

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره هفت، مهر ماه ۹۸

کاربرد کریجینگ بیزین تجربی در پهنه‌بندی آلودگی خاک به فلزات سنگین (مطالعه موردی: شهرستان اسفراین)

صفیه تیمورزاده^{۱*}

teymourzadeh@msc.guilan.ac.ir

روح الله میرزایی محمدآبادی^۲

محسن محمدی^۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۵

چکیده

زمینه و هدف: روش‌های کریجینگ به‌ویژه کریجینگ معمولی در بین روش‌های درون‌یابی به دلیل ایجاد خطای کم‌تر و تولید حداقل واریانس ممکن، محبوبیت بیش‌تری نسبت به سایر روش‌ها دارند؛ با این‌وجود، پیچیدگی‌های مختلف موجود در این روش، استفاده از آن را محدود می‌کند؛ از این رو کریجینگ بیزین تجربی برای غلبه بر مشکلات کریجینگ معمولی معرفی شده است.

روش بررسی: در این پژوهش، کارایی کریجینگ معمولی و بیزین تجربی برای تعیین الگوی مکانی عناصر نیکل، مس و روی در خاک سطحی اطراف مجتمع صنعتی اسفراین بررسی شده است. بدین منظور ۳۵ نمونه خاک سطحی (۰-۲۰ cm) در منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۸۷ کیلومترمربع برداشت شد و غلظت فلزات در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله تعیین گردید. دو روش کریجینگ معمولی و بیزین تجربی برای درون‌یابی استفاده شد و ارزیابی متقابل به همراه آماره‌های ارزیابی RMSE، NSE و PBIAS برای سنجش صحت و مقایسه کارایی دو روش استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از توصیف آماری نشان داد که میانگین غلظت عناصر نیکل، روی و مس در منطقه به ترتیب ۲۳/۶۱، ۵۸/۴۷ و ۱۲/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و در مقایسه با غلظت زمینه طبیعی، میانگین غلظت دو عنصر روی و مس بیش‌تر و در مورد عنصر نیکل این مقدار کم‌تر از غلظت طبیعی آن‌ها می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری: در روش کریجینگ معمولی مدل‌های نمایی (مس و روی) و کروی (نیکل) بهترین مدل‌هایی بودند که به داده‌ها برازش داده شدند. نتایج ارزیابی متقابل نشان داد که روش کریجینگ بیزین تجربی نسبت به کریجینگ معمولی دارای کارایی بیش‌تری در برآورد غلظت عناصر مورد مطالعه بوده است اگرچه این تفاوت بسیار زیاد نبود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی متقابل، درون‌یابی، عناصر سنگین، کریجینگ بیزین تجربی، مجتمع صنعتی اسفراین

۱- کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست گرایش آلودگی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران (نویسنده مسؤول)

۲- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳- استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

Application of Empirical Bayesian Kriging to Map Soil Contamination by Heavy Metals (Case study: Esfarayen city)

Safiye.Teymourzade^{1*}

teymourzadeh@msc.guilan.ac.ir

Rouhollah Mirzaei²

Mohsen Mohammadi³

Accepted:2016.06.08

Received:2016.02.04

Abstract

Background and purpose: Kriging methods especially ordinary kriging are more popular than other interpolation methods because of less uncertainty and the least possible variance. However, various complications in the procedure of this method limit its uses. Therefore, empirical Bayesian kriging has been introduced to overcome the problems of ordinary kriging.

Materials and methods: In this study, the efficiency of ordinary kriging and empirical Bayesian kriging was investigated to determine the spatial pattern of concentrations of Ni, Cu and Zn in the soils surrounding the Esfarayen industrial complex. For this purpose, 35 surface soil samples (0-20 cm) were collected in area of nearly 87 Km² and the metal concentrations were determined in the soil samples using a Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (FAAS). The ordinary and empirical Bayesian kriging were utilized for interpolating and cross validation including RMSE, NSE and PBIAS were used to assess and compare the efficiency of two methods.

Results: The results showed the mean concentration of Ni, Zn and Cu were 23.61, 58.47 and 12.51 mg/kg respectively. Based on the results the mean concentration of Zn and Cu were more than background concentrations of the metals, whereas Ni concentration was less than background concentration.

Discussion and conclusion: The experimental vario-gram of Cu, Zn and Ni concentrations were best-fitted by exponential, exponential and spherical models respectively. The results of cross validation indicated that the empirical Bayesian kriging was more accurate than ordinary kriging to estimate the elements concentration, though this difference was not considerable.

Key words: Bayesian kriging, Esfarayen Industrial Complex, Cross validation, Heavy metals, Interpolation

1- MSc, Environmental Pollution Trends, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran
*(Corresponding Author)

2- Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran

3- Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran

مقدمه

این جمله می‌توان به پژوهش‌های استواری و همکاران (۱۴)، شهبازی و همکاران (۱۵)، میرزایی و همکاران (۱۶)، عبداللهی و همکاران (۱۷)، فرزانه و همکاران (۱۸)، دیانی و همکاران (۲)، خداکرمی و همکاران (۱۹) و محمودی و همکاران (۲۰) اشاره کرد.

دنیل کریگ از پیشگامان علم زمین‌آمار بود که در ابتدای کار خود روش‌های آماری تجربی را توسعه داد (۲۱، ۲۲) و سپس در دهه ۱۹۶۰ این روش توسط مترون به رسمیت شناخته شد (۱). از این‌رو اصطلاح کریجینگ که یکی از مشهورترین روش‌های زمین‌آمار است به افتخار او ابداع شد. در دو دهه اخیر، شایستگی این روش توسط محققین زیادی در علوم مختلف تأیید شده است. در حال حاضر کریجینگ روشی است که به‌طور گسترده در اکثر رشته‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و اصطلاحی کلی برای مجموعه روش‌هایی با کم‌ترین خطا است که بهترین برآوردهای خطی ناریب را فراهم می‌کند (۱۳).

مطالعات محیط‌زیستی اکثراً بر اساس نمونه‌برداری هستند، اما معمولاً اندازه‌گیری‌ها یک پیوستگی را در فضا از نمونه‌ها فراهم می‌کنند. بیش‌تر تحلیل‌گران و مشتری‌های آن‌ها می‌خواهند بدانند که چه مقادیری از متغیرها ممکن است در بین نمونه‌برداری‌ها وجود داشته باشد. در اوایل کاربران، مجبور بودند تا خود برای تحلیل‌های زمین‌آمار کد نویسی کنند، اما در ۲۰ سال اخیر این وضعیت با ظهور نرم‌افزارهای قوی مانند GSLIB (۲۳)، GSTAT (۲۴، ۲۵) و GenStat (۲۴) تغییر کرده است. چندین بسته نرم‌افزاری سیستم‌مختص جغرافیایی نیز، تحلیل‌های زمین‌آمار را ممکن ساخته‌اند و کریجینگ به‌ویژه کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging) یکی از پرطرفدارترین روش‌های درون‌یابی در این بسته‌ها می‌باشد (۱۳)؛ اما باوجود محاسن فراوان، مشکلات موجود در برازش دادن مدل‌ها از معایب روش‌های کریجینگ می‌باشد، از این‌رو شرکت ESRI (Environmental Science Research Institute) پس از

یکی از شیوه‌های مورد استفاده در دهه‌های اخیر برای بررسی پراکنش متغیرهای محیطی، کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی Geographical Information System (GIS) به همراه زمین‌آمار (Geostatistic) است (۱، ۶). علم زمین‌آمار یکی از دقیق‌ترین روش‌هایی است که علاوه بر توصیف تغییرات مکانی و زمانی داده‌ها قادر به تهیه نقشه‌های کمی پراکنش متغیرهای محیطی با حداقل واریانس ممکن می‌باشد (۷).

