

ارزیابی عملکرد مدل‌های درونیابی در پهنه‌بندی فلزات سنگین خاک (مطالعه موردی: شهرستان هریس)

سیدرضا صادقی‌خو^۱، رحیم‌علی عباسپور^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
R.Sadeghikho@ut.ac.ir

۲. استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۱۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۸

چکیده

فلزات سنگین در زمین‌های کشاورزی جذب گیاهان می‌شوند؛ وارد چرخه غذایی انسان شده و مقدار بیش‌ازحد آن‌ها باعث بیماری‌هایی در انسان می‌شود. بنابراین آگاهی از توزیع مکانی این عناصر برای برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست امری ضروری است. در این تحقیق به بررسی توزیع مکانی فلزات سنگین در شهرستان هریس پرداخته شد. بدین منظور نمونه‌هایی از خاک تهیه و به اندازه‌گیری غلظت عناصر (پتاسیم، منگنز، روی، آهن و مس) پرداخته شد. در ادامه با استفاده از روش‌های ریاضی (روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله، چندجمله‌ای‌های محلی و توابع پایه‌ای شعاعی) و روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ) به تهیه نقشه‌های خطرپذیری پرداخته شد. در بین روش‌های مختلف، مدل‌های بهینه با مقایسه مقادیر کمترین مربعات خطاها، میانگین مطلق خطاها و میانگین قدر مطلق خطاها ارزیابی شدند. بدین ترتیب که نزدیک‌تر بودن معیارهای ذکر شده به صفر ملاک تعیین مدل بهینه قرار گرفت. از بین مدل‌های بررسی شده برای عنصر پتاسیم، روش وزن‌دهی معکوس فاصله، برای منگنز روش کریجینگ معمولی با مدل نمایی، برای روی، روش کریجینگ ساده با مدل کروی، برای آهن، روش توابع پایه‌ای شعاعی و برای مس نیز روش توابع پایه‌ای شعاعی، بهینه‌ترین روش‌ها انتخاب شدند. سپس به تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی به تفکیک مناطق مختلف با استفاده از شاخص‌های استاندارد WHO، کلی و استاندارد موسسه خاک و آب ایران پرداخته شد و نتایج نشان داد که عناصر پتاسیم و مس در محدوده غیرمجاز بودند.

کلیدواژه

آلودگی خاک، سیستم اطلاعات مکانی، فلزات سنگین، کریجینگ، مدل‌های درونیابی.

۱. سرآغاز

غذایی انسان می‌شوند (Burger, 2008). افزایش بیش از حد این عناصر در خاک موجب افزایش احتمال بروز برخی بیماری‌ها از جمله سرطان می‌شود (Duruibe et al., 2007; Nriagu, 1988). و همچنین این عناصر به دلیل تجزیه نشدن، آثار خطرناکی روی دستگاه گوارش و سیستم عصبی انسان دارند (Maas et al., 2010). در برخی موارد آلودگی ناشی از فلزات سنگین خاک حتی به مرگ

بررسی عناصر آلاینده موجود در خاک، به‌عنوان مهم‌ترین منبع تغذیه برای انسان امری اجتناب‌ناپذیر است. از جمله این عناصر می‌توان به فلزات سنگین اشاره کرد. خاک‌های آلوده مناطق شهرنشین مستقیماً با انسان در ارتباط هستند (Sun et al., 2010). درحالی‌که در زمین‌های کشاورزی این عناصر جذب گیاهان شده و از این طریق وارد چرخه

است. (Li et al., 2017) در چین مرکزی با استفاده از روش درونیابی کریجینگ به بررسی میزان آلودگی فلزات سنگین در اطراف یک معدن پرداختند و نتایج حاصل نشان می‌داد که میزان آلودگی فلزات سنگین کرم و منگنز بسیار بیشتر از حد استاندارد جهانی این فلزات در خاک هست و از این رو کنترل این آلودگی‌ها را با استفاده از شاخص‌های طبیعی پیشنهاد کردند. (McGrath et al., 2004) در اطراف یک معدن نقره در ایرلند، با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار و سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) به تهیه نقشه ریسک‌پذیری فلز سرب برای تفکیک مناطق خطرناک و ایمن، براساس حد آستانه 1000 mg/kg پرداختند. (Saby et al., 2006) در اطراف شهر پاریس با استفاده از روش کریجینگ معمولی به بررسی توزیع مکانی فلز سرب پرداختند و با استفاده از تکنیک تقویت خاک‌های سطحی به بررسی سهم انسان در آلودگی خاک توسط فلز سرب پرداختند. نتایج حاصل حاکی از تأثیر زیاد انسان در این آلودگی بود (Xie et al., 2011). در شهر پکن به مقایسه روش‌های درونیابی کریجینگ معمولی، چندجمله‌ای‌های محلی، توابع پایه‌ای شعاعی و وزن‌دهی معکوس فاصله برای پیش‌بینی توزیع مکانی فلزات سنگین خاک پرداختند که نتایج حاصل نشان داد، همه روش‌های درونیابی دارای دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی فلزات سنگین خاک هستند (Yasrebi et al., 2009). در شهر شیراز به مقایسه روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ معمولی در پیش‌بینی بعضی پارامترهای شیمیایی خاک پرداختند و با ارزیابی متقابل میانگین کمترین مربعات و میانگین قدرمطلق خطاها به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ معمولی در همه پارامترها عملکرد بهتری نسبت به وزن‌دهی معکوس فاصله داد. (Li et al., 2015) در چین با استفاده از روش کریجینگ به بررسی آلودگی فلزات سنگین پرداختند و نتایج حاصل نشان می‌دادند که میزان آلودگی فلز کادمیم در خاک به میزان محسوسی بیشتر از استاندارد جهانی این فلز است.

حیوانات می‌انجامد (Wardrope & Graham, 1982). عوامل متعددی در آلودگی خاک مؤثر هستند که استفاده نادرست انسان از طبیعت و افزایش بی‌رویه بهره‌وری از آن از جمله این عوامل محسوب می‌شوند و برای مدیریت مناسب محیط‌زیست و داشتن محیط‌زیست پایدار بررسی عوامل آلودگی و کنترل آنها ضروری است (Romić et al., 2007). در ایران، افزایش بهره‌وری اقتصادی نامناسب از زمین‌های کشاورزی و استفاده نابجا از مواد شیمیایی عوامل اصلی افزایش غلظت عناصر سنگین خاک به شمار می‌روند که در برخی مناطق به معضلی جدی تبدیل شده است. (Ghanbarpour et al., 2013; Shahbazi et al., 2016; Esmaili et al., 2014; Dankoub et al., 2012). از مهم‌ترین عوامل آلودگی خاک در ایران استفاده نادرست از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها است (Atafar et al., 2008). گیاهان، مواد مورد نیاز خود از جمله نیترات‌ها، فسفر، آهن و سایر عناصر مورد نیاز خود برای قندسازی را به صورت شیره خام و محلول در آب از خاک بدست می‌آورند. تا وقتی که خاک از این ترکیبات و عناصر غنی باشد گیاهان حداکثر بازدهی خود را در تولید قند دارند، اما به علت بهره‌وری نامناسب گیاهان، خاک از این مواد تهی و استفاده از کودهای شیمیایی برای کشاورزی گریزناپذیر می‌شود. کودهای شیمیایی به علت ارزان‌ی و ناآگاهی کشاورزان در استفاده بهینه، در ایران به وفور استفاده و از این رو باعث انباشتگی فلزات سنگین در خاک شده‌اند. در نتیجه آگاهی از توزیع مکانی این عناصر امری اجتناب‌ناپذیر است.

پژوهش‌های زیادی به بررسی توزیع مکانی فلزات سنگین آلاینده خاک پرداخته‌اند که از میان آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (Dragović et al., 2014) به بررسی غلظت عناصر کادمیم، روی، سرب، نیکل، منگنز، آهن، مس، کروم و کبالت در اطراف یکی از صنایع فولاد در ۵۰ کیلومتری شهر بلغراد پرداختند. نتایج حاصل از روش کریجینگ معمولی نشان می‌داد که توزیع این عناصر بیشتر از مقدار گزارش شده جهانی برای زمین‌های کشت‌نشده

بررسی همبستگی مکانی احتمالی بین غلظت این عناصر در خاک‌های کشاورزی و (iii) تفکیک مناطق دارای آلودگی بیشتر از حد آستانه مجاز شاخص کلی و استاندارد WHO و استاندارد مؤسسه حفاظت خاک و آب ایران.

