

## بهینه سازی موقعیت برداشت نمونه های تکمیلی در منطقه سپاهان شهر با استفاده از ترکیب مطالعات زمین آماری و روش تبرید شبیه سازی شده

سعید سلطانی محمدی<sup>۱</sup>، ملیحه عباس زاده<sup>۲</sup>، اردشیر هزارخانی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استاد دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۵/۳ تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۶/۲۳

### چکیده:

بهینه سازی طرح نمونه برداری از موضوعات مهم و جذاب برای متخصصین زمین آمار و ژئوشیمیست هاست و تا به امروز روش های متنوعی در زمینه بهینه سازی موقعیت برداشت نمونه ها (اولیه و تکمیلی) ارائه گردیده است. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از روش تبرید شبیه سازی شده، موقعیت برداشت نمونه های تکمیلی در مطالعات زیست محیطی منطقه سپاهان شهر بهینه گردد. در منطقه سپاهان شهر علاوه بر عامل مجاورت با محدوده معدنی ایرانکوه (عامل آلاینده)، بادهایی که جهت غالب وزش آنها در طول سال، از سمت این محدوده معدنی به سمت دشت سپاهان شهر می باشد، احتمال آلوده شدن منطقه را افزایش داده است. با استفاده از واریانس تخمین به عنوان معیار عدم قطعیت تخمین، روشی برای بهینه سازی نقاط نمونه برداری تکمیلی بر اساس اطلاعات حاصل از برداشت های اولیه ارائه شد. کمینه سازی واریانس تخمین به عنوان تابع هدف تعریف شد که تابعی غیر خطی است. از آنجا که تعداد بسیار زیاد ترکیبات ممکن، استفاده از روش های جستجوی جامع را برای حل این مساله غیر ممکن ساخته است، از روش فراچسی تبرید شبیه سازی شده برای حل مساله استفاده شد. برداشت نمونه های تکمیلی پیشنهادی از این روش منجر به کاهش واریانس تخمین میانگین منطقه از ۰/۳۴ به ۰/۲۲ خواهد شد، که بیشترین کاهش عدم قطعیت تخمین است که می تواند در نتیجه برداشت این تعداد نمونه ایجاد شود. استفاده از این روش می تواند نقش به سزایی در کاهش هزینه های نمونه برداری و هدفمند نمودن آنها داشته باشد

واژه های کلیدی: زمین آمار، تبرید شبیه سازی شده، بهینه سازی، نمونه برداری زیست محیطی

### مقدمه

محیطی و اقتصادی را در پی خواهد داشت. چنانچه در نتیجه طراحی بر اساس نقشه های حاصل از تخمین آلاینده ها، در بخشی از منطقه که نیاز به پاکسازی وجود دارد هیچگونه عملیات بهسازی صورت نگیرد و همچنان آلوده بماند، ریسک زیست محیطی حاصل می شود.

از گامهای مهم در فرآیند بازسازی مناطق آلوده صنعتی، تخمین حجمی از خاک است که به بهسازی نیاز دارد و دقت محاسبه آن، بر موفقیت گامهای بعدی تأثیرگذار است. عدم قطعیت در تخمین محدوده ای که باید بهسازی در آن صورت پذیرد، ریسک های زیست

می توان با استفاده از داده های حاصل از برداشت نمونه های اولیه، موقعیت برداشت نمونه های تکمیلی را بهینه کرد. هدف از برداشت نمونه های تکمیلی، افزایش دقت تخمین است. برای این منظور لازم است نمونه های تکمیلی در نقاطی برداشت شوند که منجر به کمینه شدن عدم قطعیت تخمین گردند. واریانس تخمین را می توان به منظور کمی کردن عدم قطعیت تخمین به کار برد [7]، و از آن در تعریف ملاک بهینه سازی استفاده کرد.

