

ارزیابی ژئوشیمیایی و آلودگی عناصر سنگین رسوبات رودخانه رونج واقع در شمال غرب تربت جام

مجید اطاری، محمد خانه باد*، اسداله محبوبی، سید رضا موسوی حرمی

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، ایران

پذیرش ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

دریافت ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

چکیده

در این پژوهش به بررسی آلودگی رسوبات رودخانه رونج به عناصر سنگین می‌پردازیم. حوضه آبریز رونج به مساحت ۱۳۱ کیلومترمربع و به صورت کشیده در ۲۰ کیلومتری شهرستان تربت جام (شمال شرق ایران) قرار دارد. به منظور بررسی آلودگی رسوبات به عناصر سنگین، ۱۵ نمونه از رسوبات منطقه برداشت و مورد تجزیه ICP-MS قرار گرفت. به منظور پایش آلودگی رسوبات رودخانه رونج به عناصر سنگین از شاخص غنی‌شدگی و ضریب آلودگی استفاده شد. کروم، نیکل و آهن در محدوده بدون غنی‌شدگی است و رفتار ژئوشیمیایی مشابه داشته که از هوازدگی و فرسایش واحدهای سنگی اولترامافیک سرچشمه گرفته و آلودگی کم ایجاد کرده است. آرسنیک، سرب و مس آلودگی متوسط در منطقه دارند. سازند شمشک منجر به تمرکز آلودگی آرسنیک و سرب در ابتدای حوضه آبریز رونج شده است. عبور شاخه‌های فرعی از روی واحدهای گرانیتی و تلاقی این شاخه‌های فرعی در انتهای حوضه آبریز با رودخانه رونج منجر به غنی‌شدگی و آلودگی مس و سرب در رسوبات انتهای حوضه شده است. شاخص بار آلودگی نیز تمرکز آلودگی در ابتدا و انتهای حوضه آبریز را نشان می‌دهد که نشانه تأیید شاخص‌های قبلی است.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبریز رودخانه رونج، آلودگی رسوب، عناصر سنگین، تربت جام.

Geochemical Assessment and Pollution of Heavy Elements in the Revenj River Sediments in the Northwest of Torbat-e-Jam

Majid Otari, Mohammad Khanehbad^{*1}, Asadollah Mahboubi¹, Reza Mousavi Harami¹

1. Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

In this study, the pollution of the Revenj River sediments with heavy elements has been studied. Revenj River catchment with an area of 131 Km² is located 20 kilometers from the city of Torbat-e-Jam (northeast of Iran). To investigate the contamination of sediments with heavy elements, 15 samples of sediments were taken from the area and analyzed by ICP-MS. In order to monitor the contamination of Revenj River sediments with heavy elements, enrichment factor and contamination factor were used. Chromium, nickel and iron with no enrichment have similar geochemical behavior and originate from weathering and erosion of ultramafic rock units and have caused low pollution. Arsenic and lead are low pollutant and copper is moderately pollution in the area. Shemshak Formation has led to a focus on arsenic and lead pollutant at the beginning of the Revenj River catchment. The passage of tributaries over the granite units and the confluence of these tributaries at the end of the catchment with the Revenj River has led to relatively severe enrichment and contamination of copper and lead in the sediments at the end of this catchment. The pollution load index shows the concentration of pollution at the beginning and end of the catchment area, which is in line with the previous indicators.

Keywords: Revenj River Catchment, sediment pollution, heavy elements, Torbat-e- Jam.

mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

*نویسنده مسئول

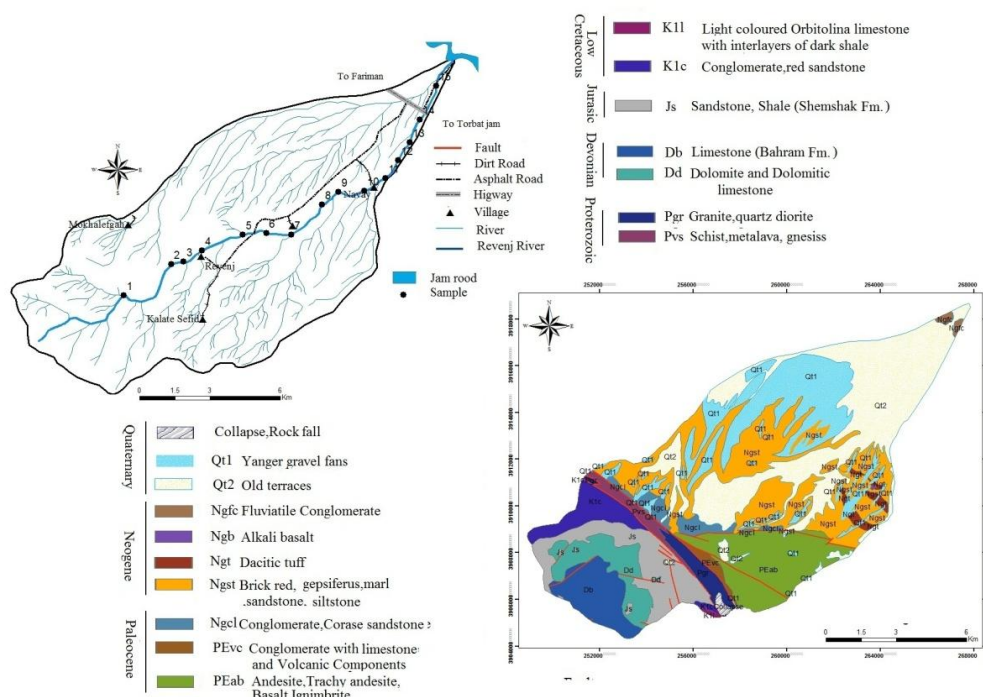
مقدمه

گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوا ناشی از تولید کنترل نشده آلاینده‌ها، توسعه پایدار را تهدید می‌کند (Huang et al., 2020). همچنین رشد سریع جمعیت و صنعتی شدن باعث شده آلودگی عناصر سنگین رسوبات به مسئله‌ای جدی تبدیل شود (Xiuling et al., 2019). به‌طور طبیعی آزادسازی عناصر سنگین در محیط با هوازدگی سنگ‌های آذرین آغاز شده که طی فرایند مذکور این عناصر می‌تواند وارد آب و رسوب شود. عوامل مختلفی می‌تواند منجر به انباشت یا دسترس‌پذیری عناصر مذکور در رسوبات شود. در شرایط اسیدی عناصر سنگین متحرک بوده است و در حین فرایند هوازدگی یا در رسوب باقی می‌ماند و یا به آب سطحی و زیرزمینی وارد می‌شود. آب نقش مؤثری در حمل و انتقال عناصر مذکور در محیط دارد. میزان غلظت عناصر در رودخانه متغیر است و به‌میزان بارندگی وابسته است (Kabata-Pendias, 2007). رسوبات آلاینده‌ها را از جریان آب رودخانه‌ها جذب می‌کنند که این آلاینده‌های جمع شده ممکن است برای مدت طولانی بر جامعه زیستی از طریق زنجیره غذایی تأثیر گذارد (Yujun et al., 2008). عناصر سنگین در صورتی که از حد معینی تجاوز کند به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم محیط زیست محسوب می‌شود که می‌تواند به محیط آسیب برساند (Rajeshkumar et al., 2018). فعالیت‌های انسانی از قبیل معدنکاری، صنعتی، کودهای شیمیایی، حشره‌کش‌ها و آفت‌کش منجر به آزادسازی عناصر سنگین در رسوبات می‌شود (Misra et al., 2009). همچنین تردد وسایل نقلیه و ترافیک جاده‌ای باعث انتقال عناصر سرب، مس، کادمیوم، روی، کروم و نیکل به محیط زیست می‌شود (Hui et al., 2017). عناصر سنگین می‌تواند مدت طولانی در رسوبات و خاک کنار جاده باقی بماند و سلامت انسان را از طرق مختلف تهدید کند (Zhang et al., 2017). در این پژوهش به ارزیابی میزان غلظت عناصر سنگین در رسوبات رودخانه رونج می‌پردازیم. رودخانه رونج واقع در شمال غرب شهرستان تربت جام با طول ۲۴ کیلومتر از ارتفاعات سرچشمه گرفته و پس از آبیاری باغات و مزارع زعفران روستاهای رونج، سمرغاه، نووا، با الحاق به رودخانه مخالفگاه وارد رودخانه بزرگ جامرود می‌شود. روستای رونج بزرگ‌ترین روستا در منطقه با جمعیتی بالغ بر ۵۰۰ خانوار، که عمده فعالیت آنها کشاورزی و دامپروری است. از محصولات باغی منطقه گردو، بادام، گیلاس، آلبالو و سیب است و از محصولات کشاورزی زعفران، کندم، جو، گوجه فرنگی می‌توان نام برد. وجود آب انبارهای قدیمی، آبشار مصنوعی و شرایط آب هوایی معتدل به‌دلیل باغات فراوان، منطقه را به یکی از ایستگاه‌های گردشگری تبدیل کرده است. ارتفاعات منطقه از واحدهای سنگی مختلفی منجمله سنگ‌های الترامافیک تشکیل شده است که نقش به‌سزایی در آلودگی منابع آب و خاک به عناصر سنگین دارد. در منطقه بررسی شده، رودخانه رونج نقش مهمی در تأمین آب بخش کشاورزی و دامپروری دارد، از این‌رو، بررسی آلودگی رسوبات رودخانه به عناصر سنگین حائز اهمیت است. عناصر سنگینی که در این پژوهش بررسی می‌شود شامل آرسنیک، کروم، آهن، نیکل، سرب، مس و روی است.