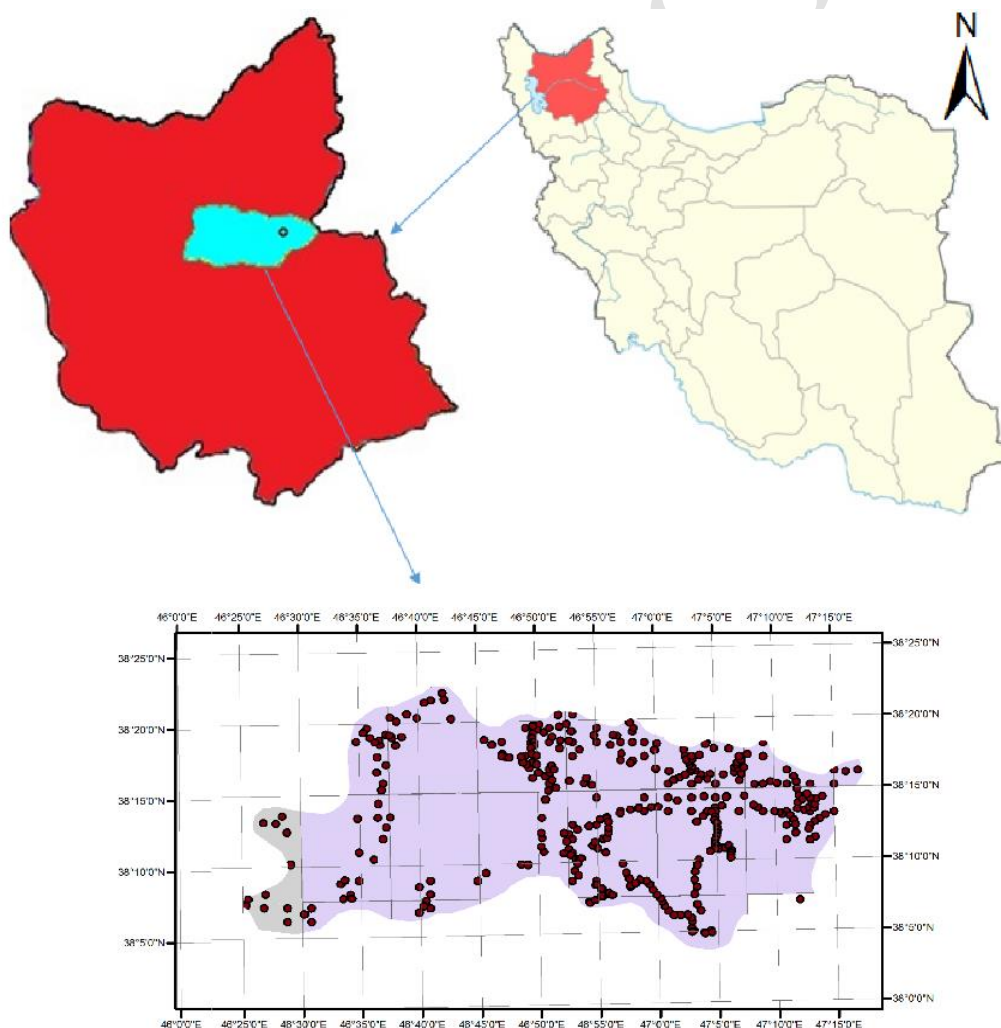
۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

شهرستان هریس واقع در شمال غربی ایران در بین عرض‌های $38^{\circ}04'$ و $38^{\circ}22'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $46^{\circ}22'$ و $47^{\circ}22'$ شرقی قرار دارد (شکل ۱).

در همه پژوهش‌های ذکر شده پیشین، محققان برای پیشبرد اهداف خود از روش‌های متفاوتی برای تخمین پهنه‌بندی مقدار فلزات سنگین نمونه‌برداری شده در منطقه مورد مطالعه استفاده کردند و لذا سؤالی که پیش می‌آید این است که کدام روش می‌تواند محققان را در ارزیابی بهتر میزان فلزات سنگین در نقاط برداشت نشده یاری کند.

هدف از این تحقیق: (i) تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی عناصر روی، مس، آهن، منگنز و پتاسیم با استفاده از روش‌های متفاوت درونیابی و انتخاب بهترین روش درونیابی مکانی با مقایسه RMSE, MAE و MBE (ii)



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه برداشت شده

هستند. اصل نخست جغرافیا بیان می‌کند که پدیده‌های روی سطح زمین به یکدیگر شبیه هستند، اما پدیده‌های نزدیکتر به هم نسبت به پدیده‌های با فاصله زیاد شباهت بیشتری به هم دارند (Tobler, 2004). اساس روش‌های درونیایی نیز بر این مبناست که هرچه نقاط برداشت نشده فاصله کمتری با نقاط برداشت شده داشته باشد مقدار کمیت پیش‌بینی شده برای کمیت مورد نظر در آن نقطه تفاوت کمتری با نقاط برداشت شده دارد.

۱.۳. کریجینگ

کریجینگ یکی از روش‌های درونیایی زمین‌آمار است که اساس آن بر پایه میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و از جمله ویژگی‌های این روش که آن را از سایر روش‌های درونیایی متمایز می‌سازد این است که این روش بهترین تخمین‌گر ناریب است (Isaak & Srivastava, 1989). برای استفاده از روش‌های درونیایی داده‌های مورد استفاده باید دارای توزیع نرمال باشند. برقراری این شرط با استفاده از نمودار QQ انجام گرفت (Johnston et al., 2001) و داده‌هایی که از توزیع نرمال دور بودند با استفاده از تبدیل لگاریتمی به داده‌هایی با توزیع نرمال تبدیل شدند. نخستین مرحله در آنالیزهای آماری محاسبه و ترسیم واریوگرام است در حقیقت واریوگرام تغییرپذیری نمونه‌ها براساس فاصله بین آنها را بیان می‌کند. واریوگرام تجربی براساس رابطه (۱) بیان می‌شود (Webster & Oliver 2001):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

که در آن $m(h)$ تعداد زوج مشاهدات به فاصله h از یکدیگر هستند و $Z(x_i)$ مقدار مشاهده‌شده متغیر Z در نقطه x_i و $Z(x_i + h)$ مقدار مشاهده‌شده متغیر Z در مکان $x_i + h$ است.

مرحله بعدی، انتخاب بهترین مدل تئوری برای برازش به واریوگرام تجربی است. شکل واریوگرام مدل‌شده نشان‌دهنده خودهمبستگی مکانی داده‌ها و توصیف‌کننده

ارتفاع این شهرستان از سطح دریا بین ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ متر است. آب و هوای این منطقه نیمه‌خشک سرد (سازمان-هواشناسی-کشور ۲۰۱۸) محسوب می‌شود. بیشینه و کمینه دمای مطلق این منطقه به ترتیب ۳۶/۵ درجه سانتی‌گراد بالای صفر و ۳۳ درجه سانتی‌گراد زیر صفر و میانگین بارش سالانه این شهرستان ۳۵۰ میلیمتر است (اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی). زمین‌های این شهرستان برای کشاورزی کاملاً مناسب و بسیار حاصل‌خیز هستند. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق دارای مساحتی حدود ۱۵۸،۰۰۰ هکتار است که حدود ۱۱۶،۰۰۰ هکتار از آن پوشیده از زمین‌های کشاورزی است و شغل اکثر مردم منطقه کشاورزی است.