### واریانس تخمین و خصوصیات آن

واریانس تخمین به صورت زیر بیان و محاسبه می شود:

$$\sigma_k^2(\mathbf{s}) = \sigma^2 - \mathbf{c}^T(\mathbf{s}) \cdot \mathbf{C}_M^{-1} \cdot \mathbf{c}(\mathbf{s}) \quad (1)$$

که  $\mathbf{C}_M^{-1}$  معکوس ماتریس کوواریانس  $\mathbf{C}_M$  و  $\mathbf{c}$  بردار هم تغییرنمای نقطه مورد تخمین و نمونه ها است. ماتریس های  $\mathbf{C}_M$  و  $\mathbf{c}$  بر اساس تابع هم تغییرنما محاسبه می شوند [8].

$M$  نشانگر مجموعه نمونه هاست.

بر اساس رابطه فوق (رابطه ۱)، روشن است که مقدار واریانس کریگینگ به فاکتورهای زیر وابسته است: خصوصیات ساختار فضایی متغیر، که به وسیله هم تغییرنما نمایش داده می شود.

تعداد کل نمونه هایی که در تخمین استفاده می شوند. موقعیت نسبی نمونه ها نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به موقعیت نقطه مورد تخمین.

بنابراین مقدار واریانس تخمین از مقدار واقعی نمونه های مورد استفاده تأثیر پذیر نبوده و در نتیجه مقدار نمونه ها در محاسبات تخمین وارد نمی شود [2,3,4]. این خصوصیت امکان محاسبه تأثیر

و از طرف دیگر در صورتیکه در نتیجه طراحی بر اساس نقشه های حاصل از تخمین، فرآیند بهسازی در مناطقی صورت گیرد که نیازی به بهسازی (صرف هزینه) در آن نیست، ریسک اقتصادی حاصل خواهد شد. یک طرح نمونه برداری باید بتواند دقت تخمین را تا حد ممکن افزایش دهد. در مطالعات زمین آماری از پارامتر واریانس تخمین به عنوان کمیتی برای بیان عدم قطعیت تخمین استفاده می شود [۱]. این خصوصیت واریانس تخمین که از مقدار واقعی نمونه ها تأثیرپذیر نیست [2,3,4]، امکان استفاده از آن را به عنوان معیاری برای بهینه سازی طرح نمونه برداری فراهم می آورد. در این مقاله کوشش شده است تا با استفاده از معیار کمینه سازی واریانس تخمین کریگینگ و روش بهینه سازی تیرید شبیه سازی شده، طرح نمونه برداری تکمیلی در منطقه سپاهان شهر بهینه شود.

### روش شناسی

طرح نمونه برداری به عنوان ورودی اولیه کلیه مطالعات زمین آماری، تأثیر بسزایی بر کیفیت و کارایی برداشت ها دارد. یک طرح نمونه برداری اشتباه می تواند منجر به بیش تخمینی یا حتی تخمین اشتباه و یا افزایش هزینه ها به بیش از حد مورد نیاز گردد [5]. در گذشته تلاش های زیادی به منظور بهینه سازی طرح نمونه برداری صورت گرفته و معیارهای متفاوتی برای این منظور ارائه گردیده است. یکی از معیارهای تعریف شده، بهینه کردن تعداد جفت نقاطی است که برای گام های مختلف در تخمین واریوگرام به وجود خواهد آمد [6] از معیارهای متداول دیگر در این زمینه می توان به بهینه سازی ماکزیم فاصله داری نقاط بر اساس واریانس کریگینگ قابل قبول اشاره کرد [7]. علاوه بر این

نمونه های تکمیلی را بر واریانس تخمین کل، قبل از برداشت آنها فراهم می آورد [9,10,11].

### تعریف تابع هدف

هدف، تعیین موقعیت برداشت نمونه های تکمیلی است به نحوی که اطلاعات حاصل از آنها منجر به بیشترین کاهش در واریانس تخمین میانگین شود. واریانس تخمین به عنوان کمیتی برای بیان عدم قطعیت [1]، که از مقدار واقعی نمونه ها نیز تأثیر پذیر نمی باشد [8]، امکان محاسبه کاهش قطعیت تخمین را پیش از برداشت واقعی نمونه های تکمیلی فراهم می آورد [9,10,11]. بنابراین می توان از این پارامتر در تعریف تابع هدف استفاده و تابع هدف را به صورت کمینه سازی واریانس تخمین پس از اضافه کردن نمونه های جدید تعریف نمود.