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه

حوضه آبریز رودخانه رونج واقع در ۲۵ کیلومتری شهرستان تربت جام، بخشی از زیر حوضه جامرود است و از لحاظ تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران نیز متعلق به حوضه آبریز قره‌قوم در شمال شرق ایران است. مساحت حوضه آبریز رونج ۱۳۱ کیلومتر مربع و جزء حوضه‌های کشیده است. بر اساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک تربت جام، حوضه آبریز مذکور در یک اقلیم گرم و خشک قرار گرفته که مجموع بارندگی ۱۶۶ روز در سال و متوسط بارش سالیانه حدود

۱۶۷/۵ میلی‌متر تعیین شده است. رودخانه مذکور در بهار و زمستان سیلابی است و حجم زیادی از رسوب را به پایین دست انتقال می‌دهد. این رودخانه به‌طور کلی از چند چشمه با دبی بین ۱ تا ۲ اینچ تشکیل شده است. دارای آب شیرین است که به مصارف کشاورزی و دامپروری می‌رسد. مسیر دسترسی از طریق بزرگراه فریمان- تربت جام است. مجموعه ولکانیسم در منطقه از سنگ‌های آندزیت، بازالت، تراکی آندزیت، توف و ایگنمبرلیت تشکیل شده که به‌وسیله کنگلومراهای نئوژن پوشیده شده است. تقریباً اکثر قطعات کنگلومراها از واحدهای سنگی اطراف‌به‌ویژه آندزیت‌ها تشکیل شده است. از واحدهای رسوبی در منطقه می‌توان به سنگ آهک‌های سازند بهرام، دولومیت و دولومیت‌های آهکی با سن دونین و ماسه سنگ‌ها و شیل‌های سازند شمشک اشاره کرد. از واحدهای دگرگونی مانند گنایس و از واحدهای آذرین مانند گرانیت در منطقه رخنمون دارد (Boubee de Gramont et al., 1979).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز رونج برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کاریزنو (Boubee de Gramont et al., 1979)
Figure 1. Geological map of Revenj Catchment taken from 1: 100000 map of Kariz Now (Boubee de Gramont et al., 1979)

روش پژوهش

به‌منظور نمونه‌برداری از رسوبات رودخانه بررسی شده، ابتدا موقعیت جغرافیایی منطقه با استفاده از نرم‌افزار Google Earth بررسی شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Global Mapper نقشه توپوگرافی منطقه به‌دست آمد. در نهایت حوضه آبریز رودخانه رونج ترسیم شد. در مجموع ۱۵ نمونه از رسوبات لایه سطحی تا عمق ۳۰ سانتی‌متری بستر رودخانه در شهریور ماه ۹۸ به‌وسیله بیلچه مخصوص رسوب‌برداری از بالادست تا پایین دست برداشت و به آزمایشگاه رسوب‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد انتقال داده شد (شکل ۱). ابتدا نمونه‌ها در سکوهای پلاستیکی تمیز پخش شده، سپس در دمای معمولی آزمایشگاه خشک و سپس به‌وسیله دستگاه لرزاننده، دانه‌بندی شد. رسوبات قرار گرفته روی الک ۱/۵ فی (۰/۳۵ میلی‌متر) برای تجزیه ICP-MS (پلاسمای القایی- اسپکترومتری جرمی) به آزمایشگاه زر آزما تهران انتقال داده شد. به‌منظور پردازش اطلاعات و ارزیابی آلودگی از شاخص‌های زیست‌محیطی منجمله ضریب آلودگی

(Contamination Factor)، عامل غنی‌شدگی (Enrichment Factor)، شاخص بار آلودگی (Pollution Load Index) و شاخص ریسک اکولوژیکی (Ecological Risk index) استفاده da. به منظور ارزیابی شاخص‌های مذکور می‌توان از شیل جهانی و همچنین از مقدار غلظت زمینه عناصر منطقه استفاده کرد (Blaser et al., 2000; Ye et al., 2011). به منظور محاسبه مقدار زمینه عناصر موجود از مکان‌هایی که به دور از مناطق کشاورزی و باغی است، ۳ نمونه رسوب برداشت می‌شود و سپس با استفاده از رابطه (۱) (Bhuiyan et al., 2010) میانگین هندسی (GM) به دست آمده و به عنوان مقدار زمینه منطقه‌ای استفاده می‌شود. در رابطه مذکور exp نشان‌گر تابع نمایی و ln میانگین لگاریتم طبیعی و X غلظت عناصر بررسی شده است. در این پژوهش از مقدار شیل جهانی استفاده شد. در ادامه به توضیح شاخص‌های مذکور می‌پردازیم.

$$GM = \exp(1/n \sum_{i=1}^n \ln X_i) \quad (1)$$

- عامل ضریب آلودگی (CF) بیان‌گر میزان آلودگی رسوبات به عناصر سنگین است (جدول ۱). این عامل از تقسیم کردن غلظت عنصر در نمونه برداشت شده به غلظت همان عنصر در شیل جهانی طبق رابطه (۲) به دست می‌آید (Abraham and Parker, 2008). در این رابطه، CF عبارت است از ضریب آلودگی، C_{sample} غلظت عنصر بررسی شده و $C_{background}$ غلظت زمینه منطقه است.

$$CF = C_{sample} / C_{background} \quad (2)$$

جدول ۱. طبقه‌بندی ضریب آلودگی (Hakanson, 1980)

Table 1. Classification of contamination factor (Hakanson, 1980)

| CF | کم‌تر از ۱ | بین ۱ تا ۳ | بین ۳ تا ۶ | بیش از ۶ |
|-------------------|------------|------------|------------|----------|
| مقدار آلودگی رسوب | پایین | متوسط | قابل توجه | بالا |