۲.۲. روش‌های نمونه‌برداری

در این تحقیق ۳۷۰ نمونه خاک در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری بطور تصادفی-سیستماتیک از زمین‌های کشاورزی این منطقه برداشت شد و پس از انتقال به آزمایشگاه برای اندازه‌گیری غلظت عناصر مورد بررسی از روش‌های جذب اتمیک (Beatty, 1978) برای عناصر کم مصرف روی، مس، آهن و منگنز و روش فلیم فتومتری (Cheesbrough, 2004) برای عنصر پتاسیم استفاده شد و با استفاده از GPS برداشت مختصات نمونه‌ها صورت گرفت.

۳. تحلیل‌های آماری

برای برآورد مقدار فلزات سنگین در نقاط برداشت‌نشده در منطقه مورد مطالعه لازم است از روش‌های درونیایی استفاده شود. این روش‌ها که عموماً براساس اصل نخست جغرافیا استوار هستند شامل روش‌های ریاضی شامل وزن‌دهی معکوس فاصله، چندجمله‌ای‌های محلی و توابع پایه‌ای شعاعی و روش‌های زمین‌آمار شامل روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و کریجینگ جهانی با مدل‌های واریوگرام^۱ دایره‌ای، کروی، گوسین^۲ و نمایی

سوم بین متغیرها، در همسایگی نقاط X ، Y و Z و حداقل سازی خطاهای محاسبه شده درونیابی صورت می‌گیرد (Ruppert, 1996).

۴.۳. توابع پایه‌ای شعاعی

این روش حالتی از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی است که در آن، مقادیر پیش‌بینی شده بیشتر از بیشینه مقدار مشاهده شده و کمتر از کمینه مقدار مشاهده شده موجود است. در حقیقت برازش سطح توسط این توابع مانند غشای پلاستیکی عمل می‌کند، به طوری که انحنا کلی سطح را به حداقل برساند (Mitasova & Mitas, 1993). توابع پایه‌ای شعاعی براساس پنج تابع اصلی درونیابی را انجام می‌دهد که هسته اصلی این توابع مجموع مقادیر مربعات $(h^2 + R^2)$ است که R عامل هموارکننده و h ترسیم ناهمسانگرد مربوط به فاصله نقاط است (Carlson & Foley, 1991). در این روش برای هر مکان تابعی در نظر گرفته می‌شود که ترکیب خطی آنها به عنوان تابع نهایی برای پیش‌بینی مقدار تابع در مکان مجهول استفاده می‌شود (Mitasova & Mitas, 1993).

$$\hat{z} = \sum_{i=1}^n \omega \varphi(\|s_i - s_0\|) + w_{n+1} \quad (3)$$

که $\varphi(r) = \|s_i - s_0\|$ تابع پایه‌ای شعاعی، r فاصله اقلیدسی بین مکان مجهول (s_0) و مکان داده‌های مشاهده شده (s_i) و ω_i ‌ها وزن‌هایی هستند که باید برآورد شوند و با فرض $w = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\}$ از طریق حل دستگاه زیر بدست می‌آیند (Mitasova & Mitas, 1993):

$$\begin{pmatrix} \emptyset & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

که \emptyset ماتریس با درایه‌های i, z به طوری که $\varphi(\|s_i - s_j\|)$ درایه‌های آن را تشکیل می‌دهد. 1 برداری ستونی دارای درایه‌های یک و z بردار ستونی داده‌ها است. اگر φ بردار $\varphi(\|s_i - s_0\|)$ باشد آنگاه مقدار برآورد شده برای مکان مجهول برابر است با (Mitasova & Mitas, 1993):

دامنه^۳، قطعه^۴ و سقف^۵ است (Webster & Oliver 2001). در این تحقیق به بررسی مدل‌های کروی، دایره‌ای، نمایی و گوسین پرداخته شده است. درونیاب کریجینگ خود به روش‌های مختلفی تقسیم می‌شود که مدل‌های تست شده در این تحقیق کریجینگ‌های معمولی، جهانی و ساده هستند (Johnston et al. 2001).

۲.۳. وزن‌دهی معکوس فاصله

این روش، روشی نقطه‌مبنا است که براساس اصل نخست جغرافیا عمل می‌کند. مقدار یک پارامتر در یک مکان نمونه‌برداری نشده برابر است با (Zhanji, 1999):

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

که در آن، $Z(x)$ مجهول مسئله برای پیش‌بینی در نقطه x ؛ n تعداد نقاط نمونه‌برداری شده مؤثر در پیش‌بینی $Z(x)$ ؛ w_i وزن نقطه نمونه‌برداری شده i ام؛ d_i فاصله نقطه مجهول از نقطه مشاهده شده i ام و p توان فاصله است. در این روش درونیابی پارامتر وزن‌دهی w_i براین اساس عمل می‌کند که هر چه فاصله نقاط نمونه‌برداری شده از نقطه مجهول بیشتر باشد تأثیر آن در مقدار پیش‌بینی شده کمتر است (Zhanji, 1999).

۳.۳. چندجمله‌ای‌های موضعی

درونیابی چندجمله‌ای روشی است برای پیدا کردن فرمولی که نمودار آن از میان داده‌ها می‌گذرد. چند جمله‌ای‌های جهانی سطح برازش داده شده به داده‌ها را با در نظر گرفتن تمامی داده‌های موجود در بررسی در نظر می‌گیرد، در حالیکه چند جمله‌ای‌های موضعی این کار را برای تعداد محدودی از نقاط در درون یک بیضوی در نظر گرفته شده انجام می‌دهد (Xie et al., 2011). این روش حداقل مجذورات متناسب را بین نقاط شناسایی شده در محدوده بیضوی شکل به عنوان وزن نقطه، تخصیص می‌دهد و براساس وزن تخصیص داده شده رابطه درجه اول، دوم یا

برای بررسی دقت و صحت هر روش در پهنه‌بندی عناصر سنگین مورد نظر از ریشه دوم میانگین توان دوم خطاها^۶ (RMSE)، میانگین مطلق خطاها^۷ (MAE) و میانگین اریبی خطاها^۸ (MBE) استفاده شد. روابط مربوط به این معیارها در زیر آورده شده است:

(۶)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)]^2} \quad (۷)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)|$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)] \quad (۸)$$

که در این معادله‌ها $\hat{Z}(x_i)$ مقدار برآورد شده در نقطه x_i و $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه x_i است. هراندازه مقادیر RMSE، MAE و MBE به صفر نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده آن است که مدل برازش داده‌شده دارای عملکرد بهتری است (Willmott, 1982).

۶.۳. همبستگی مکانی

علاوه بر معیارهای ذکر شده ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی همبستگی مکانی بین عناصر استفاده شد. این معیار با استفاده از فرمول زیر اندازه‌گیری می‌شود (Lawrence, 1989):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)S_x S_y} \quad (۹)$$

که در آن \bar{X} و S_x به ترتیب میانگین و انحراف معیار استاندارد مربوط به متغیر X و به‌طور متناظر آن \bar{Y} و S_y به ترتیب میانگین و انحراف معیار استاندارد مربوط به متغیر Y است. مقدار این پارامتر از -1 تا +1 متغیر است و پراکندگی متقابل هر دو عنصر را به طور جداگانه بررسی می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده رابطه‌ای قوی‌تر بین تغییرات دو عنصر است و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عدم وجود رابطه

$$\hat{Z}(s_0) = w' \varphi + \omega_{n+1} \quad (۵)$$

که ω_{n+1} پارامتر بایاس است. در این تحقیق از پنج تابع اسپیلاین کاملاً منظم، اسپیلاین با تابع کششی، تابع مالتی کوادریک، تابع معکوس مالتی کوادریک و اسپیلاین با صفحه نازک t استفاده شده است.