مقدار تغییر واریانس کریگینگ معمولی میانگین بعد از اضافه کردن مجموعه داده های جدید (N) به مجموعه داده های موجود (M) به صورت رابطه ۲ نشان داده می شود. این رابطه بیانگر تفاوت؛ ۱- واریانس کریگینگ محاسبه شده بر اساس مجموعه M و ۲- واریانس کریگینگ محاسبه شده بر اساس مجموعه داده های M+N که شامل داده های موجود به اضافه داده های جدید می باشد.

$$\Delta \sigma_{ok}^2 = [TKV^{old} - TKV^{new}] = \quad (2)$$

$$\frac{1}{G} \left[ \sum_{g \in G} \sigma_{ok}^{old}(s_g) - \sum_{g \in G} \sigma_{ok}^{new}(s_g) \right]$$

$$\sigma_{ok}^{old}(s_g) = \sigma^2 - \underbrace{c(s_g)}_{[1,m+1]} \cdot \underbrace{C^{-1}}_{[m+1]} \cdot \underbrace{c^T(s_g)}_{[m+1,1]} \quad (3)$$

$$\sigma_{ok}^{new}(s_g) = \sigma^2 - \underbrace{c(s_g)}_{[1,m+n+1]} \cdot \underbrace{C^{-1}}_{[m+n+1]} \cdot \underbrace{c^T(s_g)}_{[m+n+1,1]} \quad (4)$$

### متغیرهای تصمیم

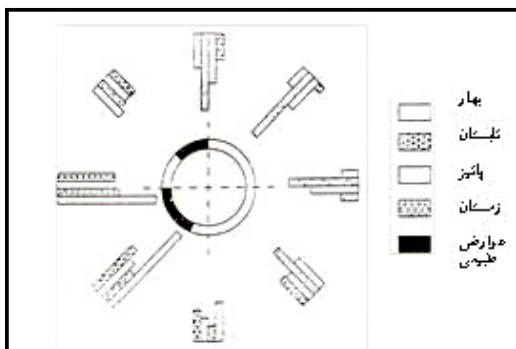
هدف، یافتن مجموعه بهینه S، که در بر گیرنده موقعیت برداشت نمونه های تکمیلی است، می باشد. مجموعه S شامل طول و عرض جغرافیایی نقاط نمونه برداری تکمیلی بوده که از محدودیت مرزهای منطقه تبعیت می کنند.

### استفاده از روش تبرید شبیه سازی شده برای

#### حل مسأله

هدف، یافتن موقعیت برداشت تعداد محدود و معینی نمونه تکمیلی است به نحوی که منجر به کمینه سازی واریانس تخمین میانگین گردد. با توجه به مدل شبکه بندی شده منطقه، موقعیت داده های اولیه و مدل کوواریوگرام برازش یافته به آن، امکان محاسبه مقدار واریانس تخمین برای همه ترکیب های ممکن از نقاط نمونه برداری و انتخاب ترکیبی که منجر به کمینه سازی واریانس تخمین شود، فراهم می آید. در عمل، تعداد این ترکیبات فوق العاده زیاد بوده و در نتیجه امکان یک جستجوی جامع در بین تمام ترکیب های ممکن، مقدور نمی باشد. در چنین شرایطی باید به جای جستجوی جامع از الگوریتم های جستجوی کارآمد استفاده شود.