- شاخص غنی‌شدگی (EF) (جدول ۲) بیان‌گر میزان تأثیر عامل خارجی بر رسوبات است (Zhang et al., 2009). در این عامل غلظت عناصر نمونه با غلظت آن عنصر در شیل جهانی مقایسه می‌شود. ضریب غنی‌شدگی طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Loska et al., 1995). در این رابطه، EF فاکتور غنی‌شدگی، C_{x1} غلظت عنصر بررسی شده، C_{ref1} غلظت عنصر مبنا، C_{x2} غلظت عنصر در محیط مبنا و C_{ref2} غلظت عنصر مبنا است. از عناصر مختلفی از قبیل آهن، آلومینیوم، کبالت، اسکاندیم، تیتانیم به عنوان عنصر مرجع برای تعیین غنی‌شدگی استفاده می‌شود (Abraham and Parker, 2008; Boat Menard, 1997; Shakeri and Modabberi, 2013). در مقاله مذکور از عنصر آهن به عنوان عنصر مرجع استفاده شده است.

$$EF = (C_{x1} / C_{ref1} \text{ sample}) / (C_{x2} / C_{ref2} \text{ background}) \quad (3)$$

جدول ۲. طبقه‌بندی فاکتور غنی‌شدگی (Chen et al., 2007)

Table 2. Classification of enrichment factor (Chen et al., 2007)

| شدت غنی‌شدگی | بدون غنی‌شدگی | اندک | متوسط | نسبتاً شدید | شدید | خیلی شدید | بینهایت شدید |
|--------------------|---------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| فاکتور غنی‌شدگی EF | کم‌تر از ۱ | بین ۱ تا ۳ | بین ۳ تا ۵ | بین ۵ تا ۱۰ | بین ۱۰ تا ۲۵ | بین ۲۵ تا ۵۰ | بیش‌تر از ۵۰ |

- شاخص بار آلودگی (PLI) برای تعیین سطح آلودگی به کار می‌رود (Tomlinson et al., 1980). این شاخص با تقسیم غلظت هر عنصر در رسوب به غلظت آن در نمونه مرجع (CF) طبق رابطه (۴) به دست می‌آید. اگر ضریب به دست آمده PLI به عدد یک نزدیک باشد نشان‌دهنده نزدیک بودن غلظت به مقدار زمینه است (Adomako et

al., 2008). در واقع اگر ضریب PLI بیش‌تر از ۱ باشد رسوب آلوده و اگر کم‌تر از ۱ باشد نشان‌دهنده عدم آلودگی رسوب است (Godwin et al, 2015).

$$PLI = \sqrt[n]{CF1 * CF2 * \dots * CFn} \quad (۴)$$

- شاخص ریسک اکولوژیک (RI) در سال ۱۹۸۰ به‌وسیله هاکانسون بیان شد (Hakanson, 1980). هاکانسون شاخص مذکور را بر اساس نتایج بررسی آلودگی رسوبات سطحی تعدادی از دریاچه‌های کشور سوئد ارائه داده است. برای تعیین شاخص ریسک اکولوژیک (RI) ابتدا بر اساس رابطه (۵) مقدار CF محاسبه می‌شود. در رابطه (۵) مقدار Cs غلظت عناصر و Cn مقدار غلظت آن عنصر در زمینه است. سپس از طریق رابطه (۶) مقدار Er محاسبه می‌شود. در این رابطه Er مقدار ریسک اکولوژیک هر یک از عناصر و Tr میزان سمیت پیشنهاد شده از سوی هاکانسون (As=10, Cr=2, Ni=Cu=Pb=5 و Zn=1) برای هر عنصر است (Hakanson, 1980). سپس از طریق رابطه (۷) شاخص ریسک اکولوژیک محاسبه می‌شود. طبقه‌بندی پتانسیل ریسک اکولوژیک (Er) و شاخص ریسک اکولوژیک (RI) در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$RI = \sum_{i=1}^m Er \quad \text{رابطه ۷} \quad Er = Tr * CF \quad \text{رابطه ۶} \quad CF = Cs/Cn \quad (۵)$$

جدول ۳. طبقه‌بندی پتانسیل ریسک اکولوژیک (Er) و شاخص ریسک اکولوژیک (RI) (Hakanson, 1980)

Table 3. Classification of potential ecological risk (Er) and ecological risk index (Hakanson, 1980)

| مقدار | کم | متوسط | قابل ملاحظه | زیاد | خیلی زیاد |
|-------|--------------|---------|-------------|--------------|--------------|
| RI | کم‌تر از ۱۵۰ | ۱۵۰-۳۰۰ | ۳۰۰-۶۰۰ | بیشتر از ۶۰۰ | ----- |
| Er | کم‌تر از ۴۰ | ۴۰-۸۰ | ۸۰-۱۶۰ | ۱۶۰-۳۲۰ | بیشتر از ۳۲۰ |

نتایج

نتایج حاصل از تجزیه رسوبات بستر رودخانه رونج در جدول ۴ نشان داده شده است. بررسی غلظت عناصر در رسوبات منطقه نشان داد، بیش‌ترین غلظت آرسنیک مربوط به نمونه ۱ است و غلظت سرب در نمونه‌های ۱ و ۱۵ که از ابتدا و انتهای حوضه آبریز برداشت شده بالا است. غلظت کروم و آهن در نمونه ۱۴ و مس در نمونه‌های ۱۴ و ۱۵ که از خروجی حوضه آبریز برداشت شده غلظت زیادی دارد. میانگین غلظت عناصر آرسنیک، سرب و مس در رسوبات رودخانه رونج بیش‌تر از شیل جهانی است و روی، کروم، مس و نیکل غلظت کم‌تر از شیل جهانی دارند (جدول ۴). بررسی ضریب آلودگی نشان از این دارد که عناصر کروم، آهن، نیکل و روی ضریب آلودگی کم‌تر از ۱ داشته و طبق طبقه‌بندی هاکانسون (۱۹۸۰) آلودگی کمی در رسوبات منطقه ایجاد کرده‌اند. آرسنیک با میانگین ۱/۱۶، سرب با میانگین ۱/۲۸ و مس با میانگین ۱/۱۶ آلودگی متوسطی در رسوبات منطقه دارند.

ارزیابی غنی‌شدگی نشان داد، عناصر کروم، آهن، نیکل و روی بر اساس طبقه‌بندی چن (۲۰۰۷) بدون غنی‌شدگی است و عناصر سرب، مس و آرسنیک با میانگین ۱/۳۵، ۱/۲۳ و ۱/۲۰ در محدوده غنی‌شدگی اندک قرار گرفته‌اند. نتایج فوق با ضریب آلودگی هم‌خوانی دارد. نقشه تغییرات ضریب آلودگی و غنی‌شدگی نشان از تمرکز آلودگی آرسنیک در ابتدای حوضه، کروم و مس در انتها و عنصر سرب در ابتدا و انتهای حوضه دارد (شکل ۳).