به دلیل تغییرات مکانی و زمانی عوامل مؤثر بر تغییر متغیرهای محیطی در محیط‌زیست، شناخت گسترش و توزیع آن‌ها با پیچیدگی‌های زیادی روبرو است (۸، ۹)؛ لذا انجام توصیه‌های مدیریتی و تدوین برنامه‌های مرتبط با این متغیرها در محیط‌زیست مستلزم تعیین الگوی تغییرات مکانی این متغیرها است. از این‌رو، به دلیل گستردگی مکان‌های مورد مطالعه و مشکلات مربوط به نمونه‌برداری، استفاده از روش‌های درون‌یابی بسیار مفید می‌باشند (۱۰)؛ در این روش‌ها می‌توان با جمع‌آوری داده‌های کم‌تر نقشه‌هایی با دقت بالاتر تهیه نمود، به طوری که با ایجاد نقشه‌های توزیع مکانی متغیرها با استفاده از روش‌های درون‌یابی می‌توان به مدیریت صحیح و اصولی دست پیدا کرد. برای این کار، تکنیک‌های درون‌یابی نظیر روش‌های وزن‌دهی عکس فاصله Inverse Distance Weighting (IDW)، توابع پایه شعاعی Radial Basis Function (RBF)، درون‌یابی چندجمله‌ای Deterministic موضعی جهانی و محلی که جزء روش‌های هستند و روش‌های کریجینگ (ساده، معمولی، جهانی و...)، کوکریجینگ و درون‌یابی فضایی که جزء روش‌های زمین‌آمار هستند، به‌طور گسترده در تحقیقات علوم محیطی استفاده می‌شوند، اما تاکنون از بین تمام روش‌های زمین‌آمار روش‌های کریجینگ به دلیل ایجاد خطای کم‌تر و تولید حداقل واریانس ممکن، محبوبیت بیش‌تری را نسبت به سایر روش‌ها داشته و در تعیین توزیع مکانی متغیرهای محیطی پتانسیل بالایی دارند (۱۱)، این موضوع توسط مطالعات متعددی تأیید شده است که از

رنگی در دو طرف میانه نمایش داده می‌شود، خطوط آبی‌رنگ نیز متناسب با وزن سمی‌واریوگرام‌ها ترسیم می‌شود به طوری که با کاهش وزن، این خطوط نیز نازک‌تر می‌شوند.

لذا از آنجاکه تاکنون کارایی روش کریجینگ بی‌زین تجربی در پهنه‌بندی متغیرهای محیطی در عمل فقط توسط میرزایی و ساکی‌زاده (۲۰۱۶) (۲۷) آن‌هم در بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است، هدف از این مطالعه، بررسی این روش و مقایسه کارایی آن نسبت به روش کریجینگ معمولی در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین روی، نیکل و مس در بخشی از خاک‌های سطحی محدوده مجتمع صنعتی شهرستان اسفراین به‌عنوان مطالعه موردی در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۲ می‌باشد.

روش بررسی

مواد و روش کار

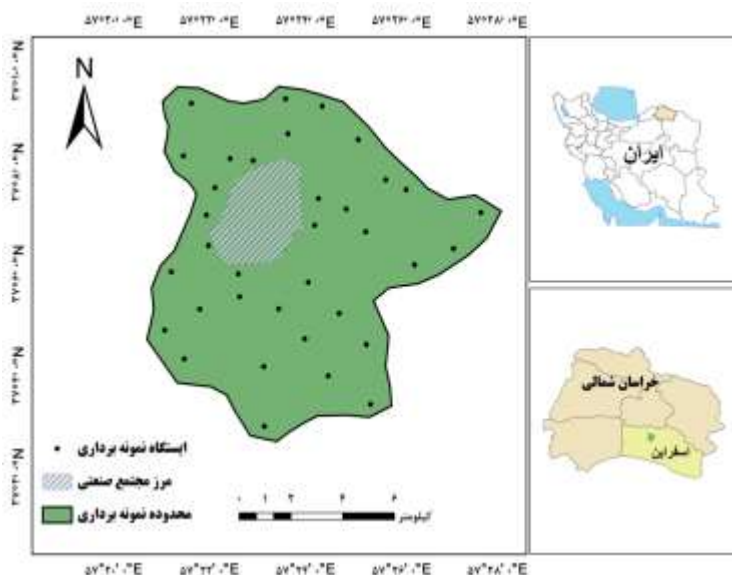
معرفی منطقه مورد مطالعه

اسفراین یکی از شهرستان‌های استان خراسان شمالی است که مجتمع صنعتی آن با مساحت ۱۲۶۰ هکتار، در کیلومتر ۱۲ جاده اسفراین - بجنورد به مختصات ۳۷ درجه و ۷ دقیقه و ۲۵ ثانیه شمالی و ۵۷ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱ ثانیه شرقی، در ارتفاع ۱۲۶۰ متری از سطح دریا واقع شده است که به ترتیب دارای میانگین دما و بارش سالیانه ۱۳-۸ درجه سانتی‌گراد و ۲۴۱ میلی‌متر می‌باشد، موقعیت منطقه در شکل (۱) ترسیم شده است. این مجتمع بزرگ‌ترین تولیدکننده مقاطع فولاد آلیاژی آهن‌گری شده در ایران است و بسیاری از نیازهای کشور به قطعات سنگین و اصلی را در صنایع مختلف تأمین می‌کند و در حال حاضر یکی از تولیدکنندگان مهم تجهیزات صنعتی برای صنایع فولاد، انرژی (نفت، گاز و نیرو)، پتروشیمی، حمل‌ونقل، ماشین‌آلات، تجهیزات صنعتی، معدنی و ... می‌باشد.

انجام آزمون‌های فراوان با افزودن یک ابزار قدرتمند دیگر به ArcGIS نسخه بالای ۱۰ این عیب را برطرف نموده و روش جدید کریجینگ بی‌زین تجربی Empirical Bayesian Kriging (EBK) را ابداع کرده است؛ در این روش برخلاف دیگر روش‌های کریجینگ نیازی به تنظیم دستی پارامترها و انتخاب مدل‌های مختلف جهت دستیابی به نتایج بهتر نیست، بلکه تمامی پارامترها به‌طور خودکار از طریق فرآیند شبیه‌سازی تنظیم می‌شوند که نتایج به‌دست‌آمده از این روش اغلب بهتر از مدل‌سازی متقابل است. از دیگر مزایای این روش می‌توان به این موارد اشاره کرد: خطای استاندارد (Standard Error) محاسبه‌شده در این روش نسبت به سایر روش‌های کریجینگ دقیق‌تر است، دقت بیش‌تر نسبت به سایر روش‌های کریجینگ برای مجموعه داده‌های کوچک یا متغیر، شبیه‌سازی طیفی از سمی‌واریوگرام‌های مناسب به‌جای ترسیم یک سمی‌واریوگرام نهایی. در هر حال محاسن قدرتمند این روش منجر به برتری آن نسبت به دیگر روش‌های قبلی زمین‌آمار شده است.

و اما نحوه عمل در روش کریجینگ بی‌زین تجربی شامل مراحل زیر است: ابتدا داده‌های موجود به زیرمجموعه‌هایی با اندازه معین تقسیم می‌شوند، برای هر کدام از زیرمجموعه‌ها یک مدل سمی‌واریوگرام تخمین زده می‌شود، با استفاده از این سمی‌واریوگرام یک ارزش جدید برای هر کدام از مقادیر داده‌ها شبیه‌سازی می‌شود، یک مدل سمی‌واریوگرام جدید از داده‌های شبیه‌سازی شده تخمین زده می‌شود و برای این سمی‌واریوگرام یک وزنی محاسبه می‌شود که چگونگی احتمال تولید سمی‌واریوگرام را از داده‌های واقعی موجود نشان می‌دهد، در نهایت این فرآیند طیفی از سمی‌واریوگرام ایجاد می‌کند که هر سمی‌واریوگرام تخمینی از سمی‌واریوگرام واقعی است که از آن فرآیند مشاهده‌شده می‌توانست تولید شود (۲۶، ۲۷).