۵.۳. معیار اعتبارسنجی روش‌های درون‌یابی

در حین اندازه‌گیری غلظت عناصر در آزمایشگاه ممکن است به علت خطاهای انسانی یا دستگاهی داده‌ای که مقدار آن در مقایسه با سایر داده‌ها غیرمعقول است، وارد نمونه شود؛ از این رو در این تحقیق نخست با استفاده از تست صحت‌سنجی 3sigma به بررسی صحت داده‌های اندازه‌گیری پرداخته شد این تست براساس یکی از قوانین آماری که بیان می‌کند در داده‌های با توزیع نرمال داده، ۹۹ درصد از داده‌های برداشت شده در فاصله سه برابر انحراف معیار نمونه از میانگین نمونه قرار دارند (Kasunic et al. 2011) از این رو داده‌هایی که در هر نمونه بیش از سه برابر انحراف معیار نمونه با میانگین نمونه اختلاف داشتند، داده پرت شناخته و از نمونه خارج شدند؛ سپس داده‌های مشاهده شده به دو دسته آموزشی و کنترل به نسبت ۸۰ درصد به ۲۰ درصد تقسیم شدند. در ابتدای کار با استفاده از داده‌های آموزشی به وسیله هر یک از روش‌های درونیابی، سطحی را به این داده‌ها برازش دادیم. از روش اعتبارسنجی متقابل جک نایف برای تعیین بردار خطاها استفاده شد. اساس کار این روش به این صورت است که در هنگام برازش سطح، هر بار یکی از داده‌ها حذف شده، برازش سطح با استفاده از سایر داده‌ها انجام گرفته و انحراف داده کنار گذاشته شده از مقدار پیش‌بینی شده برای آن یادداشت می‌شود (حسنی، ۱۳۷۷؛ Efron & Gong, 1983) سپس داده‌های کنترل را در مدل برازش داده شده قرار داده و میزان انحراف داده‌ها از مدل برازش داده شده ثبت می‌شود.

۱.۴. همبستگی پیرسون عناصر

جدول ۲ همبستگی مکانی عناصر مورد بررسی را نشان می‌دهد. تمامی مقادیر به دست آمده برای همبستگی مکانی بین عناصر دارای مقدار مثبت هستند و این نشان دهنده وجود رابطه مستقیم در تغییرات متقابل عناصر است. در بین نتایج به دست آمده همبستگی مکانی بین دو فلز روی و مس از شدت بیشتری برخوردار است که با مقدار ۴۶ درصد دارای شدیدترین رابطه در مقایسه با هر دو عنصر دیگری هستند که به بررسی پراکندگی متقابل آنها پرداخته شده است و همبستگی بین دو عنصر منگنز و پتاسیم با مقداری در حدود ۱ درصد از کمترین مقدار برخوردار است.

بین تغییرات دو عنصر است و هرچه این مقدار به 1- نزدیک تر باشد نشان دهنده رفتاری مخالف در تغییرات دو عنصر است (Lawrence, 1989).

۴. نتایج و بحث

خلاصه نتایج مربوط به آمار توصیفی داده‌های خام در جدول ۱ آورده شده است. بعد از امتحان کردن داده‌های اندازه‌گیری شده برای اعتبارسنجی داده‌ها از روش 3sigma استفاده شده که بجز یک داده، سایر داده‌ها در محدوده قابل انتظار بودند. داده اشتباه مربوط به داده‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده برای عنصر پتاسیم بود که در دامنه قابل انتظار برای این عنصر نبود؛ این داده را از میان داده‌های موجود حذف کرده و سپس به برآوردهای لازم پرداخت.

جدول ۱. آمار توصیفی داده‌ها

	پتاسیم	روی	منگنز	مس	آهن
تعداد	۳۶۹	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
میانگین	۴۶۸/۶۴	۰/۵۰	۵/۳۴	۱/۶	۴/۱۸۲
میانه	۴۳۱	۰/۴۷	۵/۴۱	۱/۷	۳/۹
مد	۳۹۰	۰/۴۱	۶/۲	۱/۶	۳/۶
انحراف معیار	۱۷۸/۲۱	۰/۱۶	۱/۲۲	۰/۴۳	۱/۴۷
واریانس	۳۱۷۶۰	۰/۰۳	۱/۵۰	۰/۱۸	۲/۱۶۴
چولگی	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۰۷۲	۰/۲۳۶	۱/۲۱
دامنه	۱۱۴۶	۰/۹۶	۶/۳۲	۲/۸	۸/۶
کمینه	۱۴۲	۰/۲	۲/۲۶	۰/۵	۱
بیشینه	۱۲۸۸	۱/۱۶	۸/۵۸	۳/۳	۹/۶

جدول ۲. همبستگی پیرسون عناصر

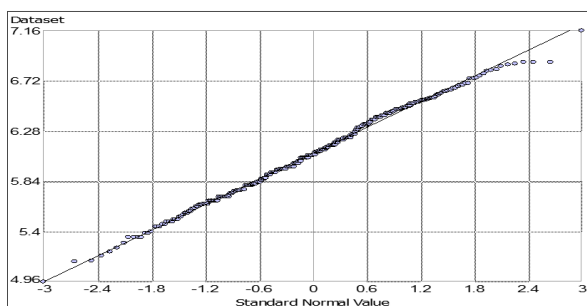
(همبستگی مکانی در سطح ۱ درصد معناداری با علامت ** و در سطح ۵ درصد با علامت * مشخص شده‌اند.)

	پتاسیم	روی	منگنز	مس	آهن
پتاسیم	۱				
روی	۰/۰۹۹	۱			
منگنز	۰/۰۱۲	۰/۱۰۵*	۱		
مس	۰/۰۵۶	۰/۴۶۱**	۰/۰۲۴	۱	
آهن	۰/۰۹۹	۰/۰۲۷	۰/۱۹**	۰/۱۵۸**	۱

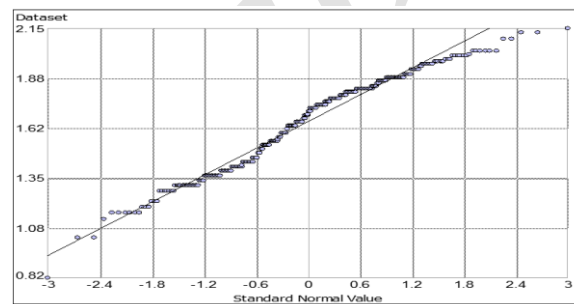
۲.۴. بررسی توزیع داده‌ها و روش‌های متفاوت درونیایی

با استفاده از نمودار توزیع فراوانی داده‌ها مشخص شد که داده‌های عناصر پتاسیم، روی، آهن و منگنز دارای چولگی نسبتاً زیادی هستند و از توزیع نرمال دور هستند و با لگاریتم گرفتن از داده‌ها به داده‌های با توزیع نرمال تبدیل شدند، اما عنصر مس با چولگی و کشیدگی بسیار کم دارای توزیع نرمال بود. پس از نرمال کردن داده‌ها با استفاده از

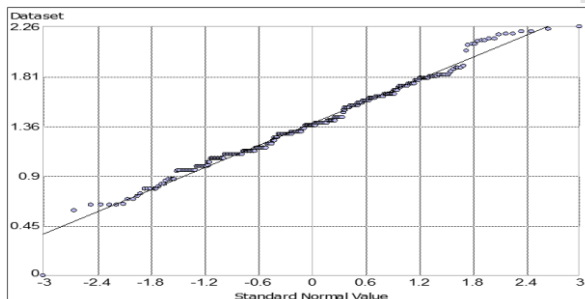
نمودار QQ^A به بررسی صحت تبدیل به کاربرده‌شده روی داده‌ها برای نرمال کردن آنها پرداخته شد. نمودار QQ در شکل ۳ آمده است که مؤید نرمال بودن داده‌های عنصر مس (که بدون تبدیل نرمال‌اند) و عناصر پتاسیم، روی، آهن و منگنز که بعد از تبدیل لگاریتمی به داده‌های نرمال تبدیل شده‌اند.



