

ارزیابی پتانسیل آلودگی آرسنیک متأثر از فعالیت‌های معدنی در استان کرمان با استفاده از روش کریجینگ شاخص

الهام قدیری صوفی^۱، سعید سلطانی محمدی^۲، مهیار یوسفی^۳ و علی عالی انوری^۲

^۱دانشجوی دکترا، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲استادیار، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۳استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۰۲

چکیده

از آنجا که فعالیت‌های معدنی بر روی کانسارهای فلزی به‌عنوان یکی از راه‌های رهاسازی و ورود عناصر خطرناکی همچون آرسنیک به محیط زیست شناخته می‌شوند؛ پرداختن به مسائل آلودگی در خاک و رسوبات آبراه‌های در پیرامون کارگاه‌های معدنی حائز اهمیت است. برای درک توزیع فضایی آلودگی آرسنیک در منطقه ساردوییه و بافت در استان کرمان، به مساحت تقریباً ۵۰۰۰ کیلومترمربع، ۱۸۰۴ نمونه رسوبات آبراه‌های برداشت شد و آنالیز ژئوشیمیایی برای این نمونه‌ها انجام گرفت و در نهایت غلظت عناصر مختلف از جمله آرسنیک در این نمونه‌ها به دست آمد. حد مجاز توصیه شده توسط استانداردها در خاک برای آرسنیک ۲۰ ppm می‌باشد. در نتیجه نمونه‌هایی که مقدار آرسنیک در آنها از این مقدار بیشتر است؛ مناطق آلوده هستند که نیاز به بهسازی زمین دارند. اما از آنجا که تعداد نمونه‌های برداشت شده محدود است، برای تشخیص ریسک آلوده بودن مناطق از روش کریجینگ شاخص استفاده شد. در منطقه مورد مطالعه ۳۲ اندیس شناخته شده مس وجود دارد؛ از این رو به منظور بررسی پتانسیل آلودگی آرسنیک حاصل از فعالیت‌های معدنی، با توجه به نقشه نهایی حاصل از به کارگیری روش کریجینگ شاخص بر روی غلظت آرسنیک موجود در داده‌های رسوبات آبراه‌ای، مشخص شد که در بخش شمال و شمال باختری منطقه آلودگی آرسنیک ممکن است در نتیجه فعالیت‌های معدنی مس پورفیری باشد اما در بخش خاوری منطقه اگر چه تراکم این اندیس‌ها بالاست؛ اما آلودگی خاصی دیده نشده است.

کلیدواژه‌ها: آرسنیک، فعالیت‌های معدنی، مس پورفیری، آلودگی زیست‌محیطی، کریجینگ شاخص.

E-mail: Elham_ghadirisufi@yahoo.com

***نویسنده مسئول:** الهام قدیری صوفی

۱- پیش‌نویس

از آنجا که به دلیل محدودیت‌های بودجه‌ای و زمانی، امکان سنجش مقدار آلاینده‌ها و از جمله آرسنیک در همه نقاط منطقه وجود ندارد، از طیف گسترده‌ای از تخمین‌گرها از سنتی (روش‌هایی همچون عکس مجذور فاصله و کریجینگ معمولی) تا الگوریتم‌های یادگیری ماشین، در مدل‌سازی آلاینده‌ها در نقاط نمونه‌برداری نشده استفاده می‌شود. انتخاب تخمین‌گر بیشتر بر پایه هدف مورد مطالعه و خصوصیات داده‌ها صورت می‌گیرد. یکی از این روش‌ها، روش کریجینگ شاخص است که به عنوان دسته‌ای از روش‌های زمین‌آماري ناپارامتری شناخته می‌شود که امروزه کاربرد گسترده‌ای در مطالعات زیست‌محیطی به ویژه مطالعه عدم قطعیت و مدیریت ریسک یافته است (Liu et al., 2007; Lee et al., 2008; Hassan and Atkins, 2011; Ungaro et al., 2008). پیش از این از کریجینگ شاخص در مدل‌سازی احتمال آلودگی فلزات سنگین در خاک (Juang and Lee, 1998; Castrignano et al., 2000; Van Meirvenne and Goovaerts, 2001) احتمال آلودگی آرسنیک در آب زیرزمینی (Liu et al., 2004; Lee et al., 2008; Goovaerts et al., 2005; Hassan and Atkins, 2011) احتمال آلودگی آرسنیک در مجاورت معادن قدیمی متروکه قلع- تنگستن و باریم- سرب (Antunes and Albuquerque, 2013) استفاده شده است. در این مقاله تلاش خواهد شد تا با استفاده از روش کریجینگ شاخص احتمال آلودگی به آرسنیک در مناطق مجاور معادن مس موجود در استان کرمان مورد بررسی قرار گیرد.

در این مطالعه استان کرمان، به دلیل قرار گرفتن در کمربند ارومیه- دختر و پتانسیل بالای کانی‌سازی مس پورفیری برای بررسی آلودگی آرسنیک در رسوبات آبراه‌های بررسی شد. از این رو ۱۸۰۴ نمونه رسوبات آبراه‌های گردآوری و آنالیز شد و غلظت آرسنیک در این نمونه‌ها به دست آمد. حد مجاز توصیه شده توسط استانداردها در خاک برای آرسنیک ۲۰ ppm است (شریعتی و همکاران، ۱۳۹۰؛ فتحی هفشجانی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Pais and Jones, 2000). از این رو به منظور

در دهه‌های اخیر، افزایش صنعتی شدن و معرفی تکنولوژی‌های جدید به کار رفته در فعالیت‌های سنتی (از جمله فعالیت‌های کشاورزی) خطر آلودگی خاک توسط مواد آلاینده را افزایش داده است. در این میان، فلزات سنگین، به علت پایداری بالای آنها، در خاک تجمع می‌یابند و سبب می‌شوند تا احتمال بالاتر بودن غلظت آنها از حد مجاز افزایش یابد (Ungaro et al., 2008). آرسنیک به عنوان یکی از این مواد آلاینده در خاک و رسوبات آبراه‌ای می‌تواند خطرات جدی به همراه داشته باشد. آلودگی محیط زیست با آرسنیک از هر دو منبع طبیعی و غیرطبیعی در بسیاری از بخش‌های جهان روی می‌دهد و به عنوان یک مشکل جهانی تشخیص داده شده است (Nriagu et al., 2007; Butcher, 2007). آرسنیک (As) بیستمین عنصر فراوان با غلظت میانگین ۲ ppm در پوسته زمین می‌باشد؛ به طوری که غلظت‌های بالاتری از آن در سنگ‌های رسوبی نسبت به سنگ‌های آذرین وجود دارد (Butcher, 2007). این عنصر به علت مسمومیت حاد و مزمن و اثرات سرطان‌زا روی انسان و حیوانات بسیار نگران‌کننده است (Duan et al., 2013). فعالیت‌های انسانی از جمله اکتشاف، استخراج و فراوری مواد معدنی می‌تواند سبب افزایش غلظت آرسنیک در یک ناحیه گردد؛ به گونه‌ای که میزان بالای آن در میان مردمی وجود دارد که در پیرامون مناطق استخراجی و کارخانه ذوب ساکن هستند (Nriagu et al., 2007). آرسنیک معمولاً با کانی‌های سولفیدی همراه است و حتی مقدار کم آن سبب آلودگی محیط زیست می‌شود (Antunes and Albuquerque, 2013; Pais and Jones, 2000). کشور ایران به دلیل قرارگیری روی کمربند جهانی مس و به‌ویژه اهمیت نوار آتشفشانی ارومیه- دختر که از ارومیه تا جنوب باختر سیرجان کشیده شده است، خواستگاه مناسبی را در زمینه مطالعه روی کانسارهای مس پورفیری فراهم می‌آورد. در این راستا با توجه به اینکه پیریت و کالکوپیت از مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی هستند که در کانسارهای مس پورفیری وجود دارند؛ از این رو آلودگی آرسنیک در مناطقی که معدنکاری مس پورفیری انجام می‌گیرد باید به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد.

