

ارزیابی میزان آلودگی و توزیع فلزات سنگین در رسوبات رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های آماری

سعید چوپانی^۱، پیمان رضایی^{۲*} و محمدرضا غریب‌رضا^۳

۱- دانشجوی دکترا رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۳- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

نویسنده مسئول: p.rezaee@hormozgan.ac.ir

دریافت: ۹۹/۱۲/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این پژوهش عناصر بالقوه سمناک آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور بر اساس یک استراتژی قطعی تعداد ۲۱ نمونه رسوبات سطحی مطابق با پراکنش کانون‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای آلودگی و ریخت‌شناسی رودخانه‌ای جمع‌آوری شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، غلظت عناصر سمی و سولفور با استفاده از دستگاه ICP-MS و درصد کربن آلی کل به دست آمد. با استفاده از فاکتور غنی‌شدگی و استانداردهای کیفیت رسوب (ISQGs, PEL, SEL)، سطح آلودگی ناشی از عناصر سمی آشکارسازی شد. برای شناسایی دسته عناصر فلزی دارای رفتار ژئوشیمیایی مشابه در محیط رسوبی و نیز یافتن مهمترین جاذب کاتیونی در بازه‌های مورد بررسی از تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی (AHC) با ضریب تشابه پیرسون در نرم‌افزار XLSTAT2018 بهره‌گیری شد. بررسی‌ها بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فاکتور آلودگی را به ترتیب عناصر Ni و Cu, Zn با رده آلودگی زیاد به خود اختصاص داده‌اند. این درحالی است که در رسوبات غنی‌شدگی متوسطی از عناصر Cu و Zn و غنی‌شدگی کم از Ni رقم خورده است. نتایج به خوبی بازه‌های آلوده و پاک رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت را مشخص کردند. از منظر غلظت، بخش عمده محدوده مورد مطالعه (به جز بازه روستای ابودبس تا شهرک گلستان) از عناصر Ni و Cr، قسمت‌های پایین دست از شبه فلز آرسنیک در سطح مخاطر آمیز قرار دارند. نیکل و کروم در بیش‌تر نمونه‌ها دارای غلظتی بیش از تراز PEL بوده و احتمال بروز مسمومیت برای آبزیان و بهره‌برداران آب وجود دارد. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای و ضریب همبستگی، نشان از همبستگی معنی‌دار مثبت (-0.701 = r) بین عناصر Ni, Cr و As و رسوبات ریز دانه رسی در خوشه B و برقراری همبستگی معنی‌دار مثبت (-0.643 = r) بین عناصر فلزی سمی Cu و Zn و Pb و مواد آلی در خوشه A دارد. ضرایب همبستگی بیانگر منشأ یکسان و یا رفتار ژئوشیمیایی مشابه آن‌ها نسبت به هم و برقراری شرایط ژئوشیمیایی مشابه در انتقال و ورود آن‌ها به فاز جامد یا کانی‌سازی در رسوبات سطحی دارد.

واژگان کلیدی: رسوبات سطحی، فلزات سنگین، رودخانه کارون، ژئوشیمی، خوشه‌بندی

پیشگفتار

به دلیل تداوم آن‌ها در محیط‌زیست و همچنین توانایی انتقال و زیست انباشتگری در طول زنجیره غذایی، یکی از آلاینده‌های بسیار خطرناک هستند. رسوبات بستر منبع بالقوه آلودگی بوده و به عنوان معرف و شناساگر مهمی برای آلودگی محیط‌های آبی مطرح می‌باشند که با مطالعه آن‌ها می‌توان به راحتی مقدار و نوع آلودگی را مشخص نمود (محمدرزاده و همکاران، ۱۳۹۷). رسوبات به وسیله بسیاری از مواد سمی و خطرناک از جمله فلزات سنگین از طریق

رسوبات رودخانه‌ای علاوه بر اینکه شرایط مورد نیاز برای حیات موجودات ریز آبی را فراهم می‌نماید، به عنوان یک منبع بالقوه برای تهنشست بسیاری از فلزات سنگین و مواد شیمیایی خطرناک در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس مطالعات گیباس (۱۹۷۳) و سالومون و فورسترن (۱۹۸۴) حدود ۳۰ تا ۹۸ درصد از فلزات موجود در آب رودخانه تمایل به تجمع در فاز رسوب را دارند. عناصر بالقوه سمی

رسوبات بستر به عناصر سنگین و منابع آن در مقایسه با استانداردهای کیفیت رسوب در رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت، به دلیل ورود انواع آلاینده‌های کشاورزی، صنعتی، خانگی و بیمارستانی انجام شد.

مواد و روش‌ها

گستره مورد مطالعه

رودخانه کارون به طول بیش از ۹۵۰ کیلومتر و آبدهی حدود ۲۵ میلیارد مترمکعب در سال، بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه ایران و استان خوزستان است که به شمال‌باختر خلیج فارس می‌ریزد (مرشدی و همکاران، ۱۳۹۲). تراز اکولوژیک رودخانه کارون بر دبی پایه ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است و منبع تأمین آب کشاورزی، صنعت و شرب در استان خوزستان است (کریمی، ۱۳۹۵). حجم رسوبگذاری در این بازه به حدود ۲ میلیون متر مکعب در سال می‌رسد (شجاعیان و خدابخشی، ۱۳۹۶).

محدوده‌ای از رودخانه کارون که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته، شامل بخش جلگه‌ای اهواز از قسمت جنوبی شهر اهواز، از پل پنجم (پل جمهوری) تا فارسیت به طول تقریباً ۱۸ کیلومتر است که در برگیرنده بازه‌های شهری و روستایی، اراضی کشاورزی و صنعتی می‌باشد (شکل ۱). در محدوده مورد مطالعه علاوه بر شهر اهواز، کانون‌های جمعیتی شامل شهرستان کارون، کوت سید صالح، روستاهای ابودبس و جنگیه به همراه صنایع فولاد و چند تصفیه خانه آب (تصفیه‌خانه صنایع فولاد و تصفیه‌خانه گلستان)، همچنین بیمارستان‌های دولتی و آموزشی گلستان، سینا و شهید باقی، اراضی کشاورزی و یک کشتارگاه صنعتی وجود دارد. به واسطه فعالیت‌های گسترده کشاورزی، شهری و صنعتی، عموماً بوم سازگان رودخانه کارون آلوده فرض می‌شوند.

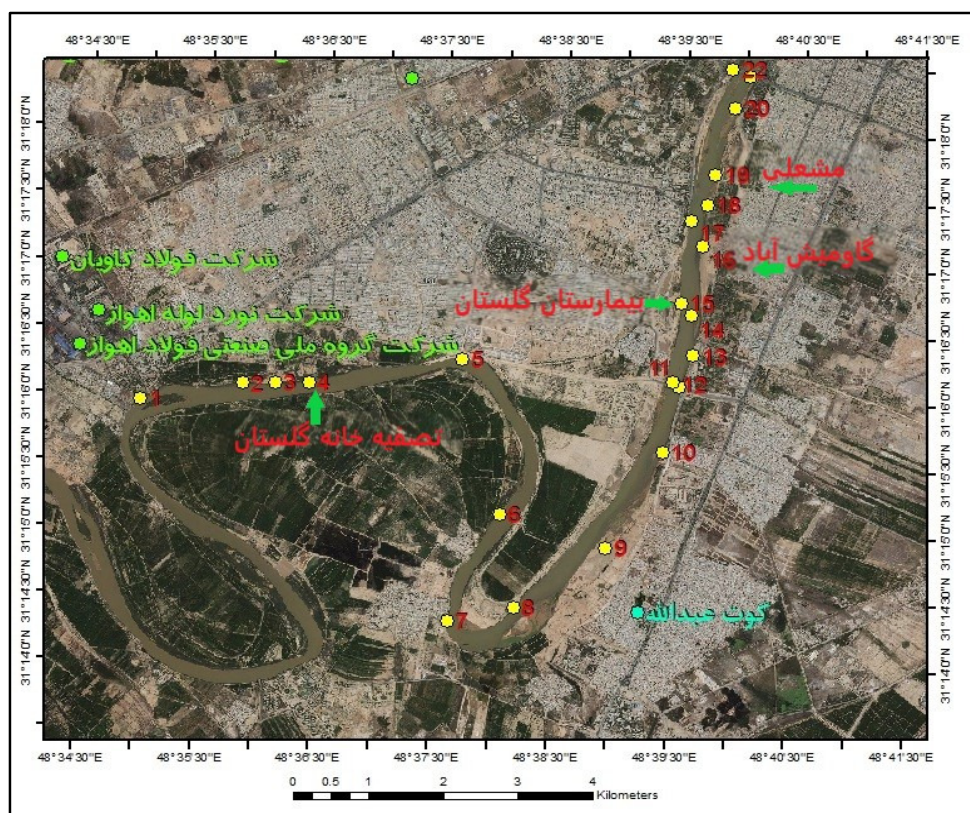
روش پژوهش

در پژوهش حاضر برای دستیابی به اهداف موردنظر، روش پژوهش بر پایه مطالعات میدانی، آزمون‌های آزمایشگاهی، تحلیل‌های ژئوشیمیایی و آشکارسازی سطح آلودگی‌ها بر اساس استانداردهای بین‌المللی کیفیت رسوب (ISQGs, PEL, SEL) طراحی شد.

تخلیهٔ پساب‌های مایع، رواناب‌های زمینی، نشت حاصل از منابع صنعتی و کشاورزی و نزولات جوی آلوده می‌شوند (راست‌منش و همکاران، ۱۳۹۴) که از منابع طبیعی یا انسان ساخت سرچشمه می‌گیرند. فلزات پس از ورود به محیط آبی، از راه فرایندهای فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی در رسوبات نهشته می‌شوند (آئلو و همکاران، ۲۰۰۸) به نحوی که بیش از ۹۰ درصد فلزات سنگین در پیکره‌های آبی در ترکیب با ذرات معلق و رسوبات باقی می‌مانند (علی‌بیگی و همکاران، ۱۳۹۶). از سوی دیگر رسوبات سطحی رودخانه‌ها به دلیل مجاورت آسان در تماس با فاضلاب‌های شهری و صنعتی، در برابر آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین آسیب‌پذیر هستند (میلر، ۱۹۹۷). به همین دلیل تعیین غلظت فلزات سنگین در رسوبات برای ارزیابی کیفیت زیست‌بوم‌های آبی امری ضروری است.

بسیاری از استانداردهای کیفی توسعه داده شده بر اساس غلظت عناصر سنگین و سمی همچون Pb, Cu, Cd, As, Ni, Zn, Ag, Cr، هیدروکربن نفتی و آلودگی آلی پایدار بنا شده‌اند. نهشته‌های ریزدانه و مواد آلی در محیط‌های رودخانه‌ای به دلیل داشتن قابلیت جذب سطحی ناشی از بار منفی، خاستگاه کاتیون‌های فلزات سنگین بوده و در خود آثار رویدادهایی را که منجر به افزایش غلظت عناصر شده‌اند را ثبت می‌کنند. بنابراین بررسی آلودگی رسوبات شرایط را برای تدقیق عوامل و منشأ آلودگی‌ها و اتخاذ اقدامات مدیریتی کاهش‌دهنده غلظت آلاینده‌ها فراهم می‌آورد (غریب‌رضا و همکاران، ۱۳۹۹).