در نمودار حاصل از ترسیم سمی‌واریوگرام، مقدار میانه به شکل خط قرمز و مقادیر آستانه ۲۵ و ۷۵ درصد نیز با خط‌چین‌های



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان خراسان شمالی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک در منطقه

Fig. 1- The location of study area in Iran and North Khorasan Province and soil sampling sites

استفاده از ترکیبی از اسیدهای HCL و HNO₃ به نسبت ۳:۱ صورت گرفت، در نهایت محلول شفاف به دست آمده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شده و در یک بالن به حجم ۵۰ cc رسانده شد (USEPA, ۳۰۵۰B, ۲۸). غلظت عناصر در هر نمونه توسط دستگاه جذب اتمی شعله (FAAS) مدل Shimadzu AA-670 قرائت شد، همچنین خاک استاندارد SRM 2711 Montana II برای کنترل کیفیت و بررسی صحت اندازه‌گیری مقدار فلزات سنگین کل در نمونه‌ها استفاده شد و در هنگام هضم به همراه هر گروه از نمونه‌ها یک نمونه شاهد تهیه و همراه با سایر نمونه‌ها مورد آنالیز قرار گرفت.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

با توجه به اینکه در انجام مطالعات آماری، نرمال بودن داده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است ابتدا بررسی نرمال بودن داده‌ها، در نرم‌افزار SPSS 19 به کمک آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (K-S) انجام گرفت. همچنین مهم‌ترین ویژگی‌های آماری داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه‌برداری، آماده‌سازی و تجزیه نمونه‌ها

پس از بررسی نقشه منطقه مورد مطالعه و در نظر گرفتن جهت وزش باد غالب، نقاط نمونه‌برداری به روش شبکه‌بندی منظم و با تکنیک GIS که معمول‌ترین شیوه در مطالعات زمین‌آماري محسوب می‌شود (۱۷) در منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۸۷ کیلومترمربع تعیین شد. در منطقه با توجه به موقعیت نقاط از قبل تعیین شده، در مجموع ۳۵ نمونه خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری به صورت مرکب، متشکل از ۵ نمونه در یک محدوده ۵×۵ متر و به وسیله بیلچه پلاستیکی جمع‌آوری گردید، همچنین ۳ نمونه شاهد به منظور سنجش غلظت زمینه از منطقه‌ای دور از منشأ آلودگی و در خلاف جهت باد غالب برداشت شد، تمام نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی ریخته شد، سپس نمونه‌ها برای خشک شدن به مدت ۴۸ ساعت در معرض هوای آزاد قرار گرفتند، پس از خشک شدن ابتدا هریک از نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متری و سپس از الک مش ۱۰۰ عبور داده شدند. از هر نمونه خاک ۳ g توسط ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ g توزین گردید و عصاره‌گیری برای تعیین غلظت کل فلزات سنگین با

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

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(z(xi) - z^*(xi))^2]}{\sum_{i=1}^n [(z(xi) - O)^2]} \quad (3)$$

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (z(xi) - z^*(xi))}{\sum_{i=1}^n (z(xi))} \quad (4)$$

در این معادلات $Z(xi)$ و $Z^*(xi)$ به ترتیب مقادیر واقعی و برآورد شده، O میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد مشاهده‌ها است.

بعد از کنترل اعتبار پارامترهای تخمین‌گر کریجینگ و انتخاب بهترین روش با بالاترین دقت، اقدام به پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های توزیع مکانی عناصر گردید. تغییرنمای همه متغیرها و مقادیر اثر قطعه‌ای (Nugget effect)، حد آستانه (Sill)، دامنه تأثیر و کلاس همبستگی مکانی حاصل از مدل‌سازی نیز در محیط نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰/۲ محاسبه و نقشه‌های پراکنش عناصر ترسیم شد. برای انجام درون‌یابی به روش کریجینگ بیزین تجربی نیز پس از انجام بررسی‌های موردنیاز و با توجه به تعداد کل نمونه‌ها، اندازه زیرمجموعه‌ها (Subset Size) ۲۰ و تعداد شبیه‌سازی (Simulation) نیز ۱۰۰۰ مرتبه انتخاب شد.

(یافته‌ها و بحث)

نتایج آنالیز آماری

مهم‌ترین ویژگی‌های آماری داده‌ها شامل حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات غلظت عناصر سنگین در جدول (۱) آورده شده است، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای هر سه عنصر روی، نیکل و مس مقدار p محاسبه‌شده از آزمون کلموگوروف-اسمیرنوف (K-S) Kolmogorov_SmirnovTest بیش‌تر از ۰/۰۵ بود که این نشان‌دهنده نرمال بودن مقادیر این عناصر می‌باشد، همچنین نمودار فراوانی این عناصر در شکل (۲) نشان داده شده است که تصدیق بر توزیع نرمال داده‌ها می‌باشد. متوسط غلظت عناصر نیکل، روی و مس به ترتیب ۲۳/۶۱ و ۵۸/۴۷ و ۱۲/۵۱ میلی‌گرم

برای تجزیه تحلیل ساختار تغییرات مکانی متغیرهای موردنظر از تابع تغییرنما جهت نشان دادن تغییرات یک متغیر با در نظر گرفتن فاصله استفاده و پارامترهای ورودی برای درون‌یابی مکانی توسط تخمین‌گرهای کریجینگ معمولی و بیزین تجربی آماده گردید. تابع تغییرنما عبارت است از متوسط مجذور اختلافات بین دو مشاهده در دو موقعیت مکانی واقع در فضای نمونه‌برداری که توسط آرایه h از هم جدا شده‌اند (معادله ۱):

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

در این معادله $Z(xi)$ مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در نقطه x_i و $Z(x_i+h)$ مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در نقطه x_i+h و $N(h)$ جفت نمونه‌های جداشده توسط h هستند؛ که غالباً به $\gamma(h)$ سمی‌واریوگرام اطلاق می‌شود (۲۹). در این معادله مقدار تغییرنما وابسته به فاصله بین مقادیر یک متغیر ناحیه‌ای در دو نقطه است. اگر این مقدار وابسته به جهت نیز باشد، نیم‌تغییرنمای ناهمسان‌گرد (Anisotropic) و در غیر این صورت همسان‌گرد (Isotropic) نامیده می‌شود. برای اعتبارسنجی تخمین‌های انجام‌گرفته از روش اعتبارسنجی متقابل (Cross Validation) استفاده شد، در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. همچنین با استفاده از مدل‌های به‌دست‌آمده، در تعدادی از نقاطی که اندازه‌گیری وجود خواهد داشت، مقادیر تخمینی محاسبه می‌شود. درنهایت با توجه به مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده، دقت هر روش و صحت تخمین‌ها بر مبنای حداقل بودن شاخص‌های آماری جذر میانگین مربع خطا (Root Mean Squared Error) و درصد اریب خطا (PBIAS) محاسبه گردید و در رابطه با شاخص کارایی (Nash-Sutcliffe) (NSE)، هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده صحت بالای درون‌یابی‌ها می‌باشد (۳۰). مقدار این معیارها با استفاده از روابط ۲ تا ۴ به دست آمد:

خاک دارد، همین‌طور در مطالعات دیگر نشان داده شده است که غلظت بالای فلزات دلالت بر توزیع مکانی ناهمگون آن‌ها دارد (۳۲).

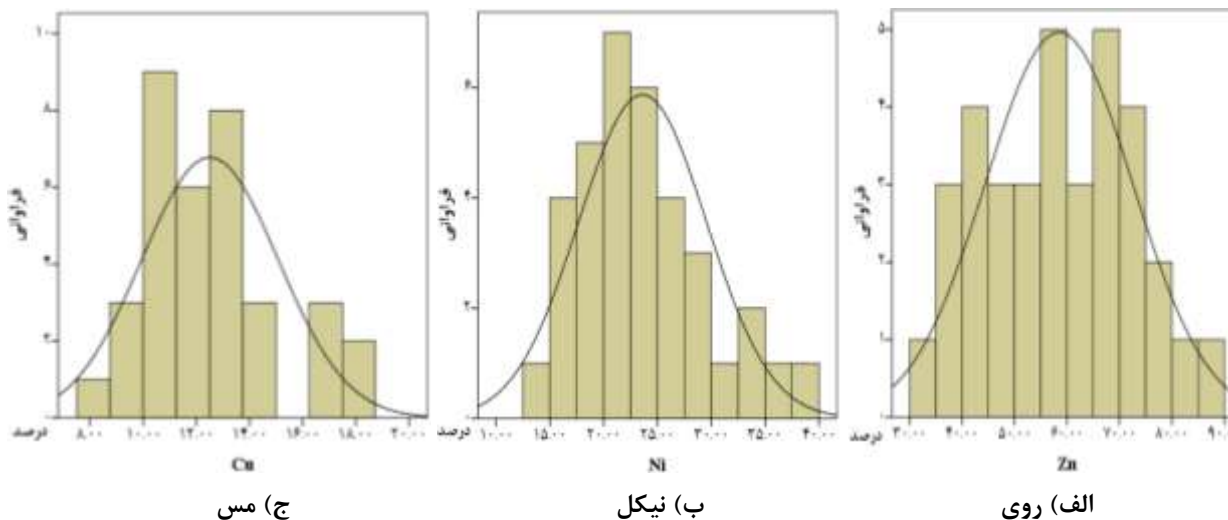
در رابطه با غلظت زمینه و طبیعی نیکل، مس و روی که به ترتیب برابر است با ۲۵/۰۲، ۱۰/۸۴ و ۴۶/۶۴، مشاهده می‌شود که میانگین غلظت دو عنصر روی و مس بیش‌تر و در مورد عنصر نیکل این مقدار کم‌تر از غلظت طبیعی آن‌ها می‌باشد.

