نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره هشتم، شماره بیستم، سال ۱۳۹۲، صفحه ۱ تا ۹
Vol. 8, No. 20, 2014, pp. 1-9

تخمین عیار به روش فازی اصلاح شده

مطالعه موردی: کانسار طلای دره‌اشکی اصفهان

حسن طالبی[۱]، امید اصغری[۲*]

۱- آزمایشگاه شبیه‌سازی و پردازش داده‌ها، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران؛ h.talebi@ut.ac.ir
۲- آزمایشگاه شبیه‌سازی و پردازش داده‌ها، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران؛ o.asghari@ut.ac.ir

(دریافت ۲۱ آذر ۱۳۹۰، پذیرش ۱۵ خرداد ۱۳۹۲)

چکیده

امروزه استفاده از علم زمین‌آمار در تخمین ذخیره معادن به دلیل استفاده از ابزارهای قوی در شناسایی تغییرات موجود در منطقه همچون واریوگرام امری متداول است. این اصل تا زمانی استوار است که متغیر ناحیه‌ای دارای ساختار فضایی مناسبی در منطقه باشد. در غیر این صورت زمین‌آمار نیز قادر به تخمین دقیق عیار در نقاط مختلف نخواهد بود. در این‌گونه موارد که متغیر ناحیه‌ای ساختار فضایی ضعیفی از خود نشان می‌دهد (به طور مثال کانسارهای طلای رگه‌ای)، نسبت اثرقطعه‌ای به سقف واریوگرام بالا است، تعداد داده کمی در دسترس است، روش‌های مبتنی بر منطق فازی کاربرد پیدا می‌کند. روش تخمین ذخیره فازی بر اساس الگوریتم خوشه‌یابی فازی میان‌مرکز (FCM) عمل می‌کند. از آنجا که این الگوریتم برای ایجاد مراکز خوشه اولیه از توابع تصادفی استفاده می‌کند و به دلیل طبیعت خاص داده‌های معادن طلا شامل حجم زیادی داده با عیار در حد زمینه و تعداد کمی داده آنومال، قادر به بازتولید مراکز خوشه معتبر و مطابق با واقعیت نیست. در این مطالعه با تفکیک جامعه داده‌ها به منظور جلوگیری از اثر هموارسازی و فاصله گرفتن از فضای تصادفی اولیه برای تعیین هدفمند مراکز خوشه‌های با اعتبار بیشتر، الگوریتم تخمین قادر به ارائه نتایج دقیق‌تری بوده است. در نهایت با انجام اعتبارسنجی، دقت سه روش مقایسه شده است به طوریکه خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) روش تخمین فازی معمولی و روش کریجینگ به‌ترتیب ۰.۲۰۵ و ۰.۱۶۲ به‌دست آمد. روش اصلاحی قادر بود این پارامتر را به مقدار ۰.۱۰۷ کاهش دهد. همچنین این روش قادر بوده است پارامترهای آماری و زمین‌آماری توزیع داده‌های واقعی را با دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر تشخیص دهد.

کلمات کلیدی

دره‌اشکی، منطق فازی، FCM، توابع تصادفی، RMSE

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

تخمین ذخیره هرچه دقیق‌تر معادن طلا از گذشته تا کنون از جمله اهداف معدنکاران بوده است. از جمله روش‌های دقیق در تخمین ذخیره و پیش‌بینی تغییرات عیار در کانسارها، روش‌های زمین‌آماری است. از طرفی به دلیل طبیعت توزیع طلا در زمین، شبیه‌سازی روند تغییرات توسط واریوگرام‌ها بسیار مشکل بوده و نیاز به داده‌های فراوانی دارد و دسترسی به داده‌های فراوان نیز مستلزم هزینه‌های بالای حفاری گسترده در منطقه است که اغلب اقتصادی نیست. در صورت ضعیف بودن ساختار متغیر ناحیه‌ای، زمین‌آمار هم در ارائه تخمین‌های دقیق ناتوان خواهد بود[۱]. در این‌گونه موارد که کمیت عیار ساختار فضایی ضعیفی دارد (به‌طور مثال کانسارهای طلای رگه‌ای) روش تخمین فازی ممکن است بتواند مفیدتر واقع شود[۴]. در واقع می‌توان گفت در مواردی که نسبت اثر قطعه‌ای[۱] به سقف[۲] واریوگرام بزرگ باشد و یا نقش عوامل ابهام‌ساز در تغییرپذیری چشم‌گیر باشد، روش‌های مبتنی بر منطق فازی کاربرد پیدا می‌کند [۵]. روش تخمین فازی که بر اساس الگوریتم خوشه‌یابی فازی میان‌مرکز[۳] بنا نهاده شده است[۵] معمولا در کانسار-هایی با شرایط بالا به‌کار می‌رود. اما به دلیل این که الگوریتم خوشه‌یابی میان‌مرکز بر اساس توابع تصادفی[۴] خوشه‌یابی را انجام می‌دهد[۷] و طبیعت خاص داده‌های کانسارهای طلا که شامل حجم زیادی داده در حد مقادیر زمینه بوده و تعداد بسیار کمی داده آنومال وجود دارد، انتظار می‌رود این الگوریتم قادر به بازتولید جامعه آنومال نباشد. از جمله نقاط ضعف این الگوریتم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- زمان محاسبات طولانی.
- حساس به حدس‌های اولیه.
- حساس به نویز [۸] (داده‌های آنومال عیار طلا).