جدول ۴. مقدار غلظت عناصر سنگین در رسوبات رودخانه رونج و شیل جهانی (ppm) (Turekian et al., 1961)
Table 4. Concentration of heavy elements in the Revenj River Sediments and Global shale (ppm)
(Turekian et al., 1961)

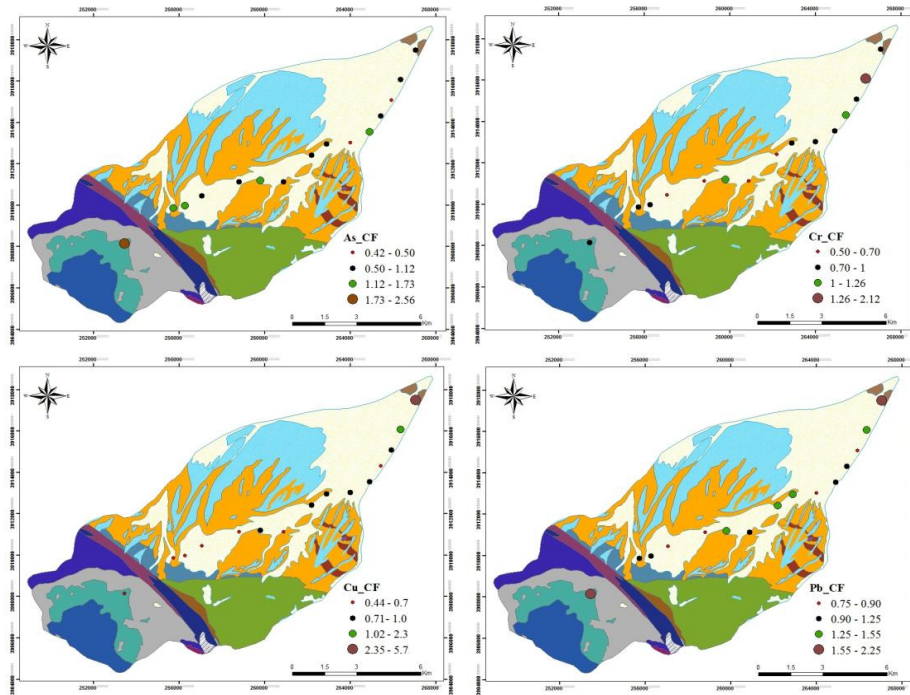
| Sample | As | Cr | Fe | Ni | Cu | Pb | Zn |
|--------------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| 1 | ۳۳/۴ | ۹۴ | ۴۶۷۷۴ | ۳۷ | ۲۷ | ۴۵ | ۸۸ |
| 2 | ۱۸/۵ | ۸۲ | ۴۶۳۱۲ | ۵۰ | ۲۵ | ۲۳ | ۹۱ |
| 3 | ۲۲/۶ | ۸۶ | ۴۷۶۶۷ | ۴۳ | ۲۰ | ۲۴ | ۸۳ |
| 4 | ۱۱/۷ | ۵۹ | ۳۹۶۸۹ | ۳۶ | ۲۱ | ۱۸ | ۷۴ |
| 5 | ۱۳/۴ | ۵۰ | ۳۸۸۳۶ | ۳۶ | ۲۳ | ۱۵ | ۷۲ |
| 6 | ۱۸/۱ | ۱۱۴ | ۴۶۲۱۶ | ۳۳ | ۴۱ | ۳۰ | ۶۸ |
| 7 | ۱۰/۱ | ۵۷ | ۴۲۱۹۴ | ۳۴ | ۲۴ | ۲۲ | ۸۰ |
| 8 | ۱۲/۵ | ۷۰ | ۳۸۱۸۵ | ۲۸ | ۴۱ | ۲۹ | ۷۳ |
| 9 | ۱۴/۶ | ۹۶ | ۴۱۷۱۵ | ۳۰ | ۳۸ | ۲۸ | ۶۳ |
| 10 | ۶/۶ | ۱۰۰ | ۴۴۵۰۷ | ۲۹ | ۴۶ | ۱۷ | ۹۳ |
| 11 | ۱۹ | ۸۰ | ۴۹۸۶۱ | ۳۵ | ۴۴ | ۲۵ | ۸۰ |
| 12 | ۱۲/۷ | ۱۲۶ | ۵۱۳۶۲ | ۳۲ | ۳۲ | ۲۵ | ۸۷ |
| 13 | ۵/۵ | ۸۵ | ۴۱۳۵۴ | ۲۷ | ۳۶ | ۱۵ | ۶۷ |
| 14 | ۱۴/۶ | ۲۱۲ | ۶۹۸۲۰ | ۳۶ | ۱۰۲ | ۳۱ | ۶۸ |
| 15 | ۱۳/۳ | ۸۵ | ۳۸۷۱۲ | ۳۱ | ۲۵۹ | ۳۹ | ۶۲ |
| Mean | ۱۵/۱ | ۹۳/۰۶ | ۴۵۵۴۶ | ۳۴/۴۶ | ۵۲/۲ | ۲۵/۷۳ | ۷۶/۶ |
| Global shale | ۱۳ | ۱۰۰ | ۴۷۲۰۰ | ۶۸ | ۴۵ | ۲۰ | ۹۵ |

جدول ۵. میانگین ضریب آلودگی (CF) و غنی شدگی (EF) به عناصر سنگین در حوضه آبریز رونج
Table 5. Contamination factor (CF) and enrichment factor (EF) mean of heavy elements in Revenj Catchment

| Element | As | Cr | Fe | Ni | Cu | Pb | Zn |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| CF | ۱/۱۶ | ۰/۹۳ | ۰/۹۶ | ۰/۵۰ | ۱/۱۶ | ۱/۲۸ | ۰/۸۰ |
| EF | ۱/۲۰ | ۰/۹۴ | ۱ | ۰/۵۳ | ۱/۲۳ | ۱/۳۵ | ۰/۸۵ |

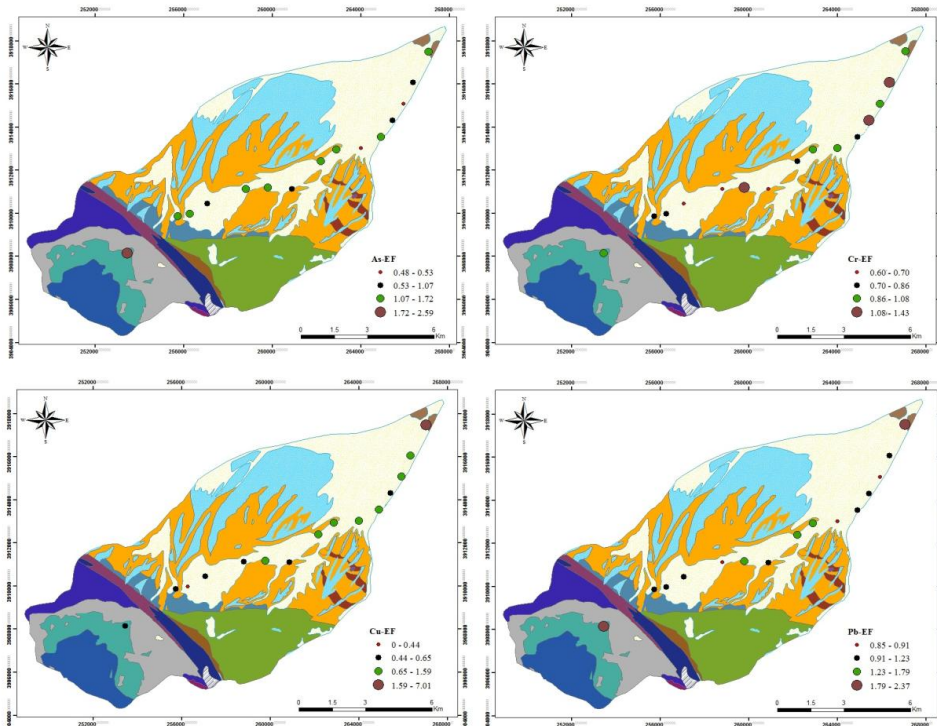
نتایج حاصل از ارزیابی شاخص بار آلودگی نشان داد، مقدار شاخص بار آلودگی نمونه‌های رسوب منطقه کم‌تر از ۱ بوده و به مقدار زمینه برابر است. نمونه ۱۴ با ضریب بار آلودگی ۱/۳۷، نمونه ۱۵ با ضریب ۱/۱۸ و نمونه ۱ با ضریب بار آلودگی ۱/۱۰ بر اساس شاخص مذکور به ترتیب آلوده به عناصر سنگین هستند (جدول ۵). نقشه تغییرات بار آلودگی رسوبات منطقه نشان از تمرکز آلودگی در ابتدا و انتهای حوضه آبریز دارد (شکل ۴).

