استفاده از متغیر کمکی ضریب سولفیدی به‌منظور بهبود نتایج برآورد مس با کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی

سمیه شیخ محمدی[۱]، امید اصغری[۱*] و غلامحسین نوروزی[۱]

[۱] پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۰)

چکیده

طرح‌های معدنی اغلب با عدم قطعیت و مخاطره همراه هستند و هدف مدل‌سازی، برآورد ذخیره، کاهش واریانس برآورد و عدم قطعیت به‌منظور کاهش مخاطره تصمیم‌گیری است. از سوی دیگر یکی از راه‌های کاهش واریانس برآورد، اجرای حفاری‌های گسترده و پُرهزینه در منطقه است. از دیگر روش‌های کاهش واریانس برآورد که با صرف هزینه کمتر قابل اجرا است، روش‌های زمین‌آماری چندمتغیره است. در این تحقیق از روش‌های کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی که می‌توانند با استفاده از متغیر کمکی (در اینجا ضریب سولفیدی) به بهبود نتایج کمک کنند، به‌منظور برآورد متغیر عیار مس معرفی می‌شوند. منطقه مورد بررسی در یکی از مناطق پتانسیل‌دار مس، واقع در استان کرمان است. برای برآورد چگونگی توزیع عیار مس در منطقه، از داده‌های ضریب سولفیدی استفاده شد، زیرا نسبت به حفاری‌های صورت‌پذیرفته پوشش بیشتری در منطقه دارد و با هزینه کمتری نیز همراه است. در اجرای روش کوکریجینگ هم‌مختصات فقط داده‌های ثانویه هم‌مختصات با محل برآورد متغیر اولیه در نظر گرفته می‌شوند. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از این دو روش، نسبت به روش کریجینگ معمولی که از متغیر ثانویه استفاده نمی‌کند، کیفیت نتایج توزیع مس را بهبود می‌دهد. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از روش اعتبارسنجی حذفی صورت گرفت. براساس معیارهای میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و واقعی (R)، روش‌های کریجینگ با روند بیرونی و کوکریجینگ هم‌مختصات، نتایج بهتری را آشکار ساختند.

واژه‌های کلیدی: واریانس برآورد، ضریب‌سولفیدی، کوکریجینگ هم‌مختصات، کریجینگ با روند بیرونی، مدل مارکوف

The use of auxiliary variable sulphide factor to improve the estimation results of copper by collocated cokriging and kriging with external drift

Somayeh Sheykhmohammadi[1], Omid Asghari[1*] and Gholam Hossain Norouzi[1]

[1] *College of Engineering, University of Tehran, Iran*

(Received: 1 May 2012, accepted: 12 October 2013)

[*]Corresponding author: o.asghari@ut.ac.ir [*]نگارنده رابط:

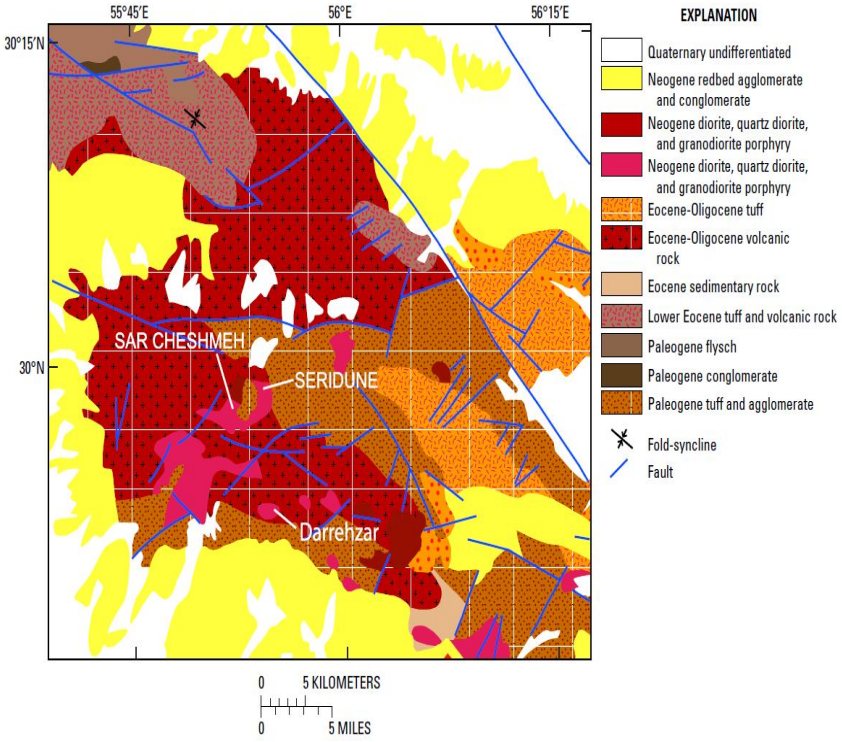
Summary

In projects of reserves estimation, we would like to reduce the estimation variance and related uncertainty. This reduction usually requires extensive and costly drilling. Multivariate geostatistical methods could be noted as an inexpensive and budget saving method to reduce the estimation variance. Often, there exists much secondary data that must be considered in a geostatistical reservoir modeling. All secondary data being used as a secondary variable must be highly correlated with the primary one. This work introduces the collocated cokriging and kriging with an external drift to incorporate sulphide factor as secondary information to estimate the copper content in a porphyry system. The study area was one of the desirable areas of copper, located in Kerman Province. Sulphide factor as highly correlated and fully covered data was selected to improve the estimation of copper in this region. In collocated cokriging, the number of the secondary information used for estimation is reduced to the estimation location. However, the datum colocated with primary data implementations of collocated cokriging is often limited to a single secondary variable. Improved models would be constructed if multiple variables were accounted for simultaneously. Contrary to cokriging, kriging with an external drift does not make explicit the structural link between the target variable and the auxiliary variable, for the latter is considered to be deterministic. After determining the mean of the estimation variance, experimental results showed that both methodologies incorporating secondary information led to better results than ordinary kriging that did not incorporate any sulphide factor data. The ordinary kriging method uses only cupper assay information, while in collocated cokriging and kriging with an external drift, both cupper assay and sulphide factor information are used as an auxiliary variable. The validation sample was used to compare the performance of the methods. Collocated cokriging and kriging methods with an external drift based on mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and the correlation coefficient of real and estimated values (R) illustrate better results.