پژوهش‌های مشابه و گسترده‌ای در زمینه آلودگی عناصر سنگین در محیط‌های مختلف آبی انجام شده که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های (اوستا اگلو و اسلام، ۲۰۲۰، جونپور و همکاران، ۲۰۲۰، میلایس و همکاران، ۲۰۱۹، زارع‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶، رفیعی و همکاران، ۱۳۹۳، زارع‌زاده و همکاران، ۲۰۱۷، غریب‌رضا و همکاران، ۱۳۹۹، زارع‌زاده و رضایی، ۱۳۹۳، غلام‌دخت بندری و همکاران، ۱۳۹۵) اشاره نمود. با توجه به گستردگی کمی و تنوع فعالیت‌های انسانی در دشت خوزستان و در نظر گرفتن این مهم که عمده پساب‌ها و فاضلاب‌ها به صورت مستقیم یا غیرمستقیم وارد سیستم آبی منطقه می‌شوند، بررسی آلودگی‌ها، آلاینده‌ها و سطوح مخاطرات ضرورتی اجتناب ناپذیر است. لذا، پژوهش فوق با هدف آگاهی از خطر آلودگی



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری رسوبات سطحی از بخش‌های مختلف رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت

مطالعات میدانی

پیمایش‌های میدانی در دو بخش پایش کانون‌های آلودگی و طرح نمونه برداری تنظیم شد. نمونه‌برداری به عنوان مرحله اصلی عملیات میدانی با استراتژی قطعی و پس از شناسایی کانون‌های آلودگی، شرایط مورفولوژی رودخانه، جزایر و سدهای میان کانالی، جریان رودخانه و حوضچه‌های آرامش قبل و بعد از کانون‌های آلاینده به انجام رسید. در روش استراتژی قطعی (رادتک، ۲۰۰۵)، منطقه مورد مطالعه به بازه‌های کوچک‌تری بر اساس شناخت بدست آمده از کانون‌های آلاینده تقسیم و محل برداشت بر مبنای قضاوت کارشناسی است و هیچ نمونه‌ای مطابق شبکه یا اتفاقی برداشته نخواهد شد. بدین ترتیب، تعداد ۲۱ نمونه سطحی از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری از رسوبات ریزدانه بستر رودخانه کارون در بازه مورد نظر با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر رسوب دست نخورده، مجهز به لوله پلی‌پروپیلن شفاف برداشته شد و موقعیت نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه GPS ثبت گردید (شکل ۱). در بازه مورد مطالعه مهم‌ترین کاربری اراضی، در بخش بالادست شهری، بخش میانی کشاورزی و روستایی و پایین دست شهری و صنعتی است (شکل ۱).

نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ برای بررسی وضعیت آورد آلودگی‌های ناشی از صنایع فولاد، زباله‌های بیمارستانی، فاضلاب تصفیه خانه گلستان و شهرک پیام در بخش پایین دست مورد بررسی قرار گرفتند. از نمونه ۵ تا ۸، کانون‌های غیرنقطه‌ای آلودگی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و روستایی به منابع آب و رسوب رودخانه کارون، در مجاورت روستاهای ابودیس، جنگیه و غرب اراضی دادگستری در نزدیکی اکیاتان برداشت شدند. نمونه شماره ۹ تا ۲۱ در قسمت بالادست و بیشتر درون بازه شهری اهواز از کانون‌های آلودگی نقطه‌ای شامل فاضلاب‌های شهری و خانگی، بیمارستانی و صنعتی به منظور بررسی اثر کانون‌های آلودگی درون‌شهری مورد بررسی قرار گرفتند. بدین ترتیب، نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که بیشینه اثرات منشأهای آلودگی پایش شوند. شکل ۲ تصویری از کانون‌های آلودگی نقطه‌ای در محدوده پژوهش فوق را نشان می‌دهد. برای برآورد مقادیر غلظت پایه، یک مغزه رسوبی در بالا دست پل فولاد با ضخامت ۷۸ سانتی‌متر به شکل دست نخورده با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر برداشت گردید. این مغزه رسوبی بلافاصله بعد از برداشت و

فریز کردن با فواصل منظم ۲ سانتی‌متر با کاردک برش داده شد. بدین ترتیب تعداد ۳۹ نمونه تهیه و برای بررسی‌های آزمایشگاهی ارسال گردید.

تخلیه آب به صورت عمودی حمل و در سردخانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان منتقل و در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت به همان صورت عمودی نگهداری شد. مغزه رسوبی، بعد از



شکل ۲. تصویری از کانون‌های آلودگی نقطه‌ای در رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت

(HCl) و به حجم رساندن و قرائت غلظت عناصر فلزی، شبه فلزی و سولفور با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جرمی پلاسمای القایی در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی کشور بوده است. مقادیر غلظت عناصر بر اساس وزن خشک برحسب (mg/kg) محاسبه شده است. درجه‌بندی دستگاه ICP-MS از طریق نمونه استاندارد و نمونه صفر و کنترل کیفیت از طریق تکرار نمونه آزمون برای برخی نمونه‌ها انجام شده است. مراحل این فرایند از روش ورنیمونت و اسپندلی (۱۹۸۵) اقتباس شده است. همچنین مقادیر درصد کربن آلی بر اساس دستورالعمل والکی و بلک (۱۹۸۴) تعیین شد.

روش‌های بررسی آلودگی رسوبات فاکتور آلودگی و درجه آلودگی

برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین و سمی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های مرسوم هاکانسون (۱۹۸۰) از محاسبه فاکتور آلودگی^۲، درجه آلودگی^۳ استفاده شد. فاکتور آلودگی (C_f) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$C_f = C_x / C_b \quad (1)$$

بررسی‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های رسوبی پس از برداشت و انجام ملاحظات بسته‌بندی و نگهداری، در کیسه‌های پلاستیکی مخصوص (زیپ کیپ) قرار گرفته و پس از ثبت محل و کد نمونه تا زمان آماده‌سازی در فریزر نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه آب و خاک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، برای آزمون دانه‌بندی و تعیین غلظت عناصر آماده‌سازی شدند. برای این منظور، نمونه‌ها پس از خشک شدن در دمای C ۸۰° به دو قسمت به ترتیب برای بررسی‌های دانه‌بندی و بخش ریزدانه تر از ۲ میلی‌متر برای بررسی‌های ژئوشیمیایی تفکیک شدند. نمونه‌ها با استفاده از سری کامل الک استاندارد UNIFIED^۱ و آزمایش هیدرومتری دانه‌بندی شدند. بخش ریزدانه تر از ۲ میلی‌متر نیز با استفاده از هاون چینی پودر شدند (توکر، ۱۹۸۸).

بر اساس روش کینگ‌استون و جیسی (۱۹۹۸) مقدار ۲۵/۰ گرم از رسوبات پودر شده توزین و برای تعیین غلظت عناصر مورد نظر در پژوهش آماده‌سازی گردید. این مرحله شامل هضم نمونه‌ها با اسیدهای هیدروفلوریک (HF)، پرکلریک (HClO₄)، نیتریک (HNO₃) و هیدروکلریک

² Contamination factor

³ Degree of contamination

¹ Unified Soil Classification System

$$EF = \frac{C_i/C_r}{B_n/B_r} \quad (3)$$

که، C_i غلظت به دست آمده برای عنصر مورد بررسی، C_r غلظت عنصر نرمال کننده در همان نمونه، B_n غلظت پایه عنصر مورد بررسی و B_r غلظت پایه عنصر نرمال کننده است. بر اساس روش ساترلند و تولسا (۲۰۰۰)، مقادیر متفاوت غنی‌شدگی به شرح زیر طبقه‌بندی شده است. فاکتور غنی‌شدگی برای برآورد تاثیر فعالیت‌های انسان‌زاد بر آلودگی رسوبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش از عنصر اسکاندیم به دلیل غیرمتحرک بودن و داشتن کمترین تغییرات به عنوان عنصر مرجع برای محاسبه فاکتور غنی‌شدگی استفاده شد (سینکس و رایت، ۱۹۸۸؛ رفیعی و همکاران، ۱۳۹۳).

که در آن C_x غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و C_b غلظت هر عنصر در زمینه است و برای آن چهار رده تعریف شده است (جدول ۱).

مجموع فاکتور آلودگی برای عناصر مورد بررسی در هر ایستگاه، نشان‌دهنده درجه آلودگی (C_d) است (رابطه ۲).

$$C_d = \sum C_f \quad (2)$$

فاکتور غنی‌شدگی^۴

فاکتور غنی‌شدگی یکی از پرکاربردترین شاخص‌های کیفیت رسوب در محیط‌های آبی به شمار می‌رود (رابطه ۳) که توسط (لورینگ و همکاران (۱۹۹۵) ارایه شده و توسط ساترلند و تولسا (۲۰۰۰) توسعه داده شده است.

جدول ۱. رده‌بندی آلودگی رسوبات بر اساس فاکتور و درجه آلودگی (هاکانسون، ۱۹۸۰).

فاکتور آلودگی	رده	درجه آلودگی	رده
$C_f < 1$	آلودگی بسیار کم	$C_d < 8$	کم
$1 \leq C_f < 3$	آلودگی متوسط	$8 \leq C_d < 16$	متوسط
$3 \leq C_f < 6$	قابل ملاحظه	$16 \leq C_d < 32$	قابل ملاحظه
$C_f > 6$	آلودگی بسیار زیاد	$C_d > 32$	زیاد

که در آن C_n ، غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه و B_n غلظت همان عنصر در نمونه زمینه است. ضریب $1/5$ نیز برای کمینه کردن اثر تغییرات احتمالی در غلظت‌های زمینه به علت تأثیرات زمین‌شناختی اعمال می‌شود. شاخص زمین‌انباشتگی هفت گروه یا کلاس دارد که براساس مقادیر آن، رسوبات از غیرآلوده تا به شدت آلوده طبقه‌بندی می‌شوند (گنزالس و همکاران، ۲۰۰۶).

I_{geo} :	$I_{geo} \leq 0$	غیرآلوده
	$0 < I_{geo} \leq 1$	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
	$1 < I_{geo} \leq 2$	آلودگی متوسط
	$2 < I_{geo} \leq 3$	آلودگی متوسط تا زیاد
	$3 < I_{geo} \leq 4$	آلودگی زیاد
	$4 < I_{geo} \leq 5$	آلودگی زیاد تا خیلی زیاد
	$I_{geo} > 5$	آلودگی خیلی زیاد

معیارهای کیفیت رسوب SQGs

تعیین این که آیا غلظت فلزات سنگین در رسوبات تهدیدی برای زندگی آبزیان در بر خواهد داشت مهم است. برای بررسی این موضوع، غلظت‌های بدست آمده با مقادیر

منشاء زمین‌زاد و انسان‌زاد هر یک از عناصر بر اساس طبقه‌بندی ژانگ و لیو (۲۰۰۰) مشخص شد. مقادیر EF کمتر از $1/5$ نشان‌دهنده نقش عوامل طبیعی و فرایند هوازدگی و EF بیشتر از $1/5$ نشان‌دهنده سهم عوامل انسانی در غنی‌شدگی رسوبات به فلزات است.

EF :	$EF \leq 2$	غنی‌شدگی کم
	$2 < EF \leq 5$	غنی‌شدگی متوسط
	$5 < EF \leq 20$	غنی‌شدگی قابل توجه
	$20 < EF \leq 40$	غنی‌شدگی زیاد
	$EF > 40$	غنی‌شدگی خیلی زیاد

شاخص زمین‌انباشت^۱ (I_{geo})

شاخص زمین‌انباشت برای اولین بار به وسیله مولر پیشنهاد و اندیس مولر نامیده شد (مولر، ۱۹۷۹). این شاخص برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در رسوبات به کار برده می‌شود (آدری، ۲۰۰۴). این شاخص به صورت زیر بیان می‌شود (مولر، ۱۹۷۹).

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (4)$$

¹Geo- accumulation Index

⁴ Enrichment Factor

استفاده شده است. ضرایب همبستگی عناصر سنگین در رسوبات با آزمون همبستگی پیرسون به منظور تفسیر آماری رابطه عناصر سنگین با یکدیگر و منشأیابی آنها استفاده شده است. درخت خوشه‌ای یا دندوگرام، گزینه‌های هم‌وزن را به هم متصل می‌کند تا خوشه‌های بزرگ‌تر ایجاد شود و تشابهات مابین نمونه‌ها را سنجش و ارزیابی نماید (چوئری و همکاران، ۲۰۰۹).

نتایج و بحث

غلظت عناصر سنگین

نتایج حاصل برای عناصر سنگین و سمی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری به همراه درصد کربن آلی، درصد رس و پارامترهای آماری نمونه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان از برتری هفت عنصر سنگین به ترتیب $Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > As > Cd$ از منظر غلظت در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه پل پنجم (جمهوری) تا فارسیت دارد. غلظت فلز سمی کادمیوم با حداقل ضریب تغییر، در اکثر نمونه‌ها نسبتاً یکسان است و دارای روند تقریباً مشابهی با عنصر آرسنیک است. غلظت فلزات سنگین سرب و نیکل، کروم و مس در بیشتر ایستگاه‌های نمونه‌برداری مشابه می‌باشد، اما روی در اکثر ایستگاه‌ها افزایش بیشتری نشان می‌دهد (شکل ۳).