نتایج حاصل از ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیک در جدول ۷ نشان داده شده است. میانگین ضریب Er عناصر بررسی شده کم‌تر از ۴۰ است و در نتیجه مقدار پتانسیل ریسک اکولوژیک عناصر سنگین در منطقه کم است. میانگین ضریب Er برای عناصر مذکور به شکل $As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$ برقرار است. بر اساس نتایج حاصل از ضریب Er مقدار شاخص ریسک اکولوژیک رسوبات حوضه آبریز رودخانه رونج ارزیابی شد. بررسی‌ها نشان از کم بودن ضریب شاخص ریسک اکولوژیک (> 150) دارد و وضعیت ریسک اکولوژیک در رسوبات منطقه کم است (جدول ۷). شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی تمرکز ریسک اکولوژیکی را در ابتدا و انتهای حوضه آبریز نشان می‌دهد.



شکل ۲. نقشه تغییرات ضریب آلودگی آرسنیک (As-CF)، کروم (Cr-CF)، سرب (Pb-CF) و مس (Cu-CF) در حوضه آبریز رونج

Figure 2. Map of arsenic (As-CF), chromium (Cr-CF), lead (Pb-CF) and copper (Cu-CF) contamination factor in Revenj Catchment



شکل ۳. نقشه تغییرات غنی‌شدگی آرسنیک (As-EF)، کروم (Cr-EF)، سرب (Pb-EF) و مس (Cu-EF) در حوضه آبریز رونج

Figure 3. Map of arsenic (As-EF), chromium (Cr-EF), lead (Pb-EF) and copper (Cu-EF) enrichment factor in Revenj Catchment

جدول ۶. شاخص بار آلودگی ارزیابی شده در رسوبات منطقه بررسی شده

Table 6. Evaluation of pollution load index in sediments of the study area

| Sample | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PLI | ۱/۱۰ | ۰/۸۷ | ۰/۸۵ | ۰/۵۹ | ۰/۸۷ | ۰/۹۴ | ۰/۶۲ | ۰/۷۴ | ۰/۸۰ | ۰/۷۰ | ۰/۹۱ | ۰/۸۷ | ۰/۵۵ | ۱/۳۷ | ۱/۱۸ |

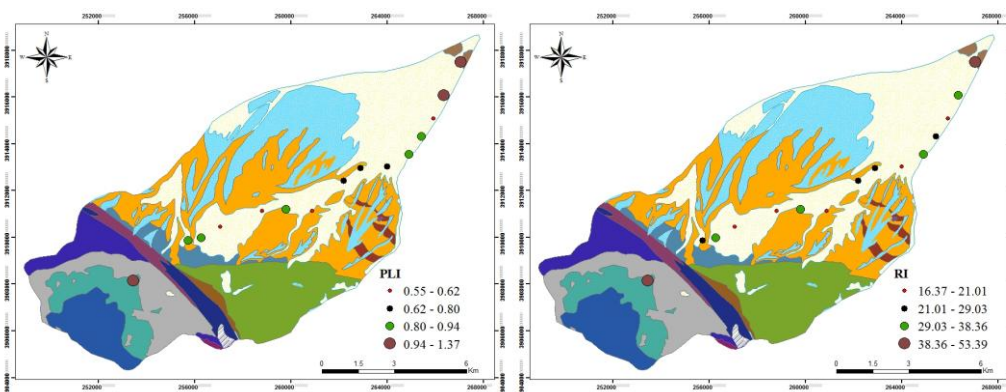
جدول ۷. شاخص ریسک اکولوژیک و پتانسیل ریسک اکولوژیک ارزیابی شده برای رسوبات منطقه بررسی شده

Table 7. Ecological risk index and potential ecological risk for sediments in the study area

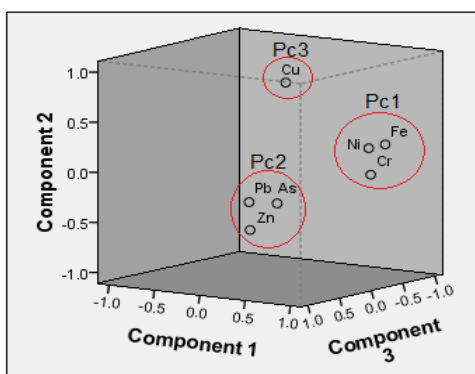
| Er | As | Cr | Pb | Cu | Zn | Ni | RI |
|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|
| 1 | ۲۵/۶۹ | ۱/۸۸ | ۱۱/۲۵ | ۳ | ۰/۹۲ | ۲/۷۲ | ۴۵/۴۶ |
| 2 | ۱۴/۲۳ | ۱/۶۴ | ۵/۷۵ | ۲/۷۷ | ۰/۹۵ | ۳/۶۷ | ۲۳/۰۳ |
| 3 | ۱۷/۳۸ | ۱/۷۲ | ۶ | ۲/۲۲ | ۰/۸۷ | ۳/۱۶ | ۳۱/۳۶ |
| 4 | ۹ | ۱/۱۸ | ۴/۵ | ۲/۳۳ | ۰/۷۷ | ۲/۶۴ | ۲۰/۴۳ |
| 5 | ۱۰/۳۰ | ۱ | ۳/۷۵ | ۲/۵۵ | ۰/۷۵ | ۲/۶۴ | ۲۱/۰۱ |
| 6 | ۱۳/۹۲ | ۲/۲۸ | ۷/۵ | ۴/۵۵ | ۰/۷۱ | ۲/۴۲ | ۳۱/۴۰ |
| 7 | ۷/۷۶ | ۱/۱۴ | ۵/۵ | ۲/۶۶ | ۰/۸۴ | ۲/۵ | ۲۰/۴۱ |
| 8 | ۹/۶۱ | ۱/۴ | ۷/۲۵ | ۴/۵۵ | ۰/۷۶ | ۲/۰۵ | ۲۵/۶۴ |
| 9 | ۱۱/۲۳ | ۱/۹۲ | ۴ | ۴/۲۲ | ۰/۶۶ | ۲/۲۰ | ۲۷/۲۴ |
| 10 | ۵/۰۷ | ۲ | ۴/۲۵ | ۵/۱۱ | ۰/۹۷ | ۲/۱۳ | ۱۹/۵۴ |
| 11 | ۱۴/۶۱ | ۱/۶ | ۶/۲۵ | ۴/۸۸ | ۰/۸۴ | ۲/۵۷ | ۳۰/۷۶ |
| 12 | ۹/۷۶ | ۲/۵۲ | ۶/۲۵ | ۳/۵۵ | ۰/۹۱ | ۲/۳۵ | ۲۵/۳۶ |
| 13 | ۴/۲۳ | ۱/۷ | ۳/۷۵ | ۴ | ۰/۷۰ | ۱/۹۸ | ۱۶/۳۷ |
| 14 | ۱۱/۲۳ | ۴/۲۴ | ۷/۷۵ | ۱۱/۷۷ | ۰/۷۱ | ۲/۶۴ | ۳۸/۳۶ |
| 15 | ۱۰/۲۳ | ۱/۷ | ۹/۷۵ | ۲۸/۷۷ | ۰/۶۵ | ۲/۲۷ | ۵۳/۳۹ |
| Mean | ۱۱/۶۲ | ۱/۸۶ | ۶/۴ | ۵/۸ | ۰/۸۰ | ۲/۵۳ | ۲۹/۰۵ |