Keywords: Variance estimation, sulphide factor, collocated cokriging, kriging with external drift, Markov model

۱ مقدمه

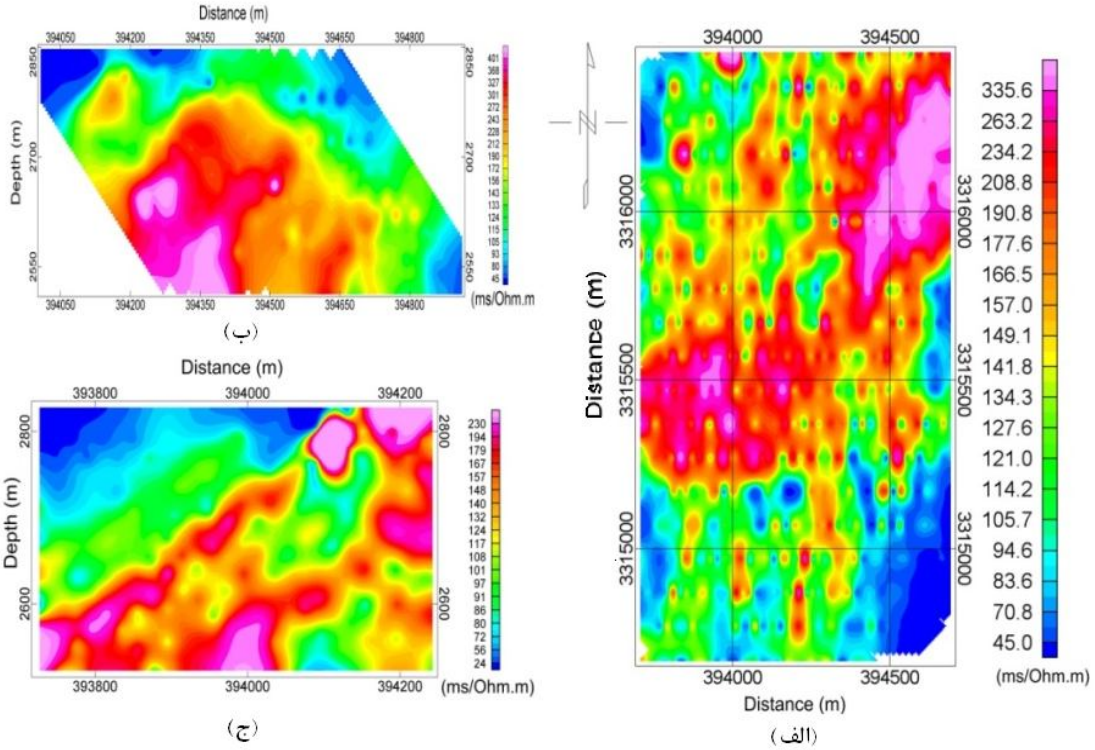
در اغلب روش‌های درون‌یابی از دو نوع داده اولیه و ثانویه استفاده می‌شود. زمین‌آمار یک چارچوب مناسب برای ترکیب اطلاعات ثانویه به‌منظور بهبود برآورد متغیر اولیه فراهم می‌کند. روش‌های زمین‌آماری متفاوتی برای استفاده از داده‌های ثاویه در بهبود برآورد داده‌های اولیه توسعه یافته‌اند (بویزیو و همکاران، ۲۰۰۶a). از میان این روش‌ها، می‌توان اطلاعات ثانویه را به‌کمک روش‌های کریجینگ با روند بیرونی و کوکریجینگ هم‌مختصات برای افزایش دقت برآورد مورد استفاده قرار داد. در روش کریجینگ با روند بیرونی، از داده‌های ثانویه برای نشان دادن تغییرات میانگین محلی متغیر اولیه استفاده می‌شود و سپس کریجینگ ساده روی باقی‌مانده‌های حاصل از حذف میانگین محلی از مقدار داده‌ها اجرا می‌شود. میانگین محلی از راه ارزیابی محلی یک تابع خطی از یک متغیر ثانویه هموار به‌دست می‌آید (بویزیو و همکاران، ۲۰۰۶b). این روش زمانی به‌کار برده می‌شود که متغیر اصلی با متغیر کمکی موردنظر دارای همبستگی باشد. این روش از متغیرهای ثانویه برای پیش‌بینی مدل روند استفاده می‌کند (فرناندز و روچا، ۲۰۱۰). کوکریجینگ



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه سریدون (جان و همکاران، ۲۰۱۰).

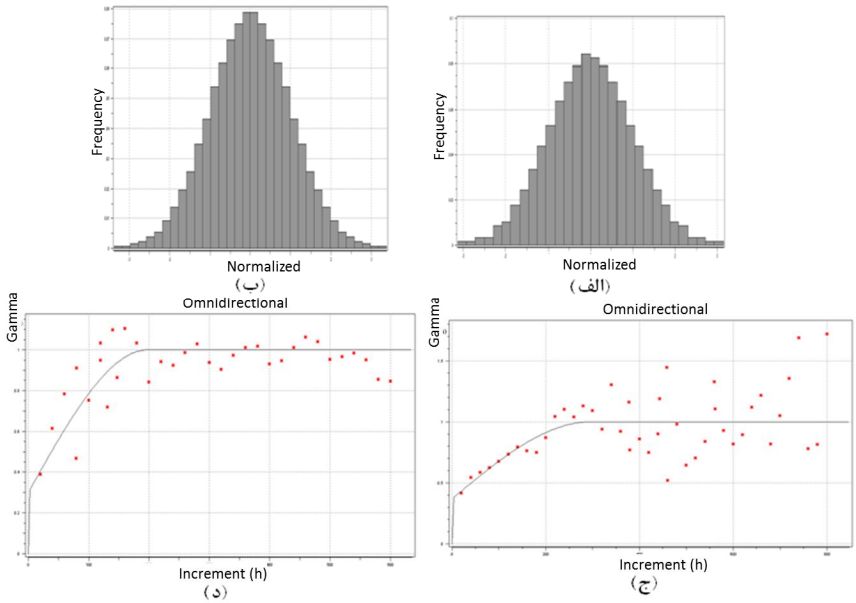
هم‌مختصات یک روش زمین‌آماری چند متغیره است که فقط از داده‌های ثانویه هم‌مختصات با محل برآورد متغیر اولیه استفاده می‌کند. این روش با در نظر گرفتن همبستگی فضایی در نقاط نمونه برداری هم‌مختصات با متغیر اولیه و سادگی استفاده به واسطهٔ روابط مارکوف، نسبت به سایر روش‌هایی که از ترکیب اطلاعات ثانویه استفاده می‌کنند، برتری دارد. از طرفی اجرای روش، ساده است و تنها آمارهٔ موردنیاز برای ادغام داده‌ها، ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه است (واکرنگل، ۲۰۰۲).