حد آستانه z_k و $P(u; z_k | (n))$ احتمال اینکه $Z(u) > z_k$ می‌باشد. در یک موقعیت نمونه برداری نشده، u_0 بر آورد کریجینگ شاخص به صورت زیر است:

$$I^*(u_0; z_k) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(z_k) I(u_j; z_k) \quad (4)$$

که $I(u_j; z_k)$ مقدار شاخص در موقعیت‌های اندازه‌گیری شده، $u_j, j=1, 2, 3, \dots, n$ و λ_j وزن اختصاص یافته به $I(u_j; z_k)$ در بر آورد $I^*(u_0; z_k)$ است.

تخمین کریجینگ شاخص باید نارایب و با کمترین واریانس خطای تخمین باشد؛ از این رو:

$$E[I^*(u_0; z_k) - I(u_0; z_k)] = 0 \quad (5)$$

$$\text{Var}[I^*(u_0; z_k) - I(u_0; z_k)] \text{ is minimum} \quad (6)$$

هر دو این شرایط با استفاده از محاسبه وزن‌ها، λ_j ؛ با استفاده از حل سیستم معادلات خطی زیر تحقق پیدا می‌کند:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j(z_k) \gamma_i(u_i - u_j; z_k) - \mu(z_k) = \gamma_i(u_i - u_0; z_k) \quad i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j(z_k) = 1 \end{array} \right. \quad (7)$$

که $\mu(z_k)$ ضریب لاگرانژ، $\gamma_i(u_i - u_j; z_k)$ مقدار واریوگرام بین متغیرهای شاخص در نقاط نمونه‌برداری (u_j, u_i) و $\gamma_i(u_i - u_0; z_k)$ مقدار واریوگرام بین متغیرهای شاخص در نقاط نمونه‌برداری u_0 و u_i است (Antunes and Albuquerque, 2013; Liu et al., 2004). مقدار واریوگرام شاخص نیز با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\hat{\gamma} I(h, z_k) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} \{I(x_i; z_k) - I(x_i + h; z_k)\}^2 \quad (8)$$

که $I(x_i; z_k)$ و $I(x_i + h; z_k)$ متغیرهای شاخص، h طول گام و $n(h)$ تعداد نقاطی است که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند (Zoragheh et al., 2012; Lloyd and Atkinson, 2001; Chica-Olmo et al., 2014; Goovaerts, 2009). در نهایت، با استفاده از وارد کردن وزن‌ها در معادله ۴، یک احتمال که بین صفر و یک قرار دارد برای موقعیت‌های اندازه‌گیری نشده به دست می‌آید. این احتمالات سپس می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های بیشتر در برنامه‌های کاربردی مانند تعیین آلودگی، مورد استفاده قرار گیرند (Zoragheh et al., 2012).

۴- روش کار

نتایج حاصل از تحلیل آماری بر روی داده‌های آرسنیک حاصل از رسوبات آبراه‌های هیستوگرام حاصل از این داده‌ها به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده میانگین داده‌ها برابر با ۱۰/۳ ppm است که از میانگین مقدار آرسنیک در پوسته زمین بسیار بالاتر می‌باشد. در این میان ۱۴ درصد از کل داده‌های رسوبات آبراه‌های (برابر با ۲۶۰ نمونه) بالاتر از حد مجاز توصیه شده توسط استانداردها در خاک برای آرسنیک (۲۰ ppm) و ۸۶ درصد از داده‌ها (معادل با ۱۵۴۴ نمونه) پایین‌تر از این مقدار هستند. توزیع داده‌ها با مقدار چولگی برابر با ۱۹/۶۴۳ بسیار نارایب بوده و از توزیع عادی پیروی نمی‌کند؛ از این رو روش کریجینگ شاخص روشی مناسب برای درون‌یابی داده‌های آرسنیک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

با توجه به اینکه حد مجاز توصیه شده توسط استانداردها در خاک برای آرسنیک برابر با ۲۰ ppm است؛ با استفاده از معادله (۱) متغیر شاخص برای عنصر آرسنیک ایجاد شد. در ادامه به منظور بررسی وجود آیزوتروپی در داده‌ها، مدل واریوگرام در جهت‌های مختلف ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ با استفاده از داده‌های شاخص به دست آمده از عنصر آرسنیک رسم شد؛ که نتایج آن در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌گردد، داده‌های مربوط به آنالیز داده‌های شاخص در جهت‌های مختلف تغییرپذیری یکسانی ندارند و آیزوتروپی منطقه‌ای