به منظور بررسی ارتباط عناصر با یکدیگر از شاخص آماری تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) استفاده شد. از این روش به منظور کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرها و تفسیر بهتر اطلاعات استفاده می‌شود (Noori et al., 2010). روش مذکور بر پایه ماتریکس هم‌بستگی بین متغیرها استوار است (Miller and Miller, 2000). در واقع تحلیل مؤلفه اصلی یک تکنیک چندمتغیره است که هدف اصلی آن کاهش تعداد متغیرهای یک مجموعه داده چند متغیره است تا جایی که تا حد ممکن تغییرات متغیرهای اولیه در مجموعه داده را توضیح دهد. این هدف به وسیله دنباله‌ای از ترکیبات خطی متعامد از متغیرهای اولیه با نام مؤلفه‌های اصلی که واریانس بیشینه دارند به دست می‌آید. این روش می‌تواند اطلاعات زیادی را درباره ساختار اساسی داده‌ها و روابط احتمالی آنها بیان کند (Golobocanin et al., 2004). تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) یک مدل سه مؤلفه‌ای برای داده‌های منطقه بررسی شده پیشنهاد می‌کند (شکل ۵). محاسبه درصد واریانس نشان داد، مقادیر سه مؤلفه بیش‌تر از ۱ است که حدود ۷۴،۶۵ درصد از کل واریانس را شامل می‌شود. مؤلفه اول واریانس ۳۱،۳ درصد و مؤلفه دوم واریانس ۲۷،۸۶ درصد و مؤلفه سوم واریانس ۱۵،۴۶ درصد را شامل می‌شود. رابطه میان عناصر سنگین نشان داد، در مؤلفه نخست عناصر کروم، نیکل و آهن قرار دارد که با یکدیگر هم‌بستگی قوی برقرار کرده است. آهن به لحاظ شیمیایی فعال است و رفتار شیمیایی مشابه با عنصر نیکل دارد

(Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). در مؤلفه دوم سرب، روی و آرسنیک قرار گرفته است و در مؤلفه سوم عنصر مس قرار دارد. هرچند مس خود یک گروه مستقل تشکیل داده اما با عناصر مؤلفه دوم همبستگی برقرار کرده است. نتایج حاصل نشان از دو منبع مختلف (واحدهای آذرین الترامافیک و واحدهای آذرین گرانیتی) برای غلظت عناصر سنگین در رسوبات منطقه دارد.



شکل ۴. نقشه تغییرات شاخص بار آلودگی (PLI) و پتانسیل ریسک اکولوژیک (RI) در حوضه آبریز رونج
Figure 4. Map of pollution load index (PLI) and potential ecological risk (RI) in Revenj Catchment



شکل ۵. نمودار تحلیل مؤلفه اصلی عناصر سنگین در رسوبات حوضه آبریز رونج
Figure 5. Diagram of the component analysis of heavy elements in the sediments of Revenj Catchment

جدول ۸. نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی

Table 8. Results of principal component analysis component matrix

| | Component | | |
|---------------|-----------|--------|--------|
| | ۱ | ۲ | ۳ |
| As | -۰/۳۴۱ | ۰/۶۰۴ | ۰/۵۱۶ |
| Cr | ۰/۹۳۰ | -۰/۰۹۸ | ۰/۰۴۴ |
| Fe | ۰/۸۷۰ | -۰/۱۸۰ | -۰/۰۴۱ |
| Ni | ۰/۸۴۶ | -۰/۱۰۷ | -۰/۱۳۴ |
| Cu | -۰/۲۰۱ | ۰/۱۳۴ | ۰/۸۶۰ |
| Pb | -۰/۳۴۰ | ۰/۷۵۳ | ۰/۳۴۰ |
| Zn | -۰/۰۰۵ | ۰/۸۱۵ | ۰/۲۳۴ |
| Initial | ۲/۱۹۳ | ۱/۹۹۸ | ۱/۰۰۲ |
| % of Variance | ۳۱/۳۳۱ | ۲۷/۸۶۹ | ۱۵/۴۶۲ |
| Cumulative% | ۳۱/۳۳۱ | ۵۸/۲۰۰ | ۷۴/۶۶۱ |

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.
a. Rotation converged in 5 iterations.

بحث

نتایج حاصل از بررسی عناصر سنگین نشان داد، آرسنیک، سرب و مس در منطقه غنی‌شدگی اندک و آلودگی متوسط دارند. عناصر کروم، آهن، نیکل و روی بر اساس شاخص غنی‌شدگی در محدوده بدون غنی‌شدگی بوده است، از این‌رو، بر اساس ضریب آلودگی عناصر مذکور آلودگی کمی در منطقه ایجاد کرده‌اند. با توجه به این‌که سنگ‌های الترامافیک حاوی مقادیر زیاد عناصر آهن، کروم، نیکل، کبالت و منگنز است و همچنین با توجه به این‌که فرآیند هوازدگی یکی از عامل‌های تشدیدکننده خطر ناشی از آزادسازی عنصرها به‌شمار می‌آید (Dalzell, 1987)، از این‌رو، غنی‌شدگی و آلودگی کم عناصر آهن، کروم و نیکل در رسوبات بر اساس هوازدگی واحدهای سنگی الترامافیک در منطقه است. هم‌بستگی عناصر کروم، نیکل و آهن در نمودار مؤلفه اصلی مؤید این امر است. وجود سازند شیلی شمشک می‌تواند دلیلی بر غنی‌شدگی و افزایش آلودگی آرسنیک و سرب در ابتدای حوضه آبریز باشد. جذب آرسنیک به‌وسیله ذرات خاک از فرایندهای غیرمتحرک شدن فلزات است (Pierce and Moore, 1982). این امر می‌تواند تمرکز غلظت آرسنیک در ابتدای حوضه را توجیه کند. غلظت سرب ۱۰ تا ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و غلظت مس ۴ تا ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در سنگ‌های اسیدی است (Kabata-Pendias, 2001; Baker and Senft, 1995). در انتهای حوضه آبریز رودخانه رونج، مس و سرب غلظت زیادی دارد. با توجه به این‌که بعضی از شاخه‌های فرعی رودخانه رونج از روی واحدهای گرانیتی عبور کرده و در انتهای حوضه آبریز به رودخانه ملحق می‌شوند و از آن‌جاکه واحدهای اسیدی از جمله گرانیت‌ها حاوی عنصر سرب و مس هستند (اردکانی و همکاران، ۱۳۹۳; Kabata-Pendias, 2007)، از این‌رو، تمرکز زیاد سرب و مس در ناحیه مذکور را می‌توان به‌دلیل هوازدگی واحدهای گرانیتی و انتقال عناصر مذکور به‌وسیله شاخه‌های فرعی رودخانه به ناحیه ذکر شده دانست. شاخص بار آلودگی نشان از تمرکز آلودگی در پایین دست حوضه دارد. با توجه به این‌که مقدار غلظت عناصر سنگین در رسوبات ارتباط نزدیکی با بافت آن داشته و معمولاً در رسوبات ماسه‌ای سبک کم‌ترین میزان غلظت عناصر سنگین و در رسوبات گلی (دانه‌ریز) بیش‌ترین میزان غلظت را نشان می‌دهد (Kabata-Pendias, 2001)، از این‌رو، وجود مانع و خاکریزهای مصنوعی در پایین‌دست رودخانه منجر به تجمع رسوبات ریز دانه و تمرکز عناصر سنگین از جمله کروم، سرب و مس شده که این امر منجر به افزایش آلودگی در نمونه‌های پایین‌دست رودخانه شده است. آلودگی رسوب در ابتدای حوضه آبریز رونج به‌دلیل آلودگی آرسنیک و سرب در ناحیه مذکور است. آلودگی در حد کم تا متوسط عناصر سنگین در ناحیه مذکور منجر به این امر شده که پتانسیل ریسک اکولوژیک و شاخص ریسک اکولوژیک در منطقه کم باشد. از این‌رو، رودخانه رونج از دیدگاه آلودگی رسوبات به عناصر سنگین در زمره مناطق کم خطر است.