تبرید شبیه سازی شده یک الگوریتم جستجوی مبتنی بر تکرار است. در این الگوریتم توالی ای از ترکیبات ایجاد می شود که هر ترکیب جدید، از ایجاد تغییرات تصادفی و اندک در ترکیب قبلی به دست می آید [12,13,14]. در شکل ۱ الگوریتم تبرید شبیه سازی شده به صورت خلاصه بیان شده است. این الگوریتم شامل دو مکانیزم اساسی می باشد: تولید ترکیب ها و قاعده پذیرش [15]. پس از ایجاد هر ترکیب جدید، تابع هدف (به عنوان مثال واریانس



شکل ۲- سیستم گلباد اراضی سپاهان شهر [۱۶]

در این مقاله از روش تبرید شبیه سازی شده برای جستجوی مختصات بهینه برداشت نمونه های تکمیلی استفاده شد. نرم افزار Matlab توانایی جستجوی شبیه سازی شده را دارد ولی برای این منظور باید تابع هدف مسئله به صورت m.file تعریف شده باشد. در نتیجه، با توجه به مراحل الگوریتم ارائه شده در شکل ۱، کدهای لازم جهت محاسبه تابع هدف بر اساس متغیرهای تصمیم در نرم افزار Matlab تهیه و تحت عنوان goalfunction.m تعریف شد.

### مطالعه موردی

معادن سرب و روی ایرانکوه در ۲۰ کیلومتری جنوب غربی اصفهان واقع شده است. فعالیت های معدنی صورت گرفته در این منطقه احتمال آلودگی خاک های مناطق مجاور معدن را مطرح ساخته است. علاوه بر عامل نزدیکی جغرافیایی به معدن، عامل سیستم گلبادهای فعال در منطقه نیز از عواملی است که می تواند بر انتشار آلودگی در مناطق مجاور تأثیر بسزایی داشته باشد. مطابق آمار سازمان هواشناسی از وزش بادها در این منطقه، تنها حدود ۴۲ درصد از سال هوا آرام است و در حدود ۵۸ درصد از سال باد

تخمین) محاسبه و با ترکیبات قبلی مقایسه می شود. اگر مقدار تابع هدف ارتقا یافته باشد، این ترکیب پذیرفته می شود. در این الگوریتم به منظور جلوگیری از گیر کردن در بهینه محلی، در صورتیکه ترکیبی تابع هدف را ارتقا هم ندهد، احتمال پذیرش آن وجود دارد. احتمال پذیرش چنین ترکیب نامناسبی از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$P = e^{-\frac{\Delta f}{T}} \quad (5)$$

که  $\Delta f$  میزان تغییر تابع هدف و  $T$  پارامتر کنترلی است که تحت عنوان دمای سیستم شناخته می شود. به تدریج و در طول فرآیند بهینه سازی پارامتر  $T$  کاهش می یابد. رابطه ۵ نشان می دهد که با افزایش مقدار تابع هدف (در شرایطی که هدف کمینه سازی است)، احتمال پذیرش کاهش می یابد. در این فرآیند دمای سیستم برای تعداد معینی انتقال ثابت مانده و سپس کاهش می یابد. این امر باعث می شود که احتمال قبول به تدریج و همزمان با تداوم تکرارها (برای  $\Delta f$  های برابر) کاهش یابد.

```

Begin
Initialize  $(T_0, N_0)$ ;
 $k := 0$ ;
Initial configuration  $S_i$ 
Repeat procedure
do  $L := 1$  to  $N_k$ 
generate  $(S_j$  from  $S_i)$ ;
if  $f(S_j) \leq f(S_i)$  do  $S_i := S_j$ ;
otherwise
if  $\exp\left(\frac{f(S_i) - f(S_j)}{T_k}\right) > \text{random}[0, 1]$  do  $S_i := S_j$ ;
end do;
 $k := k + 1$ ;
Calculation of the length  $(N_k)$ ;
Determine control parameter  $(T_k)$ ;
Stopping criterion
end;
```

شکل ۱- الگوریتم تبرید شبیه سازی شده [12].  $T_k$  پارامتر کنترلی دمای سیستم،  $N_k$  تعداد تکرارها در دمای  $k$  ام و  $f(S_i)$  مقدار تابع هدف برای چیدمان  $i$  ام می باشد.