روش‌های کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی را بسیاری از محققان مورد استفاده قرار داده‌اند. برای مثال بورنان و همکاران (۲۰۰۰) در یک بررسی موردی به مقایسه دو روش کریجینگ با روند بیرونی و رگرسیون خطی ساده در پیش‌بینی ضخامت افقی خاک با استفاده از متغیر کمکی مدل ارتفاعی رقمی (دیجیتال) در شرایط نمونه‌برداری با تراکم متفاوت پرداختند و متوجه کارایی بهتر و دقت بیشتر روش کریجینگ با روند بیرونی در برآورد هدف شدند؛ این دقت متناسب با افزایش تعداد نمونه‌ها بیشتر می‌شد. تریزی و همکاران (۲۰۰۰) با به‌کار بردن روش کریجینگ با روند بیرونی و استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی درحکم داده‌های ثانویه به بررسی توزیع فضایی رسانش الکتریکی در ذخایر غیرتلفیقی در منطقه مونتالتو در ایتالیا پرداختند و با این روش به نتایج قابل‌قبولی رسیدند. اسنپوانگر و همکاران (۲۰۰۳) روش‌ساختند که روش کریجینگ با روند بیرونی، مزایای بیشتری نسبت به روش کریجینگ معمولی در حوضه فضا – زمان دارد، عمدتاً به این علت که در این روش روند قابل‌هدایت است. البته آنها مزایایی از روش کریجینگ معمولی نسبت به کریجینگ با روند بیرونی را نیز مطرح کرده‌اند که بیشتر



شکل ۲. برداشت داده‌های ثانویه ضریب سولفیدی: (الف) آرایش مستطیلی، (ب) و (ج) آرایش قطبی- دوقطبی.

مربوط به سادگی روش کریجینگ معمولی است. لوئیس (۲۰۰۴) روش کریجینگ با روند بیرونی را در برآورد عیار طلا با اطلاعات ثانویه‌ای همچون سنگ‌شناسی و عیار نقره به کار برد و نتیجه گرفت که استفاده از این اطلاعات در بهبود دقت برآورد عیار طلا مفید است. بویزیو و همکاران (۲۰۰۶) توپوگرافی را درحکم داده ثانویه برای برآورد دقیق‌تر سطح آب زیرزمینی در یک معدن زغال‌سنگ به کار بردند و سپس با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده با میانگین محلی متغیر و کوکریجینگ هم‌مختصات به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ هم‌مختصات نسبت به سایر روش‌ها کارایی و دقت بیشتری نشان می‌دهد. در تحقیق دیگری که بازهم از سوی بویزیو و همکاران (۲۰۰۶) در محدوده معدن زغال‌سنگ در سانتاکاترینا صورت گرفت، دو روش کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی برای برآورد سطح آب به‌کار برده شد، در حالی‌که از توپوگرافی درحکم داده ثانویه در این مثال مورد بررسی در معدن زغال‌سنگ زیرزمینی استفاده شده است. هر دو روش به کار رفته نتایج بهتری نسبت به روش کریجینگ معمولی که از داده‌های توپوگرافی استفاده نکرده است داشته‌اند. واتانب (۲۰۰۸) نتایج به‌دست آمده از روش کریجینگ با روند بیرونی را در رابطه با همبستگی بین متغیرها شرح می‌دهد، و نتیجه می‌گیرد که اگر میزان همبستگی کم باشد نتایج به‌دست آمده با نتایج برآورد کریجینگ معمولی تفاوت زیادی نخواهد داشت. فرناندز و روچا (۲۰۱۰) روش کریجینگ با روند بیرونی را در ارزیابی ذخایر سنگ آهک و لاتریت به کار بردند و هنگام مقایسه نتایج با روش کریجینگ معمولی مشاهده کردند که تفاوت زیادی در بلوک‌های برآورد شده به دو روش وجود ندارد. اما روش کریجینگ با روند بیرونی را می‌توان جایگزین قابل‌اعتمادی برای روش‌های زمین‌آماری چندمتغیره مانند کوکریجینگ معمولی به‌شمار



شکل ۳. بافت‌نمای مقادیر بهنجارشده: (الف) مس (ب) ضریب سولفیدی، واریوگرام بی‌جهت: (ج) داده‌های مس (د) داده‌های ضریب سولفیدی.

رود، زیرا نسبت به روش‌های دیگر به تلاش کمتری برای برآورد متغیر موردنظر نیاز دارد. فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۰) با مقایسه روش‌های زمین‌آمار در تعیین توزیع تخلخل در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران و پس از اِعمال روش‌های زمین‌آمار مشاهده کردند که نتایج حاصل از روش کریجینگ با روند بیرونی نسبت به نتایج به‌دست آمده از روش‌های کریجینگ معمولی و کوکریجینگ، دقیق‌تر است و درنهایت برای تعیین توزیع تخلخل با دقت زیاد از روش کریجینگ با روند بیرونی استفاده کردند. کویی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روش کوکریجینگ هم‌مختصات به شبیه‌سازی تخلخل پرداختند و درنهایت نتایج تجربی نشان داد که بازسازی ساختارها و ویژگی‌های تخلخل در داده‌های ثانویه، مطلوب و خیلی بهتر از زمانی است که از روش کوکریجینگ در شبیه‌سازی توزیع تخلخل استفاده می‌شود. ژیانگ و لی (۲۰۱۰) در منطقه زائویان در حوضه کینشوئی از داده‌های مربوط به مقادیر خاکستر درحکم داده ثانویه در شبیه‌سازی تخلخل استفاده کردند و پس از به کار بردن روش کوکریجینگ هم‌مختصات، ضمن اینکه تصریح کرده‌اند که کاربرد روش بسیار ساده است به نتایج با کیفیت و دقت خوبی دست یافتند.

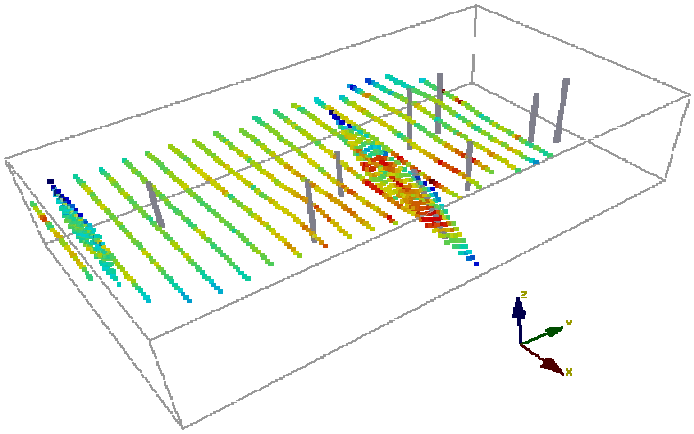
براساس این ایده در تحقیق حاضر، متغیر مس به روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی برآورد شد و نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. متغیر ثانویه مورد استفاده در این بررسی ضریب‌سولفیدی بوده است.