نتیجه‌گیری

بررسی شاخص‌های غنی‌شدگی و ضریب آلودگی بیان‌گر این است که کروم، آهن، نیکل و روی ضریب آلودگی کم‌تر از ۱ داشته و در رسوبات منطقه آلودگی کمی دارند. عناصر آرسنیک، مس و سرب با میانگین بیش‌تر از شیل جهانی دارای ضریب آلودگی و شاخص غنی‌شدگی بیش‌تر از ۱ بوده است که منجر به آلودگی رسوبات در حد متوسط شده

است. بررسی نمودار مؤلفه اصلی نشان از همبستگی عناصر کروم، آهن و نیکل دارد که نشان از منشأ مشترک عناصر مذکور است. هوازدگی و فرسایش واحدهای الترامافیک در منطقه در غنی‌شدگی و آلودگی کم عناصر مذکور نقش دارند. ترسیم نقشه تغییرات نشان از تمرکز آلودگی عناصر آرسنیک و سرب در ابتدای حوضه دارد. وجود سازند شیلی شمشک منجر به افزایش غلظت و به تبع آن افزایش آلودگی آرسنیک و سرب در ابتدای حوضه آبریز شده است. همبستگی آرسنیک و سرب به وسیله نمودار مؤلفه اصلی نشان‌دهنده این موضوع است. هم‌چنین در انتهای حوضه آبریز رونج مس و سرب تمرکز دارند. هوازدگی و فرسایش واحدهای گرانیتی منجر به تمرکز و آلودگی این عناصر در ناحیه مذکور شده است. نقشه تغییرات شاخص بار آلودگی نیز با نشان دادن تمرکز بالای آلودگی در ناحیه خروجی حوضه آبریز نیز این امر را تأیید می‌کند. بر اساس نتایج مذکور پتانسیل و شاخص ریسک اکولوژیک منطقه ارزیابی شد. نتایج نشان از کم بودن پتانسیل و شاخص ریسک اکولوژیک در رسوبات منطقه دارد که این امر نشان می‌دهد از دیدگاه زیست‌محیطی رودخانه رونج در زمره رودخانه‌های با آلودگی زیاد قرار نمی‌گیرد.

سپاس‌گزاری

از گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد به‌دلیل فراهم آوردن امکانات (طرح پژوهشی شماره ۳/۵۰۹۴۰) قدردانی می‌شود.

منابع

۱. سبحان اردکانی سهیل، معانی‌جو محمد، اسدی هاله، "بررسی غلظت سرب، کادمیوم، مس و منیزیم در منابع آب زیرزمینی دشت رزن"، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی همدان، دوره ۲۱، شماره ۴ (۱۳۹۳) ۳۱۹-۳۲۹.
2. Abraham G., Parker R., "Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand", Environ. Monit. Assess, 136 (1-3) (2008) 227-238.
3. Adomako D., Nyarko B., Dampare B., Serfor- Armah Y., Osae S., Fianko J., Akaho H., "Determination of toxic elements in waters and sediments from River Subin in the Ashanti Region of Ghana", Environ. Monit. Assess. 141 (2008) 165-175.
4. Baker D. E., Senft J. P., "Copper", John Wiley and Sons Inc., New York. (1995) 179-205.
5. Bhuiyan M. A. H., Parvez L., Islam M. A., Dampare S. B., Suzuki S., "Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh", Journal of Hazardous Materials, 173 (2010) 384-392.
6. Blaser P., Zimmermann S., Luster J., Shotyk W., "Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils, As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn, in Swiss forest soils", Sci. Total Environ. 249 (2000) 257-280.

7. Boubee de Gramont X., Guillou Y., Maurizot P., Vaslet D., de la Villeon H., "Kariz Now 1:100000 Geological map", Ministry of Industry, Geological Survey of Iran (1979).
8. Boat Menard, P., "Influence de la retime atmospheriquesur la chimie des metaux en trace dans la matiere e suspension de l Atlantique Nord", Thesis, Univ Paris (1979) 434.
9. Chen C., Kao C., Chen F., Dong D., "Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan", *Chemosphere* 66 (8) (2007) 1431-1440.
10. Dalzell H. W., "Soil management, Compost production and use in tropical and subtropical environments", (FAO Soils Bulletin 56) Food and Agriculture Orgnazation of the united Nation, Rome (1987) 186.
11. Godwin A., Oghenekohwiroro E., Funso A., Olaniyi O., "Using EF, PLI and Igeo for the assessment of heavy metal pollution and sediment quality of Asejire reservoir, Southwest Nigeria", *International Journal of Environment and Pollution Research*, 3 (4) (2015) 77-90.
12. Golobocanin D.D., Skrbic B.D., Miljevic N.R., "Principal component analysis for soil contamination with PAHs", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 72 (2004) 219-223.
13. Hakanson L., "An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach", *Water Reserch*, 14(8) (1980) 975-1001.
14. Huang L., Rad S., Xu L., Gui L., Song X., Li Y., Wu Z., Chen Z., "Heavy Metals Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment in HuixianWetland, South China", *Water Journal*. 12 (2020) 431-445.
15. Hui Z., Caiqiu W., Jiping G., Xuyin Y., Qiao W., Wenming P., Long Tao L., Qiu Jie Q., Hanpei, Z., "Assessment of Heavy Metal Contamination in Roadside Soils Along the Shenyang-Dalian Highway in Liaoning Province, China", *Polish Journal of Environmental Studies*, 26 (4) (2017) 1539-1549.
16. Kabata-Pendias A., Pendias H., "Trace elements in soils and plants", Third edition, CRC Press LLC (2001) 408.
17. Kabata-Pendias A., Mukherjee A., "Trace Elements from soild to Human, Springer Berlin", New York (2007) 550.
18. Loska K., Chebual J., Pleczar J., Wiechla D., Kwapulinski J., "Use of environment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to elevate the content of Cd, Cu

- and Ni in the Rybink water reservoir in Poland", *Water, Air and Soil pollution*, 93 (1995) 347-365.
19. Miller N. J., Miller J. C., "Statistics and chemometrics for analytical chemistry", Pearson Education, Englewood Cliffs, New Jersey (2000) 288.
20. Misra S. G., Dinesh M., "Soil Pollution", Published by S.B. Nangia, New Delhi (2009).
21. Noori R., Sabahi M.S., Karbassi A.R., Baghvand A., TaatiZadeh H., "Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set", *Desalination*, 260 (1-3) (2010) 129-36.
22. Pierce M.L., Moore C.B., "Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous iron hydroxide", *Water Research*, 16 (1982) 1247-1253.
23. Rajeshkumar S., Liu Y., Zhang X., Ravikumar B., Bai G., Li X., "Studies on seasonal pollution of heavy metals in water, sediment, fish and oyster from the Meiliang Bay of Taihu Lake in China", *Chemosphere*, 191(2017) 626-638.
24. Shakeri A., Modabberi S., "Assessment of Trace Elements Concentration in Soils of the Hashtgerd Area Using Geochemical and Multivariate Statistical Methods, Alborz Province", *Iran. Journal of Engineering Geology* (2013) 2049-2070.
25. Tomlinson D.L., Wilson J.G., Hariis C.R., Jeffrey D. W., "Problems in the Assessment of Heavy Metal Levels in Estuaries and the formation of a pollution Index", *Helgoländer Meeresunters*, 33 (1980) 566-575.
26. Turekian, K. K., and Wedepohl, K. H. "Distribution of the elements in some major units of the earth's crust", *Bulletin of Geological Society of America*. 72 (1961)175-92
27. Ye C., Li S., Zhang Y., Zhang Q., "Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China", *Journal Hazard*. 191(2011) 366-372.
28. Yujun Y.I., Kang Z., Guoan Y.U., Xuehua D., "Sediment pollution and its effect on fish through food chain in the Yangtze River", *International Journal of Sediment Research*, 23 (4) (2008) 338-347.
29. Xiuling L., Henglun S., Yongjun Z., Weixing C., Changwei H., Chen S., "istribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Water, Sediments, and Aquatic Macrophytes, A Case Study of the Junction of Four Rivers in Linyi City, China", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (16) (2019) 2861.