استاندارد ISQGs^۲، سطح اثر شدید (SEL)^۳، سطح اثرات احتمالی (PEL)^۴ و مقادیر پایه جهانی مقایسه شده است (جدول‌های ۲ و ۳). شایان توجه است که این مرحله از رایج‌ترین روش‌های بررسی وضعیت آلودگی رسوبات در نظر گرفته می‌شود (فورتسکیو، ۱۹۹۲؛ رادنیک و گائو، ۲۰۱۴). همچنین نسبت بین درصد مواد آلی (TOC)^۵ و درصد سولفورکل (TS)^۶ یکی از شاخص‌هایی است که برای بررسی شرایط اکسیداسیون و احیا محیط رسوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (برنر و ریزول، ۱۹۸۴). نسبت TOC:TS بالاتر از ۵ نشان‌دهنده شرایط اکسیداسیون، نسبت TOC:TS بین ۵ تا ۱/۵ بیانگر محیط نسبتاً احیایی و بالاخره نسبت TOC:TS کمتر از ۱/۵ نشان‌دهنده شرایط احیایی محیط رسوبی است.

خوشه‌بندی سلسله مراتبی

در پژوهش حاضر به منظور شناسایی دسته عناصر فلزی دارای رفتار ژئوشیمیایی مشابه در محیط رسوبی رودخانه‌ای و نیز در یافتن مهم‌ترین جاذب کاتیونی مانند مواد آلی و ذرات رسی در بازه‌های مورد بررسی از پارامترهای آماری (میانگین، میانه، دامنه، انحراف معیار و ضریب تغییر) و تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی (AHC) با ضریب تشابه پیرسون در نرم‌افزار XLSTAT2018

جدول ۲. غلظت پایه عناصر فلزی و شبه‌فلزی در پوسته زمین (mg/kg) (CCME 1995, EPA 2001)

Parameters	References			
	Rudnick and Gao (2003)	Taylor (1964)	Fortescue (1992)	Rickwood (1983)
As	5	1.8	0.2	1.7-5
Cd	---	---	0.16	0.1-5
Cr	92	100	122	70-330
Cu	---	55	68	14-100
Ni	47	75	99.0	23-200
S	---	260	340	260-1200

جدول ۳. مقادیر استاندارد کیفیت رسوبات برای عناصر اصلی و سمی (mg/kg) (CCME 1995, EPA 2001)

Sediment quality indices	As	Cr	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd
LEL	6	26	120	16	16	31	0.6
SEL	33	110	270	110	50	110	9
ISQG	5.9	37.3	123	35.7	-	35	0.6
PEL	17	90	315	197	-	93.1	3.5
CBSQG	9.8	43	120	32	23	36	0.99

⁵ Total Organic Carbon

⁶ Total Sulfur

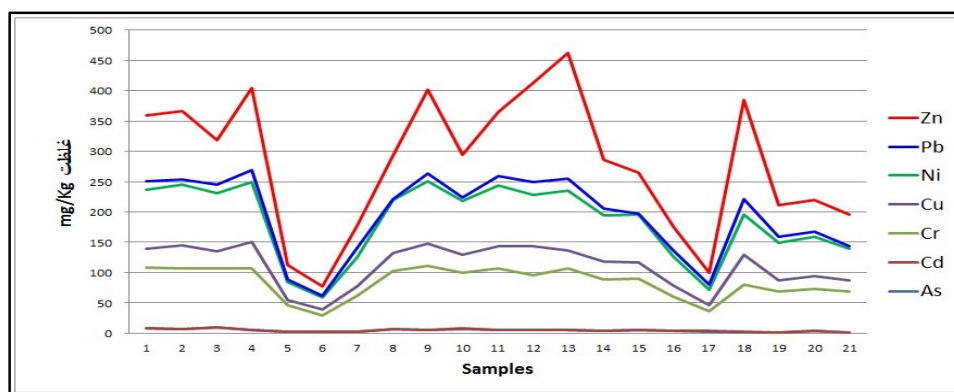
² Interim Sediment Quality Guidelines

³ Severe Effect Level

⁴ Probable Effect Level

جدول ۴. غلظت عناصر فلزی سمی (mg kg^{-1}) و کربن آلی و رس ($\%$) در رسوبات سطحی رودخانه کارون، بازه پل پنجم تا فارسیت

Sample No.	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	TOC	Clay	Texture
۱	۷/۹۵	۰/۲۲	۱۰۰/۶۹	۳۰/۱۹	۹۸/۰۶	۱۳/۴۷	۱۰۸/۹۳	۱/۱۹	۲۹/۶۵	Silty
۲	۶/۸۲	۰/۱۰	۱۰۰/۳۷	۳۷/۴۹	۱۰۰/۰۹	۸/۵۱	۱۱۳/۴۴	۲/۴۷	۳۶/۰۷	Silty
۳	۹/۷۲	۰/۲۳	۹۶/۸۴	۲۷/۹۲	۹۶/۶۵	۱۴/۳۷	۷۳/۲۸	۰/۷۵۷	۳۲/۸۶	Silty
۴	۵/۲۵	۰/۲۴	۱۰۲/۱۲	۴۳/۲۶	۹۹/۲۰	۱۹/۰۰	۱۳۵/۵۴	۲/۱۵	۳۴/۴۶	Silty
۵	۲/۶۳	۰/۱۵	۴۳/۴۹	۹/۰۰	۲۸/۷۲	۵/۰۳	۲۳/۴۶	۰/۱۳	...	sand
۶	۲/۵۷	۰/۲۵	۲۶/۸۰	۹/۵۴	۲۰/۴۳	۲/۸۰	۱۴/۴۸	۰/۰۹۹	...	sand
۷	۲/۸۳	۰/۳۳	۵۹/۰۶	۱۴/۶۰	۴۷/۸۸	۱۵/۵۱	۳۷/۱۱	۰/۳۰	۱۳/۶۰	Silt
۸	۶/۶۱	۰/۲۰	۹۵/۲۵	۲۹/۹۴	۸۷/۵۰	۱/۹۵	۷۲/۲۹	۰/۸۹	۳۱/۲۵	Silty
۹	۴/۹۳	۰/۰۵	۱۰۶/۶۱	۳۵/۶۵	۱۰۳/۹۴	۱۲/۴۹	۱۳۸/۳۲	۰/۶۳	۴۴/۰۹	Silty
۱۰	۷/۴۵	/۱۹	۹۲/۷۵	۲۹/۱۰	۸۸/۳۷	۶/۵۷	۶۹/۹۶	۱۳	۲۹/۶۵	Silty
۱۱	۴/۸۶	۰/۲۹	۱۰۱/۹۷	۳۶/۶۹	۱۰۰/۴۱	۱۴/۵۶	۱۰۵/۶۰	۲/۷۷	۴۲/۴۸	Silty
۱۲	۵/۵۲	۰/۴۵	۹۰/۳۴	۴۷/۲۹	۸۵/۰۳	۲/۱۰۰	۱۶۳/۹۶	۰/۷۴	۲۳/۲۳	Silt
۱۳	۵/۶۴	۰/۲۰	۱۰۱/۱۵	۲۹/۷۵	۹۸/۴۶	۱۹/۹۳	۲۰۷/۳۲	۰/۹۷	۳۶/۰۷	Silty
۱۴	۴/۰۸	۰/۱۸	۸۴/۷۳	۲۸/۵۶	۷۶/۲۹	۱۲/۱۱	۸۰/۶۶	۰/۷۵	۲۳/۲۳	Silt
۱۵	۴/۸۳	۰/۲۹	۸۵/۳۷	۲۶/۱۴	۷۸/۵۱	۲/۵۴	۶۷/۷۱	۱/۲۴	۲۶/۴۴	Silt
۱۶	۳/۹۳	۰/۰۹	۵۶/۶۵	۱۷/۳۷	۴۷/۹۶	۱۰/۶۰	۳۹/۸۱	۰/۱۶	۱۶/۸۱	Silt
۱۷	۳/۱۷	۰/۱۷	۳۲/۵۹	۹/۴۸	۲۴/۶۳	۹/۱۷	۲۰/۳۱	۳/۳۱	...	sand
۱۸	۱/۷۸	۰/۲۳	۷۸/۰۲	۴۹/۰۸	۶۷/۳۷	۲۵/۰۸	۱۶۳/۴۶	۰/۲۵	۱۲/۰۰	Silt
۱۹	۰/۹۵	۰/۱۹	۶۷/۱۰	۱۹/۲۶	۶۲/۰۸	۸/۹۶	۵۳/۳۶	۰/۲۶	۱۶/۸۱	Silt
۲۰	۳/۸۲	۰/۳۴	۶۹/۴۵	۲۰/۳۸	۶۴/۶۳	۹/۴۸	۵۱/۰۶	۰/۲۸	۱۶/۸۱	Silt
۲۱	۰/۹۵	۰/۲۰	۶۷/۱۲	۱۸/۶۸	۵۲/۹۶	۳/۷۰	۵۱/۸۵	۰/۶۷	۱۴/۱۲	Silt
میانگین	۴/۵۸	۰/۲۲	۷۹/۰۲	۲۷/۱۱	۷۲/۸۲	۱۱/۹۱	۹۰/۸۷	۱/۱۲	۲۳/۸۱	Silt
میانه	۴/۸۳	۰/۲۰	۸۵/۳۷	۲۸/۵۶	۷۸/۵۱	۱۰/۶۰	۷۲/۲۹	۰/۷۶	۲۳/۲۳	Silt
انحراف معیار	۲/۲۰	۰/۰۹	۲۴/۴۸	۱۲/۰۵	۲۷/۲۷	۶/۴۱	۵۳/۶۸	۰/۹۲	۱۳/۵۲	Silt
حداقل	۰/۹۵	۰/۰۴۵	۲۶/۸	۹/۰۰	۲۰/۴۳	۱/۵۰	۱۴/۴۸	۰/۱۰	...	
حداکثر	۹/۷۲	۰/۰۵	۱۰۷/۰۰	۴۹/۸۰	۱۰۴/۰۰	۲۵/۸۰	۲۰۷/۰۰	۳/۳۱	۴۴/۹۰	



شکل ۳. روند توزیع غلظت عناصر سنگین در رودخانه کارون، بازه پل پنجم تا فارسیت

فاکتور آلودگی و درجه آلودگی

نتایج محاسبه فاکتور و درجه آلودگی رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت در جدول ۵ و تغییرات فاکتور آلودگی و درجه آلودگی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۵ ارایه شده است. بیش‌ترین میزان

فاکتور آلودگی را عناصر نیکل، مس و روی به ترتیب با میانگین ۳/۶۴، ۳/۳۹ و ۳/۰۵ با رده آلودگی زیاد به خود اختصاص داده‌اند و بعد از آن عناصر کروم، آرسنیک و سرب با فاکتور آلودگی متوسط و کادمیوم در رده آلودگی کم قرار می‌گیرند (جدول ۵). بیش‌ترین میزان فاکتور آلودگی

جدول ۸ ارایه شده است. عنصر کروم دارای کمترین دامنه تغییرات و غنی‌شدگی کم است و عنصر مس و روی به ترتیب دارای بیش‌ترین دامنه تغییرات و بیش‌ترین غنی‌شدگی هستند (جدول ۶). غنی‌شدگی عنصر کادمیوم، آرسنیک، کروم، نیکل و سرب در تمامی نمونه‌ها در سطح کم است (جدول ۶). غنی‌شدگی عنصر مس و روی در همه نمونه در سطح کم تا متوسط بوده (جدول ۶) و این شرایط بیانگر تأثیر آلاینده‌های شهری و صنعتی و غنی‌شدگی کم تا متوسط در بازه فوق است. کمترین غنی‌شدگی عنصر روی در ایستگاه‌های ۵، ۶ و ۷ دیده می‌شود که از محدوده بدون آلودگی‌های شهری و صنعتی برداشت شده و نمونه‌ها از نظر دانه‌بندی بدون رس و یا دارای میزان رس پایین هستند. ایستگاه‌های شماره ۱۸، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب دارای بالاترین غنی‌شدگی از عناصر مس و روی هستند. در حقیقت می‌توان گفت عناصر مس و روی در این ایستگاه‌ها دارای منشاء انسان‌زاد هستند.