۲ روش تحقیق

روش‌های کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی که در این تحقیق به کار رفته‌اند، در این بخش به‌صورت خلاصه شرح داده می‌شوند.

۲-۱ کوکریجینگ هم‌مختصات

کوکریجینگ هم‌مختصات شکل ساده شده‌ای از کوکریجینگ است که از داده‌های ثانویه S فقط در نقاطی که قرار است متغیر اولیه برآورد شود استفاده می‌کند.



شکل ۴. شبکه طراحی شده برای برآورد مس.

شکل این برآوردگر به‌صورت زیر است (کای و دیمیتراکوپولوس، ۲۰۰۰):

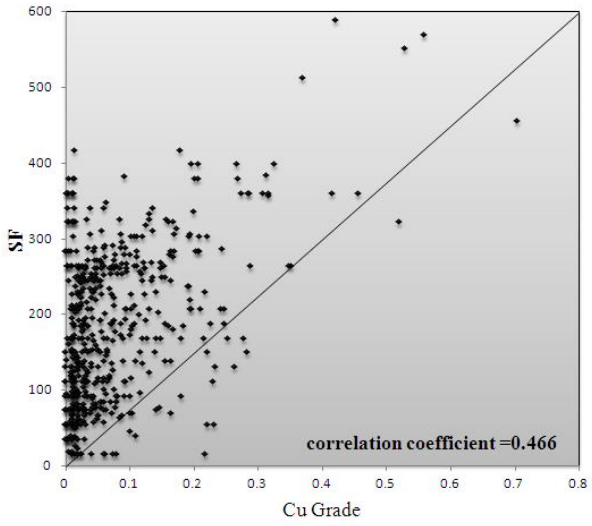
$$Z^* = \sum_{i=1}^{n} a_i [Z_i - \bar{Z}] + b[S - \bar{S}], \qquad (۱)$$

که a_i و b وزن‌های کریجینگ و S مقدار داده ثانویه در محل برآورد متغیر اولیه Z^* متغیر اولیه است. وزن‌های a_i و b با حل دستگاه معادلات کوکریجینگ هم‌مختصات به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

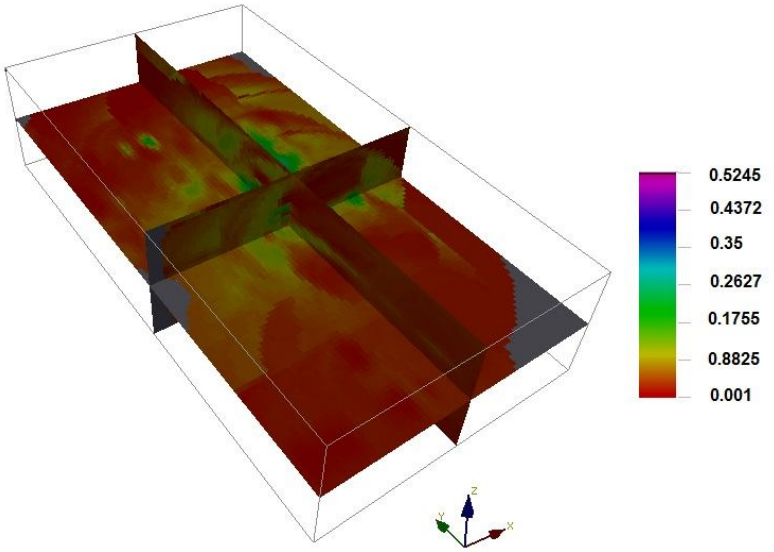
$$\sum_{i=1}^{n} [a_i \operatorname{cov}(Z_i, Z_i) + b \operatorname{cov}(S_i, Z_j)] =$$
$$\operatorname{cov}(Z^*, Z_j), \rightarrow j = 1,2,...,n$$

$$\sum_{i=1}^{n} a_i \operatorname{cov}(Z_i, S) + b \operatorname{cov}(S^*, S^*) = \operatorname{cov}(Z^*, S^*). \qquad (۲)$$

با توجه به دستگاه معادلات بالا فقط به داشتن اطلاعات در مورد کوواریانس متغیر اولیه نیاز داریم و به کوواریانس متغیر ثانویه *Cov(S, S)* نیاز نیست و کوواریانس متغیر اولیه و ثانویه *Cov(Z, S), Cov(S, Z)*



شکل ۵. نمودار پراکندگی داده‌های مس و ضریب سولفیدی.



شکل ۶. نتایج برآورد مس با کوکریجینگ هم‌مختصات.

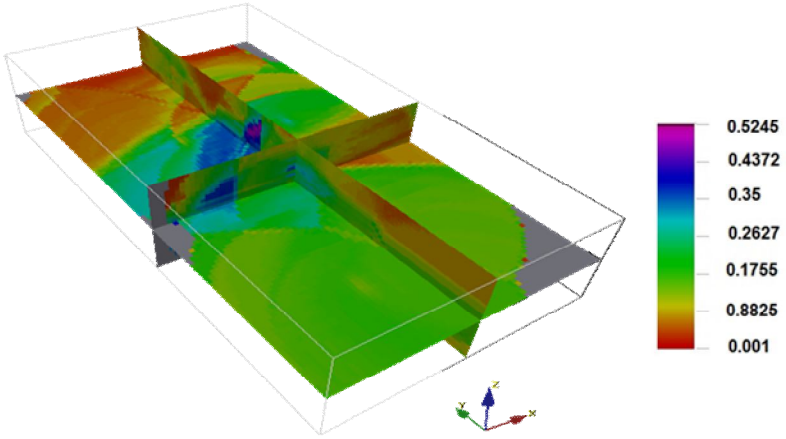
نیز به شکل زیر و با استفاده از مدل مارکوف به‌دست می‌آید (کای و دیمیتراکوپولوس، ۲۰۰۰):

$$\mathrm{cov}(Z,S)=\rho_{zs}\sqrt{Var(Z)Var(S)}=\sqrt{\frac{Var(S)}{Var(Z)}}\times\rho_{zs}\times Cov(Z,Z), \quad (۳)$$

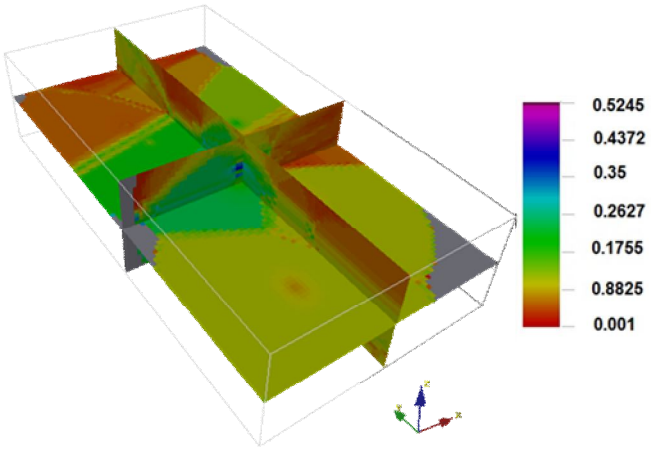
که $Var(S)$, $Var(Z)$ به‌ترتیب واریانس‌های داده‌های اولیه (Z) و ثانویه (S) هستند و ρ_{zs} هم ضریب همبستگی خطی متغیرهای هم‌مختصات Z و S است. با استفاده از این روش فقط به تابع کواریانس متغیر اولیه نیاز داریم (کای و دیمیتراکوپولوس، ۲۰۰۰).