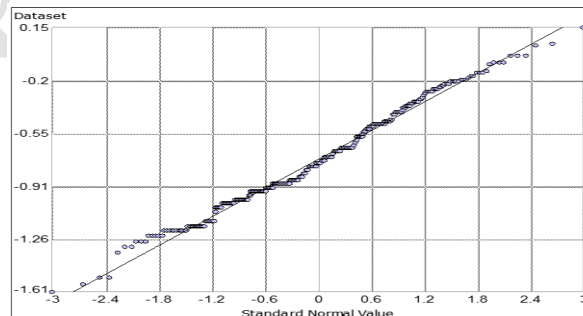
پتاسیم



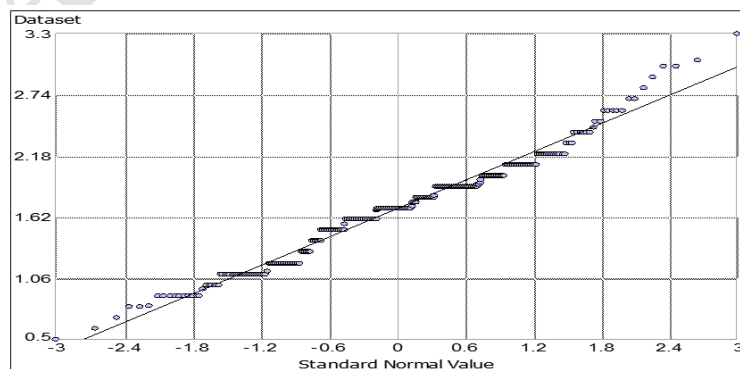
منگنز



آهن



روی

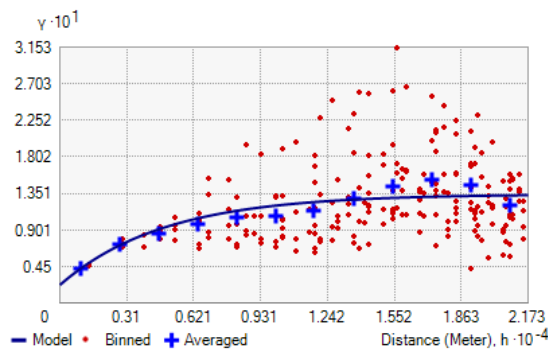


مس

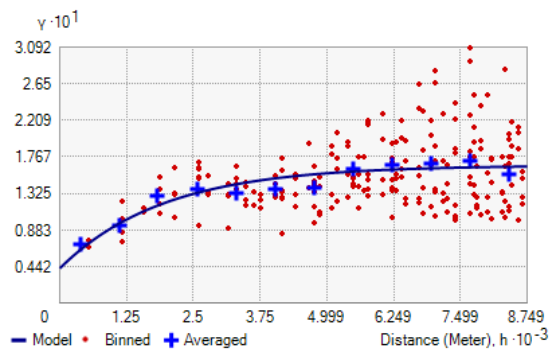
شکل ۲. نمودار QQ : عنصر مس بدون تبدیل و سایر عناصر با تبدیل لگاریتمی روی داده‌ها

(جدول ۴) و نمودارهای مربوط به بهترین واریوگرام برای عناصر آهن، پتاسیم، روی، مس و منگنز در (شکل ۲) آورده شده است. با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS به بررسی مدل بهینه برای تهیه نقشه پهنه‌بندی پرداخته شد و نتایج حاصل در تحلیل مدل‌های مختلف در جدول ۴ آورده شده است.

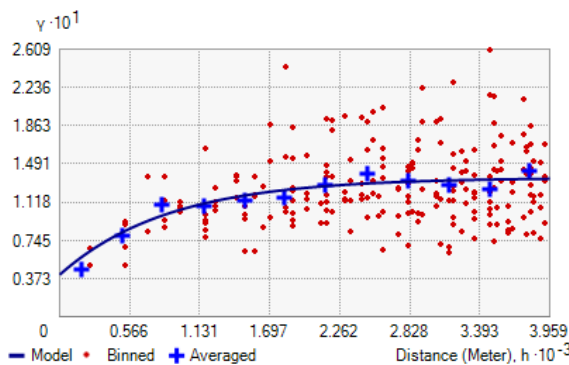
همان‌طور که بیان شد واریوگرام رابطه بین تغییرپذیری نمونه‌ها و رابطه بین آن‌ها را بیان می‌کند برای انتخاب بهترین مدل واریوگرام تجربی از نسبت قطعه به سقف استفاده می‌کنیم که کمترین مقدار آن نشان‌دهنده بهترین مدل است (Webster & Oliver, 2001). محاسبات قطعه و سقف برای مدل‌های دایره‌ای، کروی، نمایی و گوسین در



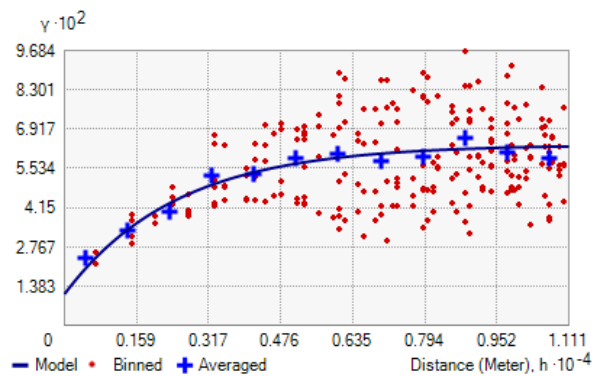
آهن



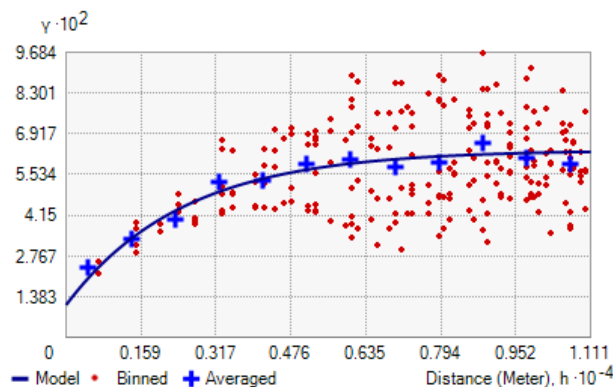
مس



پتاسیم



منگنز



روی

شکل ۲. واریوگرام‌های تجربی عناصر مورد بررسی

جدول ۳. شاخص جهانی کلی برای عناصر مس، منگنز، روی و آهن و شاخص جهانی WHO برای پتاسیم

منبع	آلودگی خیلی زیاد	آلودگی زیاد	آلوده	کمی آلوده	بدون آلودگی	عنصر
(Kelly, 1980)	> 2500	500-2500	200-500	100-200	0-100	مس
(Kelly, 1980)	> 10,000	2000-10,000	1000-2000	500-1000	0-500	منگنز
(Kelly, 1980)	> 10,000	5000-10000	3000-5000	2000-3000	0-2000	آهن
(Kelly, 1980)	> 5000	1000-5000	500-1000	250-500	0-250	روی
(McDonald et al., 2000)	ثبت نشده	ثبت نشده	350-400	150-350	0-150	پتاسیم

جدول ۴. محاسبات قطعه و سقف برای انتخاب واریوگرام تجربی

مدل برگزیده	قطعه/سقف	سقف	قطعه	مدل	عنصر
نمایی	0/338	0/0736	0/0249	دایروی	آهن
	0/303	0/0775	0/0235	کروی	
	0/198	0/0118	0/0222	نمایی	
	0/498	0/0644	0/0321	گوسین	
نمایی	0/821	0/0842	0/0692	دایروی	مس
	0/674	0/0948	0/0639	کروی	
	0/339	0/1243	0/0419	نمایی	
	0/944	0/0738	0/0697	گوسین	
نمایی	0/897	0/0696	0/0625	دایروی	پتاسیم
	0/760	0/0742	0/0564	کروی	
	0/433	0/0945	0/0410	نمایی	
	1/016	0/0654	0/0655	گوسین	
نمایی	0/338	0/0427	0/0166	دایروی	منگنز
	0/326	0/0444	0/0145	کروی	
	0/209	0/0526	0/0110	نمایی	
	0/512	0/0369	0/0189	گوسین	
نمایی	0/534	0/0702	0/0249	دایروی	روی
	0/257	0/0826	0/0213	کروی	
	0/144	0/0964	0/0139	نمایی	
	0/390	0/0500	0/0195	گوسین	