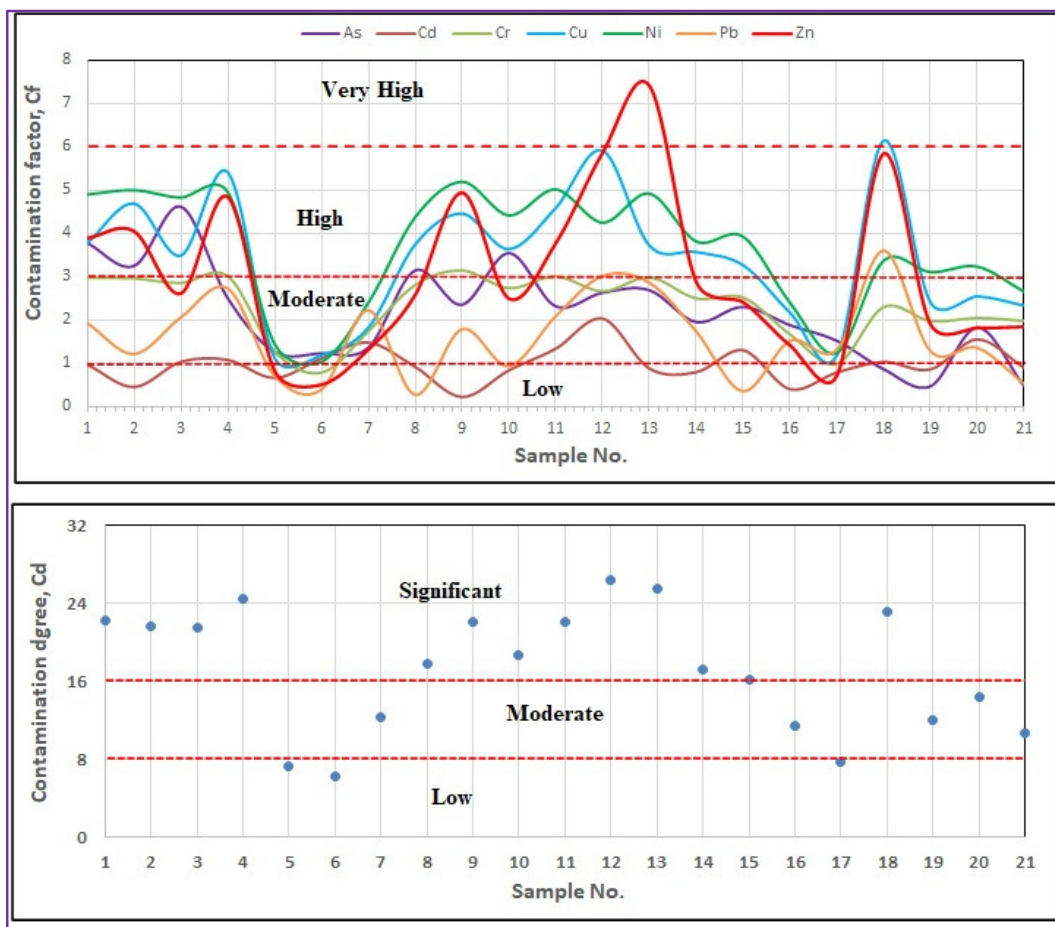
را عنصر روی در ایستگاه شماره ۱۳ و عنصر مس در ایستگاه نمونه‌برداری شماره ۱۸ با رده آلودگی بسیار زیاد به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). اما درجه آلودگی در بیش از ۸۵ درصد نمونه‌ها متوسط تا قابل‌ملاحظه است. نمونه‌های شماره ۱۲ (بالادست پل فولاد) و ۱۳ (فاضلاب تصفیه خانه فولاد) به ترتیب با درجه آلودگی ۲۶/۳۳ و ۲۵/۴۴ دارای بالاترین درجه آلودگی هستند (شکل ۴). در واقع افزایش چشمگیر آلودگی در ایستگاه‌های ۱۲ و ۱۳ به علت حجم بالای فاضلاب‌های شهری و صنعتی در این مکان‌ها است. از طرفی در ایستگاه‌های شماره ۵، ۶ و ۱۷ تقریباً تمامی عناصر کمترین تغییرات فاکتور و درجه آلودگی را نشان می‌دهند (شکل ۴).

فاکتور غنی‌شدگی

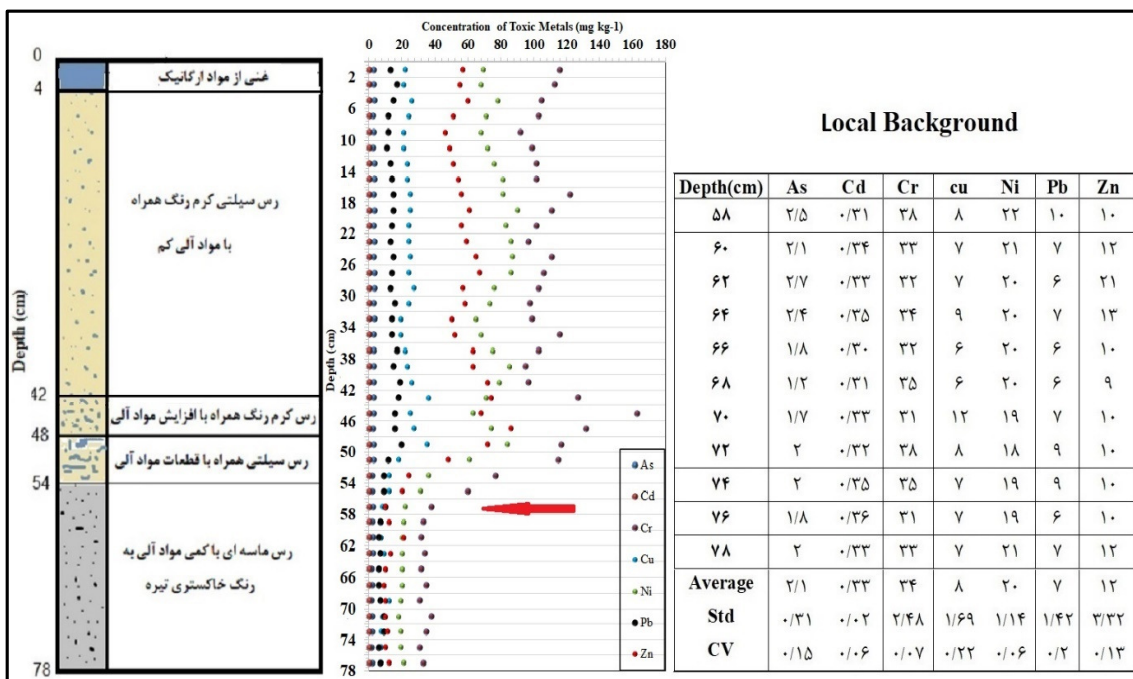
پارامترهای غنی‌شدگی هفت عنصر انتخابی مورد مطالعه به منظور آشکارسازی هرچه بیشتر اثرگذاری منشأهای پیرامون رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت در

جدول ۵. فاکتور و درجه آلودگی عناصر سنگین (mg/kg) در رسوبات سطحی رودخانه کارون، پل پنجم تا فارسیت

Indices Sample No.	Cf							Cd	رده
	As	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn		
۱	۳/۷۹	۰/۹۸	۲/۹۶	۴/۹۰	۳/۷۷	۱/۹۲	۳/۸۹	۲۲/۲۲	قابل‌ملاحظه
۲	۳/۲۵	۰/۴۶	۲/۹۵	۵	۴/۶۹	۱/۲۲	۴/۰۵	۲۱/۶۲	قابل‌ملاحظه
۳	۴/۶۳	۱/۰۴	۲/۸۵	۴/۸۳	۳/۴۹	۲/۰۵	۲/۶۲	۲۱/۵۱	قابل‌ملاحظه
۴	۲/۵۰	۱/۰۸	۳	۴/۹۶	۵/۴۱	۲/۷۱	۴/۸۴	۲۴/۵۱	قابل‌ملاحظه
۵	۱/۲۵	۰/۶۷	۱/۲۸	۱/۴۴	۱/۱۲	۰/۷۲	۰/۸۴	۷/۳۲	کم
۶	۱/۲۲	۱/۱۲	۰/۷۹	۱/۰۲	۱/۱۹	۰/۴۰	۰/۵۲	۶/۲۶	کم
۷	۱/۳۵	۱/۴۸	۱/۷۴	۲/۳۹	۱/۸۳	۲/۲۲	۱/۳۳	۱۲/۳۳	متوسط
۸	۳/۱۵	۰/۹۲	۲/۸۰	۴/۳۷	۳/۷۴	۰/۲۸	۲/۵۸	۱۷/۸۵	قابل‌ملاحظه
۹	۲/۳۵	۰/۲۳	۳/۱۴	۵/۲۰	۴/۴۶	۱/۷۸	۴/۹۴	۲۲/۰۹	قابل‌ملاحظه
۱۰	۳/۵۵	۰/۸۴	۲/۷۳	۴/۴۲	۳/۶۴	۰/۹۴	۲/۵۰	۱۸/۶۱	قابل‌ملاحظه
۱۱	۲/۳۱	۱/۳۴	۳	۵/۰۲	۴/۵۹	۲/۰۸	۳/۷۷	۲۲/۱۱	قابل‌ملاحظه
۱۲	۲/۶۳	۲/۰۳	۲/۶۶	۴/۲۵	۵/۹۱	۳	۵/۸۶	۲۶/۳۳	قابل‌ملاحظه
۱۳	۲/۶۹	۰/۸۹	۲/۹۷	۴/۹۲	۳/۷۲	۲/۸۵	۷/۴۰	۲۵/۴۴	قابل‌ملاحظه
۱۴	۱/۹۴	۰/۸۰	۲/۴۹	۳/۸۱	۳/۵۷	۱/۷۳	۲/۸۸	۱۷/۲۳	قابل‌ملاحظه
۱۵	۲/۳۰	۱/۳۱	۲/۵۱	۳/۹۳	۳/۲۷	۰/۳۶	۲/۴۲	۱۶/۰۹	قابل‌ملاحظه
۱۶	۱/۸۷	۰/۴۱	۱/۶۷	۲/۴۰	۲/۱۷	۱/۵۱	۱/۴۲	۱۱/۴۶	متوسط
۱۷	۱/۵۱	۰/۷۹	۰/۹۹	۱/۲۳	۱/۱۹	۱/۳۱	۰/۷۳	۷/۷۵	کم
۱۸	۰/۸۵	۱/۰۴	۲/۲۹	۳/۳۷	۶/۱۴	۳/۵۰	۵/۸۴	۲۳/۱۱	قابل‌ملاحظه
۱۹	۰/۴۵	۰/۸۶	۱/۹۷	۳/۱۰	۲/۴۱	۱/۲۸	۱/۹۱	۱۱/۹۹	متوسط
۲۰	۱/۸۲	۱/۵۵	۲/۰۴	۳/۲۳	۲/۵۵	۱/۳۵	۱/۸۲	۱۴/۳۷	متوسط
۲۱	۰/۴۵	۰/۹۰	۱/۹۷	۲/۶۵	۲/۳۳	۰/۵۳	۱/۸۵	۱۰/۶۹	متوسط
میانگین	۲/۱۸	۰/۹۹	۲/۳۲	۳/۶۴	۳/۳۹	۱/۶۱	۳/۰۵	۱۷/۱۸	قابل‌ملاحظه



شکل ۴. تغییرات فاکتور و درجه آلودگی عناصر در ایستگاه‌های نمونه‌برداری سطحی در بازه پل پنجم تا فارسیت



شکل ۵. نمودار تغییرات غلظت عناصر فلزی سمی و بافت مغزه رسوبی همراه با پارامترهای آماری از عمق ۵۸ تا ۷۸ سانتی‌متری

مقادیر غلظت پایه

شده در گذشته، از ورودی‌های مهم فلزی حاصل از فعالیت‌های انسانی نسبتاً جدا هستند و همچنین فلزات پس از دفن تحرک ندارند (چوئی و همکاران، ۲۰۱۲).