۲-۲ کریجینگ با روند بیرونی

این روش شاخه‌ای از کریجینگ عام است و اجازه می‌دهد که یک متغیر Z که در تعداد نقاط کمی از منطقه مورد بررسی شناخته شده‌است، به کمک متغیر دیگر S، که به‌صورت جامع در همان ناحیه شناخته شده است، پیش‌بینی شود. Z را با یک تابع تصادفی $Z(x)$ و S را به‌منزلهٔ یک متغیر قطعی $S(x)$ مدل‌سازی می‌کنیم. فرض



شکل ۷. نتایج برآورد مس به روش کریجینگ با روند بیرونی.



شکل ۸ نتایج برآورد مس توسط کریجینگ معمولی.

می‌شود که هر دو کمیت به‌صورت خطی با یکدیگر در ارتباط هستند و مقدار متوسط $Z(x)$ معادل با یک ترکیب خطی از $S(x)$، ثابت a_o و ضریب b_1 است (بورنان و کینگ، ۲۰۰۳):

$$E\left[Z\left(x\right)\right]=a_{\circ}+b_1S\left(x\right), \qquad (۴)$$

برآوردگر، یک ترکیب خطی از مقدار نمونه‌ها در مکان x_i $(i=1,2,\ldots,n)$ و وزن‌های کریجینگ w_i است:

$$Z^*(x_{\circ})=\sum_{i=1}^{n} w_i Z\left(x_{\circ}\right), \quad \text{با شرط} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i=1, \qquad (۵)$$

وزن‌های w_i با حل دستگاه معادلات زیر به‌دست می‌آیند:

(۶)

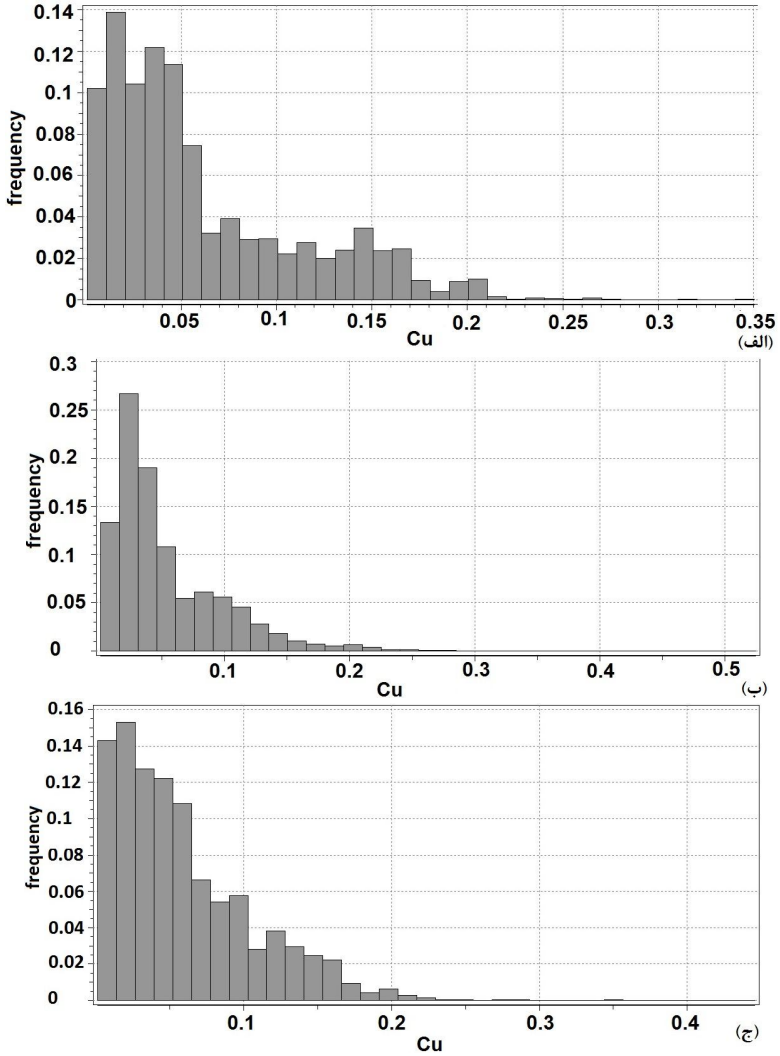
$$\sum_{j=1}^{n} w_j C\left(x_i-x_j\right)-\mu_1-\mu_2 S\left(x_i\right)=C\left(x_i-x_{\circ}\right),$$

$$i=1,2,\ldots,n \qquad \sum_{i=1}^{n} w_i=1, \qquad \sum_{i=1}^{n} w_i S\left(x_i\right)=S\left(x_{\circ}\right),$$

که در آن n تعداد نقاط موجود در هر همسایگی جست‌وجو، C تابع کواریانس باقی‌مانده‌های حاصل از تفاضل متغیر اولیه از رویه روند در نقاط متفاوت و μ_1 و μ_2 ضرایب لاگرانژ هستند که به‌منظور برقراری شرایط ناااریب بودن، محاسبه می‌شوند.

ممکن است ترکیب یک تابع پایای مرتبه دوم (S) با یک تابع میانگین ناپایا (Z) باعث تعجب باشد. به‌هرحال پایایی مفهومی است که بستگی به مقیاس دارد. در روش کریجینگ با روند بیرونی می‌توان از یک یا چند متغیر کمکی $S_i(x)$ و $i=1,2,\ldots,M$ که به‌صورت جامع در منطقه برداشت شده‌اند برای تحلیل روند استفاده کرد. لازم است که تابع‌های $S_i(x)$ در همهٔ نقاط $x\alpha$ که متغیر $Z(x)$ نمونه‌برداری شده است و نیز در نقاطی که قرار است برآورد شود مشخص باشند (بورنان و کینگ، ۲۰۰۳). اگر داده‌های ثانویه در همهٔ نقاطی که ذکر شد به‌صورت مستقیم در دسترس نبودند، در حالت پیشرفته‌تر می‌توان با اجرای کریجینگ معمولی و مدل‌سازی تابع واریوگرام، توزیع فضایی داده‌های کمکی را به‌دست آورد (تریزی و همکاران، ۲۰۰۰).

