۶/۹۵	۳/۳۱	۸/۴۱	I-S-۰۰۱
۴۶۹/۴۵	۲۲/۹۲	۳۴/۰۶۰	I-S-۰۰۲
۱۳۴/۶۶	۸/۲۹	۲۹/۴۶	I-S-۰۰۳
۳۴/۱۱	۳/۸۰	۱۸/۷۸	I-S-۰۰۴ (BG*)
۱۰۱/۰۷	۷/۵۲	۲۹/۲۵	I-S-۰۰۵
۴۴/۵۵	۳/۳۱	۲۶/۱۰	I-S-۰۰۶
۱۱۵/۷۴	۳/۴۳	۲۶/۴۸	I-S-۰۰۷
۷۱/۳۱	۲/۴۹	۲۶/۵۰	I-S-۰۰۸
۱۱۲/۰۲	۰/۹۶	۲۲/۵۵	I-S-۰۰۹ (BG)
۱۴/۰۷	۳/۲۲	۴۳/۳۷	I-S-۰۱۰a
۰/۶۵۴	۹/۸۴	۴۶/۸۸	I-S-۰۱۰b
۵/۸۳	ND**	۵۰/۳۰	I-S-۰۱۱

* Back ground

** Not detected



شکل ۶- پراکندگی غلظت روی در عمق ۵-۰ سانتی-متری رسوبات رودخانه‌ای (mg kg^{-1}).



شکل ۵- پراکندگی غلظت مس در عمق ۵-۰ سانتی-متری رسوبات رودخانه‌ای (mg kg^{-1}).

پ

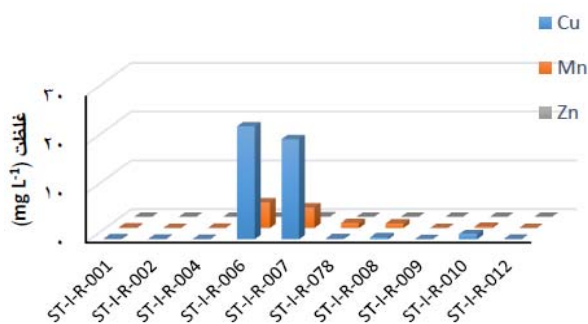
کیلوگرم در ایستگاه‌های ۱۱، ۱۰b و ۱۰a مشاهده شد. عدم استحصال منگنز از سنگ‌های معدنی دلیل این غلظت‌های بالا می‌باشد. بیشترین غلظت منگنز در میان نمونه‌های رسوبات ۳۴/۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و در ایستگاه ۲ مشاهده شد. غلظت منگنز به سمت پایین دست و با پیوستن رودخانه سونگون به رودخانه پخیر کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند کاهش طبیعی غلظت در اثر رسوب منگنز و یا رقیق شدن باشد. پراکندگی غلظت منگنز در شکل ۷ آمده است. براساس گزارش ملاپیری (۱۳۹۲)، قبلاً مشخص شده بود که ایستگاه‌های ۶، ۷ و ۱۰ با ۳ ایستگاه نمونه‌برداری رسوب (۱، ۲ و ۸) در این تحقیق تقریباً به هم نزدیک بوده و می‌توان آن‌ها را مورد مقایسه قرار داد. مقایسه نمودارها نشان داد که بیشترین غلظت مس در رسوب و آب، مربوط به ایستگاه‌های رودخانه پخیر (نزدیک دامپ باطله) است. هم‌چنین غلظت‌های روی و منگنز در آب و رسوب، در این ایستگاه‌ها از ایستگاه‌های دیگر به نسبت بیشتر می‌باشد (شکل ۸).

بیشترین غلظت مس مربوط به ایستگاه ۲ و دارای مقدار ۴۶۹/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پس از آن ایستگاه ۱ با مقدار ۱۹۶/۹۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در دره پخیر واقع بوده و به محل انباشت باطله‌های معدن نزدیک‌اند. دلیل این غلظت بالا عبور رودخانه پخیر از میان باطله‌ها و شستشوی مس می‌باشد؛ به طوری‌که سطح رسوبات رودخانه به دلیل ترسیب سولفات مس به رنگ آبی دیده می‌شوند. پراکندگی غلظت مس در شکل ۵ آمده است.