مس و منگنز در محدوده مجاز قرار دارند، این عناصر را از لحاظ میزان کمبود و یا کفایت این عناصر براساس نشریه فنی شماره ۱۷۹ موسسه حفاظت خاک و آب ایران (ملکوتی و همکاران، ۱۳۷۹) (جدول ۶) دسته‌بندی کردیم و برای عنصر پتاسیم پهنه بندی را براساس شاخص جهانی WHO برای تعیین منطقه آلوده به‌کار بردیم

با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده (جدول ۱) و معیارهای شاخص جهانی آلودگی خاک (Kelly, 1980) و استاندارد WHO (جدول ۳) مشخص شد که بیشترین مقدار عناصر روی، آهن، مس و منگنز در محدوده مجاز قرار دارند اما آن‌طور که برای عنصر پتاسیم (شکل ۸) مشخص است مقدار این عنصر تقریباً در کل منطقه مورد مطالعه در محدوده غیرمجاز قرار دارد. از آنجا که عناصر آهن، روی،

جدول ۵. نتایج ارزیابی روش‌های ریاضی و زمین‌آمار در درون‌یابی آهن، پتاسیم، مس، منگنز و روی

عنصر	روش	آموزشی			امتحانی			روش برگزیده
		میانگین قدر مطلق خطاها	میانگین مطلق خطاها	کمترین مربعات	میانگین قدر مطلق خطاها	میانگین مطلق خطاها	کمترین مربعات	
آهن	وزن دهی معکوس فاصله ۲/۸	۰/۵۳۹	۰/۰۱۶	۰/۸۳۰	۰/۵۴۵	۰/۱۰۳	۰/۷۸۷	توابع پایه‌ای شعاعی(مالتی کوادریک)
	چندجمله ای محلی ۱	۰/۵۸۴	۰/۰۱۸	۰/۸۵۳	۰/۵۹۰	۰/۰۶۰	۰/۸۰۵	
	توابع پایه ای شعاعی(مالتی کوادریک)	۰/۵۲۰	۰/۰۱۱	۰/۷۸۷	۰/۵۳۹	۰/۰۷۴	۰/۷۳۲	
	کریجینگ معمولی(نمایی)	۰/۵۳۱	۰/۰۲۵	۰/۷۸۳	۰/۵۴۹	۰/۰۷۰	۰/۷۷۲	
	کریجینگ ساده(نمایی)	۰/۵۳۵	۰/۰۲۱	۰/۷۸۶	۰/۵۵۶	۰/۰۵۹	۰/۷۷۵	
	کریجینگ جهانی(گوسین)	۰/۶۹۷	-۰/۰۹۰	۰/۹۴۶	۰/۷۲۵	-۰/۰۹۲	۰/۹۶۷	
مس	وزن دهی معکوس فاصله ۲/۶۸	۰/۲۱۹	۰/۰۰۵	۰/۲۹۴	۰/۲۳۱	۰/۰۳۸	۰/۳۰۹	توابع پایه‌ای شعاعی(CRS)
	چندجمله ای محلی ۱	۰/۲۳۰	۰/۰۰۱	۰/۳۰۶	۰/۲۲۸	۰/۰۳۰	۰/۲۹۵	
	توابع پایه‌ای شعاعی(CRS)	۰/۲۱۵	۰/۰۰۲	۰/۲۸۴	۰/۲۱۹	۰/۰۳۶	۰/۲۹۱	
	کریجینگ معمولی(نمایی)	۰/۲۱۵	۰/۰۰۳	۰/۲۸۵	۰/۲۱۷	۰/۰۳۴	۰/۲۹۰	
	کریجینگ ساده(نمایی)	۰/۲۲۰	۰/۰۰۷	۰/۲۹۰	۰/۲۱۹	۰/۰۳۹	۰/۲۸۵	
	کریجینگ جهانی(کروی)	۰/۲۲۶	۰/۰۰۴	۰/۳۰۶	۰/۲۳۴	۰/۰۲۸	۰/۳۰۹	

ادامه جدول ۵. نتایج ارزیابی روش‌های ریاضی و زمین آمار در درون‌یابی آهن، پتاسیم، مس، منگنز و روی

عنصر	روش	آموزشی			امتحانی			روش برگزیده
		میانگین قدر مطلق خطاها	میانگین مطلق خطاها	کمترین مربعات	میانگین قدر مطلق خطاها	میانگین مطلق خطاها	کمترین مربعات	
پتاسیم	وزن دهی معکوس فاصله ۱/۳۳	۱۲۹/۷۶۱	۵/۹۷	۱۷۲/۲۳	۱۰۳/۳۲	۹/۴۸	۱۳۲/۱۹	وزن دهی معکوس فاصله ۱,۳۳
	چندجمله ای محلی ۳	۱۲۹/۳۰	۵/۶۲	۱۶۷/۳۸	۱۱۶/۸۷	۸/۹۷	۱۴۹/۱۹	
	توابع پایه ای شعاعی (سی آر اس)	۱۲۵/۴۳	۴/۰۱	۱۶۵/۱۰	۱۰۶/۹۵	۱۱/۰۶	۱۳۵/۷۵	
	کریجینگ معمولی (کروی)	۱۲۲/۶۷۲	-۰/۴۶	۱۶۳/۸۵	۱۰۷/۱۲	۸/۱۳	۱۴۲/۱۱	
	کریجینگ ساده (نمایی)	۱۲۶/۷۶	۳/۹۹	۱۶۴/۳۱	۱۰۹/۴۱	۱۴/۱۹	۱۳۲/۳۵	
	کریجینگ جهانی (نمایی)	۱۲۴/۷۳	-	۱۶۷/۵۵	۱۰۹/۳۳	-	۱۴۷/۷۳	
	وزن دهی معکوس فاصله ۱/۹۸	۰/۶۲۴	-۰/۰۲	۰/۸۸	۰/۵۱۵	۰/۱۶۸	۰/۶۹۵	
	چندجمله ای محلی ۱	۰/۶۶۲	۰/۰۰۸	۰/۹۴	۰/۶۲۱	۰/۰۹۲	۰/۷۹۵	
	توابع پایه ای شعاعی (آر اس تی)	۰/۶۱۰	-	۰/۸۵۵	۰/۵۲۴	۰/۱۸۱	۰/۷۰۴	
	کریجینگ معمولی (نمایی)	۰/۶۱۱	۰/۰۲۱	۰/۸۴۶	۰/۵۲۴	۰/۱۹۳	۰/۶۹۳	
منگنز	کریجینگ ساده (کروی)	۰/۶۰۹	۰/۰۰۵	۰/۸۴۱	۰/۵۵۱	۰/۱۴۹	۰/۷۰۲	کریجینگ معمولی (نمایی)
	کریجینگ جهانی (گوسین)	۰/۷۰۹	-	۰/۹۲۷	۰/۵۹۷	۰/۰۸۶	۰/۷۴۶	
	وزن دهی معکوس فاصله ۱/۰۳	۰/۰۷۳	-	۰/۱۱۱	۰/۰۷۵	-	۰/۱۱۱	
	چندجمله ای محلی ۱	۰/۰۸۸	۰/۰۰۰	۰/۱۲۴	۰/۰۹۶	-	۰/۱۳۴	
	توابع پایه ای شعاعی (آر اس تی)	۰/۰۷۲	-	۰/۱۰۷	۰/۰۷۶	-	۰/۱۰۶	
روی	کریجینگ معمولی (نمایی)	۰/۰۷۳	-	۰/۱۰۸	۰/۰۷۵	-	۰/۱۰۵	کریجینگ ساده (کروی)
	کریجینگ ساده (کروی)	۰/۰۷۳	-	۰/۱۰۹	۰/۰۷۵	-	۰/۱۰۴	
	کریجینگ جهانی (کروی)	۰/۰۷۹	-	۰/۱۱۷	۰/۰۸۶	-	۰/۱۱۹	
	کریجینگ جهانی (کروی)	۰/۰۷۹	-	۰/۱۱۷	۰/۰۸۶	-	۰/۱۱۹	
	کریجینگ جهانی (کروی)	۰/۰۷۹	-	۰/۱۱۷	۰/۰۸۶	-	۰/۱۱۹	

جدول ۶. استاندارد ایران برای کلاسه‌بندی عناصر کم‌مصرف

کلاس	محدوده مجاز عناصر کم مصرف			
	آهن	منگنز	روی	مس
کمبود	<۵	<۵	<۰/۷	<۰/۵
کفایت	۵-۱۲	۵-۱۰	۰/۷-۱	۰/۵-۱
غنی	۱۲-۲۰	۱۰-۳۰	۱-۲	۱-۲

خاک از این لحاظ در حالت کفایت قرار دارد.