از لحاظ نظری واریوگرام در روش کریجینگ با روند بیرونی باید از مقادیر باقی‌مانده $Z(x)-m(x)$ استنباط شود. این موضوع ساده نیست، چون هیچ‌کدام از باقی‌مانده‌ها و یا روند از قبل مشخص نیستند. یک راه‌حل این است که ابتدا روند $m(x)$ برآورد شود، سپس مقادیر باقی‌مانده $r(x)=Z(x)-m(x)$ را محاسبه کنیم و درنهایت واریوگرام باقی‌مانده‌ها را به‌دست آوریم. این روش ممکن است نیاز به شروع یک پردازش تکرارشونده داشته باشد، برای مثال، شروع با یک واریوگرام تقریبی از داده‌های



شکل ۹. بافت‌نماهای مس برآورد زده شده توسط: (الف) کریجینگ معمولی، (ب) کوکریجینگ هم‌مختصات و (ج) کریجینگ با روند بیرونی.

اولیه $Z(x)$ و متعاقباً بهبود آن (هابرلندت، ۲۰۰۷). یک راه‌حل ساده‌تر انتخاب صرفاً جفت داده‌هایی از $Z(x)$ است که تحت‌تأثیر روند نیستند، یعنی $m(x) = 0$، یا به مقدار کم تحت‌تأثیر هستند، بنابراین در مورد این جفت داده‌ها $Z(x)$ $= r(x)$ و می‌توان به‌طور مستقیم واریوگرام موردنظر را به‌دست آورد (هابرلندت، ۲۰۰۷.، گوارتس، ۱۹۹۹ و باکستر و الیور، ۲۰۰۵). برای مثال اگر روند ناهمسانگرد بود، برای برآورد واریوگرام فقط از جفت داده‌هایی که در جهت عمود بر روند قرار دارند استفاده می‌شود، فرض این است که تغییرات فضایی باقی‌مانده‌ها به‌صورت همسانگرد است (هابرلندت، ۲۰۰۷).

۳ نتایج تجربی و تحلیل‌ها روی داده‌های مس و ضریب سولفیدی منطقه

۳-۱ زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

ناحیه موردنظر عمدتاً شامل یک کمپلکس آتشفشانی ائوسن است که از گدازه آندزیت - بازالت (۸۰٪)، گدازه تراکی - آندزیت (۱۰٪) و رسوبات آبرفتی (۱۰٪) تشکیل شده است. می‌توان گفت این کانسار پورفیری یک توده

گرانودیوریتی – کوارتز مونزونیتی است. دو معدن بزرگ موجود در این منطقه سرچشمه و دره زار هستند. نقشه زمین‌شناسی منطقه سریدون در شکل ۱ نشان داده شده است. این کانسار شامل آندزیت و تراکی آندزیت ائوسن است که در گرانودیوریت میوسن بالایی نفوذ کرده است و با دایک‌های کوارتز مونزونیتی و گرانودیوریتی پرفیری قطع شده است (برزگر، ۲۰۰۷).

۳-۲ داده‌ها و روش‌ها

در این تحقیق داده‌های اولیه شامل عیار مس برداشت شده از گمانه‌ها در ناحیه موردنظر و داده‌های ثانویه، برداشت‌های الکتریکی قطبی-دوقطبی است. در منطقه موردنظر به‌منظور برداشت‌های الکتریکی مقاومت ویژه و بارپذیری، از آرایش مستطیلی با فاصله خطوط جریان ۱۲۰۰ متر و فاصله الکترودی ۲۰ متر برای بررسی تغییرات کل منطقه و از آرایش قطبی - دوقطبی با فاصله الکترودی ۴۰ متر در دو نیم‌رخ به طول ۱۰۰۰ متر استفاده شده است. با در دست داشتن داده‌های مربوط به بارپذیری و مقاومت ویژه، ضریب سولفیدی به‌صورت زیر تعریف می‌شود که این ضریب برحسب واحد عامل فلزی است:

$$SF = \frac{M \times 2000}{6.6 \times \rho_a}, \qquad (۷)$$

که M بارپذیری، ρ_a مقاومت ویژه ظاهری و SF ضریب سولفیدی است.

شکل۲، نقشه‌های ضریب سولفیدی را برای آرایش‌های مستطیل و قطبی-دوقطبی در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد.

بی‌هنجاری حاصل از این پارامتر که ترکیبی از بی‌هنجاری‌های بارپذیری و مقاومت ویژه است، محدودتر و مرتبط‌تر با کانی‌سازی است (انصاری، ۱۳۸۶).در این بررسی ابتدا به یکسان‌سازی طول داده‌های حاصل از حفاری پرداخته شد و سپس توزیع آن همراه داده‌های ضریب‌سولفیدی با استفاده از تبدیل چندک‌های نظیر به توزیع نرمال تبدیل شد و واریوگرافی روی آنها صورت گرفت (شکل ۳).

یک شبکه ۲۰×۲۰×۲۰ مترمربع در فضای X=1220m, Y=2280m, Z=520m در نرم‌افزار SGeMS طراحی و مقدار ضریب سولفیدی با استفاده از روش کریجینگ معمولی برآورد شد. این شبکه به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند همهٔ داده‌های اولیه و ثانویه را شامل شود (شکل ۴). با در دست داشتن مقادیر ضریب سولفیدی در محل کامپوزیت‌ها ضریب همبستگی مس و ضریب‌سولفیدی به میزان ۰.۴۶۶ تعیین شد (شکل ۵).

جدول ۱. پارامترهای آماری تخمین توسط روش‌های به‌کاررفته.

	عیار واقعی مس	کریجینگ معمولی	کوکریجینگ هم‌مختصات	کریجینگ با روند بیرونی
میانگینخطای برآورد	–	۰/۸۸۵۹	۰/۵۴۳	۰/۸۷۶
انحراف معیارخطای برآورد	–	۰/۱۶۶	۰/۰۳۵	۰/۱۴۸
میانگین مس	۰/۰۷	۰/۰۶۲	۰/۰۵	۰/۰۵۹
انحراف معیار	۰/۰۹	۰/۰۵۲	۰/۰۴۵	۰/۰۴۶
کمینه	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
بیشینه	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۵۴۲	۰/۴۵

جدول ۲. نتایج اعتبارسنجی روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی.