بررسی آلودگی آرسنیک در رسوبات آبراه‌های از روش کریجینگ شاخص استفاده شد و در پایان مناطقی که در آنها پتانسیل آلودگی آرسنیک بیشتر از حد مجاز در رسوبات آبراه‌های بودند، شناسایی شدند.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت تقریباً ۵۰۰۰ کیلومتر مربع، از دو نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰، به نام‌های ساردویی و بافت در کرمان در بخش جنوبی کمربند ارومیه-دختر تشکیل شده است (شکل ۱- الف) (Yousefi et al., 2012). این زون از پتانسیل بسیار بالایی برای اکتشاف ذخایر مس برخوردار است (Yousefi et al., 2012; Boomeri et al., 2009; Ranjbar et al., 2004). واحدهای سنگ‌شناسی در منطقه به ۸ رده تقسیم شدند (شکل ۱- ب). سنگ‌های متامورفیک پالئوزوئیک شامل فیلیت‌ها، شیست‌های سریستی و مرمر و آمیزه‌های کرتاسه شامل دیابازها، توف‌های اسپیلیتی، چرت‌ها، سربانتین، هارزبورژیت، ماسه‌سنگ، گابرو و کراتوفیرها قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی در منطقه مورد مطالعه هستند. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن به وسیله آذرآواری‌ها، آندزیت‌های تراکیتی، بازالت‌های تراکیتی، آندزیت-بازالت‌ها، لاهای آندزیتی، رسوبات توفی، ریولیت‌ها، توف‌های ریولیتی، توف‌های کلوخه‌ای، ایگنمبریت‌ها، سنگ‌های بازالتی و آندزیت‌ها مشخص می‌شوند. سنگ‌های رسوبی ائوسن در کمپلکس آتشفشانی-رسوبی بیشتر شامل ماسه‌سنگ‌ها، سیلتستون‌ها، کنگلومراها و سنگ‌های آهک هستند. سنگ‌های نفوذی شامل گرانادیوریت‌ها، کوارتزدیوریت‌ها، دیوریت‌ها، دیوریت-پورفیری، گرانیت پورفیری و گرانیت‌های با سن کرتاسه، ائوسن، الیگوسن-میوسن و نئوژن هستند. رسوبات الیگوسن-میوسن عمدتاً شامل کنگلومراها، سیلتستون‌ها و ماسه‌سنگ‌ها هستند. سنگ‌های آتشفشانی نئوژن عمدتاً شامل آذرآواری‌ها، آگلومراهای آندزیتی، داسیت‌ها، داسیت‌های ریولیتی و آندزیت‌هایی هستند که سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی ائوسن را پوشانده‌اند. نهشته‌های آبرفتی کواترنر، تراس‌ها، رس‌ها و مخروط‌افکنه‌های گراولی جوان‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی در منطقه هستند (Yousefi et al., 2012).

در منطقه مورد مطالعه ۳۲ اندیس شناخته شده از نهشته مس پورفیری وجود دارد که از این اندیس‌ها به عنوان تست برای ارزیابی کارایی روش کریجینگ شاخص در شناسایی مناطق آلوده به آرسنیک استفاده گردیدند.

۳- کریجینگ شاخص

کریجینگ شاخص روش درون‌یابی انعطاف‌پذیری را برای مجموعه داده‌هایی فراهم می‌آورد که (۱) مشاهدات زیادی در زیر حد تشخیص وجود داشته باشد؛ (۲) هیستوگرام داده‌ها به شدت لاگ نرمال باشد و (۳) کلاس‌های خاصی از مقادیر دارای ارتباط فضایی بهتری نسبت به کلاس‌های دیگر هستند (مانند غلظت‌های پایین آلودگی) (Goovaerts, 2009). در مورد داده‌های با چولگی بسیار زیاد، مقادیر بسیار بزرگ می‌تواند به شدت بر روی شناسایی الگوی فضایی و در نتیجه پیش‌بینی تأثیر بگذارد (Goovaerts, 2009). روش‌های مختلفی برای مقابله با اثر مقادیر خارج از ردیف ارائه شده است که یکی از این روش‌ها، استفاده از روش کریجینگ شاخص به جای روش‌های متداول کریجینگ است (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۰).

کریجینگ شاخص یک روش زمین‌آماري نامتغیری برای بر آورد احتمال بیشتر از یک مقدار ویژه (z_k) در موقعیت داده شده است. در کریجینگ شاخص، متغیر تصادفی ($Z(u)$) به یک متغیر شاخص با توزیع دوتایی به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$I(u; z_k) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(u) \leq z_k, k = 1, 2, \dots, m \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

مقدار مورد انتظار $I(u; z_k)$ ، مشروط به n داده مجاور، می‌تواند به صوت زیر بیان شود:

$$E[I(u; z_k | (n))] = \text{Prob} \{Z(u) \leq z_k | (n)\} = F(u; z_k | (n)) \quad (2)$$

$$P(u; z_k | (n)) = 1 - F(u; z_k | (n)) \quad (3)$$

که $F(u; z_k | (n))$ مقدار تابع توزیع احتمال تجمعی شرطی $Z(u)$ است برای

معدنی در این مناطق است. در این خصوص در بخش‌های خاوری که حتی تراکم اندیس‌ها بیشتر است، آلودگی ویژه‌ای قابل ثبت نشده است. از این رو آلودگی محیط زیست در مناطق شمال و شمال خاوری باید مورد توجه خاصی قرار بگیرد. واریانس حاصل از روش کریجینگ شاخص نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود؛ در نتیجه تراکم کمتر نمونه‌ها در بخش باختری واریانس تخمین در این منطقه بیشتر است و با عدم قطعیت بیشتری همراه خواهد بود. واریانس تخمین در بخش‌های شمال و شمال خاوری که با توجه به شکل ۶ دارای آلودگی آرسنیک بالاتر از حد مجاز هستند، واریانس پایینی دارند و از این رو اعتبار تخمین آلودگی با استفاده از روش کریجینگ شاخص در این مناطق در حد قابل قبولی بوده و باید آلودگی آرسنیک در این مناطق مورد توجه قرار گیرد.