شاخص زمین‌انباشت

مقادیر محاسبه شده شاخص زمین‌انباشت (I_{geo}) فلزات سنگین و سمی برای رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه در جدول ۷ آمده است. روی و بعد از آن نیکل بیش‌ترین شاخص زمین‌انباشت را نشان می‌دهند و در رده شدت آلودگی متوسط قرار می‌گیرند. بقیه عناصر انتخابی در محدوده غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار دارند. کادمیوم و سرب به ترتیب با ۰/۴۳ و ۰/۵۹ کمترین شاخص زمین‌انباشت را به خود اختصاص می‌دهند (جدول ۷).

مقادیر غلظت پایه، با استفاده از برداشت یک مغزه رسوبی در بالادست پل فولاد با ضخامت ۷۸ سانتی‌متر برآورد گردید. شکل ۳ نمودار تغییرات غلظت هفت عنصر سمی شامل آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی در مغزه رسوبی فوق به همراه تغییرات بافت رسوبی، غلظت و پارامترهای آماری از عمق ۵۸ تا ۷۸ سانتی‌متری را نشان می‌دهد. نبود تغییرات محسوس غلظت عناصر مورد نظر در مغزه رسوبی از عمق ۵۸ سانتی‌متری تا ۷۸ سانتی‌متری ما را به یک میانگین غلظت پایه عنصری در محیط مورد مطالعه هدایت می‌کند (شکل ۵). راست‌منش و همکاران (۱۳۹۴) غلظت عناصر در عمق ۵۰ سانتی‌متری را به عنوان زمینه طبیعی برای رودخانه کارون مورد استفاده قرار داده‌اند. فرض بر این است که فلزات مغزه رسوبی انباشته

جدول ۶. پارامترهای غنی‌شدگی عناصر انتخابی در رودخانه کارون، بازه پل پنجم تا فارسیت

Heavy Metals	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Average	۰/۷۵	۰/۳۱	۰/۸۰	۱/۱۲	۱/۱۸	۰/۶۱	۰/۹۶
Max	۱/۲۸	۰/۷۸	۰/۸۷	۲/۲۱	۱/۳۰	۱/۲۹	۲/۱۱
Min	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۹۶	۰/۰۷	۰/۵۴

جدول ۷. مقادیر شاخص زمین‌انباشت عناصر سنگین رسوبات سطحی رودخانه کارون، پل پنجم تا فارسیت

عنصر	شاخص زمین‌انباشتگی	شدت آلودگی منطقه
As	۰/۷۵	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
Cd	۰/۴۳	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
Cr	۰/۸۲	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
Cu	۰/۹۶	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
Ni	۱/۰۰	آلودگی متوسط
Pb	۰/۵۹	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
Zn	۱/۲۴	آلودگی متوسط

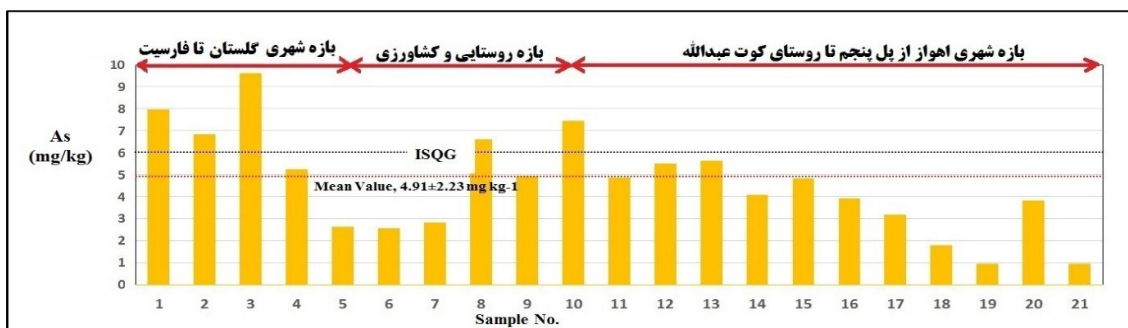
ارزیابی آلودگی رسوبات بر اساس SQGs

برای جذب شدن روی سطح رسوبات از خود نشان می‌دهد (کوآسر و همکاران، ۲۰۰۳). کاهش غلظت سرب نیز می‌تواند به علت کاهش منابع آلودگی این عنصر در بازه مورد مطالعه باشد. لذا این بازه از رودخانه کارون از نظر آلودگی سرب، برای آبریان و بهره‌برداران آب دارای وضعیت مطلوبی است. کروم با ۴۲/۸۵ درصد و نیکل با بیش از ۵۷ درصد دارای غلظتی فراتر از سطح آلودگی PEL بودند (جدول ۸) که بیشینه غلظت در محدوده ورودی فاضلاب روستای کوت عبدالله (نمونه شماره ۹) به دست آمده است (شکل ۷). تحلیل میدانی کانون‌های آلودگی بیانگر تأثیر قابل

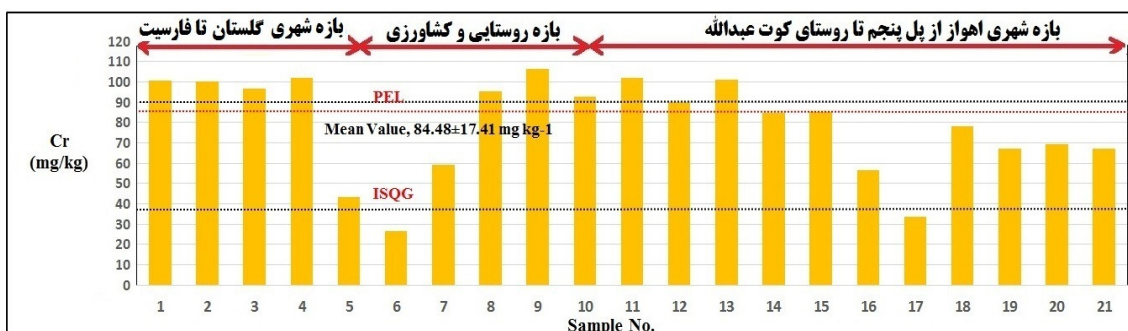
علاوه بر تشریح و بحث درباره وضعیت ژئوشیمیایی و کیفیت رسوبات، سطح آلودگی آن‌ها در مقایسه با حدود استاندارد SQGs، PEL، SEL در جدول ۸ ارایه شده است. بر اساس مقایسه بین معیارهای کیفیت رسوب با استانداردها، رودخانه کارون دارای رسوباتی پاک از منظر عناصر کادمیوم و سرب در بازه مورد مطالعه است. به طوری که ۱۰۰ درصد نمونه‌ها غلظتی کمتر از ISQG دارند (جدول ۸). کم شدن غلظت کادمیوم نسبت به سایر آلاینده‌ها را می‌توان به دلیل شعاع هیدراته بزرگ‌تر از سایر عناصر دانست که تمایل کمی

نمونه‌های شماره ۵، ۶، ۷ که بیشتر در محدوده روستایی و اراضی کشاورزی قرار دارد، آلودگی ناشی از این فعالیت ناچیز است شبه‌فلز آرسنیک دارای میانگین غلظت پایین‌تر از حداقل سطح آلودگی ۵/۹ mg/kg است (شکل ۶). نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در بازه شهری گلستان تا فارسیت و نمونه شماره ۸ در ساحل باختری کوت عبدالله و نمونه شماره ۱۰ در ساحل خاوری از فاضلاب شکاره دارای غلظتی فراتر از استاندارد ISQG و به تعبیری در آستانه مخاطره‌آمیز می‌باشند. شرایط نشان از وجود منشأهای غیرطبیعی آرسنیک به ویژه در محدوده شهری گلستان تا فارسیت دارد (شکل ۶).

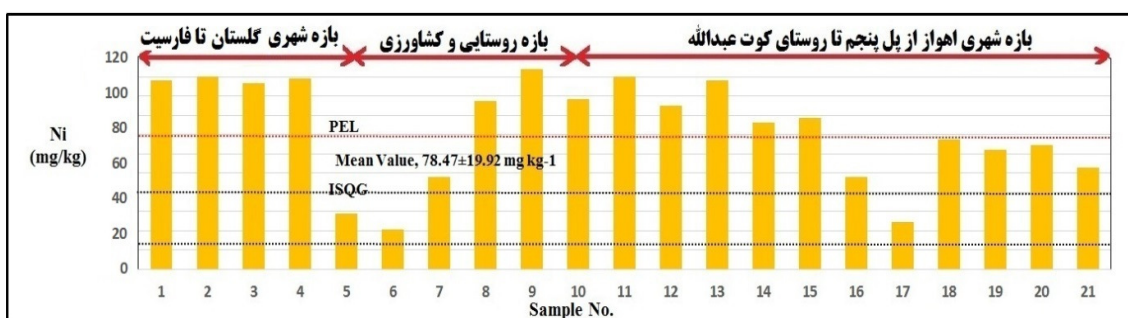
ملاحظه کاربری‌های شهری و صنعتی و تأثیر ناچیز فعالیت کشاورزی در افزایش غلظت فلز سنگین نیکل در طول رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه است. نتایج نشان داد، شرایط محیطی به گونه‌ای است که قابلیت جذب عنصر نیکل در رسوبات سطحی رودخانه فراهم بوده و در غالب نقاط آن وارد فاز کانی‌سازی شده است. عنصرسنگین نیکل در شرایط کاتیونی قادر به ورود به فاز محلول و آب مصرفی بهره‌برداران است. بدین ترتیب رودخانه کارون از ابتدای مقطع مطالعه تا انتهای آن دارای بازه‌های آلوده از منظر عنصر سنگین نیکل است (جدول ۸ و شکل ۸) و احتمال بروز مسمومیت برای آرزیان و بهره‌برداران آب وجود دارد. اما در بازه روستای ابودیس تا اراضی باختر دادگستری



شکل ۶. مقایسه غلظت آرسنیک نمونه‌های رسوب سطحی با استانداردهای کیفیت رسوب (SQGs)



شکل ۷. مقایسه غلظت کروم نمونه‌های رسوب سطحی با استانداردهای کیفیت رسوب (SQGs)



شکل ۸. مقایسه غلظت نیکل نمونه‌های رسوب سطحی با استانداردهای کیفیت رسوب (SQGs)

جدول ۸. مقایسه بین معیار کیفیت رسوب و غلظت فلزات سنگین (mg/kg) همراه با درصد نمونه‌ها در هر معیار

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
ISQG	۵/۹	۰/۶	۳۷/۳	۳۵/۷	۱۵/۹	۳۵	۱۲۳
PEL	۱۷	۳/۵	۹۰	۱۹۷	۴۲/۸	۹۱/۳	۳۱۵
محدوده این مطالعه							
Min	۰/۹۵	۰/۰۵	۲۶/۸	۹	۲۰/۴۳	۱/۹۸	۱۴/۴۸
Max	۹/۷۲	۰/۴۵	۱۰۶/۶۱	۴۹/۰۸	۱۰۳/۹۴	۲۵/۰۸	۲۰۷/۳۲
درصد نمونه‌ها در هر معیار							
ISQG < نمونه %	۷۶/۲	۱۰۰	۹/۶	۸۱	۱۴/۳۲	۱۰۰	۸۱
بین ISQG - PEL	۲۳/۸	۰	۴۷/۵۵	۱۹	۲۸/۵۷	۰	۱۹
PEL > نمونه %	۰	۰	۴۲/۸۵	۰	۵۷/۱	۰	۰

فاضلاب‌های ورودی و تجمع مواد آلی در شرایط نسبتاً احیایی دارای مواد آلی بیش از ۱% هستند که در نمونه شماره ۱۸ به بیش از ۳/۳ درصد می‌رسد (جدول ۱۰). ذرات رس و مواد آلی از حامل‌ها و جاذب‌های عناصر سنگین به فرم کاتیونی به شمار می‌روند (غریب‌رضا و اشرف، ۲۰۱۴). وجود مواد آلی بیانگر شرایط احیایی کم اکسیژن و ورود عناصر سنگین به فاز کانی‌زایی و رسوبات است. درصد قابل ملاحظه رس و مواد آلی می‌تواند شرایط را برای افزایش سطح آلودگی و مسمومیت آبریان و دام و بهره‌برداران آب به ویژه بخش کشاورزی فراهم کند. در بازه مورد مطالعه فزونی مواد آلی مستقیماً تحت تأثیر ورود فاضلاب‌های شهری و روستایی پیرامون می‌باشد در صورتی که میزان ذرات رس یک پارامتر ناشی از رژیم رسوبی رودخانه است.