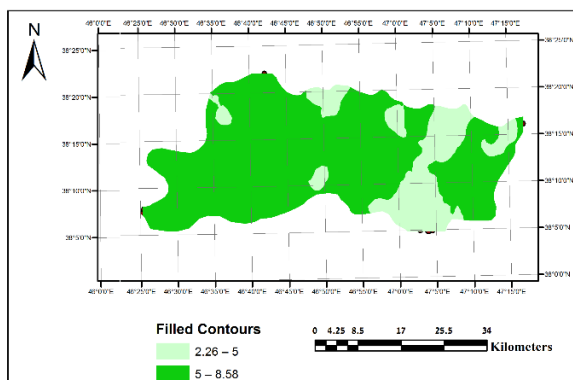
براساس نتایج به دست آمده عنصر مس (شکل ۶) در ۱ درصد مناطق در محدوده کمبود، در ۷ درصد مناطق در محدوده کفایت و در ۹۲ درصد مناطق در محدوده زیاد و رو به آلودگی قرار دارد. بنابراین در این منطقه در زمین‌های کشاورزی باید اهتمام جدی در کنترل مواد حاوی این آلاینده به کار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده عنصر روی (شکل ۷) در حدود ۹۱ درصد مناطق دچار کمبود است و در ۹ درصد مناطق در محدوده کفایت قرار دارد و بنابراین از این بابت تهدیدی برای خاک وجود ندارد.

با توجه به نتایج بدست آمده و شاخص جهانی WHO برای عنصر پتاسیم (شکل ۸)، این عنصر در بیشتر مناطق در محدوده آلوده قرار دارد که دلیل آن بدون شک مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی پتاسیم دار در این منطقه است بنابراین باید کشاورزان منطقه را در استفاده بهینه از کودهای کشاورزی مطلع کرد.

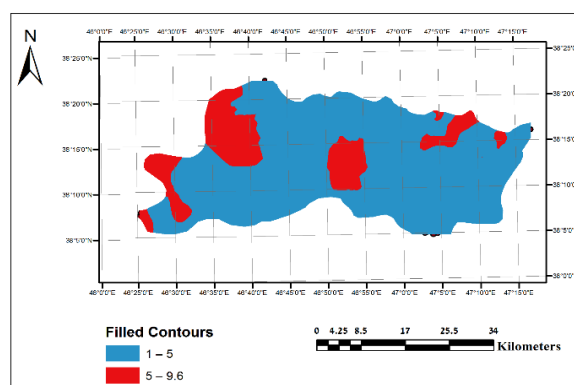
۵. بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی عناصر

همان‌طور که بیان شد توزیع عناصر آهن، مس و منگنز در محدوده مجاز قرار دارد، خاک از لحاظ آلودگی این عناصر در سلامت کامل قرار دارد. اما برای مطالعه بیشتر از استاندارد مؤسسه آب و خاک ایران برای کلاسه‌بندی این عناصر استفاده شد و محدوده‌هایی که دارای کمبود عنصر، کفایت عنصر و زیادی عنصر از یکدیگر تفکیک شدند. بدین ترتیب علاوه بر مشخص کردن مناطق دارای آلودگی مناطق دارای کمبود نیز مشخص شدند.

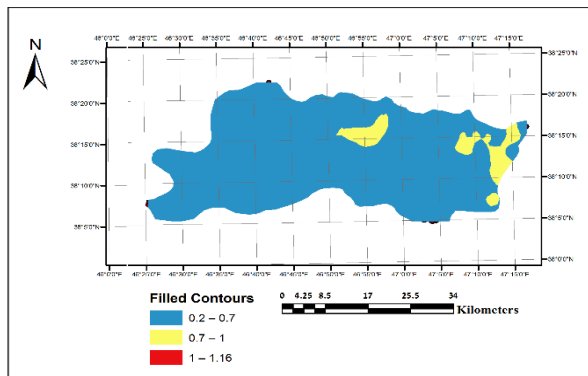
در پهنه‌بندی فلز آهن (شکل ۴) مشخص شد که در ۷۵ درصد خاک منطقه مقدار این عنصر در محدوده کمبود قرار دارد و منطقه مورد مطالعه دارای کمبود است. و در ۲۵ درصد مناطق در محدوده کفایت قرار دارد. براساس نتایج بدست آمده عنصر منگنز (شکل ۵) حدوداً در ۲۰ درصد منطقه دارای کمبود و در ۸۰ درصد منطقه در محدوده کفایت قرار دارد. بنابراین می‌شود نتیجه‌گیری کرد



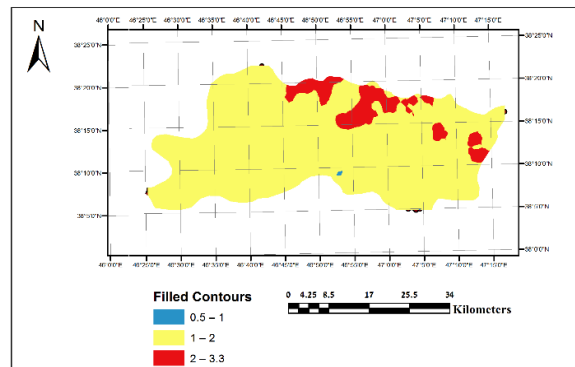
شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی عنصر منگنز



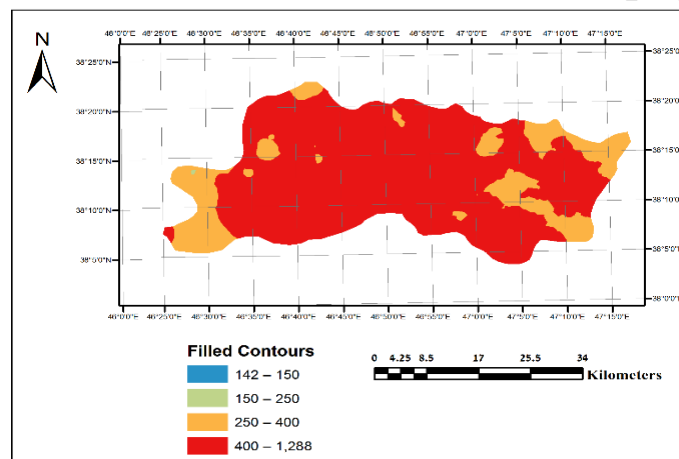
شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی عنصر آهن



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی عنصر روی



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی عنصر مس



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی عنصر پتاسیم

کارایی به شمار آورد؛ ولی اگر بخواهیم یک روش را به‌طور میانگین، روش برتر انتخاب کنیم، در مقایسه نسبی بین همه مقادیر RMSE های بدست آمده می‌شود گفت در مواردی مانند پروژه مورد بررسی که محدوده وسیعی از یک منطقه مورد بررسی است و تعداد نقاط برداشت هم محدود است کریجینگ با مدل‌های کروی و نمایی، روش برگزیده انتخاب می‌شود. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی شده برای عناصر، مشخص شد که عنصر پتاسیم براساس استاندارد جهانی WHO در محدوده آلودگی قرار دارد و علت آن هم استفاده بی‌رویه کشاورزان منطقه از کودهای شیمیایی پتاسیم‌دار است؛ سایر عناصر با توجه به استانداردهای جهانی در محدوده امنیتی قرار داشتند و در مرحله بعد این عناصر با استانداردهای ایران برای عناصر

نتیجه‌گیری

با بررسی‌های انجام شده در این تحقیق مشخص شد که روش‌های درونیایی، همه دارای دقت‌های نزدیک به هم هستند. در درونیایی یک سطح برای پیش‌بینی نقاط نمونه‌برداری نشده هستند. در انتخاب مدل برگزیده برای درونیایی نقاط برای عنصر پتاسیم روش وزن‌دهی معکوس فاصله، برای عناصر روی و منگنز روش کریجینگ، روش برگزیده و برای عناصر آهن و مس روش توابع پایه‌ای شعاعی، روش برگزیده انتخاب شدند که این وضعیت نشان از برتری نسبی روش‌های توابع پایه‌ای شعاعی و کریجینگ نسبت به روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله و چندجمله‌ای‌های محلی هستند. اما به وضوح با توجه به نتایج به‌دست آمده، نمی‌توان هیچ‌کدام از روش‌ها را بدون

پهنه‌بندی پیشنهاد می‌شود که برای بالا بردن دقت در محاسبات و تصمیم‌گیری‌های بعدی، نخست از همه روش‌های درون‌یابی ذکر شده در مقاله استفاده و سپس براساس مقادیر RMSE، MAE و MBE‌های به دست آمده روش بهتر انتخاب شود.