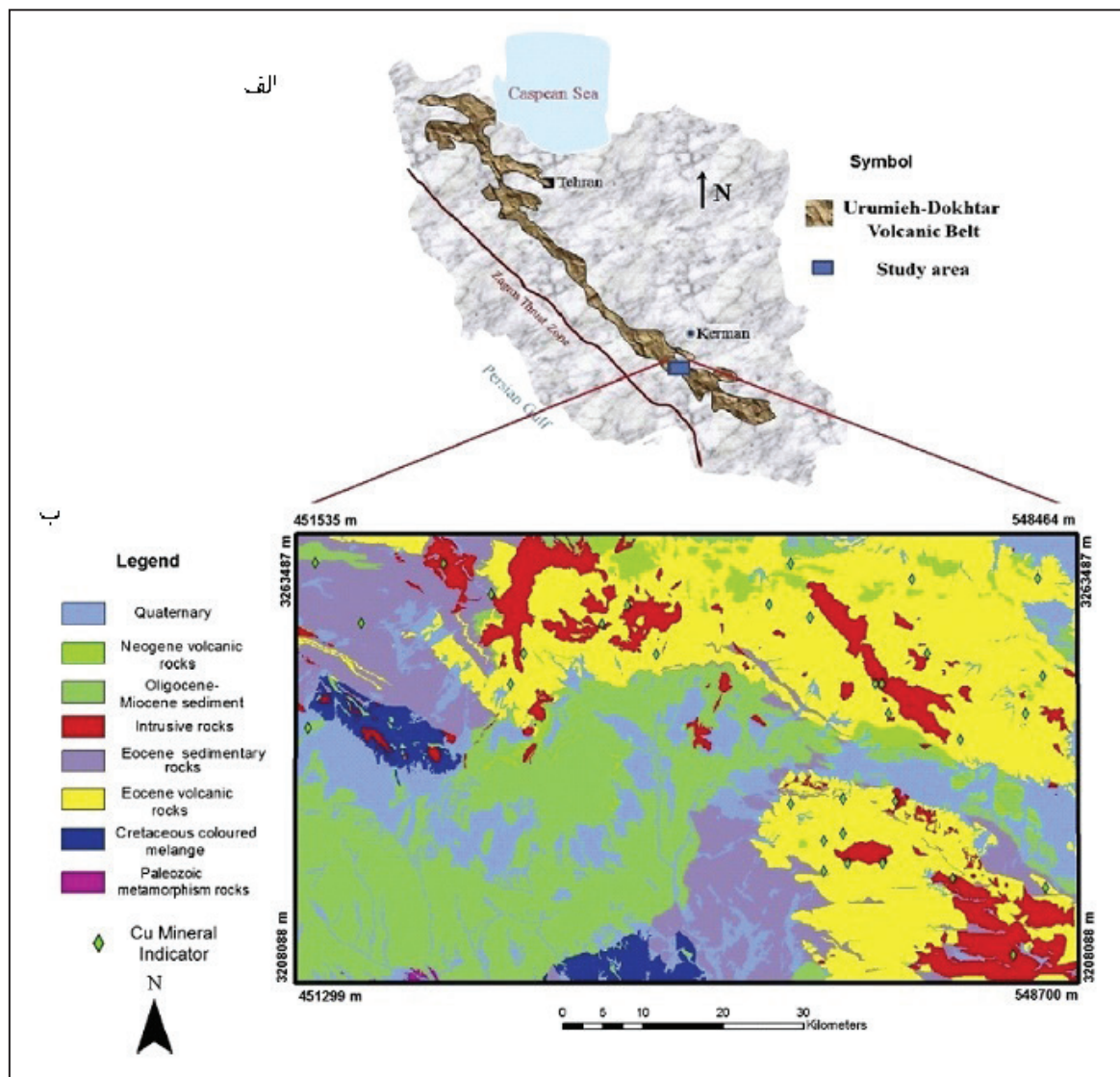
۶- نتیجه‌گیری

به دلیل قرارگیری استان کرمان روی کمربند ارومیه-دختر، این استان دارای پتانسیل بالای کانی‌سازی مس پورفیری است. در نتیجه، اکتشاف و فعالیت‌های معدنکاری بر روی نهشته‌های مس پورفیری، در این ناحیه حجم بسیار بالایی دارد. با توجه به اینکه آرسنیک معمولاً همراه با کانی‌سازی سولفیدی بوده و حتی مقادیر کم این عنصر نیز سمی است؛ از این رو آلودگی آرسنیک در این منطقه باید مورد توجه قرار گیرد. در این راستا در مقاله حاضر از روش کریجینگ شاخص برای بررسی آلودگی آرسنیک در رسوبات آبراهه‌ای در مناطق ساردویی و بافت، در استان کرمان، و از اندیس‌های موجود در این مناطق برای ارزیابی روش مورد مطالعه، استفاده شد. در ابتدا پس از تبدیل داده‌ها به مقادیر صفر و یک و پس از آن، لحاظ کردن اثر آنیزوتروپی‌های هندسی و منطقه‌ای موجود در داده‌های آرسنیک رسوبات آبراهه‌ای، در نهایت نقشه نهایی نشان‌دهنده مقادیر بالاتر از حد آستانه (۲۰ ppm) حاصل از این داده‌های تبدیل یافته به دست آمد. همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقدار آرسنیک در بخش‌های شمال و شمال باختری بالاست و غلظت این عنصر در محیط‌های ثانویه (رسوبات آبراهه‌ای) مقادیر بالاتر از ۲۰ ppm دارند که متأثر از فعالیت‌های معدنی در این مناطق است. در این زمینه در بخش‌های خاوری که حتی تراکم اندیس‌ها بیشتر است آلودگی خاصی ثبت نشده است. در کنار مسئله تخمین، یکی از اهداف اصلی این پژوهش ارزیابی میزان قطعی نبودن داده‌های برآورد زده شده است. مطالعه همزمان نقشه واریانس برآورد و نقشه تخمینی آرسنیک، معیاری از قطعی نبودن مقادیر برآورد شده را ارائه می‌دهد. بدین ترتیب هر جا واریانس کمتر باشد، مقدار آرسنیک برآورد شده در آن نقطه خطای کمتری دارد. از این رو، نتایج حاصل از بررسی واریانس کریجینگ شاخص (شکل ۷)، که ابزار مناسبی برای ارزیابی خطای تخمین می‌باشد، حاکی از این است که با توجه به واریانس پایین تخمین در مناطق شمال و شمال خاوری و در نتیجه بالا بودن اعتبار تخمین، آلودگی آرسنیک در این مناطق باید مورد توجه خاصی قرار بگیرد و اقدامات لازم برای مدیریت آلودگی آرسنیک و کنترل آن در مناطق پیرامون فعالیت‌های معدنی تدوین و اجرا شود.

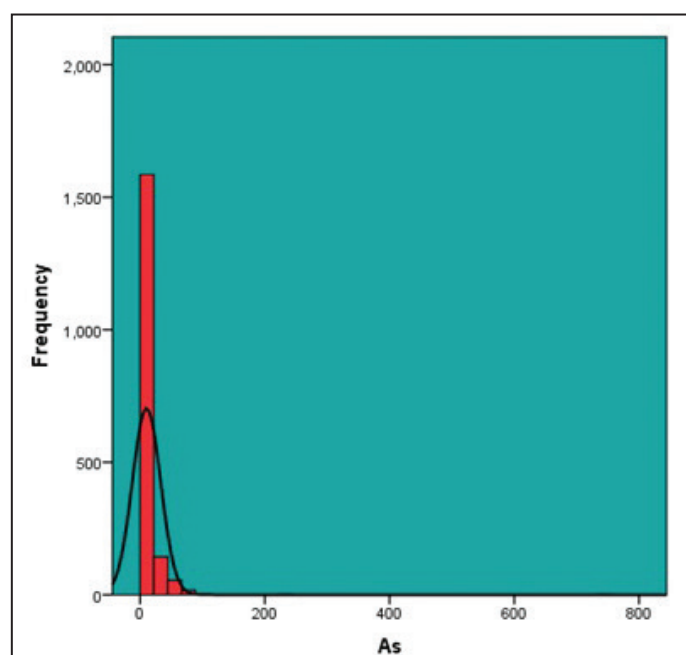
و هندسی هستند که با توجه به دامنه تأثیر آنها در جهت‌های مختلف، بیشترین تغییرپذیری در جهت ۱۳۵ درجه و کمترین آن در جهت ۴۵ درجه به دست آمد. در صورت مشاهده تغییرپذیری متفاوت در واریوگرام‌های تجربی ترسیمی در جهت‌های مختلف (وجود آنیزوتروپی در داده‌ها)، باید مدل واریوگرام آنیزوتروپی به آنها برازش داده شود (Budrikaitė, 2005). از این رو ابتدا یک مدل واریوگرام آنیزوتروپی به این واریوگرام‌های تجربی برازش شد که نتیجه آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل آنیزوتروپی که در اینجا ارائه شده یک مدل دوساختاره با اثر قطعه‌ای برابر با ۰/۰۵ و از دو مدل کروی در جهت‌های آزیموت ۴۵ و ۱۳۵ درجه تشکیل شده است که مشخصات این مدل در جدول ۱ آورده شده است. پس از اعمال آنیزوتروپی منطقه‌ای، از روش کریجینگ شاخص برای درون‌یابی آلودگی آرسنیک در منطقه مورد مطالعه استفاده شد که نتیجه آن را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد. در شکل ۷ نیز واریانس کریجینگ نشان داده شده است.