غلظت عنصر مغذی سولفور در بازه مورد مطالعه دارای تغییرات قابل‌ملاحظه بوده و مقدار میانگین این عنصر ۱۱۷۴/۷۶ می‌باشد (جدول ۱۰) که با میانگین استاندارد تایلور (۱۹۶۴) که عدد mg/kg ۲۶۰ است، دارای اختلاف بسیار فاحشی است. بیشینه غلظت این عنصر در نمونه‌های ۱۳، ۴ و ۱۶ در محدوده ورودی فاضلاب‌های شهری مشاهده می‌شود (جدول ۱۰). با استفاده از مقادیر غلظت سولفور و مواد آلی نسبت بین درصد TOC و درصد سولفور کل (TS) در تمام ایستگاه‌های نمونه‌برداری محاسبه شد. بیش از ۷۱ درصد آن‌ها را شرایط محیطی اکسیداسیون در بر می‌گیرند (جدول ۱۰). در محیط احیایی به ترتیب غلظت عناصر کروم، نیکل، مس، سرب، روی و آرسنیک کاهش یافته است یا به عبارت دیگر افزایش غلظت این عناصر تابع کاهش اندازه ذرات رسوبی و شرایط اکسیداسیون محیط رسوبی است، اما عنصر کادمیوم تابع این شرایط نیست (جدول ۱۰).

میانگین غلظت فلز روی و مس در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه به ترتیب ۹۰/۸۷ و ۲۹/۰۴ mg/kg بدست آمده است (جدول ۷). فقط غلظت روی در ۱۹ درصد از نمونه‌ها و مس در کمتر از ۲۴ درصد نمونه‌ها دارای مقادیر فراتر از سطح آلودگی ISQG هستند (جدول ۸).

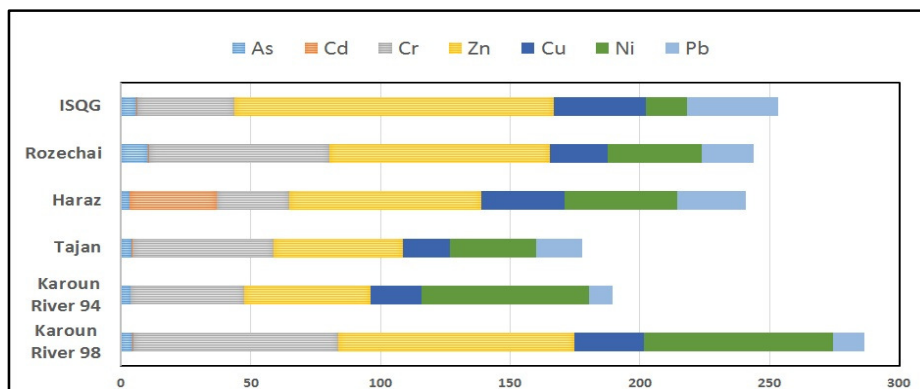
مقایسه غلظت عناصر سنگین در رسوبات سطحی کارون، بازه پل پنجم تا فارسیت با پژوهش‌های دیگر
مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین و سمی در بازه مورد مطالعه با سایر پژوهش‌های مشابه در ایران از جمله رودخانه‌های تجن، هراز، روضه‌چای، رودخانه کارون ۱۳۹۴ و استاندارد ISQG نشان داد که میانگین غلظت نیکل، کروم و روی نسبت به رودخانه تجن و روضه چای و هراز بیش‌تر است. اما نسبت به کارون ۹۴ (میانگین غلظت عناصر سنگین فقط برای ایستگاه‌های ۱۸ تا ۲۳ که در محدوده مطالعه حاضر بوده‌اند، محاسبه شده است) غلظت کلیه عناصر سنگین با یک افزایش قابل‌ملاحظه همراه است. نسبت به استاندارد ISQG میانگین غلظت کروم و نیکل بیش از حد استاندارد است (جدول ۹ و شکل ۹).

بررسی میزان مواد آلی، رس و سولفور

در این پژوهش درصد مواد آلی (TOC) و درصد بخش ریزدانه (ریزتر از ۰/۶۳ mm) به منظور شناخت تأثیرگذار آن در جذب و غنی‌شدگی فلزات سنگین در طول رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت اندازه‌گیری شد. بخش عمده‌ای از رسوبات رودخانه را ذراتی در اندازه سیلت و رس تشکیل داده، به طوری که در اغلب آن‌ها میزان رس بیش از ۳۰٪ است (جدول ۱۰). بازه‌های شهری به دلیل

جدول ۹. میانگین غلظت عناصر سنگین رودخانه کارون، بازه پل پنجم تا فارسیت و پژوهش‌های مشابه

River/Area	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	References
کارون ۹۸	۴/۵۸	۰/۲۲	۷۹/۰۲	۲۷/۱۱	۷۲/۸۲	۱۱/۹۱	۹۰/۸۷	مطالعه حاضر
کارون ۹۴	۳/۳۵	-	۴۲/۷	۱۷/۲۳	۶۲/۱	۹/۲۲	۵۲/۶۳	راست‌منش، ۱۳۹۴
تجن	۴/۱۶	۰/۳۳	۵۴/۲۹	۱۸	۳۳/۴۲	۱۷/۸۸	۵۰	غریب‌رضا و همکاران، ۱۳۹۹
هراز	۳/۴۵	۳۳/۵۵	۲۸/۱	۳۲/۱	۴۳/۶	۲۶/۳۵	۷۳/۸	نصرآبادی و همکاران، ۲۰۱۰
روضه چای	۱۰/۵	۰/۲۸	۶۹/۷	۲۲/۴	۳۶	۲۰	۸۵	غریب‌رضا و همکاران، ۲۰۱۹
ISQG	۵/۹	۰/۶	۳۷/۳	۳۵/۷	۱۵/۹	۳۵	۱۲۳	CCME 1995, EPA 2001



شکل ۹. مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین رودخانه کارون، بازه پل پنجم تا فارسیت با پژوهش‌های مشابه

جدول ۱۰. میزان رس، مواد آلی و سولفور و نسبت TOC/Ts در رسوبات سطحی رودخانه کارون، پل پنجم تا فارسیت

Sample No.	S	TOC	Clay	Ts	TOC/Ts	شرایط محیطی
۱	۸۰۲/۴۶	۱/۱۹	۲۹/۶۵	۰/۰۸	۱۴/۸۸	اکسیداسیون
۲	۹۷۸/۱۳	۲/۴۷	۳۶/۰۷	۰/۱	۲۵/۲۶	اکسیداسیون
۳	۸۴۱/۱۴	۰/۷۶	۳۲/۸۶	۰/۰۸	۹	اکسیداسیون
۴	۲۳۳۸/۸۶	۲/۱۵	۳۴/۴۶	۰/۲۶	۸/۱۶	اکسیداسیون
۵	۸۵۱/۷۹	۰/۱۳	۰	۰/۰۹	۱/۵۵	احیایی
۶	۱۱۶۸/۸	۰/۱	۰	۰/۱۲	۰/۸۵	احیایی
۷	۶۴۹/۳۲	۰/۳	۱۳/۶۰	۰/۰۷	۴/۳۶	اکسیداسیون
۸	۸۲۶/۹۴	۰/۸۹	۳۱/۲۵	۰/۰۸	۱۰/۷۷	اکسیداسیون
۹	۱۱۶۲/۵۱	۰/۶۴	۴۴/۰۹	۰/۱۲	۵۰/۵	اکسیداسیون
۱۰	۱۱۲۲/۹۵	۱/۳۰	۲۹/۶۵	۰/۱۱	۱۱/۵۸	اکسیداسیون
۱۱	۳۲۵/۱۲	۲/۷۷	۴۲/۴۸	۰/۰۳	۸۵/۳۲	اکسیداسیون
۱۲	۵۴۲/۳۰	۰/۷۴	۲۳/۲۳	۰/۰۵	۱۳/۶۶	اکسیداسیون
۱۳	۲۰۴۹/۶۵	۰/۹۸	۳۶/۰۷	۰/۲	۴/۷۶	نزدیک به احیایی
۱۴	۷۹۸/۴۱	۰/۷۶	۲۳/۲۳	۰/۰۸	۹/۴۸	اکسیداسیون
۱۵	۶۶۰/۴۸	۱/۲۴	۲۶/۴۴	۰/۰۷	۱۸/۸۳	اکسیداسیون
۱۶	۳۰۲۵/۷۷	۰/۱۷	۰	۰/۳	۰/۵۵	احیایی
۱۷	۱۱۲۹/۴۴	۳/۳۱	۱۵	۰/۱۱	۲۹/۳۲	اکسیداسیون
۱۸	۸۹۴/۸۹	۰/۲۵	۱۲	۰/۰۹	۲/۸۲	نزدیک احیایی
۱۹	۴۴۲/۴۴	۰/۲۷	۱۶/۸۱	۰/۰۴	۶/۰۷	اکسیداسیون
۲۰	۱۲۳۹/۶۹	۰/۲۹	۱۶/۸۱	۰/۱۲	۲/۳۱	نزدیک احیایی
۲۱	۶۲۱/۹۲	۰/۶۷	۱۴/۱۲	۰/۰۶	۱۰/۸۱	اکسیداسیون
میانگین	۱۱۷۴/۷۶	۱/۱۲	۲۳/۸۱	۲۳/۸۱	۲۳/۸۱	

ضریب همبستگی

ضریب همبستگی در واقع ارتباط احتمالی بین فلزات مانند منشا مشترک، توزیع واحد و رفتار مشابه را بیان می‌کند (دیوپ و همکاران، ۲۰۱۵). از آنجا که عناصر سنگین تهدیدی برای موجودات آبی می‌باشند، شناسایی روابط متقابل آن‌ها امری مهم است. در این پژوهش جهت تعیین همبستگی داده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است (جدول ۱۱). همانطور مشاهده می‌شود، مواد آلی همبستگی بالایی با مس، سولفور و روی دارد که احتمالاً نشان‌دهنده جذب عناصر سنگین توسط مواد آلی است. بنابراین مواد آلی می‌توانند به عنوان یک حامل برای این عناصر عمل کنند (راست‌منش و همکاران، ۱۳۹۴). ارتباط معنی‌دار مثبتی میان Cr، Ni و AS با رس وجود دارد. پس ذرات رس حامل اصلی عناصر نیکل و کروم و آرسنیک هستند. ضریب همبستگی بالا بین فلزات مختلف می‌تواند به معنی منابع مشترک آن‌ها، وابستگی متقابل، رفتار یکسان در طول حمل و نقل باشد. بنا براین همبستگی بالای عناصر نیکل و کروم و آرسنیک بیانگر آلودگی از منابع ورودی یکسان و مشترک می‌باشد. عناصر مس و روی (۰/۸۵)، روی و سرب (۰/۷۳۵) نیز همبستگی مثبت و قابل توجهی دارند و می‌توانند از منابع آلودگی مشترک باشند.

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای

آنالیز خوشه‌ای یک روش پژوهشی چندمتغیره است که در این مطالعه به منظور منشأیابی آماری عناصر به وسیله نرم‌افزار XLSTAT2018، برای دستیابی به ضرایب تشابه و رسم دندوگرام مورد استفاده گرفته است. از ضرایب همبستگی که توسط نرم‌افزار به دست آمده، برای دستیابی به ضرایب تشابه و رسم دندوگرام استفاده شد.

آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی با استفاده از داده‌های نرمال انجام شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون‌های نرمال بودن داده^{۱۱} (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling,) در نرم‌افزار XLSTAT2018 (Lilliefors, Jarque-Bera) استفاده شد. در این آزمون‌ها فرض صفر بر نرمال بودن داده‌ها بنا شده است. یعنی اگر فرض صفر رد شود به معنی غیرنرمال بودن داده‌ها است. معمولاً چنانچه سطح معنی‌داری در این آزمون بیش‌تر از ۰/۰۵ باشد، می‌توان داده‌ها را با اطمینان بالایی نرمال فرض کرد. نتایج نشان داد

که در آزمون Jarque-Bera به جز سولفور که دارای $0.05 < p\text{-value}$ می‌باشد، بقیه عناصر دارای توزیع نرمال هستند. در روش آنالیز خوشه‌ای مطابق شکل ۱۰، عناصر به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

گروه اول یا گروه A، به دو زیر گروه A1 و A2 تقسیم شده است و زیر گروه A1 نیز به دو زیر گروه تقسیم می‌شود به طوری که در زیر گروه A1-1 عناصر Zn و Pb و زیر گروه A1-2 عناصر Cu، S و مواد آلی قرار می‌گیرند. اما زیر گروه A2 تنها عنصر Cd را در خود جای داده است. گروه دوم یا گروه B به دو زیر گروه B1 و B2 تقسیم شده است. به طوری که زیر گروه B1 شامل عناصر Ni، Cr و درصد رس و گروه B2 شامل عنصر As می‌باشد.