بر کیلوگرم وزن خشک می‌باشد. ضریب تغییرات غلظت نیکل، روی و مس در منطقه به ترتیب ۲۵/۱۵، ۲۴/۰۴ و ۲۰/۵۴ درصد می‌باشد که نشان از تغییرپذیری متوسط غلظت کل فلزات مذکور در منطقه دارد. ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۰ درصد نشان از تغییرپذیری کم و ضریب تغییرات بیش‌تر از ۹۰ درصد نشان از تغییرپذیری زیاد دارد (۳۱). تغییرپذیری بالای عناصر با تفاوت معنی‌دار از لحاظ آماری احتمالاً نشان از محتوای بالای آن‌ها در

جدول ۱- خلاصه آماری غلظت نیکل، روی و مس در ۳۵ نمونه خاک سطحی محدوده مجتمع صنعتی اسفراین

Table 1- Descriptive statistical summary of Ni, Zn and Cu concentration in 35 soil samples around of Esfarayen Industrial Complex

عنصر	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)	چولگی	کشی‌دگی	غلظت زمینه
نیکل	۲۳/۶۱	۱۲/۵۶	۳۷/۸۴	۵/۹۴	۲۵/۱۵	۰/۶۲	۰/۱۳	۲۵/۰۲
روی	۵۸/۴۷	۳۴/۴۹	۸۵/۹۲	۱۴/۰۶	۲۴/۰۴	-۰/۰۱	-۱/۰۳	۴۶/۶۴
مس	۱۲/۵۱	۷/۸۷	۱۸/۴۸	۲/۵۷	۲۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۱۲	۱۰/۸۴



شکل ۲: نمودار فراوانی نسبی غلظت عناصر الف (روی، ب) نیکل و ج) مس در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه

Fig. 2: Relative abundance of metals concentration A: Zn, B: Ni and C: Cu in soil samples of study area

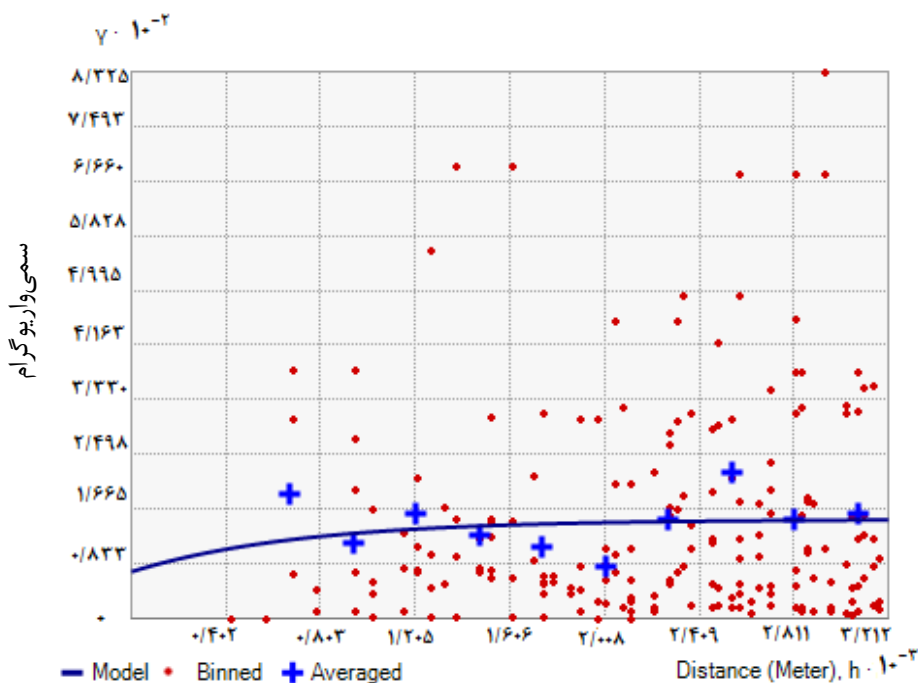
نتایج حاصل از روش کریجینگ معمولی

به جهت بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی مکانی غلظت فلزات مذکور در منطقه مورد مطالعه طبق روش کریجینگ معمولی، پس از برازش چندین مدل نیم‌تغییرنما، برای فلزات مس و روی، مدل نمایی و برای فلز نیکل مدل کروی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برگزیده شد.

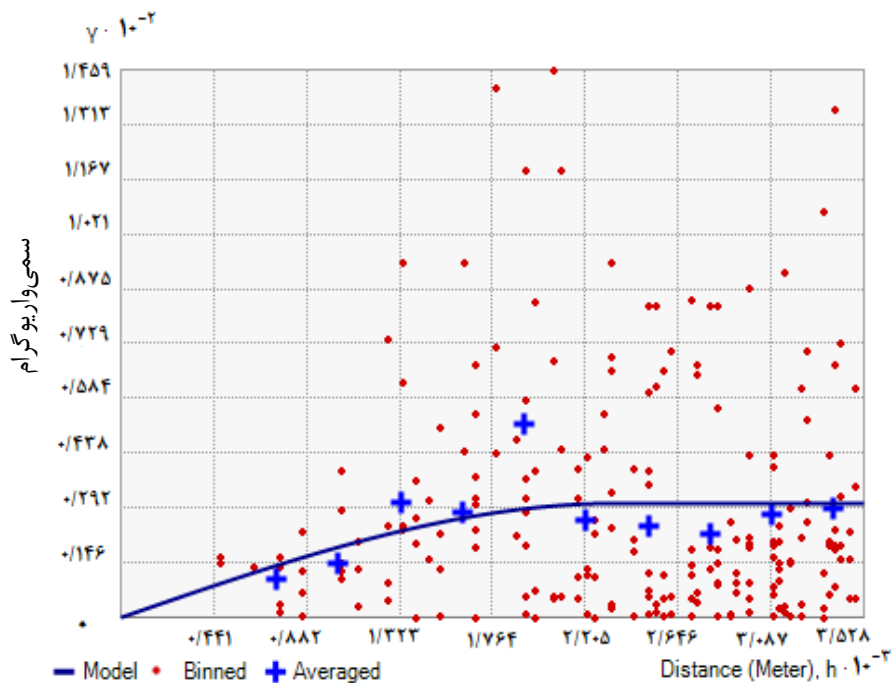
پس از تهیه تغییرنمای سطحی متغیرها و به‌منظور بررسی همسان‌گردی داده‌ها، مشخص شد که متغیرها همسان‌گرد بوده و می‌توان در محاسبات بعدی از تغییرنمای همه‌جهته استفاده نمود.