30. Zhang W., Feng H., Chang J., Qu J., Xie H., Yu, L., "Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze river intertidal zone, An assessment from different indexes", *Environmental Pollution*. 157 (2009) 1533-1543.

Geochemical Assessment and Pollution of Heavy Elements in the Revenj River Sediments in the Northwest of Torbat-e-Jam

Majid Otari, Mohammad Khanehbad*, Asadollah Mahboubi, Reza Mousavi Harami
Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,
Iran

Extended Abstract

(Paper pages 25-38)

Introduction

Naturally, the release of heavy elements in the environment begins with the weathering of igneous rocks, which during the above process can enter the water and sediment. In acidic conditions, heavy elements are mobile and remain in the sediment or enter surface and groundwater during the weathering process. In this study, the concentration of heavy elements such as Arsenic, Chromium, Iron, Nickel, Lead, Copper and Zinc in the sediments of the Revenj River has been evaluated. Revenj River located in the northwest of Torbat-e-Jam city with a length of 24 km that originates from the heights and after irrigating the orchards and saffron fields of Revenj, Samarghaveh, Nova villages, joins the opposite river and enters the great Jamrood River. The access route to the study area is via Fariman-Torbat-Jam highway. The rock units of the region include volcanic rocks, which include andesite, basalt, trachyandesite, tuff, ignimbrite, and sedimentary units of limestone of Bahram Formation, dolomite and calcareous dolomites with Devonian age and sandstones and shales of Shemshak Formation pointed out. There is also a granite rock unit in the outcrop area.

Material and methods

In order to investigate the contamination of river sediments with heavy metals, 15 samples of surface layer sediments to a depth of 30 cm in the riverbed were taken in September 2020 by a special shovel for upstream to downstream of the river and transferred to Ferdowsi University of Mashhad laboratory. Then, after drying, the samples were granulated by a vibrating device, and finally, the sediments placed on a sieve at 1.5 ϕ for ICP-MS analysis were transferred to Zar Azma Laboratory in Tehran. In order to process information and pollution assessment, environmental indicators including Contamination Factor, Enrichment Factor, Pollution Load Index and Ecological Risk Index were used. In this study, global shale was used to evaluate the above indicators.

Results and discussion

The Contamination Factor indicates the degree of contamination of sediments with heavy elements, which is obtained by dividing the concentration of the element in the sample taken by the concentration of the same element in the global shale. The Enrichment Factor indicates the extent of the effect of external factors on sediments. In the above index, global shale is used as the base element concentration and Iron element is used as the reference element. Pollution Load Index that is used to determine the level of contamination and is obtained by dividing the concentration of each element in the sediment by its concentration in the reference sample. If the above index coefficient is more than 1, sediment is pollution and if it is less than 1, it

indicates no sediment pollution. The Ecological Risk Index was expressed by Hakanson in 1980 and indicates the degree of hazardous heavy elements in sediments

Evaluation of the above indices showed that chromium, iron, nickel and zinc had a contamination factor of less than 1 and according to Hakanson (1980) classification have caused little contamination in the sediments of the region. Arsenic, lead and copper are moderately contaminated in local sediments. Enrichment Factor showed that the elements chromium, iron, nickel and zinc were without enrichment according to Chen (2007) classification and the elements of lead, copper and arsenic were in the range of low enrichment. The above results are consistent with the contamination factor. The enrichment change map, like the contamination factor map, shows the concentration of arsenic enrichment at the beginning of the basin, chromium and copper at the end, and lead at the beginning and end of the basin. The results of the evaluation of the pollution load index showed that at the beginning of the basin, sample 1 with a pollution load coefficient of 1.10 and at the end of the basin, samples 14 with a pollution load coefficient of 1.37 and sample 15 with a pollution load coefficient of 1.18 are relatively contaminated with heavy elements. Evaluation of ecological risk (Er) potential showed that the average Er coefficient of the studied elements is less than 40 and as a result the amount of ecological risk potential of heavy elements in the region is low. The average Er coefficient for the above elements is As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn. Also, the study of the ecological risk index shows the low coefficient of the above Index and the status of ecological risk in the sediments of the region is low. In order to investigate the relationship between the elements with each other, the statistical index of principal component analysis (PCA) was used. Principal component analysis proposes a three-component model for the data of the study area. The first component contains the elements chromium, nickel and iron, which have a strong correlation with each other. The second component contains lead, zinc and arsenic, and the third component contains copper. Although copper itself has formed an independent group, it has correlated with the elements of the second component. The results show two different sources for the concentration of heavy elements in the sediments of the region. These two sources include ultramafic rock units and granite igneous units. The results of the study of heavy elements showed that arsenic, lead and copper in the region have low enrichment and moderate pollution. The elements chromium, iron, nickel and zinc based on the enrichment index have been in the range without enrichment, so based on the contamination factor, the elements have caused little pollution in the region. Due to the fact that ultramafic rocks contain large amounts of iron, chromium, nickel, cobalt and manganese, so the enrichment and low pollution of iron, chromium and nickel in sediments is based on weathering of ultramafic rock units in the region. The presence of shale in Shemshak Formation can be a reason for enrichment and increase of arsenic and lead pollution at the beginning of the catchment. Absorption of arsenic by soil particles is one of the processes of immobilization of metals, so this can justify the concentration of Arsenic concentration at the beginning of the basin. Due to the fact that acidic units including granites contain the elements of lead and copper, and due to the fact that some tributaries of the Revenj River pass through granite units and join the river at the end of the catchment, so the high concentration of lead and copper in the above area can be considered due to weathering of granite units and the transfer of the above elements by the tributaries of the river to the mentioned area. Pollution load index indicates the concentration of pollution downstream of the basin. The presence of artificial barriers and embankments downstream of

the river has led to the accumulation of fine-grained sediments and the concentration of heavy elements such as chromium, lead and copper, which has led to increased pollution in downstream samples. Sediment pollution at the beginning of Revenj catchment is due to arsenic and lead pollution in the upstream area. Low to moderate pollution of heavy elements in the upstream area has led to low ecological risk potential and ecological risk Index in the region.

Conclusion

According to the enrichment factor and contamination factor, chromium, iron, nickel and zinc have caused little contamination in sediments, but arsenic, copper and lead have moderate contamination. Weathering and erosion of ultramafic units play a role in the enrichment and low pollution of the above elements. Drawing a change map shows the concentration of arsenic and lead contamination at the beginning of the basin. Shemshak shale formation plays an important role in increasing arsenic and lead pollution at the beginning of the catchment. At the bottom of the catchment, copper and lead are concentrated. Weathering and erosion of granite units has led to the concentration and contamination of these elements. The results of potential and ecological risk index in the region are low, which indicates that from an environmental point of view, the Revenj River is one of the low risk areas from the perspective of sediment pollution to heavy elements.

Keywords: Revenj River Catchment, sediment pollution, heavy elements, Torbat-e- Jam.

*Corresponding Author: mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir