

بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوبات چهار رودخانه مهم منتهی به دریای خزر

چکیده

فلزات سنگین در محیط‌های آبی از شکل محلول و مواد جامد معلق در رسوبات جذب و انباشته می‌شوند. انباشت نهایی فلزات سنگین در محیط‌های آبی رسوبات و بدن موجودات زنده است. انباشت زیستی فلزات سنگین از طریق شبکه غذایی نگرانی‌های ناشی از خطرهای بیولوژیکی و محیط‌زیستی بالقوه را فراهم می‌کنند. بنابراین پژوهش در زمینه آلودگی فلزات سنگین نقش مؤثری در حفاظت از بهداشت انسانی و کاهش خطرهای ناشی از آلودگی آن‌ها دارد. در این پژوهش به منظور سنجش آلودگی فلزات سنگین (آهن، منگنز، روی، مس، نیکل، سرب، کادمیوم و کبالت) در رسوبات سطحی (۵-۰ سانتی‌متر) چهار رودخانه مهم منتهی به دریای خزر (نکارود، تجن، سیاهرود و تالار)، از ۱۶ ایستگاه، نمونه‌های رسوب از بستر رودخانه‌ها در تابستان ۱۳۹۴ جمع‌آوری و پس از هضم با تیزاب سلطانی توسط دستگاه جذب اتمی شعله اندازه‌گیری شد. روند تغییر میانگین غلظت فلزات سنگین (میلی‌گرم فلز بر کیلوگرم رسوب) در رسوبات سطحی به‌صورت آهن $(23300/00) < \text{روی} (2028/87) < \text{منگنز} (701/25) < \text{نیکل} (36/77) < \text{سرب} (25/77) < \text{مس} (19/62) < \text{کبالت} (18/62) < \text{کادمیوم} (5/62)$ بود. در بین عنصرهای مورد مطالعه میانگین عنصرهای روی، کادمیوم و سرب بیش‌تر از غلظت میانگین رسوبات جهانی است. همچنین تحلیل‌های آماری نشان داد مقدار عنصرهای آهن، منگنز، کبالت و مس در رودخانه سیاهرود، کادمیوم در رودخانه نکارود و روی در رودخانه تجن متفاوت است $(p < 0/05)$. استفاده از شاخص‌های درجه آلودگی (C_I) ، پتانسیل خطر محیط‌زیستی (E_T) ، غنی‌شدگی (EF) و زمین انباشتگی (I_{geo}) نشان داد که بیشینه ارزش شاخص‌های مطالعه شده متعلق به عنصر کادمیوم است. همچنین نتایج شاخص‌های پتانسیل خطر محیط‌زیستی کل (RI) ، درجه آلودگی کل (C_d) و بار آلودگی (PLI) حاکی از آن است که خطر محیط‌زیستی در رودخانه نکارود قابل‌توجه و بسیار نگران‌کننده است. این تحقیق ضرورت کنترل فعالیت‌های انسانی و استفاده از راهبردهای مدیریت و کنترل آلودگی در کیفیت رسوبات رودخانه‌های منتهی به دریای خزر را ثابت کرد.

واژگان کلیدی: آلودگی، رودخانه، رسوب، فلزات سنگین، شاخص‌های محیط‌زیست.

مقدمه

دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین بستر آبی محصور در کره‌ی هستی، یکی از مهم‌ترین دریاچه‌های جهان از منظر محیط‌زیستی، سیاسی و اقتصادی است. بهره‌برداری بی‌رویه و غیراصولی از منابع طبیعی این دریا، این اکوسیستم را به‌طور فزاینده‌ای تحت فشار تهدیدهای محیط‌زیستی قرار داده است (De Mora et al., 2004; Humbatov et al., 2015). تخلیه فاضلاب‌های صنعتی، تراکم بالای جمعیت، کشاورزی متراکم و بهره‌برداری از منابع فسیلی سبب شده است تا در طول چند دهه‌ی اخیر فشارهای محیط‌زیستی متعددی به این بستر آبی تحمیل شود (Parizanganeh et al., 2007). رودخانه‌های حوضه‌ی جنوبی دریای خزر در مرزهای سیاسی کشور ایران سهم ۵ درصدی از منابع تغذیه‌کننده آبی را به خود اختصاص داده‌اند (Humbatov et al., 2015). از آنجایی‌که رشته‌کوه‌های البرز در فاصله اندکی از سواحل جنوبی

محمد آبادی^۱

عباسعلی زمانی^{۲*}

عبدالحسین پری زنگنه^۳

یونس خسروی^۴

حمید بدیعی^۵

۱، ۲، ۳. گروه علوم محیط‌زیست، دانشگاه زنجان،

زنجان، ایران

۴، ۵. گروه شیمی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

*مسئول مکاتبات:

zamani@znu.ac.ir

کد مقاله: ۱۳۹۸۰۲۰۵۶۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۴

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی

ارشد است.



دریای خزر استقرار یافته‌اند، رودخانه‌های این حوضه نقش چشم‌گیری در حمل رسوبات دارند. چراکه فاصله اندک و اختلاف ارتفاع زیاد بین سرچشمه با مصب رودخانه‌ها در این حوضه، می‌تواند در تخلیه رسوبات آلوده سهم بسزایی داشته باشد (مصطفوی، ۱۳۸۵).

امروزه آلودگی اکوسیستم‌های آبی به فلزات سمی به دلیل حضور منابع‌های نشر دهنده متعدد، پایداری، سمیت بالا، عدم تجزیه‌پذیری و تجمع زیستی در بخش زنده یک اکوسیستم بسیار مورد توجه همگان قرار گرفته است. آلودگی یک اکوسیستم به فلزات سمی، زنجیره غذایی و در نهایت سلامت و بهداشت جامعه انسانی را تهدید می‌کند (Malvandi, 2017). ورود فلزات سمی به یک اکوسیستم آبی توسط دو منبع انسانی و طبیعی صورت می‌گیرد که در نهایت آب، رسوب و بخش زیست‌شناسی این اکوسیستم‌ها مقصد نهایی فلزات سنگین منتقل شده است (Nguyen et al., 2016). پس از فراهم آمدن شرایط فیزیکی و شیمیایی و زیست‌شیمی محیط‌های آبی، فلزات سنگین از فاز محلول به رسوبات منتقل می‌شوند. بنابراین رسوبات نقش مهمی در انتقال و ذخیره‌سازی فلزات سمی ایفا می‌کنند (Zhang et al., 2009).

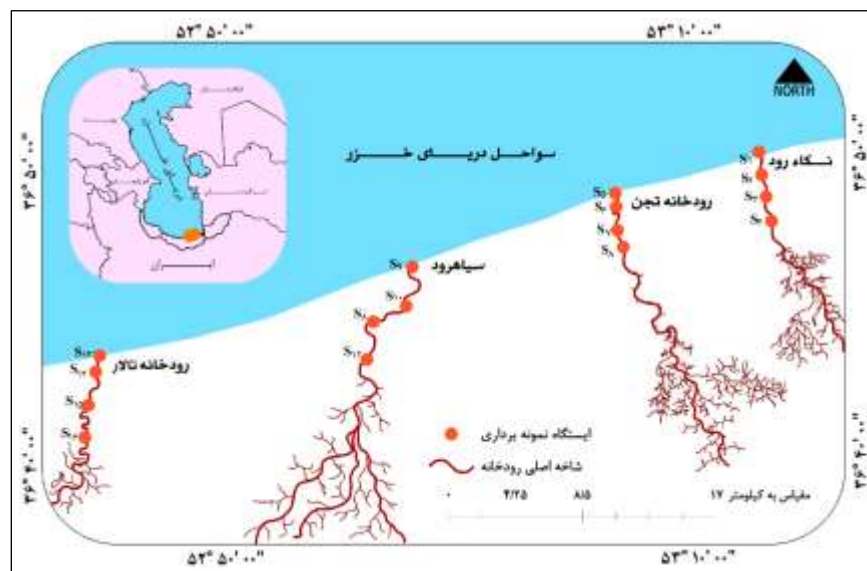
رسوبات رودخانه‌ای یکی از مسیرهای مناسب به منظور سنجش و نظارت بر آلودگی اکوسیستم‌های آبی می‌باشند؛ چراکه رسوبات نه تنها نقش بسزایی در انتقال آلاینده‌ها دارند، بلکه از جمله منابع بالقوه ثانویه آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های آبی نیز به حساب می‌آیند (Duodu et al., 2017). در این راستا بررسی کیفیت رسوبات رودخانه‌ای به عنوان یک رویکرد مناسب در سنجش غلظت فلزات سمی توجه محققین را به خود معطوف کرده است. نتایج پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌های مختلف نشان داد که در رسوبات رودخانه زرین گل استان گلستان روند تغییر غلظت فلزات سنگین به صورت آهن < آلومینیوم < منیزیم < سلیسیم < کروم < روی < آرسنیک < نیکل < کبالت < نقره است و بیش‌ترین مقدار میانگین شاخص‌های غنی‌شدگی، درجه آلودگی و زمین انباشتی متعلق به عنصر سلیسیم و آرسنیک است و مقدار درجه آلودگی کل و ضریب بار آلودگی برای مجموع ایستگاه‌ها کم‌تر از سطح نگران‌کننده است (Malvandi, 2017). هم‌چنین در پژوهشی دیگر که توسط Ghanbarpour et al. (2013) در رسوبات حوضه آبخیز رودخانه تجن صورت گرفت، غلظت فلزات سنگین از روند آلومینیوم < آهن < کروم < نیکل < روی < کبالت < آرسنیک < سزیم < قلع < کادمیوم پیروی کردند و غلظت میانگین فلزات کبالت، آهن، کروم و نیکل بیش‌تر از غلظت میانگین جهانی پسته زمین است. در مطالعه‌ای دیگر در رسوبات رودخانه نکا، مقصودی و همکاران (۱۳۹۴) روند کاهش غلظت فلزات سنگین را به صورت آهن < روی < کروم < وانادیوم < نیکل < مس < سرب < کبالت < قلع < کادمیوم < نقره گزارش کردند و عنصرهای نقره، کادمیوم و قلع دارای غنی‌شدگی بسیار شدید و عنصرهای نقره و کادمیوم در تمامی ایستگاه‌ها مقادیر زمین انباشتی شدید تا بسیار شدید را نشان دادند. هم‌چنین محققین بیان کردند، می‌توان از عامل‌های آلاینده در محدوده مورد مطالعه، پساب‌های حاصل از معادن زغال‌سنگ، ایستگاه راه‌آهن و کارخانه‌های بزرگ همچون کارخانه چوب و کاغذ نکا را اشاره کرد. در پژوهشی دیگر در رسوبات رودخانه سرخ کشور ویتنام (Nguyen et al., 2016) روند تغییر غلظت فلزات سنگین به صورت وانادیوم < روی < مس < کروم < سرب < نیکل < کادمیوم است و غنی‌شدگی عنصرهای نیکل، سرب، کادمیوم، مس و روی سطح نگران‌کننده را نشان دادند که جزء آلاینده‌های غالب رودخانه سرخ می‌باشند. Kim و همکاران (۲۰۱۱) روند تغییر غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ی هان کشور کره را به صورت آهن < منگنز < روی < جیوه < کروم < سرب < مس < نیکل < کبالت < آرسنیک < کادمیوم گزارش کردند و نشان دادند بیش‌ترین مقدار میانگین غنی‌شدگی عنصرها در مطالعه آن‌ها متعلق به عنصرهای جیوه، مس، روی و کادمیوم است. در پژوهش انجام شده توسط Bilinski (۲۰۰۸)، کاهش غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه سوا در کشور اسلوانی از روند آهن < منگنز < روی < سرب < نیکل < مس < کبالت < کادمیوم پیروی کردند.

با توجه به اهمیت رسوبات رودخانه‌ای در سنجش غلظت فلزات سنگین در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، می‌توان گفت اهمیت پژوهش‌هایی با این محور اعتبار مناسبی دارند و استمرار بررسی‌های فوق در دوره‌های زمانی و مکانی مختلف می‌تواند راهگشایی مناسب در مدیریت این اکوسیستم‌ها باشد. رودخانه‌های نکارود، تجن، سیاهرود و تالار از جمله رودخانه‌های مهم در سواحل استان مازندران می‌باشند که حوزه‌ی آبریز این رودخانه‌ها پذیرای آلودگی‌های ناشی از فاضلاب‌های معادن، صنایع، کشاورزی، مسکونی و شیلاتی است. از این رو تجزیه و تحلیل نمونه‌های

رسوب رودخانه‌های مذکور روشی مناسب در سنجش آلودگی فلزات سنگین می‌باشد و دستیابی به اطلاعات جامع‌تر در زمینه مدیریت و کنترل مشکل‌های محیط‌زیستی اکوسیستم‌های فوق را می‌تواند فراهم کند.

مواد و روش‌ها

چهار رودخانه‌ی مورد مطالعه در کار حاضر، نکارود، تجن، سیاهرود و تالار در غرب استان مازندران و در محدوده‌ی بین شهرهای نکا و بابل قرار دارند (شکل ۱). این رودخانه‌ها از جنوب به رشته‌کوه‌های البرز (سرچشمه آن‌ها) و از شمال به دریای خزر منتهی می‌شوند. منطقه مذکور با ویژگی آب‌وهوای معتدل مرطوب با تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های معتدل، متوسط بارندگی ۷۰۰ میلی‌متر، دمای ۱۶/۸ سانتی‌گراد و با مجموع حوضه آبریز ۹۲۰۰ کیلومترمربع مشخص می‌شود. رودخانه‌های مورد مطالعه از مهم‌ترین رودخانه‌های منتهی به دریای خزر در مرزهای سیاسی استان مازندران می‌باشند. ورود آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، استحصال سوخت‌های فسیلی و رشد شهرنشینی سبب شده است تا بر نگرانی‌های محیط‌زیستی مردم ساکن در منطقه بیافزاید (قشلاقی و رستمی، ۱۳۹۵؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مصطفوی، ۱۳۸۵). در شکل ۱، موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری از رسوبات چهار رودخانه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری از رسوب در چهار رودخانه مورد مطالعه.

به‌منظور بررسی و ارزیابی غلظت فلزات سنگین در رسوبات چهار رودخانه نکارود، تجن، سیاهرود و تالار از چهار ایستگاه در فاصله‌های منظم از مصب هر یک از رودخانه‌ها، نمونه‌های رسوب با استفاده از گراب فولادی ضدزنگ در تابستان ۱۳۹۴ جمع‌آوری و در ظرف‌های پلی-اتیلنی که پیش‌تر با محلول اسید نیتریک ۵ درصد شستشو داده شده بودند نگهداری و به آزمایشگاه علوم محیط‌زیست دانشگاه زنجان منتقل شد. در آزمایشگاه به‌منظور حذف رطوبت، نمونه‌های رسوب به مدت ۲۴ الی ۴۸ ساعت در هوای آزاد قرار گرفتند و در ادامه از الک ۶۳ میکرون (۲۳۰ Mesh) عبور داده شدند و تا زمانی که آزمایش‌های موردنظر بر روی آن‌ها انجام شود در جای خشک و سر بسته نگهداری شدند. به‌منظور اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی (EC)، مقدار ۱۰ گرم از نمونه‌های رسوب با ترازو توزین و به درون ارلن‌های ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد.

سپس مقدار ۲۵ میلی لیتر آب مقطر فوق خالص به آن اضافه شد و به مدت ۱۵ دقیقه سوسپانسیون تشکیل شده بر روی همزن الکتریکی قرار داده شد. پس از اتمام زمان مخلوط شدن، به مدت ۳۰ دقیقه سوسپانسیون تشکیل شده به حال خود رها شد و در ادامه جهت سنجش پراسنجه-های مذکور از دستگاه مولتی متر (HQ 40d Hach Multi Meter) استفاده شد (Monroy *et al.*, 2014).

در اندازه گیری محتوای مواد آلی کل (Total Organic Matter) موجود در نمونه های رسوب مقدار ۵ گرم از نمونه عبور داده شده از الک ۶۳ میکرون توزین شد و سپس به درون ظرف بوتله چینی ریخته شد. نمونه به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۴۰ سانتی گراد حرارت داده شد. پس از پایان زمان سوختن مواد آلی و کاهش دمای بوتله چینی، تفاوت وزن ایجاد شده پیش و پس از سوختن نمونه محاسبه گردید و با جایگذاری در معادله ۱، درصد محتوای مواد آلی کل هر یک از نمونه ها محاسبه گردید (Bastami *et al.*, 2015).

$$\text{رابطه ۱: } (\text{TOM, \%}) = \left[\frac{(B - C)}{B} \right] \times 100$$

در معادله ۱، TOM درصد مواد آلی، B وزن رسوب اولیه پیش از سوختن و C وزن رسوب ثانویه پس از سوختن است.

همچنین در اندازه گیری مقدار کلسیم کربنات موجود در نمونه های رسوب، مقدار ۲ گرم از نمونه رسوب عبور داده شده از الک ۶۳ میکرون توزین شد و سپس به ظرف ارلن ۵۰ میلی لیتری که پیش تر توسط ۱۰ میلی لیتر محلول هیدروکلریک اسید ۳ مولار (HCl 3M) و آهن کلرید ۳ درصد (FeCl₂ 3%) پر شده بود و راه خروج تبادل هوا در این ارلن محدودتر شده بود به آرامی اضافه شد. در ادامه کار نمونه ها توسط همزن الکتریکی هم زده شدند تا گاز کربن دی اکسید خارج شده که مقدار آن نشان دهنده مقدار کلسیم کربنات رسوب است به طور کامل انجام گیرد. تغییر وزن ایجاد شده در نمونه ها که به دلیل خروج گاز کربن دی اکسید است نشان دهنده مقدار کلسیم کربنات رسوب می باشد. مقدار کلسیم کربنات در هر یک از نمونه ها با توجه به رابطه ۲ محاسبه گردید (Loeppert and Suarez, 1996; Frank *et al.*, 2002).

$$\text{رابطه ۲: } (\text{CaCO}_3 \%) = \left(\frac{\text{g CO}_2 \text{ lost}}{\text{g Soil}} \right) \times \left(\frac{\text{g CaCO}_3 \text{ mol}^{-1}}{\text{g CO}_2 \text{ mol}^{-1}} \right) \times (100) = \left(\frac{\text{g CO}_2 \text{ lost}}{\text{g Soil}} \right) \times (2.273)(100)$$

در رابطه ۲، درصد کلسیم کربنات برابر است با مقدار کربن دی اکسید خارج شده (g CO₂) که از تفاوت وزن نمونه، پیش و پس از اضافه شدن به محلول محاسبه شده است، تقسیم بر وزن نمونه اولیه (g Soil) رسوب ضرب در عدد ۱۰۰ می باشد.

در هضم نمونه های رسوب، ۳ گرم از نمونه ۶۳ میکرون توزین و به ظرف شیشه ای درب دار ۱۰۰ میلی لیتری منتقل گردید. سپس به نمونه ها کمی آب و در ادامه ۲۱ میلی لیتر مخلوطی از ۷ میلی لیتر نیتریک اسید غلیظ و ۱۴ میلی لیتر هیدروکلریک اسید غلیظ اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت در زیر هود قرار داده شدند. پس از گذشت زمان، محتوی ظرف به بالن تقطیر ۱۰۰ میلی لیتری منتقل و به مدت ۲ ساعت نمونه ها بر روی اجاقک با دمای ۱۰۰ سانتی گراد رفلکس شدند. پس از کاهش دما، نمونه ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۰/۴۲ میکرون صاف و با نیتریک اسید ۲ مولار به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد و جهت اندازه گیری فلزات سنگین از دستگاه جذب اتمی (AAS Varian 220) با روش منحنی درجه بندی استفاده شد (Sastre *et al.*, 2002).

در این مطالعه تلاش شده است، دستیابی به یک ارزیابی واقعی از آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه ها و نمایش بهتر وضعیت بوم شناختی نمونه های رسوب در اکوسیستم هایی با ماتریکس پیچیده با استفاده از شاخص های کیفیت رسوب فراهم شود. بدین منظور از شاخص های پر کاربرد به منظور ارزیابی و تخمین شدت آلودگی نمونه های رسوب استفاده شد.

شاخص غنی شدگی (Enrichment factor) EF به طور گسترده به منظور برآورد منبع یک فلز (انسانی یا طبیعی) در نمونه های رسوب و خاک با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۳: } \text{Enrichment Factor (EF)} = (C_S/C_{Fe})_{\text{Sample}} / (C_S/C_{Fe})_{\text{Background}}$$

در این شاخص مقدار یون فلزی در رسوب آلوده با غلظت آن یون در نمونه زمینه (مقدار طبیعی) مقایسه می‌شود. برای محاسبه این شاخص از یک فلز (به‌طور معمول آهن یا آلومینیوم) که کم‌ترین سطح آلودگی انسانی را دارند به‌عنوان نرمالیزکننده استفاده می‌شود. در این راستا در مطالعه حاضر از عنصر آهن برای جداسازی مؤلفه انسانی از طبیعی استفاده شد. در معادله ۴ $C_{s/Sample}$ غلظت یک عنصر مشخص در نمونه رسوب مورد مطالعه، $C_{Fe/Sample}$ غلظت عنصر آهن در نمونه رسوب، $C_{s/Bcaground}$ غلظت میانگین عنصر در نمونه زمینه و $C_{Fe/Bcaground}$ غلظت میانگین آهن در نمونه زمینه می‌باشد. از آنجایی که مقادیرهای پس‌زمینه برای رودخانه‌های مطالعه حاضر موجود نیست از مقادیرهای میانگین جهانی فلزها در رسوبات استفاده شد که به ترتیب برای عنصرهای آهن، منگنز، روی، مس، کادمیوم، سرب، کبالت و نیکل برابر با ۰.۴۶۷۰۰، ۰.۸۵۰۹۵، ۰.۰۳، ۰.۲۰، ۹۰ و ۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. این شاخص دارای هفت رده مختلف است که در جدول ۱ مشخصه‌های هر رده آورده شده است (Agah *et al.*, 2016; Chabukdhara and Nema, 2012).

شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) (Geoaccumulation Index) توسط مولر در سال ۱۹۷۹ معرفی شد، معیار دیگری برای تعیین درجه آلاینده‌گی رسوب است و از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Müller, 1981; Jiang *et al.*, 2014).

$$I_{geo} = \log_2(C_n / 1.5B_n) \quad \text{رابطه ۴:}$$

در معادله ۴، C_n غلظت فلز موردسنجش در نمونه رسوب، B_n غلظت زمینه‌ای ژئوشیمیایی فلز و ضریب ۱/۵، ضریب تصحیح تأثیر لیتوژنیک مقدار غلظت زمینه می‌باشد. در این شاخص تفسیر اطلاعات به‌دست‌آمده با توجه به جدول ۱ صورت می‌پذیرد.

در تعیین شاخص پتانسیل خطر کل محیط‌زیستی (Potential ecological risk) RI، پتانسیل خطر محیط‌زیستی فلزات سنگین در رسوب با استفاده از شاخص پتانسیل خطر که توسط هاکنسن (1980) ارائه شده است با توجه به معادله‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ محاسبه گردید (Hakanson, 1980; Karydas *et al.*, 2015; Effendi *et al.*, 2017).

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad \text{رابطه ۵:}$$

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i \quad \text{رابطه ۶:}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad \text{رابطه ۷:}$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad \text{رابطه ۸:}$$

درجه آلودگی C_f از تقسیم کردن غلظت یک فلز در نمونه رسوب جمع‌آوری شده به غلظت همان عنصر در نمونه زمینه به دست می‌آید (Chabukdhara and Nema, 2012; Buccolieri *et al.*, 2006). در معادله‌های فوق، C_f شاخص درجه آلودگی یک فلز، C_s غلظت میانگین فلز در نمونه رسوب، C_n غلظت میانگین فلز در زمینه است. C_d درجه آلودگی کل برابر است با مجموع درجه آلودگی عنصرها در یک ایستگاه می‌باشد. هرکدام از شاخص‌های ذکر شده دارای چهار طبقه می‌باشد که در جدول ۱ مشخصه‌های هر طبقه آورده شده است. ضریب پتانسیل خطر محیط‌زیستی E_r دارای پنج رده است که از حاصل ضرب ضریب سمیت هر فلز T_r (ضریب واکنش سمیت برای عنصرهای روی، مس، سرب، کادمیوم، منگنز، نیکل و کبالت به ترتیب برابر با ۱، ۵، ۳۰، ۱، ۶ و ۲ است) در درجه آلودگی هر عنصر C_f به دست می‌آید در جدول ۱ مشخصه هر رده شاخص فوق آورده شده است (Jamshidi and Bastami, 2017; Hakanson, 1980; Xu *et al.*, 2008). RI پتانسیل کل خطر آلودگی محیط‌زیستی، برابر با مجموع پتانسیل خطر محیط‌زیستی عنصرهای مورد مطالعه در یک ایستگاه است که در جدول ۱ جزئیات خطرهای هر طبقه آورده شده است.

ضریب بار آلودگی (Pollution Load Index) PLI از دیگر شاخص‌های موردبررسی در مطالعه حاضر است که با توجه رابطه ۹ محاسبه گردید.

$$PLI = (C_{f1} \times C_{f2} \times C_{f3} \times \dots C_{fn})^{\frac{1}{n}} \quad \text{رابطه ۹:}$$

از شاخص بار آلودگی PLI برای تعیین آلودگی یکپارچه گروه‌های سمی (تمامی فلزات موردبررسی) در یک ایستگاه، با محاسبه ریشه n ام درجه آلودگی عنصرهای مورد مطالعه استفاده می‌شود. اگر شاخص بار آلودگی بیش تر از یک باشد نشان از آلودگی و مقادیرهای کم تر از ۱ حاکی از عدم آلودگی در نمونه‌های رسوب است (Godwin et al., 2015; Manoj and Padhy, 2014).

در تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از اندازه‌گیری فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب از نرم‌افزار اس. پی. اس. نسخه ۲۰ و اکسل ۲۰۱۳ استفاده شد. سطح اطمینان به کار برده شده ۹۵ درصد می‌باشد و پیش از آغاز آزمون توزیع داده‌ها بررسی شد. بررسی توزیع نرمال داده‌های نمونه رسوب، با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و کولموگراف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) با حدود اطمینان ۹۵- درصد فرض نرمال بودن داده‌ها را تأیید نکرد و با توجه به این موضوع از آزمون‌های ناپارامتریک (Kruskal-Wallis) در تحلیل‌های آماری استفاده شد. با توجه به نتایج آزمون کروسکال-والیس و مشاهده تفاوت معنی‌دار، به منظور مقایسه‌ی چندگانه میانگین غلظت فلزات سنگین و مقدار پراسنجه‌ها در بین ایستگاه‌های هر یک از رودخانه‌های مورد مطالعه از آزمون یو مان ویتنی (U Mann Whitney) و در بین چهار رودخانه از آزمون پست‌هاک (Post-hoc)، روش توکی (Tukey) به عنوان پرکاربردترین روش برای بررسی میزان اختلاف بین گروه‌ها استفاده شد. هم‌چنین از آزمون همبستگی اسپیرمن (Spearman) برای نمایش ارتباط خطی بین غلظت فلزات و پراسنجه‌ها استفاده شد. در تمام آزمون‌های آماری سطح معنی‌داری برابر P=۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

جدول ۱: طبقه‌بندی هر یک از شاخص‌های EF، I_{geo}، E_rⁱ، C_fⁱ، C_d و RI.

مقدار EF	درجه غنا	مقدار I _{geo}	سطح آلودگی	مقدار E _r ⁱ	رده خطر
EF < ۱	بدون غنی‌شدگی	I _{geo} ≤ ۰	کاملاً غیر آلوده		
۱ ≤ EF < ۳	غناى جزئى	۰ < I _{geo} ≤ ۱	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	E _r ⁱ < ۴۰	خطر کم
۳ ≤ EF < ۵	غناى متوسط	۱ < I _{geo} ≤ ۲	آلودگی متوسط	E _r ⁱ < ۸۰	خطر متوسط
۵ ≤ EF < ۱۰	غناى نسبتاً شدید	۲ < I _{geo} ≤ ۳	آلودگی متوسط تا شدید	E _r ⁱ < ۱۶۰	خطر بالا
۱۰ ≤ EF < ۲۵	غناى شدید	۳ < I _{geo} ≤ ۴	آلودگی شدید	E _r ⁱ < ۳۲۰	خطر شدید
۲۵ ≤ EF < ۵۰	غناى بسیار شدید	۴ < I _{geo} ≤ ۵	آلودگی شدید تا خیلی شدید	E _r ⁱ ≥ ۳۲۰	خطر خیلی شدید
EF > ۵۰	غناى فوق شدید	I _{geo} > ۵	آلودگی خیلی شدید		
مقدار C _f ⁱ	درجه آلودگی	مقدار C _d	درجه آلودگی	مقدار RI	رده خطر
C _f ⁱ < ۱	آلودگی کم	C _d < ۸	آلودگی کم	RI < ۱۵۰	خطر کم
۱ ≤ C _f ⁱ < ۳	آلودگی متوسط	۸ ≤ C _d < ۱۶	آلودگی متوسط	RI < ۳۰۰	خطر متوسط
۳ ≤ C _f ⁱ < ۶	آلودگی زیاد	۱۶ ≤ C _d < ۳۲	آلودگی زیاد	RI < ۶۰۰	خطر شدید
C _f ⁱ ≥ ۶	آلودگی خیلی زیاد	C _d ≥ ۳۲	آلودگی خیلی زیاد	RI ≥ ۶۰۰	خطر خیلی شدید

EF (Enrichment factor), I_{geo} (Geoaccumulation index), E_rⁱ (Potential ecological risk individual coefficient), C_fⁱ (Individual pollution coefficient), C_d (Degree of contamination), RI (Potential ecological risk)

نتایج

غلظت فلزات اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری به همراه پراسنجه‌های فیزیکی و شیمیایی در رسوبات سطحی در جدول ۲ گزارش شده است. داده‌های حاصل شده از اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در مطالعه حاضر نشان داد که روند تغییر میانگین غلظت فلزات سنگین با واحد میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌های رسوب به صورت آهن (۲۳۳۰۰) < روی (۲۰۲۵/۸۷) < منگنز (۷۰۱/۲۵) < نیکل (۳۶/۷۷) < سرب (۲۵/۷۷) < مس (۱۹/۶۲) < کبالت (۱۸/۶۲) < کادمیوم (۵/۶۲) بود. دامنه تغییر پراسنجه‌های اسیدیته ۸/۵۸-۷/۵۶؛ هدایت الکتریکی ۵۴۵۰-۲۹۵ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر؛ محتوای ترکیب آلی کل ۱۱/۳۰-۲/۱۲ درصد؛ کلسیم کربنات ۱۷/۸۰-۴/۹۰ درصد بود. بیش‌ترین میانگین مقدار عنصرهای سرب و کادمیوم در رودخانه نکارود، بیشینه مقدار عنصرهای مس، نیکل، کبالت، منگنز و آهن در رودخانه سیاهرود و بیشینه غلظت روی در رودخانه تجن اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

جدول ۲: غلظت فلزات سنگین* و پراسنجه‌های فیزیکی و شیمیایی در نمونه‌های رسوب ایستگاه‌های مورد مطالعه (۱۳۹۴).

شماره ایستگاه رودخانه	نام رودخانه	مقدار فلزات سنگین به میلی‌گرم بر کیلوگرم (ppm) و فلز آهن به درصد (%)											
		Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Co	Mn	Fe	EC (µs/cm)	pH	%TOM	%CaCO ₃
۱	نکارود	۱۸۶۰/۶۱	۷/۸۳	۱۲/۱۶	۱/۶۶	۲۳/۳۳	۱۴/۶۶	۴۷۲/۳۳	۱/۶۳	۲۲۳۰	۸/۴۹	۲/۷۸	۱۴/۴۰
۲		۲۴۵۳/۳۳	۲۲/۱۶	۸۲/۸۳	۴۰/۶۶	۳۳/۳۳	۱۹/۳۳	۴۰۰/۰۰	۱/۴۳	۵۴۵۰	۷/۹۲	۶/۱۲	۱۵/۴۵
۳		۲۷۱۰/۰۰	۱۵/۸۳	۲۳/۸۳	۳/۰۰	۳۰/۳۳	۱۸/۰۰	۵۱۶/۶۶	۱/۶۴	۳۱۹	۸/۴۹	۴/۸۲	۱۴/۹۵
۴		۲۷۶۳/۳۳	۲۴/۱۶	۲۸/۵۰	۲/۳۳	۵۵/۶۶	۲۲/۳۳	۳۴۶/۶۶	۲/۷۲	۳۰۵	۸/۵۸	۸/۸۸	۱۳/۱۵
۵	میانگین در رودخانه نکارود	۲۴۴۶/۸۲	۱۷/۵۰	۳۶/۸۳	۱۱/۹۱	۳۵/۶۶	۱۸/۵۸	۴۳۴/۱۶	۱/۸۶	۲۰۷۶	۸/۳۷	۵/۶۵	۱۴/۴۹
۶		۱۸۲۱/۰۰	۷/۵۰	۱۵/۵۰	۱/۶۶	۲۵/۲۲	۱۵/۶۶	۱۲۳۳/۳۳	۱/۸۱	۲۴۴۰	۸/۴۵	۲/۱۲	۹/۲۰
۷	تجن	۲۵۶۷/۶۶	۱۷/۸۳	۲۳/۸۳	۲۲/۶۶	۴۲/۶۶	۱۸/۳۳	۶۳۳/۳۳	۲/۳۵	۱۱۸۵	۸/۱۱	۶/۰۴	۱۰/۸۰
۸		۲۸۲۶/۶۶	۱۶/۸۳	۲۹/۵۰	۲/۳۳	۳۲/۳۳	۱۸/۳۳	۶۳۳/۳۳	۱/۹۵	۱۶۹۴	۷/۵۶	۷/۰۴	۱۷/۸۰
۹	میانگین در رودخانه تجن	۲۷۶۳/۳۳	۱۶/۵۰	۲۰/۸۳	۲/۳۳	۳۴/۳۳	۱۸/۰۰	۵۰۰/۰۰	۱/۹۲	۱۶۳۷	۸/۳۱	۴/۵۰	۱۳/۷۵
۱۰		۲۴۹۴/۶۶	۱۴/۶۶	۲۲/۴۲	۷/۲۴	۳۳/۶۴	۱۷/۵۸	۷۴۹/۹۹	۲/۰۱	۱۷۳۹	۸/۱۱	۴/۹۳	۱۲/۸۹
۱۱	سیاهرود	۲۲۶۳/۳۳	۲۷/۸۳	۱۹/۸۳	۲/۳۳	۳۱/۶۶	۲۱/۰۰	۵۴۶/۶۶	۲/۷۱	۲۷۴۰	۷/۷۵	۴/۰۰	۱۳/۱۰
۱۲		۱۹۱۴/۶۶	۲۶/۵۰	۲۴/۱۶	۲/۳۳	۴۳/۳۳	۲۰/۳۳	۹۵۶/۶۶	۳/۳۵	۱۹۶۱	۷/۶۲	۱۱/۳۰	۱۲/۲۰
۱۳	میانگین در رودخانه سیاهرود	۱۷۶۳/۳۳	۲۵/۵۰	۲۴/۸۳	۲/۰۰	۴۱/۰۰	۱۹/۳۳	۸۶۶/۶۶	۲/۶۳	۲۱۹۰	۷/۵۶	۱۰/۰۴	۸/۷۰
۱۴		۱۸۸۶/۶۶	۲۹/۸۳	۲۴/۱۶	۱/۳۳	۴۷/۰۰	۲۰/۶۶	۲۰۰۰/۰۰	۲/۹۳	۴۰۹	۸/۴۲	۷/۴۸	۹/۲۵
۱۵		۱۹۵۶/۹۹	۲۷/۴۲	۲۳/۲۴	۱/۹۹	۴۰/۷۵	۲۰/۳۳	۸۳۷/۴۹	۲/۹۱	۱۸۲۵	۷/۸۴	۸/۲۱	۱۰/۸۱
۱۳	تالار	۱۵۸۹/۳۳	۱۶/۸۳	۲۷/۱۶	۱/۳۳	۳۳/۰۰	۱۷/۳۳	۵۶۶/۶۶	۲/۱۸	۵۵۰	۸/۵۱	۴/۳۲	۷/۸۰
۱۴		۱۵/۳۳	۱۹/۵۰	۱۷/۱۶	۱/۶۶	۳۷/۰۰	۱۶/۳۳	۳۰۰/۰۰	۲/۵۲	۷۷۱	۷/۹۱	۳/۹۶	۶/۳۵
۱۵		۱۸۳۳/۳۳	۱۶/۱۶	۱۸/۱۶	۱/۳۳	۳۸/۳۳	۱۸/۶۶	۵۵۰/۰۰	۲/۹۷	۳۳۱	۷/۸۴	۴/۸۴	۴/۹۰

شماره ایستگاه	نام رودخانه	مقدار فلزات سنگین به میلی گرم بر کیلوگرم (ppm) و فلز آهن به درصد (%)											
		پراسنجه‌های فیزیکی و شیمیایی			EC (µs/cm)	Fe	Mn	Co	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn
		%CaCO ₃	%TOM	pH									
۱۶		۱۵/۱۵	۳/۳۸	۸/۱۸	۲۹۵	۲/۶۱	۶۹۶/۶۶	۱۹/۶۶	۴۰/۰۰	۱/۰۰	۱۹/۸۳	۲۳/۱۶	۱۳۸۲/۰۰
	میانگین در رودخانه تالار	۸/۵۵	۳/۸۸	۸/۱۱	۴۸۶/۷۵	۲/۵۷	۵۲۸/۳۳	۱۷/۹۹	۳۷/۰۸	۱/۳۳	۲۰/۵۶	۱۸/۹۱	۱۲۰۴/۹۹
	کمینه در کل ایستگاه‌ها	۴/۹۰	۲/۱۲	۷/۵۶	۲۹۵	۱/۴۳	۳۰۰/۰۰	۱۴/۶۶	۲۳/۳۳	۱/۰۰	۱۲/۱۶	۷/۵۰	۱۵/۳۳
	بیشینه در کل ایستگاه‌ها	۱۷/۸۰	۱۱/۳۰	۸/۵۸	۵۴۵۰	۳/۳۵	۲۰۰۰/۰۰	۲۲/۳۳	۵۵/۶۶	۴۰/۶۶	۸۲/۸۳	۲۹/۸۳	۲۸۲۶/۶۶
	میانگین در کل ایستگاه‌ها	۱۱/۰۵	۵/۶۶	۸/۱۰	۱۵۳۱	۲/۳۳	۷۰۱/۲۵	۱۸/۶۲	۳۶/۷۷	۵/۶۲	۲۵/۷۷	۱۹/۶۲	۲۰۲۵/۸۷
	مقدار استاندارد	۳/۸۸	۲/۶۶	۰/۳۶	۱۳۵۷	۵/۵۸	۴۱۹/۵۷	۲/۰۱	۸/۲۰	۱۰/۶۹	۱۵/۹۳	۶/۵۰	۷۱۱/۰۵
	رسوب جهانی					۴/۶۰	۸۵۰/۰۰	۹۰/۰۰	۶۸/۰۰	۰/۳۰	۲۰/۰۰	۴۵/۰۰	۹۵/۰۰

* میانگین سه اندازه‌گیری

همان‌طور که در جدول ۲ نیز نشان داد شده است به‌طور کلی بین غلظت فلزات روی، مس، منگنز، آهن، کبالت و کادمیوم و پراسنجه‌های کلسیم کربنات، محتوای ترکیب آلی کل و هدایت الکتریکی اختلاف معنی‌داری با توجه به آزمون کرووسکال- والیس در بین چهار رودخانه مورد مطالعه وجود دارد ($P < 0.05$). مقایسه‌ی میانگین رتبه‌ای غلظت فلزات سنگین و مقدار پراسنجه‌ها در چهار رودخانه با استفاده از آزمون توکی نشان داد در رودخانه سیاهرود غلظت عنصرهای آهن متفاوت از رودخانه‌های نکا و تجن، غلظت منگنز و کبالت متفاوت از رودخانه‌های تالار و تجن و همچنین مقدار فلز مس و محتوای ترکیب آلی کل متفاوت از رودخانه‌های نکا، تجن و تالار است ($P < 0.05$) و بیش‌ترین مقدار میانگین رتبه‌ای فلزها و ویژگی‌های دیگر نام‌برده شده در این تحقیق، به رودخانه سیاهرود اختصاص دارد. اختلاف اندک غلظت‌های آهن، منگنز، کبالت، مس و مقدار ترکیب آلی کل، در رودخانه سیاهرود نسبت به دیگر رودخانه‌ها می‌تواند به دلیل تفاوت در تمرکز و نوع فعالیت‌های کشاورزی (برنج‌کاری) باشد که با افزایش نرخ فرسایش و مصرف بیش‌تر کودهای کشاورزی در ارتباط است. در رودخانه نکا، مقدار عنصر کادمیوم و کلسیم کربنات از رودخانه‌های سیاهرود و تالار و هدایت الکتریکی از رودخانه تالار متفاوت ($P < 0.05$) و مقدار میانگین رتبه‌ای ویژگی‌های مذکور بیش‌تر است. همچنین در رودخانه تجن بیش‌ترین مقدار میانگین رتبه‌ای عنصر روی مشاهده شد که متفاوت از رودخانه‌های سیاهرود و تالار است ($P < 0.05$).

بررسی آماری غلظت فلزات سنگین و مقدار ویژگی‌های مورد مطالعه بین ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه و مصب هر یک از رودخانه‌ها نشان داد در رودخانه‌های نکا و تجن مقدار میانگین رتبه‌ای نیکل، کادمیوم، کبالت، مس، روی و سرب و ترکیب آلی کل در ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه بیش‌تر و متفاوت از ایستگاه مصب است ($P < 0.05$). در رودخانه سیاهرود ترکیب آلی کل، فلزات نیکل، روی، سرب و منگنز در ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه دارای مقدار میانگین رتبه‌ای متفاوت و بیش‌تر می‌باشند ($P < 0.05$). همچنین در رودخانه تالار مقدار میانگین رتبه‌ای فلزات نیکل، سرب و آهن در ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه متفاوت و بیش‌تر است ($P < 0.05$). بررسی هدایت الکتریکی نشان داد مقدار این ویژگی در رودخانه‌های سیاهرود و تجن در ایستگاه‌های واقع در مصب بیش‌تر و متفاوت از ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه است ($P < 0.05$).

بررسی آماری غلظت فلزات سنگین و مقدار ویژگی‌های مورد سنجش در مطالعه حاضر با توجه به محل نمونه‌برداری (ایستگاه‌های واقع در مصب و ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه) با استفاده از آزمون یو مان ویتنی نشان داد که عنصرهای کبالت، نیکل، مس و سرب و محتوای ترکیب آلی کل در ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه دارای مقدار میانگین رتبه‌ای بیش‌تر و متفاوت از ایستگاه‌های واقع در مصب است

($P < 0.05$)؛ اما پراسنجه هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های واقع در مصب مقدار میانگین رتبه‌ای بیش‌تر و متفاوت را نشان داد ($P < 0.05$). هم-چنین بین مقدار فلزات کادمیوم، روی، آهن و منگنز و پراسنجه‌های کلسیم کربنات و اسیدیتته تفاوتی مشاهده نشد. در جدول ۳ ضریب همبستگی محاسبه‌شده بین غلظت فلزات سنگین و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های رسوب آورده شده است. نتایج نشان داد در بین عنصرها، عنصر مس با نیکل ($r = 0.673$)، کبالت ($r = 0.844$) و آهن ($r = 0.655$) همبستگی مثبت و معنی‌دار دارند که با توجه به غلظت کم‌تر این عنصرها در مطالعه حاضر نسبت به مقدار متوسط جهانی (جدول ۲) از جمله عامل‌های همبستگی این عنصرها را می‌توان به منشأ زمینی، در نمونه‌های رسوب رودخانه‌های مورد مطالعه توجیه کرد. همبستگی بالا بین کادمیوم و روی ($r = 0.748$) که دارای غلظت‌های فراتر از میانگین پوسته جهانی می‌باشند، نشان از وجود یک منبع متفاوت در انتشار این عنصرها دارد. تنوع کاشت محصولات کشاورزی و استفاده زیاد کودهای کشاورزی، به‌ویژه کودهای فسفاته (غنی از کادمیوم و روی) در استان مازندران از جمله عامل‌های مهم در افزایش غلظت کادمیوم و روی در رسوبات این رودخانه‌ها است (اسکندری و همکاران، ۱۳۸۷). عدم ارتباط عنصر سرب با عنصرهای دیگر و غلظت‌های بیش‌تر از متوسط پوسته جهانی حاکی از وجود یک منبع متفاوت دیگر است. می‌توان گفت منبع این عنصر مرتبط با تمرکز صنایع و منطقه‌های مسکونی است. پساب معدن کاری زغال‌سنگ، زغال شویی، کارخانه‌های چوب و کاغذ، فعالیت کارخانه نساجی قائم‌شهر در گذشته، احتراق سوخت‌های فسیلی و رواناب‌های شهری از جمله منبع‌های مهم در افزایش سرب در منطقه مورد مطالعه است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ قشلاقی و همکاران، ۱۳۹۵).

به‌منظور درک بهتر رابطه متغیرها و بیان دقیق‌تر از منبع‌های احتمالی فلزات سنگین رابطه آن‌ها با پراسنجه‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های رسوب نیز مورد بحث قرار گرفت. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بین پراسنجه‌های اسیدیتته و هدایت الکتریکی و مقدار عنصرها هیچ رابطه آماری بااهمیتی وجود ندارد که این موضوع می‌تواند به تغییرات اندک این پراسنجه‌ها در رسوبات معطوف باشد. درصد محتوای ترکیب آلی کل با مس ($r = 0.605$)، سرب ($r = 0.682$)، کبالت ($r = 0.674$)، نیکل ($r = 0.703$) و آهن ($r = 0.506$) رابطه مثبت و معنی‌دار را نشان داد که در حقیقت بیان از فراهم شدن مکان‌های جذبی (پیوندی) مناسب در رسوبات با افزایش ترکیب‌های آلی در رسوبات است. مقدار کلسیم کربنات در نمونه‌های رسوب با کادمیوم ($r = 0.745$)، آهن ($r = 0.526$) و روی ($r = 0.823$) رابطه مثبت را بازگو می‌کند. کلسیم کربنات از کانی-های محیط خاک است که قادر است با جذب شیمیایی بعضی از عناصر سنگین یک سازوکار جذب و نگهداری فلز را فراهم آورده و سبب کاهش فعالیت شکل محلول این عنصرها و به دنبال آن افزایش غلظت در رسوبات گردد.

جدول ۳: نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن بین فلزات سنگین و پراسنجه‌های فیزیکی و شیمیایی در مطالعه حاضر (۱۳۹۴).

	Cu	Pb	Cd	Ni	Co	Zn	Fe	Mn	pH	EC	TOM
Pb	۰/۴۲۳										
Cd	۰/۰۳۰	۰/۴۱۷									
Ni	۰/۶۷۳ ^a	۰/۳۷۷	-۰/۰۵۴								
Co	۰/۸۴۴ ^a	۰/۴۶۵	۰/۱۲۵	۰/۶۶۳ ^a							
Zn	-۰/۰۳۲	۰/۴۵۰	۰/۷۴۸ ^a	۰/۰۱۲	۰/۲۴۷						
Fe	۰/۶۵۵ ^a	۰/۰۴۹	-۰/۳۳۰	۰/۷۳۳ ^a	۰/۶۸۱ ^a	-۰/۱۷۴					
Mn	۰/۲۱۷	۰/۰۴۲	-۰/۳۲۵	۰/۲۱۵	۰/۱۸۳	-۰/۲۰۸	۰/۳۴۷				
pH	-۰/۳۶۲	-۰/۱۱۱	-۰/۱۵۸	-۰/۱۴۰	-۰/۲۶۲	۰/۰۲۴	-۰/۳۳۰	-۰/۲۴۷			

EC	-۰/۰۱۵	-۰/۰۲۸	۰/۳۷۵	-۰/۴۵۰	-۰/۱۶۸	۰/۰۶۹	-۰/۳۵۶	۰/۰۲۹	-۰/۳۸۹		
TOM	۰/۶۰۵ ^b	۰/۶۸۳ ^a	۰/۴۰۲	۰/۷۰۳ ^a	۰/۶۷۴ ^a	۰/۴۳۷	۰/۵۰۶ ^b	۰/۱۸۵	-۰/۴۳۲	-۰/۰۶۲	
CaCO ₃	-۰/۱۱۸	۰/۳۹۲	۰/۷۴۵ ^a	-۰/۳۳۵	۰/۰۰۳	۰/۸۲۳ ^a	-۰/۵۲۶ ^a	-۰/۳۱۵	۰/۰۶۵	۰/۳۷۶	۰/۲۲۶

^a معنی دار در ۰/۰۱ p=؛ ^b معنی دار در ۰/۰۵ p=.

در جدول ۴ نتایج حاصل از محاسبه شاخص پتانسیل خطر محیط‌زیستی هاکنسن که شامل ارزش‌های C_f، E_r، C_d و RI است برای فلزات سنگین مورد مطالعه گزارش شده است. با توجه به این جدول مقدار میانگین درجه آلودگی C_f از روند روی < کادمیوم < سرب < کبالت < منگنز < نیکل < مس پیروی می‌کند و مقدار این شاخص برای عنصرهای روی و کادمیوم به ترتیب در ۹۳ و ۵۶ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه در طبقه آلودگی خیلی زیاد قرار دارد و تنها عنصرهای نیکل و مس در تمام ایستگاه‌ها در طبقه آلودگی کم قرار گرفتند. بررسی نتایج شاخص ضریب پتانسیل خطر محیط‌زیستی E_r حاکی از آن است روند تغییر این شاخص به صورت کادمیوم < روی < سرب < نیکل < مس < کبالت < منگنز است و تنها عنصر کادمیوم دارای ارزش پتانسیل سمیت بالا و نگران‌کننده در بین عنصرهای مورد مطالعه بود و دیگر عنصرها در تمام ایستگاه‌ها در طبقه، خطر کم جای گرفتند. شاخص درجه آلودگی کل C_d نشان داد ۴۳ و ۵۰ درصد ایستگاه به ترتیب در طبقه‌های آلودگی زیاد و خیلی زیاد جای گرفتند و در نهایت پتانسیل خطر کل محیط‌زیستی نشان می‌دهد ۷۵ درصد ایستگاه‌ها در طبقه خطر متوسط قرار دارند. بررسی مقایسه میانگین شاخص‌های مورد مطالعه در هر یک از رودخانه نشان داد بیش‌ترین مقدار ضریب آلودگی و ضریب پتانسیل خطر محیط‌زیستی عنصرهای نیکل، کبالت، مس و منگنز متعلق به رودخانه سیاهرود است. با توجه به ارتباط مثبت و معنی‌دار عنصرهای مذکور می‌توان گفت نرخ فرسایش بیش‌تر در حوضه‌ی آبخیز رودخانه سیاهرود، سبب افزایش بیش‌تر غلظت فلزات در رسوبات و افزایش مقدار شاخص‌های ضریب آلودگی و ضریب پتانسیل خطر محیط زیستی شده است. در رودخانه نکارود دو عنصر سرب و کادمیوم بیشینه مقدار ضریب آلودگی و ضریب پتانسیل خطر محیط زیستی را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به حضور منبع‌های متعدد آلوده‌کننده (معادن و پساب زغال‌سنگ، کارخانه‌های چوب و کاغذ) در حوضه‌ی آبخیز رودخانه نکارود که نقش بسزایی در آلودگی رسوبات رودخانه مذکور به دو عنصر سرب و کادمیوم دارند، افزایش مقدار شاخص‌های فوق را سبب شده است. همچنین بیش‌ترین مقدار شاخص‌های ضریب آلودگی و پتانسیل خطر محیط زیستی عنصر روی در رودخانه تجن مشاهده گردید. نتایج بررسی درجه آلودگی کل و پتانسیل خطر محیط‌زیستی کل در هر یک از رودخانه‌ها نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار شاخص‌های مذکور به رودخانه نکارود اختصاص دارد.

جدول ۴: شاخص‌های ضریب آلودگی، پتانسیل خطر محیط‌زیست، درجه آلودگی کل و پتانسیل خطر کل محیط‌زیست (۱۳۹۴).

RI	C _d	شاخص‌های C _f ⁱ ; E _r ⁱ (ضریب واکنش سمیت برای روی و منگنز برابر با T _r ⁱ = ۱ است)							نام رودخانه	شماره ایستگاه
		Mn	Zn	Co	Ni	Cd	Pb	Cu		
۱۹۴	۲۸	۰/۵۵	۱۹/۵۸	۱/۵۴ ; ۰/۷۷	۲/۰۵ ; ۰/۳۴	۱۶۶ ; ۵/۵	۳/۰۴ ; ۰/۶۰	۰/۸۷ ; ۰/۱۷	نکارود	۱
۴۱۲۱	۱۶۸	۰/۴۷	۲۵/۸۲	۲/۰۳ ; ۱/۰۱	۲/۹۴ ; ۰/۴۹	۴۰۶۶ ; ۱۳۵/۵	۲۰/۷۰ ; ۴/۱۴	۲/۴۶ ; ۰/۴۹		۲
۳۴۱	۴۲	۰/۶۰	۲۸/۵۲	۱/۸۹ ; ۰/۹۴	۲/۶۷ ; ۰/۴۴	۳۰۰ ; ۱۰/۰	۵/۹۵ ; ۱/۱۹	۱/۷۵ ; ۰/۳۵		۳
۲۸۰	۴۱	۰/۴۰	۲۹/۰۸	۲/۳۵ ; ۱/۱۷	۴/۹۱ ; ۰/۸۱	۲۳۳ ; ۷/۷	۷/۱۲ ; ۱/۴۲	۲/۶۸ ; ۰/۵۳		۴
۱۱۸۵	۷۰	۰/۵۰	۲۵/۷۵	۱/۹۵ ; ۰/۹۷	۳/۱۴ ; ۰/۵۲	۱۱۹۱ ; ۳۹/۶۸	۹/۲۰ ; ۱/۸۴	۱/۹۴ ; ۰/۳۸	میانگین در رودخانه نکارود	
۱۹۶	۲۸	۱/۴۵	۱۹/۱۶	۱/۶۴ ; ۰/۸۲	۲/۲۰ ; ۰/۳۶	۱۶۶ ; ۵/۵	۳/۸۷ ; ۰/۷۷	۰/۸۳ ; ۰/۱۶	تجن	۵
۲۲۰۸	۱۰۶	۰/۷۴	۲۷/۰۲	۱/۹۲ ; ۰/۹۶	۳/۷۶ ; ۰/۶۲	۲۲۲۶ ; ۷۵/۵	۵/۹۵ ; ۱/۱۹	۱/۹۸ ; ۰/۳۹		۶
۲۷۸	۴۲	۰/۷۴	۲۹/۷۵	۱/۹۲ ; ۰/۹۶	۲/۸۵ ; ۰/۴۷	۲۳۳ ; ۷/۷	۷/۳۵ ; ۱/۴۷	۱/۸۷ ; ۰/۳۷		۷

RI	C _d	شاخص‌های E _r ⁱ ; C _f ⁱ (ضریب واکنش سمیت برای روی و منگنز برابر با T _r ⁱ =1 است)							نام رودخانه	شماره ایستگاه
		Mn	Zn	Co	Ni	Cd	Pb	Cu		
۲۷۵	۴۰	۰/۵۸	۲۹/۰۸	۱/۸۹; ۰/۹۴	۳/۰۲; ۰/۵۰	۲۳۳; ۷/۷	۵/۲۰; ۱/۰۴	۱/۸۳; ۰/۳۶		۸
۷۶۴	۵۴	۰/۸۹	۲۶/۲۵	۱/۸۴; ۰/۹۲	۲/۹۶; ۰/۴۸	۷۱۴; ۲۴/۱	۵/۵۹; ۱/۱۲	۱/۶۳; ۰/۳۲	میانگین در رودخانه تجن	
۲۷۱	۳۵	۰/۶۴	۲۳/۸۲	۲/۲۱; ۱/۱۰	۲/۹۱; ۰/۴۶	۲۳۳; ۷/۷	۴/۹۵; ۰/۹۹	۳/۰۹; ۰/۶۱		۹
۲۷۰	۳۳	۱/۱۲	۲۰/۱۵	۲/۱۴; ۱/۰۷	۳/۸۲; ۰/۶۳	۲۳۳; ۷/۷	۶/۰۴; ۱/۲۰	۲/۹۴; ۰/۵۸	سیاهرود	۱۰
۲۳۴	۳۰	۱/۰۱	۱۸/۵۶	۲/۰۳; ۱/۰۱	۳/۶۱; ۰/۶۰	۲۰۰; ۶/۶	۶/۲۰; ۱/۲۴	۲/۸۳; ۰/۵۶		۱۱
۱۷۱	۳۰	۲/۳۵	۱۹/۸۵	۲/۱۷; ۱/۰۸	۴/۱۴; ۰/۹۶	۳۱۳; ۴/۴	۶/۰۴; ۱/۲۰	۳/۳۱; ۰/۶۶		۱۲
۲۳۶	۳۲	۱/۲۸	۲۰/۶۰	۲/۱۴; ۱/۰۶	۳/۶۲; ۰/۶۶	۲۴۴; ۶/۶	۵/۸۱; ۱/۱۶	۳/۰۴; ۰/۶۰	میانگین در رودخانه سیاهرود	
۱۶۴	۲۵	۰/۶۶	۱۶/۷۲	۱/۸۲; ۰/۹۱	۲/۹۱; ۰/۴۸	۱۳۳; ۴/۴	۶/۷۹; ۱/۳۵	۱/۸۷; ۰/۳۷		۱۳
۱۷۹	۹	۰/۳۵	۰/۱۶	۱/۷۱; ۰/۸۵	۳/۲۶; ۰/۵۴	۱۶۶; ۵/۵	۴/۲۹; ۰/۸۵	۲/۱۶; ۰/۴۳	تالار	۱۴
۱۶۵	۲۷	۰/۶۴	۱۹/۲۹	۱/۹۶; ۰/۹۸	۳/۳۸; ۰/۵۶	۱۳۳; ۴/۴	۴/۵۴; ۰/۹۰	۱/۷۹; ۰/۳۵		۱۵
۱۲۸	۲۲	۰/۸۱	۱۴/۵۴	۲/۰۷; ۱/۰۳	۳/۵۲; ۰/۵۸	۱۰۰; ۳/۳	۴/۹۵; ۰/۹۹	۲/۵۷; ۰/۵۱		۱۶
۱۵۹	۲۱	۰/۶۲	۱۲/۶۸	۱/۸۹; ۰/۹۴	۳/۲۷; ۰/۵۴	۱۳۳; ۴/۴	۵/۱۴; ۱/۰۲	۲/۱۰; ۰/۴۲	میانگین در رودخانه تالار	

بررسی نتایج حاصل از شاخص ژئوشیمیایی مولر (جدول ۵) برای هر یک از عنصرها نشان داد، عنصرهای منگنز، کبالت، مس، نیکل و سرب در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای مقدارهای $I_{geo} \leq 0$ می‌باشند که نشان از عدم آلودگی این عنصرها در رسوبات است؛ اما عنصرهای کادمیوم و روی آلودگی متوسط تا آلودگی فوق شدید را در ایستگاه‌ها مورد مطالعه بازگو می‌کنند که به ترتیب در رودخانه‌های نکارود و تجن مشاهده شده‌اند. در بررسی غنی‌شدگی فلزات سنگین مشاهده شد عنصرهای کبالت، سرب، منگنز و نیکل به ترتیب در ۹۴، ۸۱، ۸۱ و ۶۹ درصد ایستگاه‌ها، غنی‌شدگی جزئی و عنصرهای کادمیوم و روی در ۱۰۰ و ۹۴ درصد ایستگاه‌ها مورد مطالعه غنی‌شدگی فوق شدید را نشان می‌دهند و تنها عنصر مس در ۷۵ درصد از ایستگاه‌ها دارای مقدارهای بدون غنی‌شدگی است. بررسی مقدار میانگین شاخص غنی‌شدگی عنصرها در هر یک از رودخانه نشان می‌دهد بیش‌ترین غنی‌شدگی تمامی عنصرهای مورد مطالعه به‌غیر از منگنز (بیشینه میانگین غنی‌شدگی در رودخانه تجن) را رودخانه نکارود به خود اختصاص داده است.

هم‌چنین با توجه به شاخص بار آلودگی محاسبه‌شده در مطالعه حاضر، روند تغییر و مقدار میانگین این شاخص در بین چهار رودخانه به‌صورت نکارود (۱/۸۵) < سیاهرود (۱/۸۳) < تجن (۱/۷۴) < تالار (۱/۲۲) است. در حقیقت نتایج حاکی از آلودگی رسوبات به عنصرهای مورد مطالعه و اثرگذاری بیش‌تر فعالیت‌های انسانی در انتشار فلزات سنگین به رسوبات چهار رود مورد بررسی در مقایسه با فعالیت‌های طبیعی است. در جدول ۵ مقدار هر یک از شاخص‌های فوق برای ایستگاه‌های مورد مطالعه گزارش شده است.

جدول ۵: نتایج شاخص‌های غنی‌شدگی، زمین‌انباشت و ضریب بار آلودگی در ایستگاه‌های مطالعه حاضر (۱۳۹۴).

PLI	شاخص‌های I _{geo} EF							نام رودخانه	شماره ایستگاه
	Mn	Zn	Co	Ni	Cd	Pb	Cu		
۱/۰۷	-۱/۴۲; ۱/۵۸	۳/۷۰; ۵۵/۸۸	-۰/۹۵; ۲/۲۰	-۲/۱۲; ۰/۹۷	۱/۸۸; ۱۵/۸۵	-۱/۳۰; ۱/۷۳	-۳/۱۰; ۰/۴۹		۱
۲/۸۸	-۱/۶۷; ۱/۵۳	۴/۱۰; ۸۴/۳۳	-۰/۵۵; ۳/۳۲	-۱/۶۱; ۱/۶۰	۶۴/۴۹; ۴۴۲/۵۰	۱/۴۶; ۱۳/۵۲	-۱/۶۰; ۱/۶۰	نکارود	۲
۱/۶۳	-۱/۳۰; ۱/۷۲	۴/۳۴; ۸۰/۹۰	-۰/۶۶; ۲/۶۸	-۱/۷۴; ۱/۲۶	۲/۷۳; ۲۸/۳۶	-۰/۳۳; ۳/۳۷	-۲/۰۹; ۰/۹۹		۳
۱/۸۲	-۱/۸۷; ۰/۶۹	۴/۲۷; ۴۹/۸۷	-۰/۳۵; ۲/۰۱	-۰/۸۷; ۱/۴۰	۲/۳۷; ۱۳/۳۳	-۰/۰۷; ۲/۴۴	-۱/۴۸; ۰/۹۲		۴
۱/۸۵	-۱/۵۷; ۱/۳۸	۴/۰۸; ۶۷/۲۴	-۰/۶۳; ۲/۵۵	-۱/۵۹; ۱/۳۱	۱۷/۸۷; ۱۲۵/۰۱	-۰/۷۹; ۵/۲۶	-۲/۰۷; ۱/۰۰	میانگین در رودخانه نکارود	

PLI	شاخص‌های I _{geo} EF							نام رودخانه	شماره ایستگاه
	Mn	Zn	Co	Ni	Cd	Pb	Cu		
۱/۲۹	-۰/۰۴ ; ۳/۷۴	۳/۶۷ ; ۴۹/۴۵	-۰/۸۶ ; ۲/۱۲	-۲/۰۲ ; ۰/۹۴	۱/۸۸ ; ۱۴/۳۳	-۰/۹۵ ; ۱/۹۹	-۳/۱۶ ; ۰/۴۳	تجن	۵
۲/۲۳	-۱/۰۰ ; ۱/۴۷	۴/۱۷ ; ۵۳/۵۲	-۰/۶۲ ; ۱/۹۱	-۱/۲۵ ; ۱/۲۴	۵/۶۵ ; ۱۴۹/۶۱	-۰/۳۳ ; ۲/۳۵	-۱/۹۲ ; ۰/۷۸		۶
۱/۷۱	-۱/۰۰ ; ۱/۷۸	۴/۳۱ ; ۷۱/۱۳	-۰/۶۳ ; ۲/۳۰	-۱/۶۵ ; ۱/۱۳	۲/۳۷ ; ۱۸/۵۹	-۰/۰۲ ; ۳/۵۲	-۲/۰۰ ; ۰/۸۹		۷
۱/۵۷	-۱/۳۵ ; ۱/۴۲	۴/۲۷ ; ۷۰/۶۲	-۰/۶۶ ; ۲/۳۰	-۱/۵۷ ; ۱/۲۲	۲/۳۷ ; ۱۸/۸۸	-۰/۵۲ ; ۲/۵۲	-۲/۰۳ ; ۰/۸۹		۸
۱/۷۰	-۰/۸۵ ; ۲/۱۰	۴/۱۱ ; ۶۱/۱۸	-۰/۷۰ ; ۲/۱۶	-۱/۴۸ ; ۱/۱۳	۳/۰۷ ; ۵۰/۳۵	-۰/۴۵ ; ۲/۶۰	-۲/۲۳ ; ۰/۷۵	میانگین در رودخانه تجن	۹
۱/۶۷	-۱/۲۲ ; ۱/۱۰	۳/۹۸ ; ۴۱/۰۵	-۰/۴۴ ; ۱/۹۰	-۱/۶۸ ; ۰/۸۰	۲/۳۷ ; ۱۳/۴۰	-۰/۵۹ ; ۱/۷۰	-۱/۲۷ ; ۱/۰۶		۱۰
۱/۸۸	-۱/۳۵ ; ۱/۵۶	۳/۷۴ ; ۲۸/۰۹	-۰/۴۸ ; ۱/۴۹	-۱/۲۳ ; ۰/۸۸	۲/۳۷ ; ۱۰/۸۴	-۰/۳۱ ; ۱/۶۸	-۱/۳۴ ; ۰/۸۲	سیاهرود	۱۱
۱/۷۷	-۰/۵۵ ; ۱/۸۰	۳/۶۲ ; ۳۲/۹۱	-۰/۵۵ ; ۱/۸۰	-۱/۳۱ ; ۱/۰۶	۲/۱۵ ; ۱۱/۸۲	-۰/۲۷ ; ۲/۲۰	-۱/۴۰ ; ۱/۰۰		۱۲
۱/۹۹	-۰/۶۴ ; ۳/۷۴	۳/۷۲ ; ۳۱/۵۸	-۰/۴۶ ; ۱/۷۲	-۱/۱۱ ; ۱/۰۹	۱/۵۶ ; ۷/۰۶	-۰/۳۱ ; ۱/۹۲	-۱/۱۷ ; ۱/۰۵	میانگین در رودخانه سیاهرود	۱۳
۱/۸۳	-۰/۹۴ ; ۲/۰۵	۳/۷۶ ; ۳۳/۴۱	-۰/۴۸ ; ۱/۷۳	-۱/۲۳ ; ۰/۹۶	۲/۱۱ ; ۱۰/۷۸	-۰/۳۷ ; ۱/۸۸	-۱/۳۰ ; ۰/۹۸		۱۴
۱/۴۱	-۱/۱۶ ; ۱/۴۲	۳/۴۷ ; ۳۵/۸۳	-۰/۷۱ ; ۱/۹۵	-۱/۶۲ ; ۱/۰۳	۱/۵۶ ; ۹/۵۲	-۰/۱۴ ; ۲/۹۰	-۲/۰۰ ; ۰/۸۰	تالار	۱۵
۰/۶۶	-۲/۰۵ ; ۰/۶۵	-۳/۲۱ ; ۰/۲۹	-۰/۸۰ ; ۱/۵۹	-۱/۴۶ ; ۱/۰۰	۱/۸۸ ; ۱۰/۲۹	-۰/۸۰ ; ۱/۵۹	-۱/۷۹ ; ۰/۸۰		۱۶
۱/۳۹	-۱/۲۱ ; ۱/۰۱	۳/۶۸ ; ۳۰/۳۱	-۰/۶۱ ; ۱/۵۴	-۱/۴۱ ; ۰/۸۸	۱/۵۶ ; ۶/۹۸	-۰/۷۲ ; ۱/۴۲	-۲/۰۶ ; ۰/۵۶	میانگین در رودخانه تالار	۱۷
۱/۴۳	-۰/۸۷ ; ۱/۴۶	۳/۲۷ ; ۲۶/۰۲	-۰/۵۳ ; ۱/۸۵	-۱/۳۵ ; ۱/۰۵	۱/۱۵ ; ۵/۹۶	-۰/۵۹ ; ۱/۷۷	-۱/۵۴ ; ۰/۹۲		۱۸
۱/۲۲	-۱/۳۲ ; ۱/۱۳	۱/۸۰ ; ۲۳/۱۱	-۰/۶۶ ; ۱/۷۳	-۱/۴۶ ; ۰/۹۹	۱/۵۴ ; ۸/۱۹	-۰/۵۶ ; ۱/۹۲	-۱/۸۵ ; ۰/۷۷		

در جدول ۶ غلظت میانگین فلزات سنگین در هر یک از رودخانه‌های مورد مطالعه و پژوهش‌های صورت گرفته دیگر بر اکوسیستم رودخانه-ای گزارش شده است. با توجه به این جدول مقایسه غلظت میانگین فلزات سنگین رسوبات رودخانه نکارود در مطالعه حاضر با مطالعه صورت گرفته بر رسوبات رودخانه مذکور در سال ۱۳۹۴ نشان داد عنصرهای سرب، کادمیوم، روی و آهن افزایش، مس و کبالت تغییر بسیار اندک و عنصر نیکل کاهش غلظت داشته است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین مقایسه غلظت با رسوبات دیگر رودخانه‌های منتهی به دریای خزر حاکی از غلظت کمتر عنصرهای مس، نیکل، کبالت و آهن و غلظت‌های بالاتر عنصرهای سرب، روی و کادمیوم می‌باشد (قشلاقی و رستمی، ۱۳۹۵؛ مغزی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Nasrabadi et al., 2010; Ghanbarpor et al., 2014). مقایسه با پژوهش‌های انجام گرفته دیگر بر روی رودخانه‌های خارج از مرزهای سیاسی کشور ایران بیان‌کننده غلظت‌های کمتر مس، سرب و نیکل در مطالعه حاضر و غلظت‌های بیشتر کبالت، کادمیوم و روی در رودخانه‌های مورد مطالعه است (Nguyen et al., 2016; Kim et al., 2011; Bilinski, 2008). در رودخانه تجن غلظت فلزات کادمیوم، کبالت، روی و آهن در مقایسه با مطالعه پیشین (Ghanbarpor et al., 2014) افزایش یافته و تنها عنصر نیکل کاهش غلظت داشته است. در مقایسه با رودخانه‌های دیگر منتهی به دریای خزر، رودخانه تجن نیکل و کبالت کمتر (مغزی و همکاران، ۱۳۹۰؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴) و تنها عنصر روی غلظت بیشتری داشته است (Nasrabadi et al., 2010)؛ خراط صادقی و کرباسی، ۱۳۸۷). غلظت عنصرهای روی، کبالت و کادمیوم در رودخانه تجن در مقایسه با رودخانه‌های دیگر کشور بالاتر و غلظت عنصرهای مس، سرب، نیکل و منگنز در آن کمتر گزارش شده است (Nguyen et al., 2016; Kim et al., 2011; Bilinski, 2008). میانگین غلظت فلزات سنگین مس، سرب و نیکل در رسوبات رودخانه سیاهرود در محدوده‌ی مورد مطالعه در مقایسه با مطالعه قشلاقی و رستمی (۱۳۹۵) بر روی رودخانه مذکور نشان داد که تنها غلظت عنصرهای کادمیوم و روی در این رودخانه افزایش یافته است. در مقایسه با دیگر رودخانه‌های منتهی به دریای خزر، رودخانه سیاهرود (مطالعه حاضر) دارای غلظت بیشتر عنصرهای روی، منگنز، سرب، کادمیوم و آهن و غلظت کمتر عنصر مس است (Malvandi, 2017; Nasrabadi et al., 2010)؛ خراط صادقی و کرباسی، ۱۳۸۷؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین مقایسه غلظت فلزات سنگین با مطالعه‌های انجام شده توسط Bilinski (2008) و Kim et al. (2011) بر روی رودخانه‌های

خارج از مرزهای کشور ایران حاکی از غلظت‌های کم‌تر مس، سرب، کبالت و آهن و غلظت‌های بیش‌تر روی، منگنز و کادمیوم در مقایسه با رسوبات رودخانه سیاهرود است.

غلظت میانگین فلزات سنگین در رودخانه تالار در مقایسه با پژوهش دیگر محققین بر روی رودخانه‌های منتهی به دریای خزر و دیگر اکوسیستم‌های رودخانه‌ای نشان می‌دهد عنصرهای مس، سرب، نیکل در این رودخانه دارای غلظت‌های کم‌تر و عنصر روی دارای غلظت بیش‌تری می‌باشد (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ قشلاقی و رستمی، ۱۳۹۵؛ مغزی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Nasrabadi *et al.*, 2010; Ghanbarpor *et al.*, 2014).

جدول ۶: مقایسه غلظت میانگین فلزات سنگین در مطالعه حاضر (۱۳۹۴) با سایر مطالعه‌های مشابه.

منبع	مقدار فلزات سنگین به میلی‌گرم بر کیلوگرم (ppm) و فلز آهن به درصد (%)								مکان	رود
	Fe	Mn	Zn	Co	Ni	Cd	Pb	Cu		
مطالعه حاضر	۱/۸۵	۴۳۴/۱۶	۲۴۴۶/۸۳	۱۸/۵۸	۳۵/۶۶	۱۱/۹۱	۳۶/۸۳	۱۷/۵۰	ایران	نکارود
مطالعه حاضر	۲/۰۱	۷۵۰/۰۰	۲۴۹۴/۶۶	۱۷/۵۸	۳۳/۵۸	۷/۲۵	۲۲/۴۱	۱۴/۶۶	ایران	تجن
مطالعه حاضر	۲/۹۰	۱۰۹۲/۵۰	۱۹۵۷/۰۰	۲۰/۳۳	۴۰/۷۵	۲/۰۰	۲۳/۲۵	۲۷/۴۱	ایران	سیاهرود
مطالعه حاضر	۲/۵۷	۵۲۸/۳۳	۱۲۰۵/۰۰	۱۸/۰۰	۳۷/۰۸	۱/۳۳	۲۰/۵۸	۱۸/۹۱	ایران	تالار
Malvandi, 2017	۱/۳۷	۲۸۶/۲۸	۳۲/۶۸	۸/۷۹	۱۲/۳۹	-	-	-	ایران	زرین‌گل
قشلاقی و رستمی، ۱۳۹۵	-	-	۶۳/۶۰	-	۲۹/۶۰	۰/۲۸	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰	ایران	سیاهرود
مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴	۰/۷۶	-	۳۲۴/۷۵	۱۸/۰۰	۱۰۲/۲۵	۱/۵۰	۲۲/۰۰	۲۲/۷۵	ایران	نکارود
Ghanbarpor <i>et al.</i> , 2014	۴/۶۲	-	۷۱/۶	۲۵/۰۰	۹۳/۱۰	۰/۱۰	-	-	ایران	تجن
مغزی و همکاران، ۱۳۹۰	-	-	۷۳/۳۱	۳۲/۸۷	۴۷/۶۳	۹/۷	۲۹/۹۸	۱۹/۹۵	ایران	بابل رود
Nasrabadi <i>et al.</i> , 2010	۱/۱۰	-	۳۷/۳۰	۵۶/۰۱	۲۲/۰۸	۴۵/۵۸	۵۷/۰۶	۲۹/۵۰	ایران	هراز
خرات صادقی و کرباسی، ۱۳۸۷	۲/۴۵	۵۱۱	۵۸/۰۰	-	۴۳/۰۰	-	۲۱/۶۰	۳۷/۰۰	ایران	شیر رود
Nguyen <i>et al.</i> , 2016	۳/۷۶	۸۰۶/۰۰	۱۲۷/۰۰	-	۳۸/۰۰	۰/۳۵	۶۶/۰۰	۸۳/۰۰	ویتنام	رود سرخ
Kim <i>et al.</i> , 2011	۳/۲۶	۶۶۶/۰۰	۱۲۶/۰۰	۱۹/۲۰	۲۵/۳۰	۰/۲۲	۳۵/۱۰	۲۹/۷۰	کره	هان
Bilinski, 2008	۳/۱۳	۱۲۰۰	۳۰۳/۰۸	۱۵/۷۰	۴۹/۳۸	۱/۲۵	۵۵/۳۶	۴۲/۸۸	اسلوانی	سوا

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین در رسوبات چهار رودخانه مهم منتهی به دریای خزر در مرزهای سیاسی کشور ایران - استان مازندران بررسی شد. بیشینه غلظت فلزات سنگین مس، کادمیوم، نیکل، منگنز و آهن در هریک از رودخانه‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های واقع در امتداد رودخانه‌ها (در مقایسه با ایستگاه‌های واقع در مصب رودخانه‌ها) مشاهده شد. غلظت عنصرهای کادمیوم، روی و سرب در بیش‌تر ایستگاه‌های نمونه‌برداری از غلظت‌های میانگین رسوبات جهانی بیش‌تر است و نتایج حاصل از شاخص‌های مهم نشان داد بیشینه مقدار ضریب آلودگی، ضریب پتانسیل خطر محیط‌زیستی، زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی مربوط به عنصر کادمیوم است. همچنین بیش‌ترین ضریب آلودگی کل، ضریب پتانسیل کل خطر محیط‌زیستی و بار آلودگی در رودخانه نکارود مشاهده شده است.

با توجه به بازدیدهای میدانی و مطالعه‌های دیگر محققین می‌توان گفت فعالیت‌های صورت گرفته در حوضه آبخیز رودخانه‌های مورد مطالعه که شامل کشاورزی و باغداری متراکم (منجر به استفاده بیش‌تر از کود و سموم مختلف شده است)، تخلیه مستقیم زباله‌ها و فاضلاب‌های مسکونی، حضور کارخانه‌های چوب و کاغذ، نساجی و صنعت سیمان، معادن زغال‌سنگ و آلودگی‌های ناشی از دپو و استخراج آن‌ها و حضور

لوله‌های انتقال‌دهنده ترکیبات نفتی در بستر رودخانه‌ها از عمده عامل‌های است که سهم بسزایی در آلاینده‌های رودخانه‌های مورد مطالعه دارند (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ قشلاقی و رستمی، ۱۳۹۵؛ دریواسی و همکاران، ۱۳۹۴؛ سعیدی و همکاران، ۱۳۸۵؛ مصطفوی، ۱۳۹۴). با توجه به حضور منابع متعدد و متنوع آلوده‌کننده در این ناحیه و غلظت‌های نگران‌کننده برخی از فلزات سنگین در مطالعه حاضر به‌ویژه فلزات روی، کادمیوم و سرب، به‌منظور پیش‌گیری از بروز مشکل‌های گسترده‌تر، پژوهش‌ها باید در مقیاس وسیع‌تر و در بخش زنده اکوسیستم‌های فوق به‌صورت دوره‌ای انجام و تداوم داشته باشد تا مدیریت و کنترل آلودگی در منطقه مورد مطالعه با انسجام بیش‌تر و چالش کم‌تری انجام پذیرد.

منابع

- اسکندری، ط.، علی‌اشرفی پور، ر.، ید الهی، ع. و توحیدی، ف.، ۱۳۸۷. بررسی آماری میزان مصرف سموم کشاورزی در شهرستان‌های استان مازندران، دومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران.
- خراطصادقی، م. و کرباسی، ع.، ۱۳۸۷. مقایسه شاخص‌های I_{geo} و EF در برآورد شدت آلودگی زیست‌محیطی رودخانه شیر رود به‌منظور حفظ معیارهای توسعه پایدار، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، جلد ۱۰: صفحات ۳۹-۳۰.
- دریواسی، س.، صائب، ک. و ملاشاهی، م.، ۱۳۹۴. بررسی تأثیر میزان فاصله از منبع آلودگی بر غلظت فلزات سنگین در خاک اطراف کارخانه سیمان شهرستان نکا، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، جلد ۱۷: صفحات ۴۴-۳۵.
- سعیدی، م.، کرباسی، ع.، نبی بید هندی، غ. و مهردادی، ن.، ۱۳۸۵. اثر فعالیت‌های انسانی بر تجمع فلزات سنگین در آب رودخانه تجن در استان مازندران، مجله محیط‌شناسی، جلد ۳۲: صفحات ۵۰-۴۱.
- قشلاقی، ا. و رستمی، ش.، ۱۳۹۵. آلودگی و گونه‌سازی فلزات سنگین در رسوبات بستر رودخانه سیاهرود (منطقه قائمشهر-استان مازندران)، مجله پژوهش‌های چینه نگاری و رسوب‌شناسی، جلد ۳۲: صفحات ۹۰-۷۳.
- مصطفوی، ح.، ۱۳۸۵. تنوع زیستی ماهیان رودخانه تالار استان مازندران، مجله محیط‌شناسی، جلد ۳۲: صفحات ۱۲۷-۱۳۵.
- مغزی، س.، سعیدی، م. و جمشیدی، ا.، ۱۳۹۰. ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه بابل رود با استفاده از شاخص‌های آلودگی رسوب، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- مقصودی، ع.، ونایی، م. و یزدی، م.، ۱۳۹۴. فلزات سنگین و بررسی شاخص‌های شدت غنی‌شدگی و ژئوشیمیایی در رودخانه نکارود، فصلنامه علوم‌زمین، جلد ۲۴: صفحات ۱۷۴-۱۶۷.

Agah, H., Bastami, K. D. and Fumani, N. S., 2016. Ecological risk, source and preliminary assessment of metals in the surface sediments of Chabahar Bay, Oman Sea. *Marine pollution bulletin*, 107(1): 383-388.

Bastami, K. D., Neyestani, M. R., Shemirani, F., Soltani, F., Haghparast, S. and Akbari A., 2015. Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern Caspian Sea. *Marine pollution bulletin*, 92(1): 237-243.

Bilinski, S., 2008. Detection of geochemical anomalies in stream sediments of the upper Sava River drainage basin (Slovenia, Croatia). *Fresenius Environmental Bulletin*, 17(2): 188-196.

Buccolieri, A., Buccolieri, G., Cardellicchio, N., Dell'Atti, A., Di Leo, A. and Maci A., 2006. Heavy metals in marine sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, southern Italy). *Marine chemistry*, 99(1): 227-235.

Chabukdhara, M. and Nema, A. K., 2012. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: a chemometric and geochemical approach. *Chemosphere*, 87(8), 945-953.

De Mora, S., Sheikholeslami, M. R., Wyse, E., Azemard, S. and Cassi, R., 2004. An assessment of metal contamination in coastal sediments of the Caspian Sea. *Marine pollution bulletin*, 48(1): 61-77.

Duodu, G. O., Goonetilleke, A. and Ayoko, G. A., 2017. Potential bioavailability assessment, source apportionment and ecological risk of heavy metals in the sediment of Brisbane River estuary, Australia. *Marine pollution bulletin*, 117(1): 523-531.

Effendi, H., Yusli, W., Mujizat, K. and Dea F. L., 2017. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal on surface sediment in west part of Java Sea. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 54 (1):1-10.

Frank, A. B., Liebig, M. A. and Hanson, J. D., 2002. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(9): 1235-1241.

Ghanbarpour, M. R., Goorzadi, M. and Vahabzade, G., 2013. Spatial variability of heavy metals in surficial sediments: Tajan River Watershed, Iran. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 1: 48-58.

Godwin, A., Oghenekohwiroro, E., Funso, A. and Olaniyi, O., 2015. 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): 77-90.

Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8): 975-1001.

Humbatov, F. Y., Ahmadov, M. M., Balayev, V. S. and Suleymanov, B. A., 2015. Trace Metals in Water Samples Taken from Azerbaijan Sector of Caspian Sea. *Chemical Engineering Journal*, 9: 288-295.

Jamshidi, S. and Bastami, K. D., 2017. Preliminary assessment of metal distribution in the surface sediments along the coastline of the southern Caspian Sea. *Marine pollution bulletin*, 116(1): 462-468.

Jiang, X., Teng, A., Xu, W. and Liu, X., 2014. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the Yellow Sea. *Marine pollution bulletin*, 83(1): 366-375.

Karydas, C. G., Ourania T., and Panos P., 2015. A new spatiotemporal risk index for heavy metals: application in Cyprus. *Water*, 7 (8): 4323-4342.

Kim, K. T., Ra, K., Kim, E. S., Yim, U. H. and Kim, J. K., 2011. Distribution of heavy metals in the surface sediments of the Han River and its estuary, Korea. *Journal of Coastal Research*, 64: 903-907.

Loeppert, R. H. and Suarez D. L., 1996. Carbonate and gypsum. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3-SSSA Book Series n.5.* ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 437-474.

Malvandi, H., 2017. Preliminary evaluation of heavy metal contamination in the Zarrin-Gol River sediments, Iran. *Marine pollution bulletin*, 117(1): 547-553.

Manoj, K. and Padhy, P. K., 2014. Distribution, enrichment and ecological risk assessment of six elements in bed sediments of a tropical river, Chottanagpur plateau: a spatial and temporal appraisal. *Journal of Environmental Protection*, 5(14): 1419-1434.

Monroy, M., Maceda-Veiga, A. and de Sostoa, A., 2014. Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern. *Science of the Total Environment*. 487: 233-244.

Müller, G., 1981. Die schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und Seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme. *Chemiker Zeitung.*, 105: 157-164.

Nasrabadi, T., Bidhendi, G. N., Karbassi, A. R. and Mehrdadi, N., 2010. Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea basin. *Environmental monitoring and assessment*, 171(4): 395-410.

Nguyen, T. T. H., Zhang, W., Li, Z., Li, J., Ge, C., Liu, J. and Yu, L., 2016. Assessment of heavy metal pollution in Red River surface sediments, Vietnam. *Marine pollution bulletin*, 113(1): 513-519.

Parizanganeh, A. H., Lakhani, V. C. and Jalalian, H., 2007. A geochemical and statistical approach for assessing heavy metal pollution in sediments from the southern Caspian coast. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 4(3): 351-358.

Sastre, J., Sahuquillo, A., Vidal, M. and Rauret, G., 2002. Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction. *Analytica Chimica Acta*, 462(1): 59-72.

Xu, Z., Ni S., Tuo, X. and Zhang, C., 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science & Technology*, 31: 112-115.

Zhang, W., Feng, H., Chang, J., Qu, J., Xie, H. and Yu, L., 2009. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: an assessment from different indexes. *Environmental Pollution*, 157(5): 1533-1543.