۵- بحث

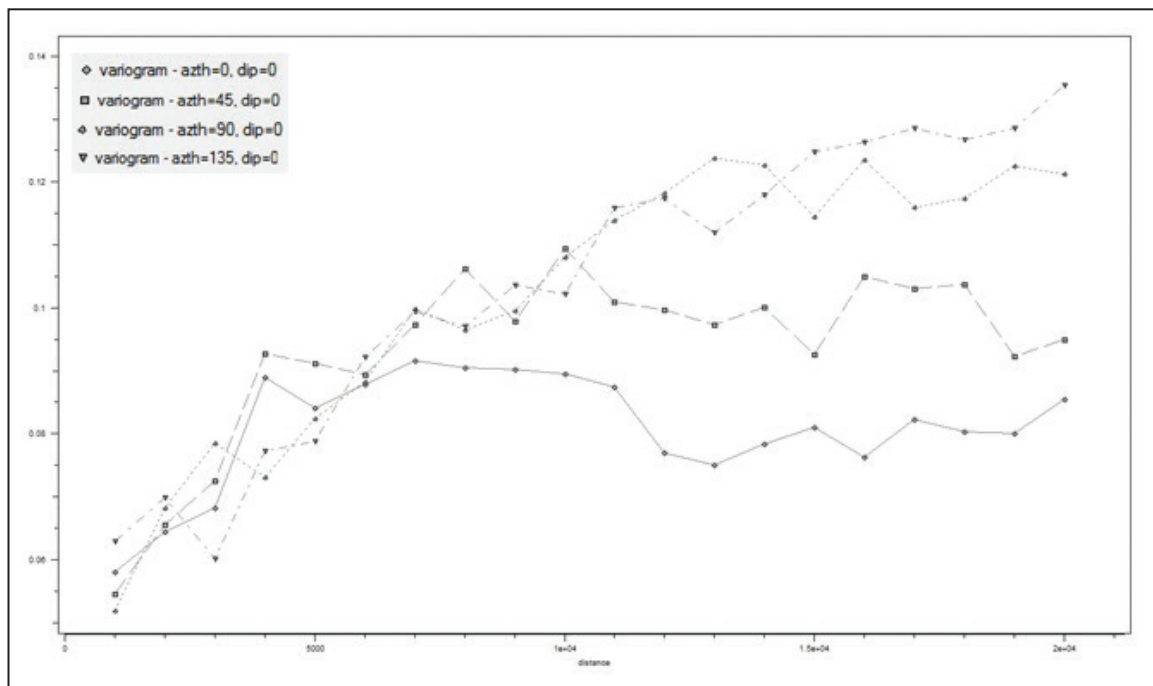
در روش‌های زمین‌آماری نیاز به نرمال بودن داده‌هاست (Mousavifazl et al., 2013). اما روش کریجینگ شاخص نیازی به نرمال بودن داده‌ها ندارد و می‌توان از این روش برای همه داده‌ها، فارغ از چگونگی توزیع آنها استفاده کرد. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است داده‌های آرسنیک حاصل از تجزیه رسوبات آبراهه‌ای دارای توزیع لاگ نرمال با چولگی بسیار زیاد ۱۹/۶۴۳ می‌باشند (جدول ۱). اما استفاده از کریجینگ شاخص در این مورد، نیازی به نرمال کردن داده‌ها نمی‌باشد. با توجه به اینکه حد مجاز توصیه شده توسط استانداردها در خاک برای آرسنیک ۲۰ ppm است در نتیجه مقدار هر نمونه به شاخص صفر و یک تبدیل شد. هدف از این مقاله پیدا کردن مناطقی با احتمال آلودگی بالاتر از حد مجاز آرسنیک در منطقه است؛ در نتیجه به مقادیر بالاتر از ۲۰ ppm عدد ۱ و به مقادیر پایین‌تر از آن عدد صفر اختصاص یافت. پس از انجام واریوگرافی در جهت‌های مختلف مشخص شد که داده‌ها دارای آنیزوتروپی منطقه‌ای و هندسی هستند (شکل‌های ۳ و ۴). در مورد داده‌های آرسنیک حاصل از رسوبات آبراهه‌ای در جهت آزیموت صفر درجه مقدار رنج برابر با ۸۴۰۰ (شکل ۴- الف)، در جهت آزیموت ۴۵ درجه رنج ۸۰۰۰ (شکل ۴- ب)، در جهت آزیموت ۹۰ درجه رنج ۱۶۰۰۰ (شکل ۴- ج) و در جهت آزیموت ۱۳۵ درجه رنج ۱۸۳۰۰ (شکل ۴- د) بودند. مقدار واریانس نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۸۵، ۰/۱، ۰/۱۲۴ و ۰/۱۲۸ به دست آمد که در نتیجه در جهت‌های ۴۵ و ۱۳۵ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین تغییرات هستند. پس از مشخص شدن کمترین و بیشترین جهت‌های آنیزوتروپی و با برازش یک مدل آنیزوتروپی دوساختاره در این دو جهت، اثر آنیزوتروپی هندسی و منطقه‌ای در داده‌های آرسنیک رسوبات آبراهه‌ای لحاظ گردید و در نهایت با تعریف بیضی جستجو برای کریجینگ شاخص، نقشه پایانی مناطق با آلودگی بالای ۲۰ ppm (شکل ۶) تهیه شد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود احتمال آلودگی آرسنیک در بخش‌های شمال و شمال باختری منطقه بالا بوده که متأثر از فعالیت‌های