	MAE	RMSE	R
کریجینگ معمولی	۰/۰۳۰۹	۰/۰۰۴۸۸	۰/۸۰۲۵
کوکریجینگ هم‌مختصات	۰/۰۳۲۱۸	۰/۰۰۴۷	۰/۸۲۱۱۶
کریجینگ با روند بیرونی	۰/۰۲۸۰۶	۰/۰۰۴۳۹	۰/۸۴۸۹۷

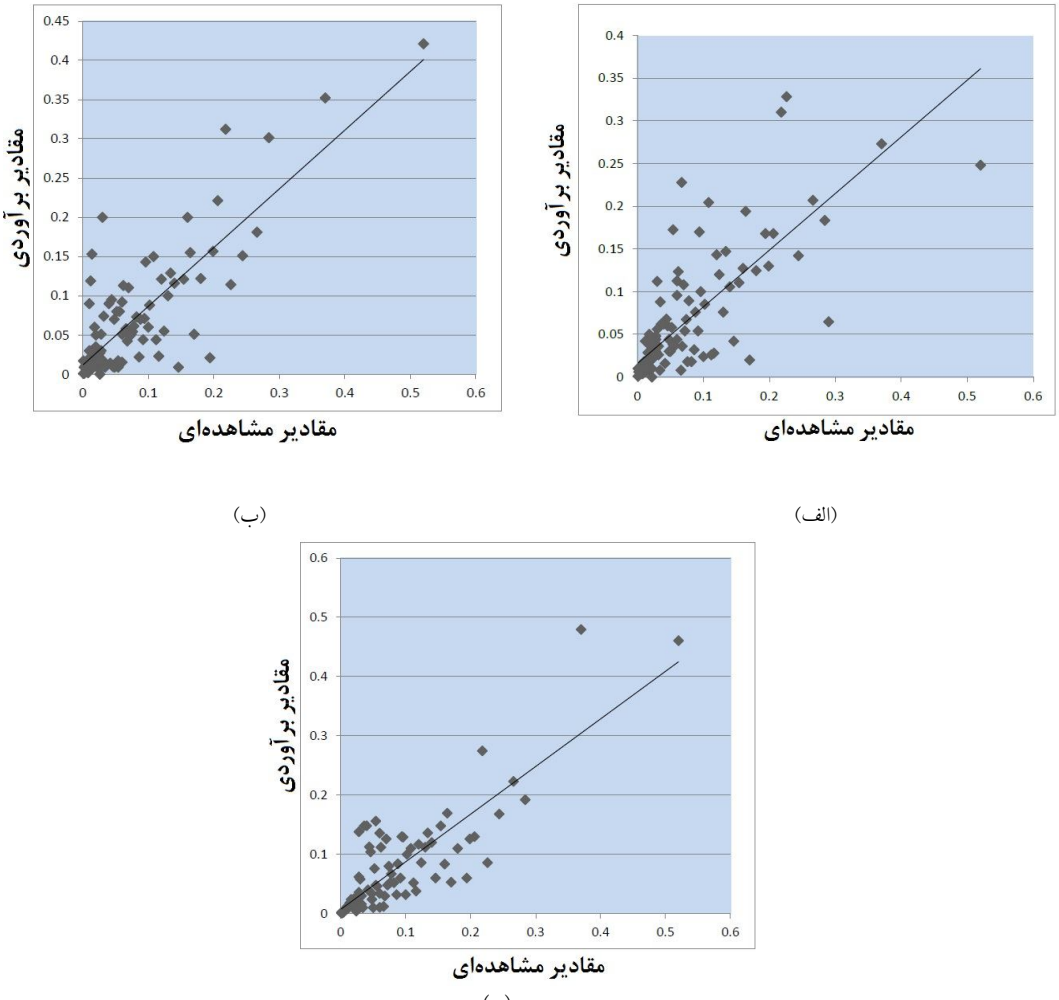
در این تحقیق ابتدا روش کوکریجینگ هم‌مختصات صورت گرفت. نتایج این محاسبات در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس روش کریجینگ با روند بیرونی در شبکه طراحی شده اجرا شد (شکل ۷). به‌منظور مقایسه، برآورد مس به روش کریجینگ معمولی نیز صورت گرفت. نتایج این برآورد در شکل ۸ نمایش داده شده است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد توزیع برآورد مس در هرکدام از روش‌ها متفاوت است. اما آنچه مشخص است این است که برآورد عیار مس به روش‌های کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی نسبت به روش‌کریجینگ معمولی کمتر تحت‌تأثیر داده‌های گمانه‌ها است. نقشه‌های بدست آمده با استفاده از روش‌های کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی تأثیر متغیر ثانویه ضریب سولفیدی را در مقایسه با روش کریجینگ معمولی که در آن برآوردها به‌شدت هموار شده‌اند، آشکار می‌کند. جدول ۱ پارامترهای آماری برآورد را برای روش‌های به کار برده شده نشان می‌دهد. بافت‌نماهای مس برآورد شده با این روش‌ها نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. .همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود نتایج برآورد مس در کریجینگ با روند بیرونی دارای هموارشدگی کمتری است و بهتر به بازتولید الگوی عیار مس پرداخته است.

با مشاهده نتایج به‌دست آمده از روش‌های برآورد موردنظر دیده می‌شود که میانگین خطای برآورد در همهٔ روش‌ها نسبتاً زیاد است که علت احتمالی آن کمبود داده اولیه و تعداد کم گمانه‌ها است. اما درنهایت با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که روش کوکریجینگ هم‌مختصات علاوه بر سادگی اجرا با توجه به همبستگی که بین داده‌های مس و ضریب سولفیدی وجود دارد باعث کاهش میانگین خطای برآورد و نیز کاهش انحراف معیار خطای برآورد شده است و همچنین میانگین خطای برآورد و انحراف معیار خطای برآورد برای روش کریجینگ با روند بیرونی نسبت به روش کریجینگ معمولی پایین‌تر است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند بازه تغییرات مس در روش‌های کریجینگ با روند بیرونی و کوکریجینگ هم‌مختصات بیشتر از روش کریجینگ معمولی است. این بازه برای روش کوکریجینگ هم‌مختصات بیشتر است. مقایسه بین نتایج برآورد و مقادیر واقعی مس در جدول ۱ آورده شده است.