یادداشت‌ها

1. Variogram
2. Gaussian
3. range
4. nugget
5. sill
6. Root Mean Square Error (RMSE)
7. Mean Absolute Error (MAE)
8. Mean Bias Error (MBE)
9. Quantile Quantile plot

کم‌مصرف کلاسه‌بندی شدند که نتایج حاصل نشان داد عنصر مس در بیشتر مناطق در محدوده زیاد رو به آلودگی قرار دارد، عنصر منگنز در محدوده کفایت و عناصر روی و آهن در محدوده کمبود قرار دارند.

هرچند روش‌های درون‌یابی مورد استفاده و نتایج حاصل در این پژوهش، برای منطقه مورد مطالعه بیان و ارزیابی شده‌اند، ولی با توجه به ماهیت مسئله که درون‌یابی عناصر سنگین در خاک است، تا حد زیادی نتایج این پژوهش به دیگر مناطق نیز قابل تعمیم است. اما به‌طور قطعی در این مورد نمی‌توان حکم داد. به این منظور لازم است تا روش استفاده شده در این پژوهش بر مناطق مختلف با انواع خاک‌ها ارزیابی شود. برای ادامه این پژوهش انجام چنین تحقیقی توصیه می‌شود. در انتخاب روش مناسب برای تولید نقشه‌های

منابع

- ملکوتی، م.، درودی، م. و مجیدی، ع. ۱۳۷۹، تعیین حد بحرانی عناصر غذایی مؤثر در خاک، گیاه و میوه، کرج، سازمان پژوهش آب و خاک.
- حسنی پاک، ع. ۱۳۷۷، زمین‌آمار، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- سازمان هواشناسی-کشور. www.irimo.ir. ۲۰۱۸.
- Atafar, Z., Mesdaghinia, A., Nouri, J., Homae, M., Yunesian, M., Ahmadimoghaddam, M. and Mahvi, A. H. 2008, Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration: Environ Monit Assess, v. 160, 1:83-89.
- Beatty R. D. 1978, Concepts instrumentation and techniques in atomic absorption spectrophotometry, Perkin-Elmer.
- Burger, J. 2008, Assessment and management of risk to wildlife from cadmium: Science of The Total Environment, 389(1): 37-45.
- Carlson, R. E. and Foley, T. A. 1991, The parameter R2 in multiquadric interpolation: Computers & Mathematics with Applications, 21(9): 29-42.
- Cheesbrough, M., 2004, District laboratory practice in tropical countries, Cambridge University press.
- Dankoub, Z., Ayoubi, S., Khademi, H. and Lu, S.-G. 2012, Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils as affected by land use in the Isfahan region, Central Iran: Pedosphere, 22(1): 33-47.
- Dragović, R., Gajić, B., Dragović, S., Đorđević, M., Đorđević, M., Mihailović, N. and Onjia, A. 2014, Assessment of the impact of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia): Journal of Cleaner Production, 84:550-562.
- Duruibe, J. Ogwuegbu, M.O.C. and Egwurugwu, J. N. 2007, Heavy metal pollution and human biotoxic effects: International Journal of Physical Sciences 2(5):112-118.
- Efron, B. and Gong, G. 1983, A leisurely look at the Bootstrap, the Jackknife, and Cross-Validation.
- Esmaili, A., Moore, F., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N. and Kermani, M. 2014, A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran: CATENA, 121: 88-98.

- 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, 1-2:48-58.
- Isaak, E. H. and Srivastava, R. M. 1989, an introduction to applied geostatistics, Oxford University Press.
- Johnston, K., Hoef, J.M.V., Krivoruchko, K. and Lucas, N. 2001, Using ArcGIS Geostatistical Analyst, New York, ESRI.
- Kasunic, M., McCurley, J., Goldenson, D. and Zubrow, D. 2011, An investigation of techniques for detecting data anomalies in earned value management data, Carnegie Mellon University.
- Kelly, 1980, Site investigation and materials problems, (former Center Landon Council).
- Lawrence, I.K.L. 1989, A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility: Biometrics, 45(1): 255-268.
- Li, Y.M., Ma, J.H., Liu, D.X., Sun, Y.L. and Chen, Y.F. 2015, [Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China]: Huan jing ke xue= Huanjing kexue / [bian ji, Zhongguo ke xue yuan huan jing ke xue wei yuan hui "Huan jing ke xue" bian ji wei yuan hui.], 36(3): 1037-1044.
- Maas, S., Scheifler, R., Benslama, M., Crini, N., Lucot, E., Brahmia, Z., Benyacoub, S. and Giraudoux, P. 2010, Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria: Environmental Pollution, 158(6): 2294-2301.
- MacDonald, D., Ingersoll, C. and Berger, T. 2000, Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems: Arch Environ Contam Toxicol, p. 20-31.
- McGrath, D., Zhang, C. and Carton, O. T. 2004, Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland: Environmental Pollution, 127(2):239-248.
- Mitasova, H. and Mitas, L. 1993, Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation: Mathematical Geology, 25(6):641-655.
- Nriagu, J. O. 1988, Toxic substance in the environment a silent epidemic of environmental metal poisoning?: Environmental Pollution, 50(1):139-161.
- Romić, M., Hengl, T., Romić, D. and Husnjak, S. 2007, Representing soil pollution by heavy metals using continuous limitation scores: Computers & Geosciences, 33(10): 1316-1326.
- Ruppert, D. 1996, Local polynomial regression and its applications in environmental statistics: School of Operations Research and Industrial Engineering.
- Saby, N., Arrouays, D., Boulonne, L., Jolivet, C. and Pochot, A. 2006, Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France: Science of The Total Environment, 367(1): 212-221.
- Shahbazi, Y., Ahmadi, F. and Fakhari, F. 2016, Voltammetric determination of Pb, Cd, Zn, Cu and Se in milk and dairy products collected from Iran: An emphasis on permissible limits and risk assessment of exposure to heavy metals: Food Chemistry, 192: 1060-1067.
- Sun, Y., Zhou, Q., Xie, X. and Liu, R. 2010, Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China: Journal of Hazardous Materials, 174(1-3): 455-462.
- Tobler, W. 2004, On the first law of geography: a reply, Annals of the association of American geographers, 94(2): 304-610.
- Wardrope, D. D. and Graham, J. 1982, Lead mine waste: hazards to livestock: The Veterinary record, 111(20): 457-459.
- Webster, R. and Oliver, M. A. 2001, Geostatistics for environmental scientists, New York, John Wiley and Sons.
- Willmott, C. J. 1982, Some comments on the evaluation of model performance: Glossary of Meteorology, v. 63.
- Xie, Y., Chen, T.-b., Lei, M., Yang, J., Guo, Q.-j., Song, B. and Zhou, X.y. 2011, Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis: Chemosphere, 82(3): 468-476.
- Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M. and Gazni, R. 2009, Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters: Research Journal of Biological Sciences, 4: 93-102.
- Zhanji, Y. 1999, Precise determination of local geoid and its geophysical interpretation: The Hong Kong Polytechnic University.