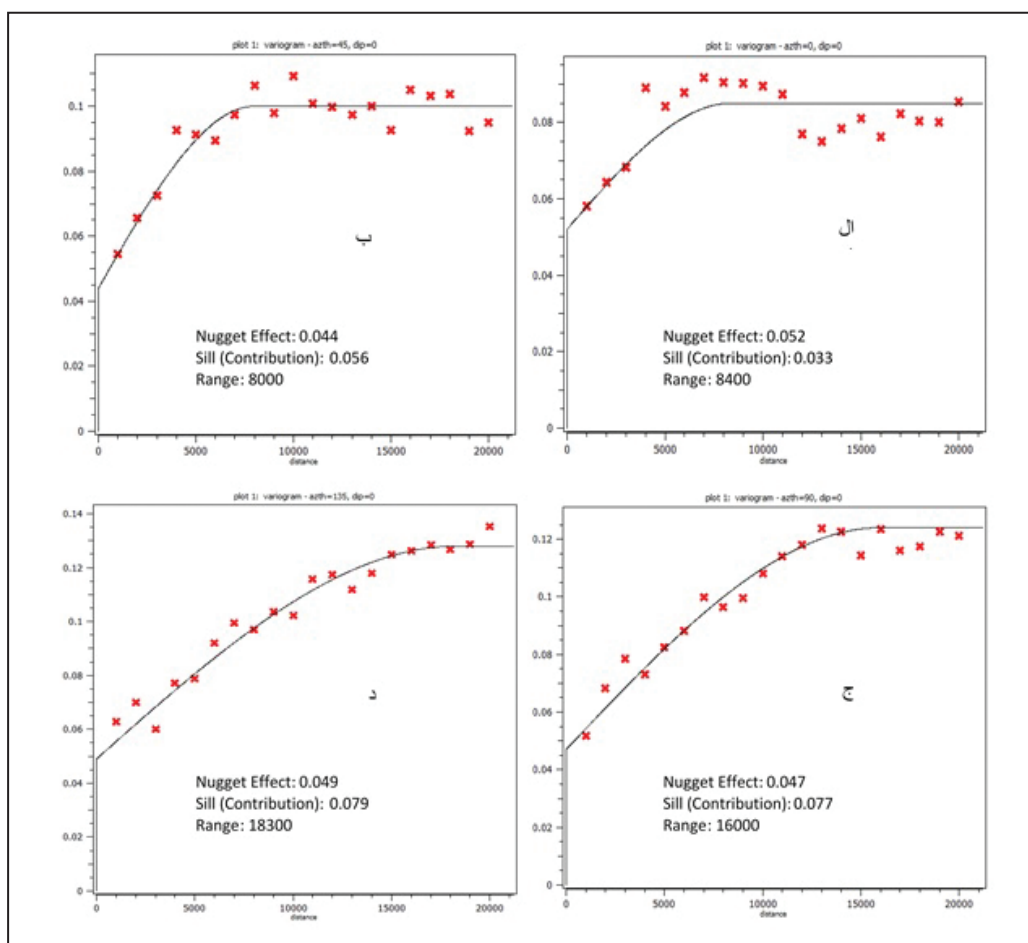
شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران؛ ب) نقشه ساده شده زمین‌شناسی (Yousefi et al., 2012).



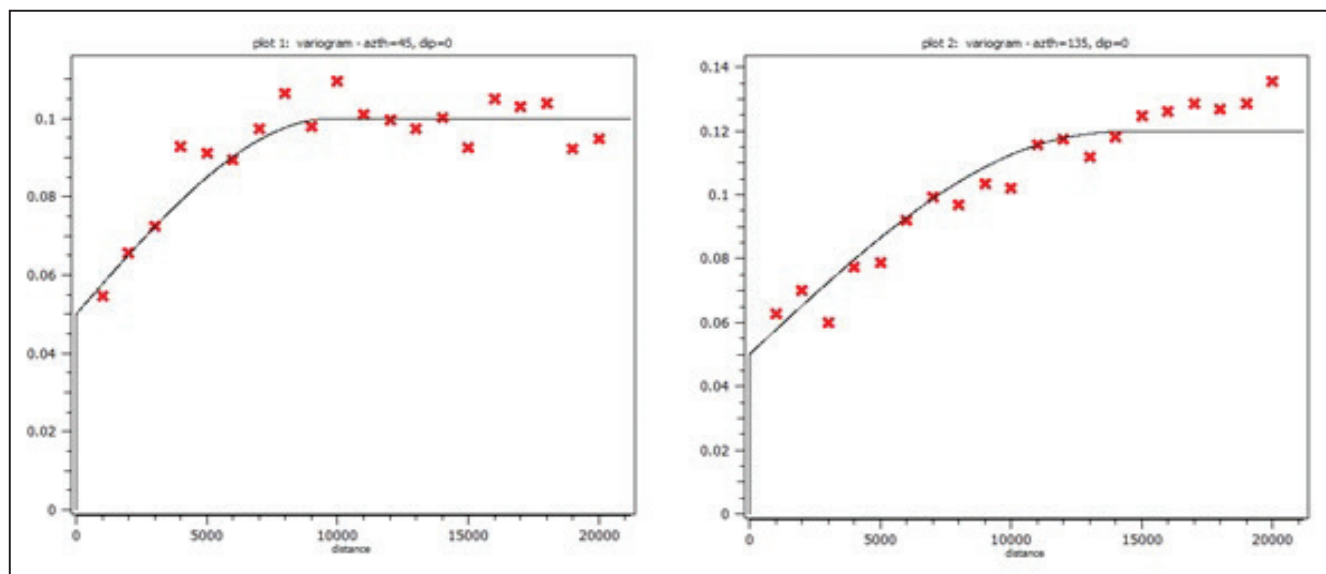
شکل ۲- هیستوگرام داده‌های خام برای عنصر آرسنیک.