به منظور بررسی اثرات نامطلوب عناصر کمیاب نام برده بر خاک های منطقه سپاهان شهر، تعداد ۳۳ نمونه از خاک منطقه برداشت شده است. پارامترهای آماری غلظت هر یک از عناصر برداشت شده در منطقه در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس روش  $\bar{x} \pm 2S$ ، مقادیر حد آستانه برای آنومالی عناصر سرب، روی و کادمیوم در منطقه سپاهان شهر محاسبه شد (جدول ۲). در شکل ۳ نقشه توزیع عناصر آلاینده کادمیوم، روی و سرب نمایش داده شده است. مقایسه مقادیر آنومالی عناصر فوق با حد مجاز آنها برای سلامتی انسان و محیط، مشخص ساخت که حد آستانه غلظت عناصر سرب و روی (جدول ۱ و ۲) در منطقه کمتر از حد مجاز برای سلامتی انسان (جدول ۳) است و این مقدار در مورد عنصر کادمیوم در منطقه بیش از حد مجاز می باشد.

جدول ۳- حد مجاز عناصر در خاک

عنصر	حدی که بهبود خاک ضروری است	حد مجاز برای سلامتی انسان و محیط	حد مناسب خاک
Pb	۶۰۰	۱۵۰	۵۰
Zn	۳۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰
Cd	۲۰	۵	۱

جریان دارد. فصل های پائیز و زمستان حدوداً با ۵۵ درصد مواقع آرام، جزء آرامترین و بهار با ۲۷ درصد مواقع آرام، پر بادترین فصل سال است. براساس سیستم گلباد های سالیانه (شکل ۲) جهت های غرب و جنوب غربی عمده ترین جهات وزش سالیانه را تشکیل می دهند و جهات شرق و شمال شرقی در درجه بعدی اهمیت قرار دارند [16].

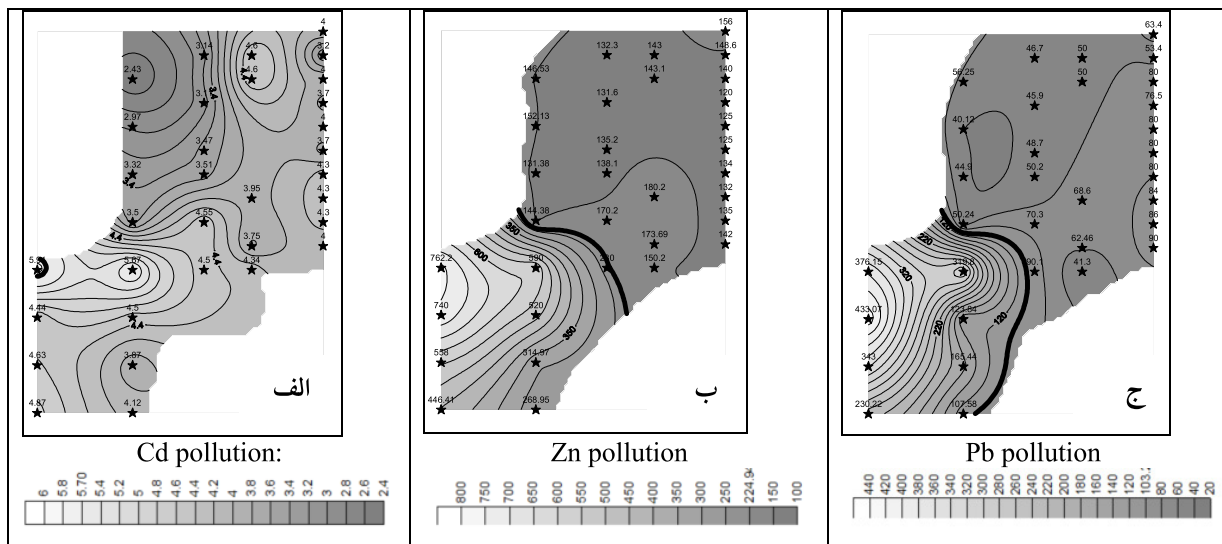
منطقه سپاهان شهر، از مناطق مجاور محدوده ایرانکوه است که در شمال شرقی این محدوده واقع شده است. علاوه بر فاکتور نزدیکی به عامل آلاینده، وزش بادهای غرب و جنوب غربی، باعث بالا رفتن احتمال آلوده بودن این منطقه شده است.