تحلیل خوشه‌بندی عناصر (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که در گروه اول عناصر سرب و روی رابطه نزدیک‌تری با هم دارند. اما مواد آلی حامل اصلی عناصر Cu و S هستند. این دو فلز دارای ارتباط معنی‌دار و همبستگی بالا با مواد آلی ($r=0.754 - 0.873$, $p\text{ value}<0.0001$) در مورد عناصر سرب و روی نیز مواد آلی نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در گروه دوم نتایج بیانگر رابطه معنی‌دار ذرات رسی و عناصر سنگین Ni و Cr است. این گروه دارای زیر کلاس‌هایی هست که بالاترین ضریب همبستگی ($r=0.993$, $p\text{ value}<0.0001$) بین نیکل و کروم بدست آمده که نشان‌دهنده همبستگی مثبت معنی‌دار بین این دو فلز سمی از منظر برخاستگاه و شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر ورود آن‌ها به فاز جامد و کانی‌سازی در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه است. از طرفی این دو فلز دارای ارتباط معنی‌دار و همبستگی بالا با مواد رسی ($r=0.948-0.961$, $p < 0.0001$) به عنوان حامل و جاذب کاتیون‌های آزاد در فاز محلول کانون‌های آلودگی و فاضلاب‌ها در طول بازه مورد مطالعه هستند. همچنین در مورد عنصر آرسنیک نیز ذرات رس نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در گروه B کروم و نیکل رابطه نزدیک‌تری باهم دارند. با توجه به رابطه متقابل و تشابه بالا بین عنصر نیکل، کروم و آرسنیک در گروه B و سرب و روی و مس در گروه A، می‌توان بیان کرد که احتمالاً هریک از این گروه‌ها دارای منابع ورودی و عوامل کنترل کننده یکسانی هستند. فلزاتی مانند سرب و روی و مس معمولاً با کاربری‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری مرتبط می‌باشند. به عنوان مثال صنعت متالورژی و احتراق

¹¹ Normality Tests

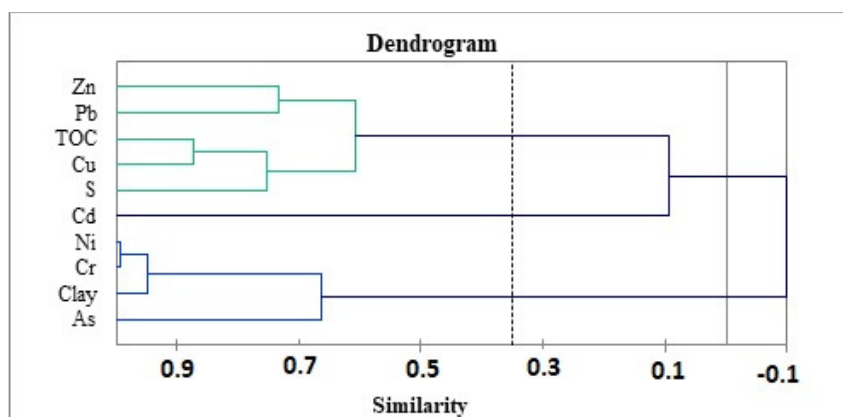
و همچنین ضریب صفر در دامنه منفی یک تا مثبت یک قرار دارد. تمام این نتایج به خوبی با ضریب همبستگی پیرسون مطابقت دارند.

سوخت‌های فسیلی می‌توانند سرب و روی منتشر کنند (راست‌منش و همکاران، ۱۳۹۴). عدم وجود ارتباط میان دوشاخه، بیانگر نبود منشاء یکسان برای آن‌ها است. اما فلز سمی کادمیوم دارای کمینه همبستگی با همه عناصر است

جدول ۱۱. ضریب همبستگی پیرسون عناصر فلزی سمی و مواد آلی، رسوبات رسی و سولفور (n=21) در بازه مورد مطالعه رودخانه کارون

Variables	As	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn	S	TOC	Clay
As	۱									
Cd	-۰/۰۱۲	۱								
Cr	۰/۶۶۴	۰/۰۰	۱							
Ni	۰/۷۰۱	۰/۰۰۲	۰/۹۹۳	۱						
Cu	۰/۳۸۸	۰/۱۸۷	۰/۷۹۸	۰/۷۸۴	۱					
Pb	۰/۱۰۲	۰/۲۷۷	۰/۳۷۹	۰/۳۷۷	۰/۶۴۳	۱				
Zn	۰/۳۲۱	۰/۰۹۶	۰/۷۴۳	۰/۷۳۴	۰/۸۵۰	۰/۷۳۵	۱			
S	۰/۰۷۹	۰/۴۶۲	۰/۵۰۹	۰/۴۹۷	۰/۸۰۱	۰/۶۰۹	۰/۶۴۴	۱		
TOC	۰/۲۰۶	۰/۱۴۳	۰/۴۸۶	۰/۴۷۲	۰/۸۷۳	۰/۶۵۰	۰/۶۹۴	۰/۷۵۴	۱	
Clay	۰/۶۶۵	-۰/۰۹۸	۰/۹۴۸	۰/۹۶۱	۰/۶۶۷	۰/۲۶۵	۰/۶۳۶	۰/۳۹۵	۰/۳۳۸	۱

Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05
Bold values indicates the significant correlations



شکل ۱۰. خوشه‌بندی عناصر سنگین، ذرات رس، مواد آلی و سولفور در نمونه‌های سطحی رودخانه کارون، بازه پل پنجم تا فارسیت

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر دستاوردهای ژئوشیمیایی مناسبی را در پی داشته و منجر به شناخت کافی از وضعیت ژئوشیمیایی رسوبات مورد بررسی و تغییرات ناشی از شرایط طبیعی و غیرطبیعی سطح آلودگی‌ها برای آبریزان و بهره‌برداران به ویژه در حوزه کشاورزی و چرخه غذایی شده است.

۱- بررسی غلظت عناصر سنگین و سمی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان از برتری هفت عنصر سنگین و سمی به ترتیب $Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > As > Cd$ از منظر غلظت در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه مورد نظر دارد.

۲- بیش‌ترین میزان فاکتور آلودگی و درجه آلودگی رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه پل پنجم تا فارسیت را عنصر نیکل، مس و روی به ترتیب با میانگین ۳/۶۴، ۳/۳۹ و ۳/۰۵ با رده آلودگی زیاد به خود اختصاص داده‌اند و بعد از آن عناصر کروم، آرسنیک و سرب با فاکتور آلودگی متوسط و کادمیوم در رده آلودگی کم قرار می‌گیرند. بیش‌ترین میزان فاکتور آلودگی را عنصر روی در ایستگاه نمونه‌برداری شماره ۱۳ و عنصر مس در ایستگاه نمونه‌برداری شماره ۱۸ با رده آلودگی بسیار زیاد به خود اختصاص داده‌اند. اما درجه آلودگی در بیش از ۸۵ درصد نمونه‌ها متوسط تا قابل

آرسنیک کاهش یافته است یا به عبارت دیگر، افزایش غلظت این عناصر تابع کاهش اندازه ذرات رسوبی و شرایط اکسیداسیون محیط رسوبی است، اما عنصر کادمیوم تابع این شرایط نیست.

۷- مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین و سمی در بازه مورد مطالعه با سایر پژوهش‌های مشابه در ایران نشان داد که میانگین غلظت نیکل، کروم و روی در مطالعه حاضر نسبت به رودخانه تجن و روضه چای هراز بیشتر است. اما نسبت به کارون ۹۴ غلظت کلیه عناصر سنگین با یک افزایش قابل ملاحظه همراه است. نسبت به استاندارد ISQG نیز میانگین غلظت کروم و نیکل بیش از حد استاندارد است. ۸- مواد آلی همبستگی بالایی با مس، سولفور و روی دارد که احتمالاً نشان‌دهنده جذب عناصر سنگین توسط مواد آلی است. ارتباط معنی‌دار مثبتی میان Cr و Ni، AS با Clay وجود دارد. پس ذرات رس حامل اصلی عناصر نیکل و کروم و آرسنیک هستند. همبستگی بالای عناصر نیکل و کروم و آرسنیک بیانگر آلودگی از منابع ورودی یکسان و مشترک می‌باشد. عناصر مس و روی، روی و سرب نیز همبستگی مثبت و قابل توجهی دارند و می‌توانند از منابع آلودگی مشترک باشند. با توجه به این که عناصر روی، کروم، مس و سرب در صنایع کاربرد دارند و همچنین در محیط زیست شهری دارای غلظت زیادی هستند، بیان کننده منشاء انسان‌زاد آن‌ها می‌باشد.

۱۱ - براساس خوشه‌بندی سلسله مراتبی عناصر سنگین در محدوده مورد مطالعه در دو خوشه اصلی قرار گرفتند. عناصر سرب و روی و مس و سولفور به همراه مواد آلی در گروه A، و عناصر نیکل، کروم و آرسنیک به همراه رس در گروه B که می‌تواند ناشی از رابطه متقابل و تشابه بالا بین این دو گروه باشد. احتمالاً هریک از این گروه‌ها دارای منابع ورودی و عوامل کنترل کننده یکسانی هستند. فلزاتی مانند سرب و روی و مس معمولاً با کاربردهای صنعتی و فاضلاب‌های شهری مرتبط می‌باشند. نبود وجود ارتباط میان دوشاخه بیانگر نبود منشاء یکسان برای آن‌ها است. اما فلز سمی کادمیوم هیچ گونه رابطه معنی‌داری با عناصر دیگر و همچنین مواد آلی و ذرات رس نشان نداده است. تمام این نتایج به خوبی با ضریب همبستگی پیرسون مطابقت دارند.

ملاحظه است. ایستگاه‌های شماره ۱۲ (بالادست پل فولاد) و ۱۳ (فاضلاب تصفیه خانه فولاد) به ترتیب با درجه آلودگی ۲۶/۳۳ و ۲۵/۴۴ دارای بالاترین درجه آلودگی هستند. در واقع افزایش چشمگیر آلودگی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری ۱۲ و ۱۳ به علت حجم بالای فاضلاب‌های شهری و صنعتی است.

۳- روی و بعد از آن نیکل بیش‌ترین شاخص زمین‌انباشت را نشان می‌دهند و در رده شدت آلودگی متوسط قرار می‌گیرند. بقیه عناصر انتخابی در محدوده غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار دارند.

۴- فلز نیکل با بیش از ۵۷ درصد و کروم با ۴۲/۸۵ درصد دارای غلظتی فراتر از حداکثر سطح آلودگی PEL هستند. بیشینه غلظت نیکل و کروم در ورودی فاضلاب روستای کوت عبدالله (نمونه شماره ۹) به دست آمده است. بنابراین اکثریت بازه‌های شهری و صنعتی از منظر عنصر سنگین نیکل و کروم آلوده است. اما در بازه میانی نمونه‌های شماره ۵، ۶، ۷ که بیش‌تر در محدوده روستایی و اراضی کشاورزی قرار دارد، آلودگی ناشی از این فلزات ناچیز است. تحلیل میدانی کانون‌های آلودگی بیانگر تأثیر قابل ملاحظه کاربری‌های شهری و صنعتی و تأثیر ناچیز فعالیت کشاورزی در افزایش غلظت فلز سنگین نیکل و کروم در طول رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه است. شبه فلز آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه گلستان تا فارسیت در اثر ورود فاضلاب‌های خانگی و پساب‌های صنعتی و کشاورزی دارای غلظتی فراتر از حداقل تراز ISQG است. رودخانه کارون دارای رسوباتی پاک از منظر عنصر کادمیوم و سرب در بازه مورد مطالعه است. به طوری که ۱۰۰ درصد نمونه‌ها غلظتی کمتر از ISQG دارند.