۳-۴ اعتبارسنجی روش‌ها

اعتبارسنجی نتایج با استفاده از روش اعتبارسنجی حذفی صورت گرفت. به‌این‌صورت که در این تحقیق، ۲۰ درصد از داده‌های مشاهده‌ای به‌صورت تصادفی حذف شدند. در این روش برخلاف اعتبارسنجی متقابل که در آن فقط یک داده حذف می‌شود و با سایر داده‌ها در محل دادهٔ حذف شده، برآورد صورت می‌گیرد، ۲۰ درصد داده‌ها حذف شدند تا توانایی روش در بازتولید داده‌ها بهتر اثبات شود. با حذف ۲۰ درصد از داده‌های کل به‌صورت تصادفی، انتخاب نقاط مشاهده‌ای از همهٔ گمانه‌ها و نیز از همهٔ عیارهای کم و زیاد صورت می‌گیرد. در مرحله بعد با به‌کارگیری روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی، برآورد برای نقاط حذف شده صورت گرفت. با در دست داشتن مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر برآورد شده با استفاده از معیارهای میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی مقادیر مشاهده‌ای (R)، اعتبارسنجی برای روش‌های موردنظر صورت گرفت. نتایج این اعتبارسنجی در جدول ۲ آورده شده است. نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و برآوردهای حاصل از روش‌های زمین‌آماری متفاوت نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی در روش (الف) کریجینگ معمولی، (ب) کوکریجینگ هم‌مختصات و (ج) کریجینگ با روند بیرونی.

مقایسه نتایج هر سه روش زمین‌آماری نشان می‌دهد که استفاده از روش کریجینگ با روند بیرونی برآورد بهتری را در مکان‌هایی که متغیر اولیه وجود دارد فراهم می‌کند. زیرا هم براساس بافت‌نما در شکل ۹ مشخص است که بازتولید عیار بهتر و با هموارشدگی کمتری صورت گرفته است و هم براساس معیارهای میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و واقعی (R)، روش کریجینگ با روند بیرونی نتایج خوبی به‌دست می‌آید.

۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش‌های زمین‌آماری چندمتغیره کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی از متغیر ضریب سولفیدی به‌منظور برآورد متغیر مس استفاده شده است. هر دو روش نسبت به روش کریجینگ معمولی که از متغیر ثانویه استفاده نمی‌کند نتایج بهتری را نشان می‌دهند. نتایج اعتبارسنجی نیز تأکید می‌کند که استفاده از روش کریجینگ با روند بیرونی مناسب‌تر بوده است. روش کوکریجینگ هم‌مختصات با در نظر گرفتن همبستگی فضایی متغیرهای اولیه و ثانویه نسبت به سایر روش‌هایی که از ترکیب اطلاعات ثانویه استفاده می‌کنند دارای برتری است. از طرفی اجرای این روش بسیار ساده است چرا که ضریب همبستگی بین داده اولیه و ثانویه تنها آماره موردنیاز برای ادغام داده ثانویه است.

در روش کریجینگ با روند بیرونی از متغیرهای کمکی برای پیش‌بینی مدل روند در منطقه استفاده می‌شود و فرض بر این است که متغیر اولیه به‌صورت یک تابع خطی از متغیر ثانویه است. نتایج تجربی روی داده‌های عیار مس و داده‌های ضریب‌سولفیدی در منطقه مورد بررسی روشن ساخت که روش کوکریجینگ هم‌مختصات با داشتن میانگین خطای برآورد کمتر نسبت به روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ با روند بیرونی بهتر عمل کرده است و نیز استفاده از روش کریجینگ با روند بیرونی با میانگین خطای ۰/۸۷۶ نسبت به کریجینگ معمولی با میانگین خطای ۰/۸۸۵۹ مناسب‌تر بوده است. در برآورد به روش کریجینگ، عیار مس بسیار تحت‌تأثیر داده‌های گمانه است ولی ظاهراً در کوکریجینگ هم‌مختصات و کریجینگ با روند بیرونی، با توجه به در نظر گرفتن همبستگی مس و ضریب سولفیدی توزیع مناسب‌تری صورت گرفته است. از سوی دیگر با مشاهده نقشه‌های توزیع عیار مس در منطقه، دیده می‌شود که تقریباً مناطق پُرعیارتر در قسمت شمال شرقی ناحیه قرار گرفته‌اند، یعنی جایی که می‌توان گفت مقادیر ضریب‌سولفیدی نیز زیاد است.

منابع

فرج‌پور، ز.، نبی بیدهندی، م.، ترابی، م. ر.، و باقری، م.، ۱۳۸۹، مقایسه روش‌های زمین‌آماری جهت تعیین توزیع تخلخل در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران: چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، مقالات پوستری، ۹۴۸– ۹۵۱.

انصاری، م. ح.، ۱۳۸۶، مطالعه ژئوفیزیکی در محدوده سریدون کرمان: پایان‌نامه کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه تهران.

Barzegar, H., 2007, Geology, Petrology and Geochemical Characteristics of Alteration Zones within the Seridune Prospect, Kerman, Iran: unpublished Ph.D. thesis.

Boezio, M. N. M., Costa, J. F. C. L., and Koppe, J. C., 2006a, Accounting for Extensive Secondary Informationto Improve Watertable Mapping: International Association for Mathematical Geology.

Boezio, M. N. M., Costa, J. F. C. L., and Koppe, J. C., 2006b, Kriging with an external drift versus collocated cokriging for water table mapping: Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B).

Bourennane, H., King, D., and Couturier, A., 2000, Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for

predicting soil horizon thickness with different sample densities: Geoderma, **97**, 255– 271.

Borennane, H., and King, D., 2003, Using multiple external drifts to estimate a soil variable: Geoderma, **114**, 1–18.

Boxter, S. J., and Oliver, M. A., 2005, The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation: Geoderma, **128**, 325–339.

Fernandes, J. A. B., and Rocha, M. M., 2010, Kriging with External Drift Applied to Evaluation of Mineral Resources of Limestone and Lateritic Ore: IAMG.

Goovaerts, P., 1999, Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, USA.

Haberlandt, U., 2007, Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event: Institute of Water Resources Management, Journal of Hydrology, **332**, 144– 157.

John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., Gray, Floyd, Graybeal, F. T., Mars, J. C., McPhee, D. K., Seal, R. R., Taylor, R. D., and Vikre, P.G., 2010, Porphyry copper deposit model, chap. B of Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010–5070–B, 169 p.

Kay, M., and Dimitrakopoulos, R., 2000, Integrated Interpolation Methods for Geophysical Data: International Association for Mathematical Geology.

Li, S., and Jiang, Y., 2010, Application of Improved Collocated Cokriging: 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Chengdu, China

Qi, J., Mu, C., and Zhang, T., 2010, A Novel Porosity Simulation Method using the Markov Model: Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on, **2**, 549 – 553.

Troisi, S., Fallico, C., Straface, S., and Migliari, E., 2000, Application of kriging with external drift to estimate hydraulic conductivity from electrical-resistivity data in unconsolidated deposits near Montalto Uffugo, Italy: Hydrogeology Journal, **8**, 356–367.

Wackernagel, H., 2002, Multivariate Geostatistics: Springer, 165-170.