جدول ۱- پارامترهای آماری آلاینده های کادمیوم، سرب و روی در نمونه های برداشت شده در منطقه سپاهان

	سرب	روی	کادمیوم
تعداد	۳۳	۳۳	۳۳
میانگین	۱۱۱	۲۳۸	۴
میانه	۷۶	۱۴۶	۴
مد	۸۰	۱۲۵/۰	۴
انحراف استاندارد	۱۰۴	۱۸۵	۰.۷
واریانس	۱۰۹۹۳	۳۴۵۴۳	۰.۵
چولگی	۲.۱	۱.۸	۰.۴
کشیدگی	۳.۲	۲.۲	۰.۹
بازه تغییرات	۳۹۳	۶۴۲.۲	۳.۵
کمینه	۴۰.۱	۱۲۰.۰	۲.۴
بیشینه	۴۳۳.۱	۷۶۲.۲	۵.۹

جدول ۲- مقادیر آنومالی ژئوشیمیایی عناصر

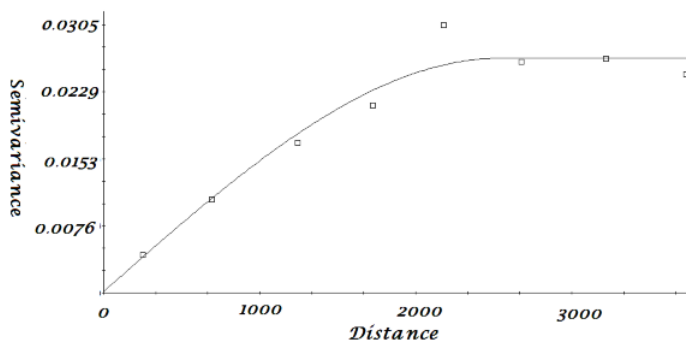
	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
$\bar{x} + 2S$ حد آستانه	۵.۷۰	۱۰.۳	۲۲۴
$\bar{x} + 3S$ آنومالی	>۵.۷۰	>۱۰.۳	>۲۲۴
ممکن $\bar{x} + 2S <$	<۶.۶۵	<۱۳.۰	<۲۸۵
آنومالی احتمالی $\bar{x} + 3S <$	>۶.۶۵	>۱۳.۰	>۲۸۵



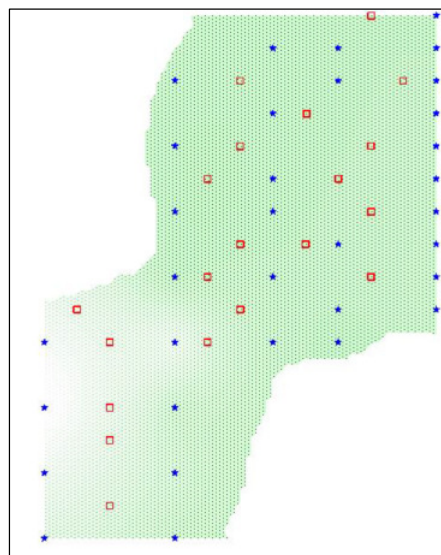
شکل ۳- پراکنده‌گی آلاینده‌های کادمیوم (الف)، روی (ب) و سرب (ج) در منطقه سیاهان شهر. تراز حد آستانه محاسبه شده در هر یک از شکل‌ها با خط ضخیم تر مشخص شده است.

جدول ۴- مشخصات مدل واریوگرام برازش یافته به واریوگرام تجربی ترسیم شده برای آلاینده کادمیوم

مدل	کروی
اثر قطعه ای	۰/۰۰۰۱۷
سقف	۰/۰۲۶۷۴
بازه	۲۵۴۱



شکل ۴- واریوگرام تجربی ترسیم شده برای آلاینده کادمیوم



شکل ۵- موقعیت جغرافیایی نقاط بهینه پیشنهادی برای برداشت نمونه های تکمیلی در منطقه سیاهان شهر ( ستاره : نمونه های اولیه، مربع: نمونه های تکمیلی)

## نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی بهینه سازی موقعیت برداشت نمونه های تکمیلی بر اساس تابع هدف کمینه سازی واریانس تخمین و با استفاده از روش تبرید شبیه سازی شده، ارائه گردیده است. برای این منظور، از مدل واریوگرام برازش داده شده به داده های اولیه، به عنوان مدل واریوگرام داده های منطقه استفاده شد. بررسی داده های اولیه نشان می دهد که غلظت عناصر سرب و روی در منطقه کمتر از حد مجاز برای سلامتی انسان و محیط است در حالیکه غلظت عنصر کادمیوم در منطقه بیش از حد مجاز می باشد، لذا در مطالعات بهینه سازی صورت گرفته، از مدل واریوگرام برازش یافته به واریوگرام تجربی آلاینده کادمیوم استفاده شد. نقاط بهینه محاسبه و بر اساس این روش منجر به کاهش واریانس تخمین منطقه از ۰/۳۴ به ۰/۲۲ شد، که این مقدار کاهش واریانس تخمین، بیشترین میزان کاهش واریانس تخمین در نتیجه اضافه کردن ۲۰ نمونه به مجموعه داده های موجود است. از لحاظ تئوری پیدا کردن نقاط بهینه با استفاده از الگوریتم جستجوی جامع امکان پذیر می باشد، اما به دلیل تعداد بسیار زیاد ترکیبات ممکن، عملاً امکان استفاده از این روش وجود ندارد. در این مقاله روش تبرید شبیه سازی برای حل این مشکل استفاده شد.

## منابع

- 1- عباس زاده، ملیحه، (۱۳۸۶)، مطالعه اثرات زیست محیطی معدن گوسفیل بر خاک های اطراف سپاهان شهر، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۵ ص.
- 2-Sinclair, J., Blackwell, G. H., (2002). Applied mineral inventory estimation. Cambridge University Press, London, p. 220-224.
- 3-Kim, YC., Martino, F., Chopra, I., (1981). Application of Geostatistics in a Coal Deposit. Mining Engineering, 33 (11), 1476-1481.
- 4-Armstrong, M., (1983). Comparing drilling patterns for coal reserve assessment. In: Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy, Australia, p. 288, 1-15.
- 5- Saikia, K., Sarkar, B.C., (2006). Exploration Drilling Optimization Using Geostatistics: a Case in Jharia Coalfield, India. Applied Earth Science (Trans. IMM B), 115(1), 13-22.
- 6-Goovaerts P., (2000). Estimation on simulation of soil properties? On optimisation problem with conflicting criteria. Geoderma, 97 (3), 165-186.
- 7-Warrick, A.W., Myers, D.E., (1987). Optimization of Sampling Locations for Variogram Calculations. Water Resources Research, 23: 496-500.
- 8-De Gruijter, J. J., and Ter Braak, C. J. F., (1990), Model-Free Estimation from Spatial Samples: A Reappraisal of Classical Sampling Theory: Mathematical Geology, 22(4), 407-415.
- 9-Journel, A.G., Huijbregts, CH., (1987), Mining Geostatistics, Academic Press London.
- 10- Chou, D., Schenk, D. E., (1983). Optimum Locations for Exploratory Drill Holes. International Journal of Mining Engineering, 1, 343-355.
- 11-Deutsch, C.V., (1993). Kriging in a Finite Domain. Mathematical Geology, 25(1), 41-52.
- 12-Deutsch, C. V., (1996). Correcting for Negative Weights in Ordinary Kriging. Computers & Geosciences, 22(7), 765-773.
- 13-Aarts, E., Korst, J., (1989). Simulated Annealing and Boltzmann Machines. Wiley, New York, NY, p. 235-250.
- 14-Van Groenigen, J.W., Stein, A., (1999), Spatial simulated annealing for constrained optimization of spatial sampling schemes. Journal of Environmental Quality 27, 1078-86.
- 15-Van Groenigen J.W., Siderius W., Stein, A., (1999). Constrained Optimization of Soil Sampling for Minimization of the Kriging Variance. Geoderma, 87, 239-259.
- 16-Lee, K., Elsharkawi, M., (2006). Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems. New York: Wiley. p. 123-146.