۵- بخش عمده‌ای از رسوبات رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه را ذراتی در اندازه سیلت و رس تشکیل داده، طوریکه در اغلب آن‌ها میزان رس بیش از ۳۰٪ است. بازه‌های شهری به دلیل فاضلاب‌های ورودی و تجمع مواد آلی در شرایط نسبتاً احیایی دارای مواد آلی بیش از ۱٪ هستند که در نمونه شماره ۱۸ به بیش از ۳/۳ درصد می‌رسد و از نظر آلودگی، دارای درجه آلودگی بالا یا قابل ملاحظه است.

۶- بررسی‌ها بیانگر این است که شرایط کاملاً احیایی در جایی اتفاق افتاده است که محیط با بافت رسوبی کاملاً ماسه‌ای و فاقد سیلت و رس است. در محیط احیایی به ترتیب غلظت عناصر کروم، نیکل، مس، سرب، روی و

سپاسگزاری

از همکاری صمیمانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان و بخش آبخیزداری آن مرکز در اجرای عملیات میدانی و بخش خدمات فنی پژوهشگاه حفاظت خاک و آبخیزداری در اجرای عملیات میدانی و خدمات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- غریب‌رضا، م. ر.، مهدی‌زاده، م.، معصومی، ح. (۱۳۹۹) ارزیابی ریسک اکولوژیک رسوبات رودخانه روضه چای با استفاده از شاخص کیفیت رسوب، گزارش نهایی، پژوهشگاه حفاظت خاک و آبخیزداری ۴۵ ص.
- غلام‌دخت بندری، م.، رضایی، پ.، قربانی، م.، کمانگر، م. (۱۳۹۵) پایش ژئوشیمیایی و زمین زیست محیطی عناصر اصلی و فرعی در رسوبات ساحلی جزیره هرمز (خلیج فارس) و ترسیم نقشه‌های هم‌پراکنش، مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۲، شماره ۳، ص ۲۸۳-۲۶۷.
- کریمی، ش. (۱۳۹۵) تعیین شاخص شدت آلودگی به عناصر سنگین در رسوبات رودخانه کارون (محدوده شهر اهواز تا خرمشهر)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، ۶۲ ص.
- محمدزاده، ژ.، روزبهانی، م.، بابایی‌نژاد، ت. (۱۳۹۷) تجمع فلزات سنگین در گیاه نی (*Phragmites australis*) و رسوبات رودخانه کارون (محدوده شهر اهواز)، نشریه اکوبیولوژی تالاب، شماره ۱ (پیاپی ۳۵)، ص ۶۴-۵۵.
- مرشدی، ج.، علوی‌پناه، س. ک.، مقیمی، ا. (۱۳۹۲) بررسی تغییرات طولی رودخانه کارون با استفاده از روش میانگین جهت‌دار خطی (منطقه مورد مطالعه: از شوشتر تا اروند)، مجله محیط‌شناسی، دوره ۳۹، شماره ۴، ص ۱۰۴-۸۹.
- Ashraf M. A., Sarfaraz M., Rizwan a N. and Gharibreza, M (2015) Environmental Impacts of Metallic Elements. Singapore. Springer. 434p
- Audry, S., Schafer, J., Blanc, G., Jouanneau, J. M (2004) Fifty- year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France), *Environmental Pollution*, 132 (3): 413- 426.
- Berner, R. A. and Raiswell, R (1984) C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. *Geol.*, 12(6): 365-368.
- CBSQG (2003) Recommendations for Use & Application Interim Guidance, in Consensus-Based Sediment Quality Guidelines, J. Dogle, Editor. Department of Natural Resources: Wisconsin. 40.
- CCME (1995) Protocol for the Derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, E.C.G.a.S. Division, Editor. Environment Canada, Guidelines Division, Technical Secretariat of the CCME Task Group on Water Quality Guidelines: Ottawa.
- Choi, K. Y., Kim, S. H., Hong, G. H., Chon, H. T (2012) Distribution of Heavy metals in the sediments of South Korean Harbors, *Environ Geochem Health*, 34: 71-82.
- David, A. J., and Leventhal, J. S (1995) Bioavailability of metals. Chap2, (July 1995).
- Diop, Ch., Dewaelé, D., Cazier, F., Diouf, A., and B. Ouddane (2015) Assessment of trace metals
- راست‌منش، ف.، زراسوندی، ع.، مسلم، ف. (۱۳۹۴) ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز، پاییز ۹۴، شماره ۱۷، ص ۲۲-۱۱.
- زارع‌زاده، ر.، رضایی، پ. (۱۳۹۳) مطالعه تجمع فلزات سنگین در رسوبات بستر مانگرو، خور گابریک (جاسک). نشریه محیط‌زیست طبیعی، دوره ۶۹، شماره ۱، ص ۶۱-۷۸.
- رفیعی، ب.، موثق، ع.، کریمخانی، ا.، صادقی‌فر، م. (۱۳۹۳) پراکندگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی خروجی تالاب انزلی، نشریه رسوب‌شناسی کاربردی، جلد ۴، ص ۱۵-۱.
- رفیعی، ب.، حسین‌پناهی، ف.، شکبیا آزاد، ع.، صادقی‌فر، م. (۱۳۹۳) بررسی پراکندگی و منشأ فلزات سنگین Ni, Co, Mn, Ti, V در رسوبات بستر دریاچه زریوار، نشریه رسوب‌شناسی کاربردی، جلد ۳، ص ۱۱-۱.
- سالاری، م.، رادمش، ف.، زارعی، ح. (۱۳۹۱) ارزیابی کمی و کیفی منابع آب رودخانه کارون با استفاده از شاخص NSFQI و روش AHP، فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۲۳، ص ۲۲-۱۳.
- شجاعیان، ز.، خدابخشی، ح. ر. (۱۳۹۶) محاسبه آورد رسوب رودخانه کارون با استفاده از نرم‌افزار GSTARS3، فصلنامه علمی تخصصی مهندسی آب، ص ۱۳۰-۱۲۲.
- عبیات، ا.، اژدری، ع.، جودکی، م.، درویشی، خ. ج. (۱۳۹۶) بررسی و تفکیک محیط‌های رسوبی کواترنری در دشت خوزستان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز، پاییز ۹۶، شماره ۲۵، ص ۶۴-۴۹.
- علی‌بیگی، ح.، میرزاده، ر.، محمودی، ر. ز. ا. (۱۳۹۶) بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوبات سطحی تالاب جفاخور، مجله محیط‌شناسی، شماره ۴۳، ص ۱۶۱-۱۴۹.
- غریب‌رضا، م. ر.، معصومی، ح.، جعفری‌گزرین، ب.، رحیم‌زاده، ح.، اصغری‌پور دشت بزرگ، ن. (۱۳۹۹) ارزیابی کیفیت رسوبات سطحی رودخانه تجن و تعیین سطح آلودگی بوم‌شناسی، مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۴، ص ۵۰۰-۴۸۵.

- Miller, J. R (1997) The role of fluvial geomorphic processes in the dispersal of heavy metals from mine sites. *J. Geochem. Explor*, 58(2-3): 101-118.
- Muller, G (1979) Schwermetalle in den sedimenten des Rheins Veränderungen seit 1971, Umschau, 79 (24): 778- 783.
- Muller, G (1969) Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River, *GeoJournal*, 2: 108-118.
- Nasrabadi, T., Nabi Bidhendi, G., Karbassi, A. and Mehrdadi, N (2010) Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea basin. *Environ. Monit. Assess*, 171: 395-410.
- Radtke, D. B (2005) Bottom-Material Samples, U. S. Geological Survey, Department of the Interior, National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data.
- Rudnick, R. L. and Gao, S (2014) Composition of the Continental Crust, in *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, H.D. Holland and K.K. Turekian, Editors. Elsevier: Oxford, p. 1-51.
- Salomons, W., Forstner, V (1984) *Metals in the Hydro-Cycle*. Berlin, Springer.
- Sinex, S., Wright, D (1988) Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay, Mar, *Pollut. Bull*, 19: 425-431.
- Sutherland, R. A. and Tolosa, C. A (2000) Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. *Environ. Pollut*, 110: 483-495.
- Sutherland, R. A. and Tolosa, C. A (2000) Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. *Environ. Pollut*, 110: 483-495.
- Taylor, S. R (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28(8): 1273-1285.
- Tucker, M. E (1988) *Techniques in sedimentology*, Blackwells, Oxford, 394 pp.
- Unlu, S., Topcuoglu, S., Alpar, B., Kirbasoglu, C., Yilmaz, Y. Z (2008) Heavy metal pollution in surface sediment and mussel samples in the Gulf of Gemlik, *Environ. Monit. Assess*, 144(1-3): 169-178.
- Ustaoglu, F. and Islam, S (2020) Potential toxic elements in sediment of some rivers at Giresun, Northeast Turkey: A preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk. *Ecol. Indicat*, 113: 106-137.
- Walkley, A. and Black, I. A (1934) An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci*, 37(1): 29-38.
- Wernimont, G. T. and Spendley, W (1985) Use of Statistics to Develop and Evaluate Analytical Methods, in *AOAC Int*. Arlington, VA.
- contamination level, bioavailability and toxicity in sediments from Dakar coast and Saint Louis estuary in Senegal, West Africa. *Chemosphere*, 138: 980-7.
- EPA (2001) *Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediments for Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual*. Environmental Protection Agency.
- Fortescue, J. A. C (1992) Landscape geochemistry: retrospect and prospect. *Appl. Geochem*, 7(1): 1-53.
- Gharibreza, M. and Ashraf, M. A (2014) *Applied Limnology*. Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. Springer. 199.
- Gibbs, R. J (1973) Mechanisms of trace metal transport in rivers, *Science*, 180: 71-73.
- Gonzales- Macias, C., Schifter, I., Liuch- Cota, D. B., endez- Rodriguez, L., & Hernandez- Vazquez, S (2006) Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Salina Cruz Bay, Mexico, *Environmental Monitoring and Assessment*, 118: 211- 230.
- Hakanson, L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
- Heikki, L (1999) Removal of harmful metals from metals plating waste waters using selective ion exchangers.
- Júnior, J. B. S., Abreu, I. M., Oliveira, D. A. F., Hadlich, G. M. and Albergaria Barbosa, A. C. R (2020) Combining geochemical and chemometric tools to assess the environmental impact of potentially toxic elements in surface sediment samples from an urban river. *Mar. Pollut. Bull*, 155: 111-146.
- Kingston, H. M. and Jassie, L. B (1998) *Introduction to Microwave Sample Preparation Theory and Practice*. ACS Professional Reference Book Series. Washington, DC: American Chemical Society.
- Koaser, S., Barrington, S., Elektorowicz, M., and Wang, L (2003) Effect of Pb and Cd on Cu adsorption by sand – bentonite liner. *Can. J. Civ. Eng*, 32(2): 241-249.
- Liu, J., Yin, P., Chen, B., Gao F., Song, H. and Li, M (2016) Distribution and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of the Luanhe River Estuary, northwest of the Bohai Sea. *Mar. Pollut. Bull*, 109: 633-639.
- Loring, D. L., Naes, K., Dahle, S., Matishov, G. G. and Illind, D (1995) Arsenic, trace metals, and organic micro contaminants in sediments from the Pechora Sea, Russia. *Mar. Geol*, 128: 152-167.
- Milačić, R., Zuliani, T., Vidmar, J., Bergant, M., Kalogianni, E., Smeti, E., Skoulikidis, N. and Ščančar, J (2019) Potentially toxic elements in water, sediments and fish of the Evrotas River under variable water discharges. *Sci. Total Environ*, 648: 1087-1096.

Zarezadeh, R., Rezaee, P., Lak, R., Masoodi, M., & Ghorbani, M (2017) Distribution and accumulation of heavy metals in sediments of the northern part of mangrove in Hara Biosphere Reserve, Qeshm Island (Persian Gulf). *Soil and Water Research*, 12(2): 86-95.

ZareZadeh, R., Rezaee, P., Lak, R., Masoodi, M., & Ghorbani, M (2017) A study of textural and accumulation heavy metals of sediments in mangrove ecosystem of Persian Gulf, South Iran. *NISCAIR-CSIR, India*, 46(01): 78-85.

Zhang, J., Liu, C. L (2000) Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, *Estua. Coast. Shelf Sci*, 54: 1051–1070.