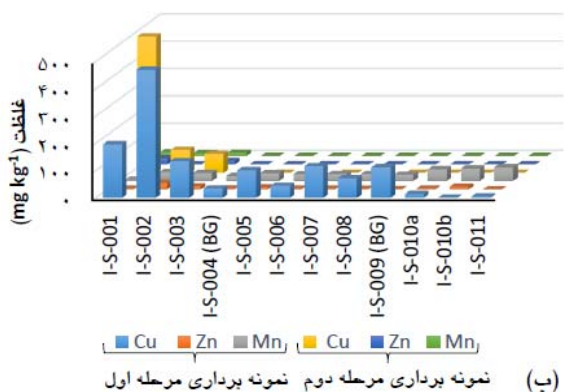
بیشترین غلظت روی در ایستگاه ۲ و با مقدار ۲۲/۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که از رودخانه پخیر برداشت شده است. با توجه به اینکه غلظت در ایستگاه‌های قبل و بعد بسیار پایین تر از ایستگاه ۲ بود لذا می‌توان گفت علت این افزایش غلظت زمین زاد بوده و منشأ آن از آبراهه‌ای است که از بالادست نقطه ۲ وارد رودخانه ایلیگینه می‌شود. پراکندگی غلظت روی در شکل ۶ آمده است.

بیشترین غلظت منگنز در نمونه‌های مربوط به باطله‌ها و به ترتیب ۵۰/۳۰، ۴۶/۸۸ و ۴۳/۳۷ میلی‌گرم بر

به غیر از ۴ مورد، غلظت فلزات از سطح به عمق روند کاهشی نشان دادند (جدول ۴).



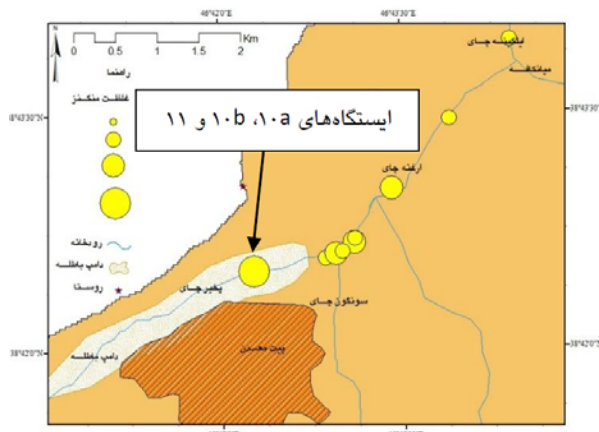
(الف)



(ب)

شکل ۸- مقایسه غلظت فلزات مورد نظر در آب سطحی (الف) و رسوب (مرحله اول: عمق ۵-۰ سانتی متری؛ مرحله دوم: عمق ۵۰-۰ سانتی متری) (ب).

علت این وضعیت، نوسانات متوالی دبی رودخانه و در نتیجه تغییرات غلظت فلزات سنگین موجود در آن می باشد که باعث می شود یک توالی از غلظت های عناصر سنگین بر روی رسوبات شکل گرفته و روند تدریجی افزایشی یا کاهش از خود نشان دهد. این وضعیت هم اکنون نیز در دره پخیر دیده می شود. به طوری که غلظت فلزات سنگین در آب رودخانه پخیر همراه با تغییرات دبی، تغییرات فصلی از خود نشان می دهد (شکل ۹). بنابراین به طور کلی بیشترین تمرکز فلزات سنگین در لایه های بالایی رسوبات وجود دارد و در مقاطع عمودی رسوبات، الگوی پراکندگی غلظت



شکل ۷- پراکندگی غلظت منگنز در عمق ۵-۰ سانتی متری رسوبات رودخانه ای (mg kg⁻¹).