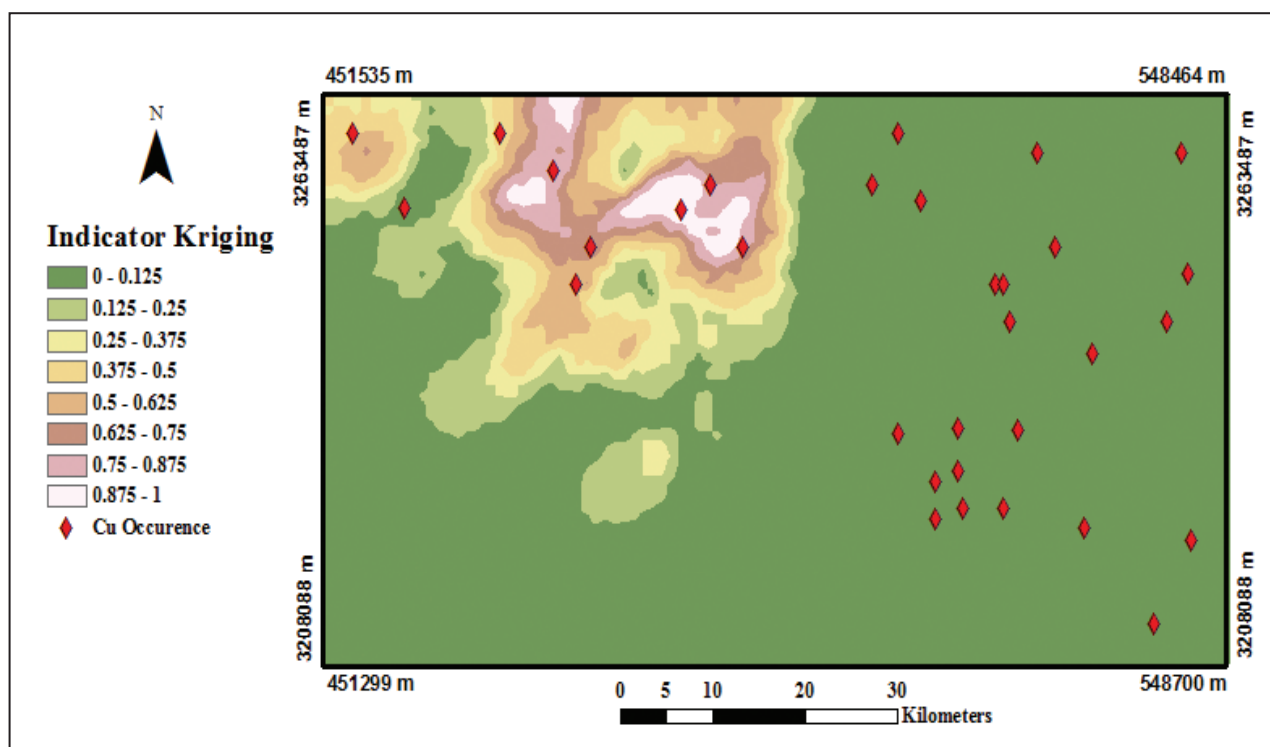
شکل ۳- واریوگرام تجربی شاخص در چهار جهت ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵.



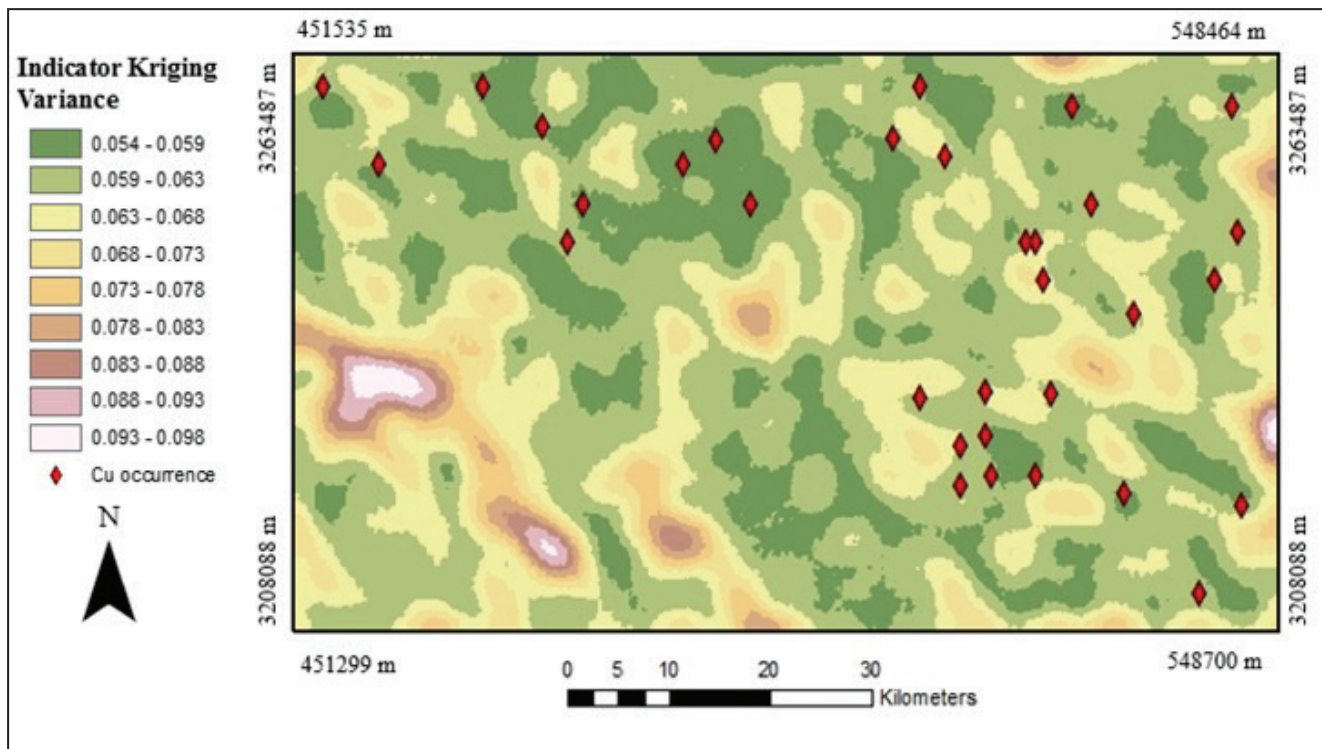
شکل ۴- برازش مدل به واریوگرام‌های تجربی در جهت‌های: الف) ۰؛ ب) ۴۵؛ ج) ۹۰؛ د) ۱۳۵.



شکل ۵- برازش مدل واریوگرام آنیزوتروپی به واریوگرام‌های تجربی در جهت‌های ۴۵ و ۱۳۵.



شکل ۶- نقشه توزیع آلودگی آرسنیک با استفاده از روش کریجینگ شاخص.



شکل ۷- نقشه توزیع واریانس حاصل از روش کریجینگ شاخص.

جدول ۱- پارامترهای آماری برای داده‌های خام عنصر آرسنیک.

تعداد داده	کمینه	بیشینه	میانگین	میانه	مد	چولگی	کشیدگی	واریانس
۱۸۰۴	۰	۷۴۳	۱۰/۳۰	۴/۰۵	۵	۱۹/۶۴۳	۶۰۵/۴۰۵	۵۱۵/۹۵۴

جدول ۲- مشخصات مدل آیزوتروپی.

۰/۰۵	اثر قطعه ای
کروی	نوع مدل ساختار اول
۱۳۵	آزیموت ساختار اول
۱۴۶۰۰	دامنه بیشینه ساختار اول
۹۸۰۰	دامنه کمینه ساختار اول
۰/۰۵	سقف ساختار اول
کروی	نوع مدل ساختار دوم
۴۵ درجه	آزیموت ساختار دوم
۱۲۰۰۰	دامنه بیشینه ساختار دوم
۱۲۰۰۰	دامنه کمینه ساختار دوم
۰/۰۲	سقف ساختار دوم

کتابناری

حسنی پاک، ع.ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۹۰- تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران. چاپ سوم، ۹۸۷ ص.
 شریعتی، ش.، آقائباتی، ع.، موسوی حرمی، ر.، مدبری، س. و آدابی، م. ح.، ۱۳۹۰- بررسی میزان آلایندگی ناشی از صنایع معدنی و فرآوری سرب و روی بر آب و خاک منطقه انگوران- دندی، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۸۱، صص. ۴۵ تا ۵۴.
 فتحی هفشجانی، ز.، لطفی، م. و سیاره، ع.، ۱۳۹۰- بررسی آلودگی آرسنیک در خاک‌های پهنه باختری بیجار. مجموعه مقالات سی‌امین گردهمایی علوم زمین.