شکل (۳) تغییرنمای همه‌جهته متغیرهای مس، روی و نیکل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، مشخصات مربوط به این تغییرنماها (مدل برازش شده، شعاع تأثیر، آستانه، اثر قطعه‌ای و ...) در جدول (۲) آورده شده است. از بررسی نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه می‌توان نتیجه گرفت که دو متغیر نیکل و مس دارای ساختار

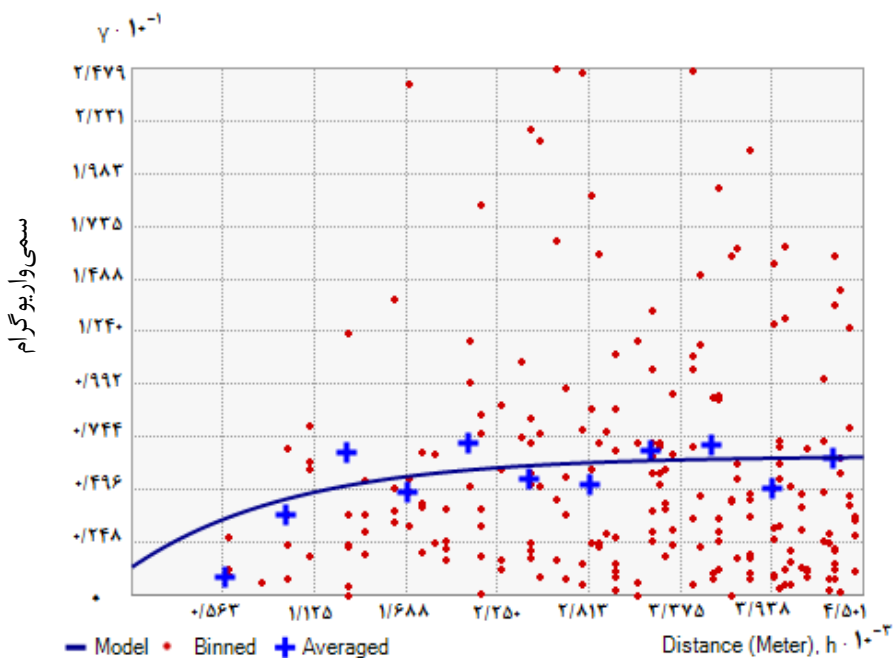
مکانی (وابستگی مکانی) قوی و متغیر روی دارای ساختار مکانی متوسط می‌باشد. هرچه این نسبت کم‌تر باشد، نشان از آن دارد که ساختار مکانی بهتری برای متغیرها وجود دارد. با توجه به نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه می‌توان گفت: اگر این نسبت کم‌تر از ۰/۲۵ باشد، متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی قوی، بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ ساختار مکانی متوسط و هنگامی که بزرگ‌تر از ۰/۷۵ باشد، ساختار مکانی ضعیف است (۳۳). این امر می‌تواند نشان‌دهنده غلبه بیش‌تر واریانس بخش ساختاری تغییرنما بر واریانس بخش تصادفی آن به‌ویژه در مورد دو فلز نیکل و مس در تحقیق حاضر باشد که خود می‌تواند دلیلی بر مناسب بودن الگوی نمونه‌برداری، فواصل کوچک‌تر نمونه‌برداری و دقت نسبتاً مناسب تجزیه‌های آزمایشگاهی باشد. همچنین در این برازش مقدار اثر قطعه‌ای برای نیکل ۵/۱۲، روی ۷۱/۴۶ و برای مس ۱/۳۲ به دست آمد.



الف) روی



(ب) نیکل



(ج) مس

شکل ۳- تغییرنمای همه‌جهته غلظت عناصر الف) روی، ب) نیکل و ج) مس در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه

Fig. 3- Isotropic variogram of metals concentration A: Zn, B: Ni and C: Cu in soil samples of study area

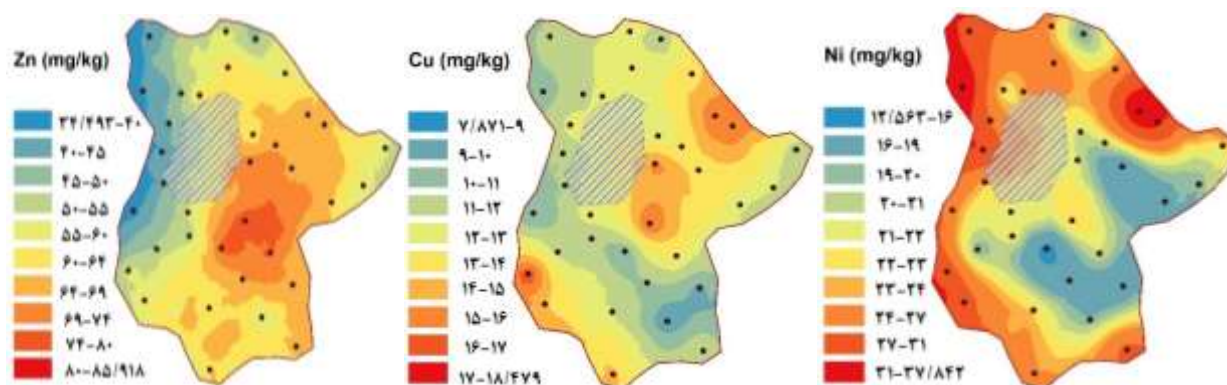
جدول ۲- پارامترها و نتایج بهترین مدل‌های تغییرنمای برازش داده‌شده به غلظت نیکل، روی و مس در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه

Table 2- The results of best experimental variogram model for Ni, Zn and Cu in topsoil of study area

متغیر	مدل برازش شده	اثر قطعه‌ای	سقف	دامنه تأثیر (متر)	نسبت اثر قطعه‌ای به سقف	کلاس همبستگی مکانی
نیکل	کروی	۰/۰۰۱	۳۰/۴۳	۲۳۵۱	۰/۰۰	قوی
روی	نمایی	۷۱/۴۶	۱۵۱/۰۷	۲۱۴۱	۰/۴۷	متوسط
مس	نمایی	۱/۳۲	۶/۵۴	۳۰۰۰	۰/۲۰	قوی

این چنین می‌توان اظهار نظر کرد که میزان این فلز در خاک، در تمامی نقاط در اطراف مجتمع تقریباً به‌طور یکنواختی پراکنده شده است که احتمالاً این امر نشان‌دهنده منشأ زمین‌شناختی این عنصر علاوه بر منشأ انسانی آن است؛ و اما در رابطه با عنصر مس همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود پراکنش غلظت در تمام جهات تقریباً به‌طور یکنواخت می‌باشد به‌غیر از چند نقطه کوچک که به شکل لکه داغ (Hotspot) در شمال شرقی، مرکز و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه ملاحظه می‌شود.

نقشه‌های درون‌یابی حاصل از روش کریجینگ معمولی برای سه عنصر مورد مطالعه در شکل (۴) آورده شده است. با توجه به این نقشه‌ها مشاهده می‌شود که برای عنصر روی نقاط تمرکز آلودگی از قسمت مرکزی مجتمع به سمت شرق، شمال و جنوب شرقی بیش‌تر از دیگر جهات است و حاشیه جهات‌های غربی، شمال-شمال‌غربی و جنوب-جنوب‌غربی تمرکز غلظت کم‌تری را نشان می‌دهد که با توجه به عدم مرتفع بودن منطقه، به نظر می‌رسد این نحوه پراکنش غلظت، از جهت باد غالب (شمال‌غرب- جنوب-شرق) پیروی کرده است. در رابطه با نقشه پراکنش عنصر نیکل



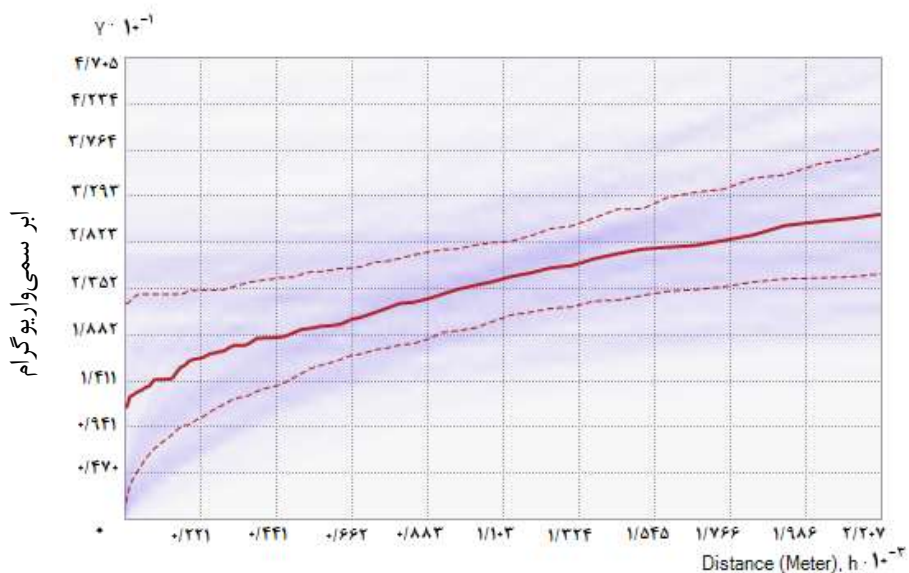
شکل ۴- الگوی مکانی برآوردی غلظت عناصر روی، نیکل و مس در خاک سطحی به روش کریجینگ معمولی