در مرحله دوم، بر اساس نتایج آزمایش دانه بندی و هیدرومتری، بافت رسوبات بر اساس طبقه بندی فولک (۱۹۷۴)، گراول ماسه ای و گراول شناخته شد. یعنی بیش از ۷۰٪ از دانه های رسوب بزرگتر از ۲ میلی متر بودند. تغییرات اندازه دانه رسوبات از سطح به عمق قابل توجه نبوده به گونه ای که از سطح تا عمق ۱۵۰ سانتی متری دانه ها درشت و فاقد مقادیر زیاد رس بودند. همچنین بنابر نتایج به دست آمده از نمونه برداری مرحله دوم، تغییرات عمقی فلزات Cu، Zn، Mn، Cd و Al بدست آمد. میانگین غلظت آن ها در سه عمق یاد شده در جدول ۴ آمده است. البته غلظت کادمیوم در هر ۳ ایستگاه بسیار پایین و در حد تشخیص دستگاه اتمی نبود.

بیشترین غلظت فلزات در هر ۳ ایستگاه و برای هر ۵ فلز، در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متری مشاهده شد. بیشترین غلظت در بین فلزات، متعلق به مس بوده که در هر ۳ ایستگاه در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متری به ترتیب دارای غلظت ۵۲۴/۸۸ میلی گرم بر کیلوگرم در ایستگاه ۱، ۸۴/۶ میلی گرم بر کیلوگرم در ایستگاه ۲ و ۶۹/۳۲ میلی گرم بر کیلوگرم در ایستگاه ۳ بوده و کاهش قابل توجهی را در اعماق پایین تر نشان می دهد به طوری که مقادیر غلظت مس در ایستگاه های ۱ و ۳ به ترتیب به ۹۶/۱۴ و ۲/۷۷ میلی گرم بر کیلوگرم و در ایستگاه شماره ۲ به حد غیرقابل تشخیص می رسد. به طور کلی

فلزات سنگین، تغییرات تاریخی ورودی‌های فلزات سنگین به سیستم رودخانه ای را منعکس می‌کند. انتقال فلزات سنگین در مقاطع عمودی علاوه بر نوع عنصر به اندازه دانه‌ها نیز بستگی داشته و تجمع آن‌ها بیشتر در ذرات ریز صورت می‌گیرد. در حالیکه ذرات درشت‌تر قادر به نگهداری فلزات نبوده و براحتی منتقل می‌شوند که به نظر می‌رسد با افزایش سطح جذب در دانه‌های ریز مرتبط باشد.

جدول ۴- غلظت عناصر مورد بررسی در نمونه برداری مرحله دوم (mg kg^{-1}).

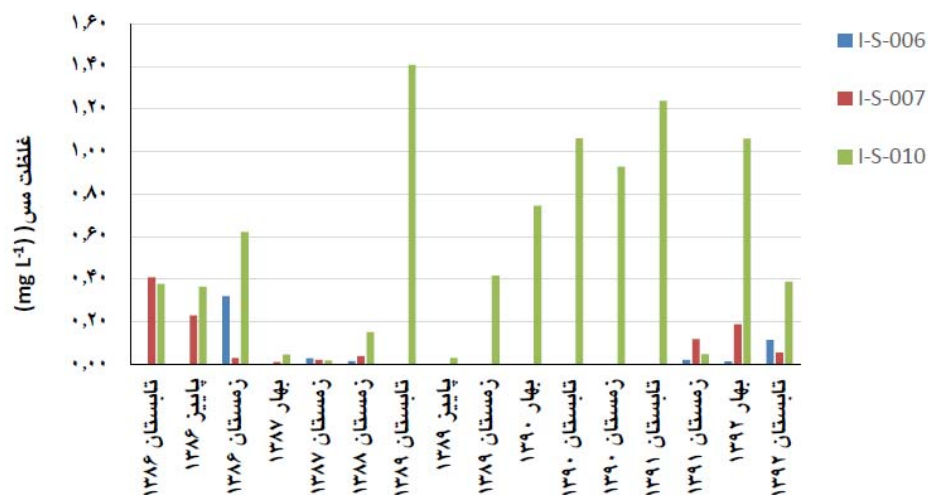
نمونه‌ها	عمق	Cu	Zn	Mn	Al
I-S-001	۰-۵۰	۵۲۴/۸۸	۲۱/۱۰۵	۱۴	۳۰۲
I-S-001	۵۰-۱۰۰	۱۰۷/۶۲	۰/۵۲۷۵	۱۴/۴۲	۰/۴۷۹
I-S-001	۱۰۰-۱۵۰	۹۶/۱۴	۹۶/۱۴	۱۲/۸۸	۰/۲۶۰۸
I-S-002	۰-۵۰	۸۴/۶	۰/۱۱۹۱	۱۰/۲۴	۰/۳۳۳۱
I-S-002	۵۰-۱۰۰	۰/۱۴۸	۴/۳۰۸	۵/۰۴۷	۰/۰۴۵۳
I-S-002	۱۰۰-۱۵۰	۰	۲/۱۲۸	۵/۴۰۲	۰/۰۸۵۹
I-S-003	۰-۵۰	۶۹/۳۲	۱۳/۰۸	۱۱/۳۱	۴۹/۲۴
I-S-003	۵۰-۱۰۰	۳۵۴/۱	۴/۴۴۸	۸/۶	۰/۰۴۶۵
I-S-003	۱۰۰-۱۵۰	۲/۷۷	۲/۷۴۹	۶/۶۲۴	۰/۰۱۵۱