References

- Antunes, I. M. H. R. and Albuquerque, M. T. D., 2013- Using indicator kriging for the evaluation of arsenic potential contamination in an abandoned mining area (Portugal). *Science of the Total Environment* 442. 545–552.
- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D. R., 2009- The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: a geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. *Journal of Geochemical Exploration* 103, 17–29.
- Budrikaite, L., 2005- Modeling of zonal anisotropic variograms. *Liet. matem. rink*, 45, spec. nr., 339-342.
- Butcher, D. J., 2007- Environmental Applications of Arsenic Speciation Using Atomic Spectrometry Detection. *Applied Spectroscopy Reviews* 42, p.1–22.
- Castrignano, A., Goovaerts, P., Lulli, L. and Bragato, G., 2000- A geostatistical approach to estimate probability of occurrence of *Tuber melanosporum* in relation to some soil properties. *Geoderma* 98, 95–113.
- Chica-Olmo, M., Luque-Espinar, J. A., Rodriguez-Galiano, V., Pardo-Igúzquiza, E. and Chica-Rivas., 2014- Categorical Indicator Kriging for assessing the risk of groundwater nitrate pollution: The case of Vega de Granada aquifer (SE Spain). *Science of the Total Environment* 470–471. 229–239.
- Duan, L., Song, J., Yuan, H., Li, X. and Li, N., 2013- Spatio-temporal distribution and environmental risk of arsenic in sediments of the East China Sea, *Chemical Geology* 340. 21-31.
- Goovaerts, P., 2009- AUTO-IK: A 2D indicator kriging program for the automated non-parametric modeling of local uncertainty in earth sciences. *Computers and Geosciences* 35, 1255–1270.
- Goovaerts, P., AvRuskin, G., Meliker, J., Slotnick, M., Jacquez, G. M. and Nriagu, J., 2005- Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of Southeast Michigan. *Water Resour Res*, 41(7). [W07013 10.1029].
- Hassan, M. M. and Atkins, P. J., 2011- Application of geostatistics with indicator kriging for analyzing spatial variability of groundwater arsenic concentrations in Southwest Bangladesh. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46, 1185–1196.
- Juang, K. W. and Lee, D. Y., 1998- Simple indicator kriging for estimating the probability of incorrectly delineating hazardous areas in a contaminated site. *Environmental Science and Technology* 32, 2487–2493.
- Lee, J. J., Liu, C. W., Jang, C. S. and Liang, C. P., 2008- Zonal management of multi-purpose use of water from arsenic affected aquifers by using a multi-variable indicator kriging approach. *J Hydrol* 359, 260–273.
- Liu, C. W., Jang, C. S. and Liao, C. M., 2004- Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan), *Science of the Total Environment* 321, 173–188.
- Liu, J. C. S., Lu, C. W. and Lin, K. L., 2007- Delimitation of arsenic-contaminated groundwater using risk-based indicator approaches around blackfoot disease hyperendemic areas of southern Taiwan. *Environ Monit Assess* 134, 293–304.
- Lloyd, C. D. and Atkinson, P. M., 2001- Assessing uncertainty in estimates with ordinary and indicator kriging. *Computers and Geosciences* 27, 929–937.
- Mousavifazl, H., Alizadh, A. and Ghahraman, B., 2013- Application of Geostatistical Methods for determining nitrate concentrations in Groundwater (case study of Mashhad plain, Iran). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5, 318-328.
- Nriagu, J. O., Bhattacharya, P., Mukherjee, A. B., Bundschuh, J., Zevenhoven, R. and Loeppert, R. H., 2007- Arsenic in soil and groundwater: an overview, *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*, Volume 9, 3-60.
- Pais, I. and Jones, J. B., 2000- *The Hand Book of Trace Elements*. St. Lucie press.
- Ranjbar, H., Honarmand, M. and Moezifar, Z., 2004- Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *Journal of Asian Earth Sciences* 24, 237–243.
- Ungaro, F., Ragazzi, F., Cappellin, R. and Giandon, P., 2008- Arsenic concentration in the soils of the Brenta Plain (Northern Italy): Mapping the probability of exceeding contamination thresholds, *Journal of Geochemical Exploration* 96. 117–131.
- Van Meirvenne, M. and Goovaerts, P., 2001- Evaluating the probability of exceeding a site-specific soil cadmium contamination threshold. *Geoderma* 102, 75–100.
- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and Carranza, E. J. M., 2012- Geochemical mineralization probability index (GMPI): A new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. *Journal of Geochemical Exploration* 115. 24–35.
- Zoraghein, H., Alesheikh, A. A., Alimohammadi, A. and Vahidnia, M. H., 2012- The utilization of soft transformation and genetic algorithm to model two sources of uncertainty of Indicator Kriging, *Computers, Environment and Urban Systems* 36 (2012) 592–598.

Assessing arsenic contamination affected by mining activities in Kerman province by using indicator Kriging method

E. Ghadiri Soufi^{1*}, S. Soltani Mohammadi², M. Yousefi³ and A. Aalianvari²

¹Ph.D. Student, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

²Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

³Assistant Professor, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 2016 February 01

Accepted: 2016 October 23

Abstract

In mining areas, assessing toxic elements (e.g., arsenic) contamination in the soil and stream deposits is a critical issue. It is because mining activities release dangerous elements that enter the environment. In this paper, for modeling the spatial distribution of arsenic contamination in Sarduiyeh-Baft area, in Kerman Province, across an area of ca. 5000 km², 1804 stream sediment samples were collected and analyzed. The recommended standard limit for arsenic in soil is 20 ppm, so samples showing arsenic concentration >20 ppm are contaminated samples, which need land reform processes. However, since the number of collected samples is limited, indicator Kriging method was used to identify the possibility of contamination. In the study area, there are 32 known occurrences of porphyry-Cu deposits. Thus, in order to estimate the arsenic contamination in the unsampled locations, indicator kriging method was used. The results indicate arsenic contaminations in north and northwest parts of the study area, which could be occurred by mining of the porphyry-Cu deposits. However, the results show that there is no arsenic contamination in the eastern part although there are several mining sites with high activities.

Keywords: Arsenic, Mining activities, Porphyry-Cu, Environmental pollution, Indicator Kriging.

For Persian Version see pages 219 to 226

*Corresponding author: E. Ghadiri Soufi; E-mail: Elham_ghadirisufi@yahoo.com