Fig. 4- Spatial distribution of Zn, Ni and Cu for Ordinary Kriging method

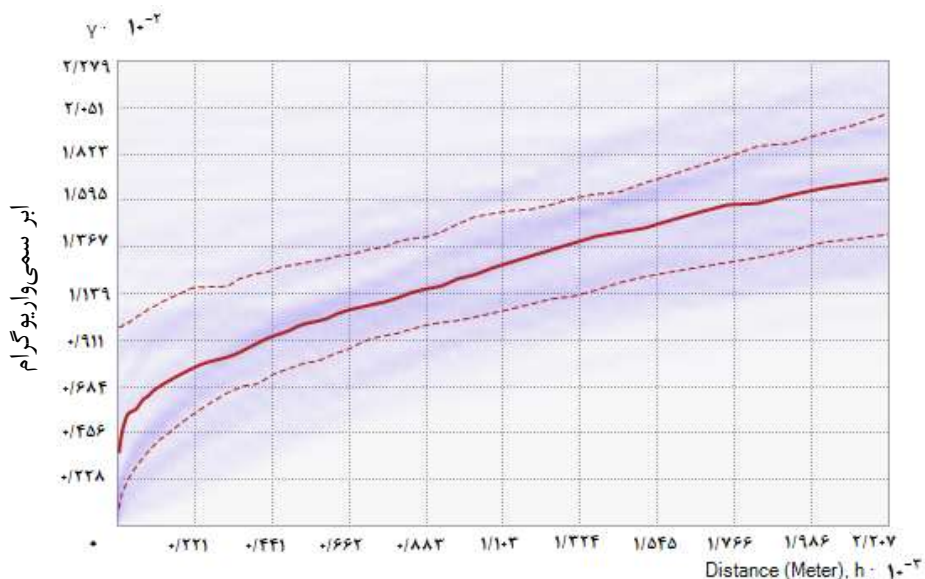
نتایج حاصل از روش کریجینگ بی‌زین تجربی

بعد از اجرای نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰/۲ و استفاده از روش کریجینگ بی‌زین تجربی با اندازه زیرمجموعه ۲۰ و تعداد شبیه‌سازی ۱۰۰۰ جهت درون‌یابی، طیف نیم‌تغییرنماهای حاصل برای سه عنصر مورد مطالعه در شکل شماره (۵) آورده شده است. همان‌طور که در اشکال مشاهده می‌شود خطوط قرمز پررنگ

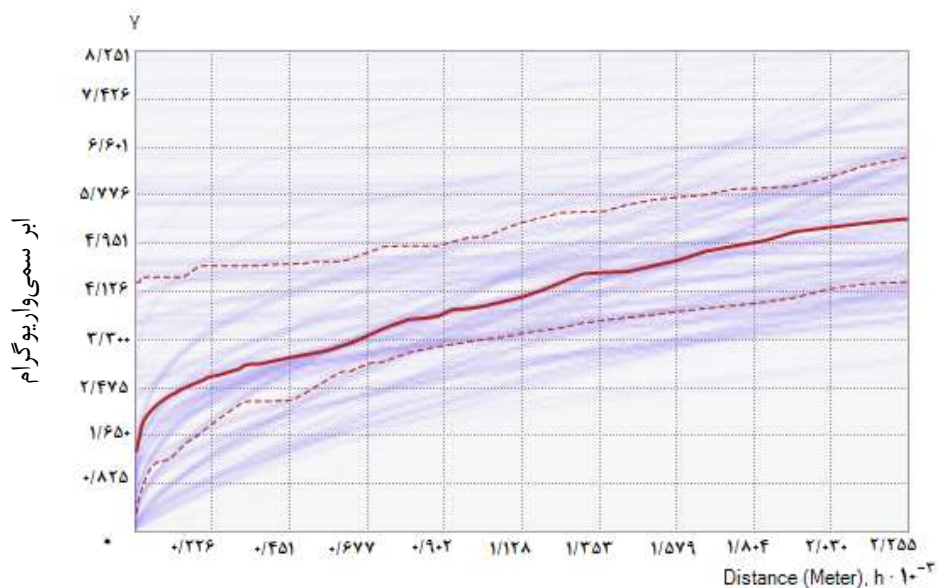
مقادیر میانه و خط‌چین‌ها مقادیر ۲۵ و ۷۵ درصد آستانه را برای هر کدام از عناصر نشان می‌دهد، خطوط آبی‌رنگ که در این جا به شکل ابر سمی‌واریوگرام ترسیم شده‌اند نیز متناسب با وزن سمی‌واریوگرام‌های تخمینی می‌باشند، به‌طوری‌که ضخامت بیش‌تر خطوط، افزایش وزن سمی‌واریوگرام‌ها را نشان می‌دهند، یعنی بیش‌تر سمی‌واریوگرام‌های ترسیمی در آن نواحی بوده است.



الف) نیکل



ب) روی



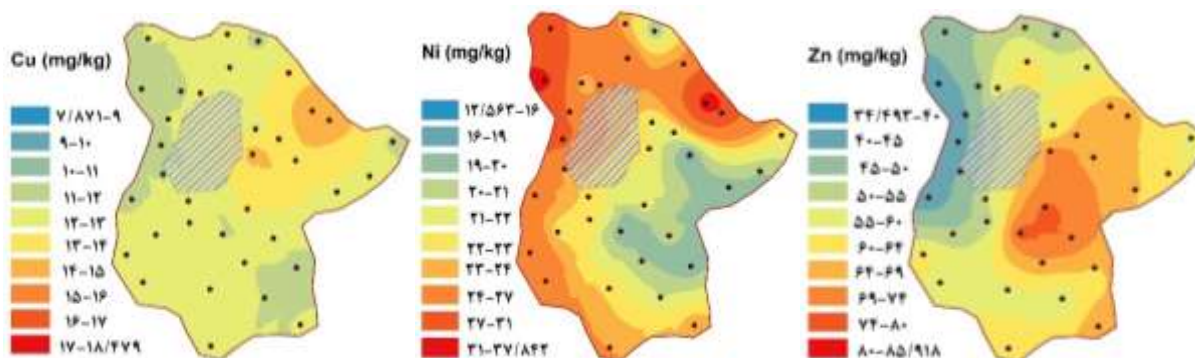
ج) مس

شکل ۵- ابر سمی واریوگرام‌های تولیدشده توسط روش کریجینگ بی‌زین تجربی برای عناصر الف) نیکل، ب) روی و ج) مس

Fig. 5- Experimental semivariogram, produced by Experimental Bayesian Kriging for A: Ni, B: Zn and C: Cu

رابطه با نقشه پراکنش نیکل نیز میزان این فلز در خاک، در تمام نقاط در اطراف مجتمع تقریباً به‌طور یکنواختی پراکنده شده است؛ اما در رابطه با عنصر مس همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود پراکنش غلظت در تمامی جهات تقریباً به‌طور یکسان بوده به‌غیر از دو نقطه کوچک که به شکل لکه داغ در شمال‌شرقی و مرکز منطقه مورد مطالعه ملاحظه می‌شود.