بر اساس نتایج به دست آمده از غلظت فلزات در مرحله اول، ۳ شاخص ضریب آلودگی، فاکتور آلودگی و ضریب بار آلودگی برای تمامی ایستگاه‌ها محاسبه شد (جدول ۵). بر این اساس می‌توان گفت ایستگاه ۲ دارای ضریب آلودگی ۱۳/۷۶۳ است که بیشترین مقدار ضریب آلودگی بوده و ترتیب افزایش ضریب آلودگی به صورت $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn}$ می‌باشد. با توجه به اینکه بیشترین مقدار CF برای منگنز مربوط به باطله‌هاست، دلیل آن می‌تواند وجود منگنز در سنگ‌های معدنی باشد که توسط معدن استخراج نشده و در دره پخیر انباشته شده‌اند. درجه آلودگی در ایستگاه ۲ دارای بیشترین شدت بوده است. همچنین برای ضریب آلودگی عناصر مورد مطالعه، مقدار ضریب آلودگی طبق رابطه ۳ مقدار

بر اساس نتایج به دست آمده از غلظت فلزات در مرحله اول، ۳ شاخص ضریب آلودگی، فاکتور آلودگی و ضریب بار آلودگی برای تمامی ایستگاه‌ها محاسبه شد (جدول ۵). بر این اساس می‌توان گفت ایستگاه ۲ دارای ضریب آلودگی ۱۳/۷۶۳ است که بیشترین مقدار ضریب آلودگی بوده و ترتیب افزایش ضریب آلودگی به صورت $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn}$ می‌باشد. با توجه به اینکه بیشترین مقدار CF برای منگنز مربوط به باطله‌هاست، دلیل آن می‌تواند وجود منگنز در سنگ‌های معدنی باشد که توسط معدن استخراج نشده و در دره پخیر انباشته شده‌اند. درجه آلودگی در ایستگاه ۲ دارای بیشترین شدت بوده است. همچنین برای ضریب آلودگی عناصر مورد مطالعه، مقدار ضریب آلودگی طبق رابطه ۳ مقدار

۱/۴۱ محاسبه گردید. با توجه به اینکه ضریب بار آلودگی بیشتر از ۱ بوده می‌توان این نتیجه را گرفت که غلظت فلزات سنگین در منطقه، به غلظت نمونه شاهد نزدیک نبوده و منطقه در اثر عوامل انسان‌زاد، دارای آلودگی به این ۳ فلز است.

نتایج محاسبه شاخص‌های آلودگی با نتایج حاصل از پژوهش اسماعیلی و مر (۱۳۹۰)، تقریباً همخوانی داشته و به جز عنصر مس که آلودگی شدیدی را باعث شده است، آلودگی ناشی از بقیه عناصر در حد کم و متوسط بوده و به‌طور نقطه‌ای در اثر عوامل طبیعی و انسان‌زاد تشدید می‌شود. بنابراین نمی‌توان سهم عوامل انسان‌زاد را در ایجاد آلودگی در منطقه معدن مس سونگون نادیده گرفت.



شکل ۹- تغییرات غلظت مس از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲ در آب سطحی در دو ایستگاه نمونه‌برداری دره پخیر (mg L⁻¹).

جدول ۵- شاخص‌های آلودگی.

نمونه‌ها	شدت آلودگی CF(Cu)	شدت آلودگی CF(Zn)	شدت آلودگی CF(Mn)	شدت آلودگی DC
I-S-001	۵/۷۷۴	۰/۸۷۳	فاقد آلودگی	۷/۰۹۵
I-S-002	۱۳/۷۶۳	۶/۰۳۲	شدید	۲۱/۶۰۸
I-S-003	۳/۹۴۸	۲/۱۸۲	متوسط	۷/۶۹۸
I-S-004 (BG)	BG	BG	BG	BG
I-S-005	۲/۹۶۳	۱/۹۷۹	متوسط	۶/۵۰۰
I-S-006	۱/۳۰۶	۰/۸۷۲	فاقد آلودگی	۳/۵۶۸
I-S-007	۳/۳۹۳	۰/۹۰۳	فاقد آلودگی	۵/۷۰۶
I-S-008	۲/۰۹۱	۰/۶۵۵	فاقد آلودگی	۴/۱۵۷
I-S-009 (BG)	BG	BG	BG	BG
I-S-010a	۰/۴۱۲	۰/۸۴۹	فاقد آلودگی	۳/۵۷۱
I-S-010b	۰/۰۱۹	۲/۵۸۹	متوسط	۵/۱۰۵
I-S-011	۱/۱۷۱	۰/۰۰۰	فاقد آلودگی	۲/۸۴۹

نتیجه‌گیری کلی

دست کاهش پیدا کرده است. از طرف دیگر میرایی طبیعی آلودگی توسط رودخانه در اثر فرآیندهایی نظیر جذب، ته‌نشست، پراکنش و انتشار باعث کاهش غلظت آلاینده‌ها در امتداد مسیر جریان شده است. بیشترین غلظت آلاینده‌ها در رسوب در ایستگاه شماره ۲ (انتهای دره پخیر) مشاهده گردید که علت آن از یک طرف ته‌نشست عناصر سنگین پس از خروج از پاشنه باطله‌ها در اثر افزایش pH محیط ناشی از سنگهای آهکی بوده و از طرف دیگر بعد از این نقطه در اثر اختلاط زهاب دره

در نمونه‌برداری مرحله اول، بر اساس غلظت‌های بدست آمده از نمونه‌های شاهد می‌توان گفت که غلظت هر سه فلز در اکثر ایستگاه‌ها بیشتر از نمونه‌های زمینه بوده و نمی‌توان فقط عوامل زمین‌زاد را برای این افزایش غلظت آلاینده‌ها در نظر گرفت. همچنین در مورد هر سه فلز، غلظت فلزات در رودخانه پخیر بیشینه بوده و به تدریج با پیوستن به رودخانه سونگون و به دلیل آلودگی کمتر این رودخانه، غلظت فلزات به سمت پایین

موجود در آن نسبت داد که باعث می‌شود یک توالی نامنظم از غلظت‌های عناصر سنگین در پروفیل عمودی رسوبات شکل گرفته و روند تدریجی افزایشی یا کاهشی از خود نشان ندهد. در پایان می‌توان گفت، تاثیر دامپ باطله بر افزایش غلظت عناصر سنگین در آب و رسوبات رودخانه‌های پخیر و سونگون محرز بوده و پاک‌سازی منطقه و کاهش آلودگی در آب و رسوب آن، بسیار ضروری می‌باشد.

پخیر با آب نسبتاً تمیز سونگون غلظت آلاینده‌ها به سرعت رقیق شده و کاهش می‌یابد.

نتایج نمونه‌برداری مرحله دوم نیز نشان داد که فلزات سنگین بطور کلی در لایه‌های سطحی رسوبات دارای غلظت بیشتری نسبت به لایه‌های پایین‌تر بوده که به دلیل نفوذ آب از سطح به عمق منطقی به نظر می‌رسد. افزایش غلظت عناصر سنگین در برخی نمونه‌ها در افق‌های پایین‌تر را می‌توان به نوسانات متوالی دبی رودخانه و در نتیجه تغییرات غلظت فلزات سنگین

منابع مورد استفاده

- اسماعیلی ک و مر ف، ۱۳۹۱. بررسی غنی شدگی فلزات سنگین ناشی از کانسار مس سونگون در رسوبات آبراهه ای. نشریه مهندسی معدن، شماره ۱۷، صفحه‌های ۳۳ تا ۳۹.
- افتخاریان ل، تی تی دژا، خاکباز ب، سارنگ ا، صادقیان پ، مهین روستا ر و نواری م، ۱۳۸۰. آزمایشگاه مکانیک خاک، نشر کتاب دانشگاهی.
- بی نام، ۱۳۸۸. استاندارد آب شرب ایران. مصوب نهصد و نوزدهمین جلسه کمیته ملی استاندارد کشاورزی و غذایی وزارت نیرو، تهران.
- خوئی ن، قربانی م و تاج بخش پ، ۱۳۷۸. کانسار مس در ایران. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- شاهی ع، آفتابی ع، اسمعیل زاده ع، مظاهری ن و شیخ فخرالدینی س، ۱۳۹۱. ارزیابی اثرات زیست محیطی فلزات سنگین در سنگ‌های باطله‌ی معدن سونگون. سی و یکمین گردهمایی علوم زمین. ۱۲-۱۱ آذر. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- شایسته فر م و رضایی ع، ۱۳۹۰. ارزیابی میزان آلودگی و توزیع فلزات سنگین در رسوبات معدن مس سرچشمه با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های آماری. نشریه مهندسی معدن، شماره ۱۱، صفحه‌های ۲۵ تا ۳۴.
- ملاپیری لیواری ح، واعظی هیر ع، حسین زاده مر، مظاهری ن و عبدلی ع، ۱۳۹۲. بررسی تأثیر باطله های معدنی بر پارامترهای کیفی آب‌های سطحی در محدوده معدن مس مولیبدن پورفریری سونگون. هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
- ملاپیری لیواری ح، ۱۳۹۲. بررسی آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی به فلزات سنگین در محدوده معدن مس-مولیبدن سونگون. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.
- Anonymous, 2012. U.S. Agency Drinking Water Standards and Health Advisories, Washington, Office of Water (EPA 822-S-12-001)
- Ashworth J, Keyes D, Kirk R and Lessard R, 2001. Standard procedure in the hydrometer method, for particle size analysis. Communications in Soil Science and Plant Analysis 32: 633-642.
- Cappyns V, Swennen R, Vandamme A and Niclae, M, 2005. Environmental impact of the former Pb-Zn mining and smelting in East Belgium. Journal of Geochemical Exploration 88: 6-9.
- Chakrabarti CL, Lu Y, Back MH, Gre'goire DC and Schroeder WH, 1994. Kinetic studies of metal speciation using chelex cation exchange resin: applications to cadmium, copper and lead speciation in river water and snow. Environmental Science and Technology 28:1957-1967.
- Folk RL, 1974. Petrology of sedimentary rocs. The Walter Geology Library - The University of Texas at Austin: Austin, US (TX).
- Lee S, Moon JW and Moon HS, 2003. Heavy metals in the bed and suspended sediments of Anyang River. Korea: Implications for water quality. Environmental Geochemistry and Health 25: 433- 452.

- Lopez-Sanchez JF, Rubio R, Samitier C and Rauret G, 1996. Trace metal partitioning in marine sediments and sludges deposited off the coast of Barcelona (Spain). *Water Research* 30:153–159.
- Plumlee GS, 1999. The environmental geology of mineral deposits. In: Plumlee GS, Logsdon MJ (eds) *Environmental geochemistry of mineral deposits part A. Processes, techniques and health issues*, *Reviews in Economic Geology* 6: 71–116.
- Wang J, Liu W, Yang R, Zhang L and Ma J, 2013. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in reclaimed soils at an open cast coal mine. *Disaster Advances* 6: 366-377.
- Weisz M, Polyak K and Hlavay J, 2000. Fractionation of elements in sediment samples collected in rivers and harbors at Lake Balaton and its catchment area. *Microchemical Journal* 67:207–217.