نقشه‌های درون‌یابی غلظت سه عنصر مورد مطالعه در خاک سطحی حاصل از روش کریجینگ بی‌زین تجربی نیز در شکل (۶) ارایه شده است. با توجه به این نقشه‌ها مشاهده می‌شود که همانند نقشه‌های حاصل از روش قبلی (کریجینگ معمولی) در این روش نیز برای فلز روی بیش‌ترین پراکنش غلظت از قسمت مرکزی مجتمع به سمت شرق، شمال و جنوب‌شرقی می‌باشد و در



شکل ۶- الگوی مکانی برآوردی غلظت عناصر روی، نیکل و مس در خاک سطحی به روش کریجینگ بی‌زین تجربی

Fig. 6- Spatial distribution of Zn, Ni and Cu for Experimental Bayesian Kriging method

بیزین تجربی کم‌تر از کریجینگ معمولی بوده است و درصد اریب خطا (PBIAS) نیز برای سه عنصر مس، روی و نیکل در روش بیزین تجربی (به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۷ درصد) کم‌تر از روش کریجینگ معمولی (به ترتیب ۰/۴۰، ۰/۲۲ و ۰/۳۴ درصد) است. نتایج میزان شاخص کارایی (NSE) نیز نشان‌دهنده برتری روش بیزین تجربی نسبت به روش کریجینگ معمولی است اگرچه این مقادیر برای هر دو روش بسیار بالا نیست. مقدار اریب برای غلظت مس منفی به دست آمد به این معنی که مقادیر پیش‌بینی شده بیش از مقادیر مشاهده شده بوده است و به عبارت دیگر مقادیر غلظت مس دارای برآورد بیش از حد بوده است. این مطلب برای دو عنصر دیگر دقیقاً معکوس بوده است و مقادیر پیش‌بینی شده کم‌تر از مقادیر مشاهده‌ای است. به هر حال، با توجه به مقادیر ارایه شده سه شاخص فوق برای هر کدام از روش‌ها، در حالت کلی می‌توان بیان داشت که روش کریجینگ بیزین تجربی، کارایی بهتری نسبت به روش کریجینگ معمولی در تعیین الگوی مکانی غلظت فلزات مورد مطالعه داشته است.

در نهایت پس از انجام درون‌یابی‌ها با استفاده از دو روش (کریجینگ معمولی و بیزین تجربی)، آماره‌های ارزیابی صحت روش‌های درون‌یابی (RMSE, NSE, PBIAS) برای متغیرها در هر کدام از این روش‌ها تعیین گردید. همان‌طور که اشاره شد، هر چه مقادیر خطای برآورد ریشه دوم میانگین مربعات (RMSE) و درصد اریب خطا (PBIAS) به صفر نزدیک‌تر باشد، مؤید آن است که صحت درون‌یابی‌ها بیش‌تر بوده است (۳۰، ۳۴ و ۳۵). همچنین هر چه مقدار شاخص کارایی Nash-Sutcliffe (NSE) به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده صحت بالای درون‌یابی‌ها می‌باشد (۳۰). مقایسه روش‌های درون‌یابی (کریجینگ معمولی و بیزین تجربی) بر اساس این شاخص‌ها در جدول (۳) آورده شده است. در بین این دو روش درون‌یابی، میزان آماره RMSE برای هر سه عنصر نیکل، روی و مس در روش کریجینگ بیزین تجربی (به ترتیب ۵/۳۸۰، ۱۱/۵۶۷ و ۲/۶۱۳) کم‌تر از روش کریجینگ معمولی (به ترتیب ۵/۶۵۱، ۱۲/۶۴۰ و ۲/۸۵۵) بوده است که در حالت کلی می‌توان اذعان داشت میزان خطا برای هر سه عنصر مورد مطالعه در کریجینگ

جدول ۳- مقایسه دو روش درون‌یابی کریجینگ معمولی و بیزین تجربی بر اساس آماره‌های ارزیابی صحت

Table 3- Cross-validation performance and ranking of different interpolation methods

کریجینگ بیزین تجربی			کریجینگ معمولی			عنصر
PBIAS (%)	NSE	RMSE	PBIAS	NSE	RMSE	
۰/۱۷	۰/۵۲	۵/۳۸	۰/۳۴	۰/۳۴	۵/۶۵	نیکل
۰/۱۲	۰/۴۷	۱۱/۵۶	۰/۲۲	۰/۳۳	۱۲/۶۴	روی
-۰/۲۸	۰/۶۳	۲/۶۱	-۰/۴۰	۰/۴۷	۲/۸۵	مس

جزئیات اطلاعات محلی را تعدیل می‌کند و در ناحیه‌ای با تغییرپذیری بالا که ارتباط مکانی ضعیف دارد، اثرات نرم‌سازی کریجینگ عادی خیلی نیرومند است (۳۷)، اما مشکلات موجود در برازش دادن مدل‌ها توسط این روش از معایب آن می‌باشد که با بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش این موضوع به اثبات رسید

به‌طورکلی، روش‌های درون‌یابی تعیین می‌کنند که چگونه اطلاعات نمونه‌های مجزا به نقشه‌های پیوسته تبدیل شوند و دقت درون‌یابی بستگی به این دارد که روش درون‌یابی چگونه تغییرپذیری مکانی و همبستگی خصوصیات خاک را نشان می‌دهد (۳۶). اگرچه روش کریجینگ معمولی یک فیلتری است که

متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای تأثیرگذار بر آن بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد.

در پایان لازم به ذکر است که هر روش و کارکردی علاوه بر مزایایی که دارد، دارای معایبی نیز می‌باشد که از معایب روش بی‌زین تجربی نیز می‌توان به سه مورد اشاره کرد: پردازش کندتر نسبت به سایر روش‌های کریجینگ، عدم دسترسی به تصحیحات کوکریجینگ و ناهمسان‌گردی، و حساس بودن تبدیل لگاریتمی به داده‌های پرت، به طوری که اگر با وجود داده‌های پرت از تبدیل لگاریتم استفاده شود مقادیر تخمین زده شده خیلی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از مقادیر واقعی خواهد شد (۲۶).

اما به طور کلی به دلیل کارایی بهتر این روش نسبت به سایر روش‌های قبلی کریجینگ تمامی این محدودیت‌ها قابل اغماض بوده و از توانایی قدرتمند این روش در تعیین بهترین الگوی مکانی عناصر مورد مطالعه نخواهد کاست.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شد که ضمن معرفی روش کریجینگ بی‌زین تجربی به عنوان روشی جدید در درون‌یابی، کارایی آن در مقایسه با روش کریجینگ معمولی بررسی شود، همچنین غلظت عناصر سنگین در منطقه مورد مطالعه بررسی گردید و نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که در مقایسه با غلظت زمینه طبیعی، میانگین غلظت دو عنصر روی و مس بیش‌تر و در مورد عنصر نیکل این مقدار کم‌تر از غلظت طبیعی آن‌ها می‌باشد؛ اما از آنجا که هدف اصلی قیاس دو روش کریجینگ بی‌زین تجربی و معمولی بود بنابراین تمام تحلیل‌ها در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۲ انجام شد. مشخص است اگر تحلیل واریوگرافی توسط نرم‌افزارهای قوی‌تری انجام می‌شد شاید نتایج دارای تغییرات اندکی بود. به هر حال طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش و با توجه به میزان خطای محاسبه شده ناشی از هر کدام از روش‌های به کار گرفته شده جهت درون‌یابی مکانی عناصر، روش کریجینگ بی‌زین

که روش کریجینگ بی‌زین تجربی می‌تواند تحلیل‌گر مناسب‌تری جهت پهنه‌بندی مکانی عناصر مورد مطالعه باشد؛ اما صحت درون‌یابی‌ها یک مفهومی نسبی است و معیارها با اهداف درون‌یابی تغییر می‌کنند. دو هدف اصلی برای نقشه‌سازی آلودگی خاک، تحلیل الگوی مکانی آلودگی خاک و شناسایی مناطق آلوده است. در هدف تحلیل الگوی مکانی آلودگی، نتایج پیش‌بینی روند مکانی کلی آلودگی خاک تا حد امکان باید دقیق باشد. شکی نیست که کریجینگ بی‌زین تجربی می‌تواند دارای بیش‌ترین توانایی به منظور پیش‌بینی روند کلی آلودگی خاک باشد. به هر حال در هدف شناسایی مناطق آلوده، نیاز است تا تکنیک‌های درون‌یابی، خصوصیات محلی آلودگی خاک (به ویژه لکه‌های داغ و سرد محلی) را با دقت بیش‌تری پیش‌بینی کنند. مشخص است که تمام نتایج درون‌یابی ممکن است دارای خطا باشند، از این رو شناسایی ناحیه‌ای به عنوان منطقه آلوده شده نباید انحصاراً متکی به نتایج درون‌یابی باشد. پیشنهاد می‌شود که زمینه طبیعی و فعالیت‌های انسانی قبل از تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. عدم قطعیت در ارزیابی آلودگی عمدتاً در ناحیه‌ای با تغییرپذیری محلی زیاد رخ می‌دهد (۲۹)؛ بنابراین نمونه‌برداری بیش‌تر در منطقه‌ای که دارای عدم قطعیت است توصیه می‌شود.

پژوهش انجام شده در این مطالعه نشان داد که روش کریجینگ بی‌زین تجربی برای سه عنصر مورد مطالعه در خاک سطحی شهرستان اسفراین بهترین تخمین‌گر می‌باشد، این روش دارای کم‌ترین میزان خطا و انحراف و بیش‌ترین صحت برای تخمین عناصر مذکور بوده است. با توجه به پژوهش صورت گرفته در این مطالعه و نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که روش‌های درون‌یابی مکانی به ویژه روش کریجینگ بی‌زین تجربی، از کارایی بسیاری در تخمین نقاط نامعلوم برخوردارند و نقشه‌های حاصل می‌تواند ابزاری مناسب برای تصمیم‌گیری مدیران در بخش‌های گوناگون باشد همچنان که میرزایی و ساکی‌زاده (۲۰۱۶) (۲۷) نیز در پژوهش خود به نتایج مشابهی دست یافتند، اما این نکته نیز قابل ذکر است که انتخاب روش مناسب درون‌یابی مکانی در برآورد یک

- Sci. Natur. Resour, 14(2), pp.11-19, (in persian).
6. Zhang, X. Y., Yue-Yu, S. U. I., Zhang, X. D., Kai, M. E. N. G., and Herbert, S. J., 2007. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere*, 17(1), 19-29.
 7. Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., 1989. *Applied geostatistics* (Vol. 2). New York: Oxford University Press.
 8. Loska, K., Wiechuła, D., and Korus, I., 2004. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30(2), pp.159-165.
 9. Bi, X., Feng, X., Yang, Y., Qiu, G., Li, G., Li, F., Liu, T., Fu, Z. and Jin, Z., 2006. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China. *Environment international*, 32(7), pp.883-890.
 10. Jiachun, S., Hazian, W., Jianming, X., Jinjun, W., Xingmei, L., Haiping, Z., and Shunlan, J., 2006. Spatial distribution of heavy metal in soil: A case study of Changning, China. *Environmental Geology Geol*, 52(1), pp.245-264.
 11. Khodakarami, L., Soffianian, A., Mohammadi Towfigh, E., and Mirghaffari, N., 2014. Study of heavy metals concentration Copper, Zinc and Arsenic soil using GIS and RS techniques (Case study: Kaboudarahang, Razan and Khonjin- Talkhab catchment in Hamedan province). *RS & GIS Techniques in Natural Resource Science*, 5(3), pp.45-55, (in persian).
 12. Juang, K.W., Lee, D.Y., and Ellsworth, T.R., 2001. Using rank-order

تجربی برای عناصر مورد مطالعه کارایی بهتری را نسبت به کریجینگ معمولی نشان داد، اگر چه این تفاوت بسیار چشم‌گیر نبود. شایان ذکر است هدف این مطالعه تنها مقایسه کارایی دو روش بود و مباحث فنی دیگر مانند تعداد نقاط و الگوی پراکنش آن‌ها، تعداد نقاط همسایه، لکه‌های داغ و سرد و... مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، این روش با توجه به سایر عوامل مؤثر بر درون‌یابی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

منابع

1. Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58(8), 1246-1266.
2. Dayani, M., Mohammadi, J., and Naderi, M., 2009. Geostatistical Analysis of Pb, Zn and Cd concentration in soil of Sepahanshahr suburb (south of Esfahan). *Water and Soil*, 23(4), 67-76.
3. Dayani, M., and Mohammadi, J., 2010. Geostatistical assessment of Pb, Zn and Cd contamination in near-surface soils of the Urban-Mining transitional region of Isfahan, Iran. *Pedosphere*, 20(5), pp.568-577.
4. Taghipour, M., Khademi, and H., Ayoubi, Sh., 2010. Spatial variability of Pb and Zn concentration and its relationship with land use and parent materials in selected surface soils of Hamadan province. *Water and Soil*, 24(1), pp.132-144, (in persian).
5. Baghaei, AH., Khademi, H., and Mohammadi, J., 1997. Geostatistical analysis of spatial variability of Lead and Nickel around two industrial factories in Isfahan province. *J. Agric.*

- Environment, 9(4), pp39-48, (in persian).
19. Khodakarami, L., Soffianian, A., Mirghafari, N., Afyuni, M. and Golshahi, A., 2012. Concentration zoning of chromium, cobalt and nickel in the soils of three sub-basin of the Hamadan province using GIS technology and the geostatistics. JWSS-Isfahan University of Technology, 15(58), pp.243-254.
 20. Mahmoudi, Sh., Mohammadi, J., and Naderi, M., 2013. Statistical and spatial distribution of some heavy metals in surface soil particle size fractions in South of Isfahan. Water and Soil Conservation, 20(2), pp.1-22.
 21. Krige, D. G., 1951. A statistical approach to some basic mine problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical. Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52, pp.119-139.
 22. Krige, D.G., 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 66, pp.13-38.
 23. Deutsch, C.V., and Journel, A. G., 1998. GSLIB: Geostatistical Software and User's Guide, second edition. Oxford University Press. New York. 340 pages.
 24. Payne, R. W., (Ed.), 2013. The Guide to GenStat Release 16, Part 2: Statistics. VSN International Ltd. Hemel Hempstead. UK.
 25. Pebesma, E.J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Computers and Geosciences. 30(7), pp.683-691.
 - geostatistics for spatial interpolation of highly skewed data in a heavy-metal contaminated site. Journal of Environmental Quality, 30(3), pp.894-903.
 13. Oliver, M.A., and Webster, R., 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. Catena, 113, pp.56-69.
 14. Ostovari, Y., Beigi, H., and Davoodian, AR., 2015. Land-Scale Processing of sedimentation potential and groundwater corrosion in Lordegan plain. Environmental Science and Technology, 17(2), pp45-61, (in persian).
 15. Shahbazi, A., Soffianian, AR., Afraz, R., and Khodakarami, L., 2011. The spatial distribution of heavy metals cadmium, copper and lead in soil and sources of these metals (Case study: Nahavand city). RS & GIS Techniques in Natural Resource Science, 2(2), pp97-109, (in persian).
 16. Mirzaei, R., Esmaeelisari, A., Ghorbani, H., Hafezimoghadass, N., Homami, M. R., and Rezaei, H. R., 2013. Predicting the spatial distribution of Cd, Ar, Cr and Cu In surface soil of Golestan Province. Environmental Research, 4(7), pp.35-44.
 17. Abdollahi, S., Delavar, MA., and Shekari, P., 2012. Spatial Distribution Mapping of Pb, Zn and Cd and Soil Pollution Assessment in Anguran Area of Zanjan Province. Soil and Water, 26(6), pp1410-1420, (in persian).
 18. Farzaneh, P., Soffianian, AR., and Moattar, F., 2001. Spatial distribution of (Ni, Cr, Pb, Cu and Co) in the Surface (Superficial) Soil of Hamadan county with Geostatistic & GIS. Human and

- contamination in Andimeshk-Shush Plain, Southwest of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), pp.2758-2769.
28. Jones, C.L., Hodge, V. F., and Schoengold, D.M., 1987. An Interlaboratory Study of Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy Method 6010 and Digestion Method 3050. Publication/US. Environmental protection agency. Also available online at <http://www2.epa.gov/region8/method-6010b-inductively-coupled-plasma-atomic-emission-spectrometry>.
26. Krivoruchko, K., and Gribov, A., 2014. Pragmatic Bayesian kriging for non-stationary and moderately non-Gaussian data. In *Mathematics of Planet Earth. Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences*. Eds: Pardo-Igúzquiza, E., Guardiola-Albert, C., Heredia, J., Moreno-Merino, L., Durán, J.J., Vargas-Guzmán, J.A., Springer, pp.61-64. also available online at <http://www.esri.com/news/arcuser/1012/empirical-byesian-kriging.html>.
27. Mirzaei, R. and Sakizadeh, M., 2016. Comparison of interpolation methods for the estimation of groundwater