در این مطالعه سعی بر این بوده است تا با اصلاح الگوریتم خوشه‌یابی فازی میان‌مرکز شامل فاصله گرفتن از فضای رندوم اولیه و متمایل شدن به تعیین هدفمند مراکز اولیه خوشه‌ها و همچنین دسته‌بندی اولیه داده‌ها به منظور جلوگیری از اثر هموارسازی الگوریتم بر روی داده‌های آنومال[۵]، ضعف آن در هنگام مواجهه با داده‌هایی مشابه داده‌های کانسارهای طلا تا حدودی برطرف شود. برای مقایسه دقت روش اصلاح شده، دو روش کریجینگ معمولی و تخمین فازی ساده نیز بر روی منطقه اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام عملیات اعتبارسنجی ۲۰٪ داده‌ها به عنوان داده تست به صورت رندوم حذف شد تا در پایان بتوانیم میزان دقت سه روش در مقیاس محلی و منطقه‌ای را با هم مقایسه کنیم.

۲- تخمین بر اساس منطق فازی

در مواردی که بتوانیم کانسار را بر اساس یک عیار حد به دو قسمت ماده معدنی و باطله تقسیم کنیم، تعلق نمونه-های موجود به این دو جامعه یا صفر است (عدم تعلق) و یا یک (تعلق کامل). در این‌گونه جوامع ابهامی وجود ندارد و از قوانین فازی تبعیت نمی‌کنند. ولی در واقعیت کمتر می‌توان چنین جوامعی را مشاهده کرد. به طور مثال اگر عیار حد کانساری ۳٪ باشد آن‌گاه نمونه‌هایی با عیار ۲.۹۹٪ و ۰.۰۰۱٪ هر دو در جامعه باطله قرار خواهند گرفت که توجیه علمی و اقتصادی ندارد[۱۰]. در واقع هر نمونه باید با امکان معینی متعلق به هر یک از جوامع باشد. منطق فازی این ضعف را پوشش داده و با ایجاد تابع عضویت[۸] به هر نمونه درجه‌ای داده است که نشان دهنده تعلق این نمونه به هر یک از جوامع می‌باشد. درجه عضویت هر نمونه در دامنه بین صفر و یک می‌تواند تغییر کند. هرچه میزان درجه عضویت یک نمونه به یک مجموعه فازی به یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده تعلق بیشتر این نمونه به آن جامعه است[۶]. از جمله مزیت‌های این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- جوامعی که مرز چندان مشخصی ندارند با این روش قابل مدل‌سازی هستند.
- فرضیات زیادی برای استفاده از آن لازم نیست.
- در مقایسه با روش تخمین زمین‌آماری این روش با تعداد کمتری از نمونه‌ها می‌تواند فرآیند تخمین را عملی کند [۱].

معمولا انجام یک تخمین ذخیره فازی شامل مراحل زیر است:

۱- آماده سازی داده ها شامل تعیین مختصات و عیار نظیر آنها.
۲- خوشه بندی داده ها براساس روش «خوشه یابی فازی میان مرکز» و محاسبه مختصات مرکز و عیار هر خوشه.
۳- انتخاب شعاع جستجو.
۴- انجام درون یابی یا برون یابی فازی[۵،۱].

۲-۱- خوشه‌یابی فازی میان‌مرکز

خوشه‌بندی یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت می‌باشد و فرآیند خودکاری است که در طی آن، نمونه‌ها به خوشه‌هایی که اعضای آن مشابه یکدیگراند، تقسیم می‌شوند. در خوشه‌بندی کلاسیک هر نمونه ورودی متعلق به یک و فقط یک خوشه می‌باشد و نمی‌تواند عضو دو خوشه و یا بیشتر باشد. تفاوت اصلی خوشه‌بندی کلاسیک و خوشه‌بندی فازی در همین جاست که در خوشه‌بندی فازی یک نمونه می‌تواند متعلق به بیش از یک خوشه باشد[۷،۶]. فرض کنید n نمونه داشته باشیم که برای هر یک m متغیر اندازه‌گیری شده باشد. می‌خواهیم این نمونه‌ها را به c خوشه با مرکز معلوم تقسیم کنیم برای این کار از تحلیل خوشه‌ای فازی میان‌مرکز به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

۱- درجه عضویت هر نمونه به هر خوشه را به طور تصادفی تعیین می‌کنیم. در اینجا لازم است مجموع عضویت‌های هر نمونه به خوشه‌های مختلف برابر واحد باشد. در رابطه زیر c تعداد خوشه‌ها و μ_{ki} تعلق نمونه kام به خوشه iام است.

$$\sum_{i=1}^{c}\mu_{ki}=1 \qquad (۱)$$

۲- با استفاده از درجه عضویت و مختصات مرکز خوشه ها لازم است مختصات جدید مرکز خوشه‌ها از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$c_{ij}=\frac{\sum_{k=1}^{n}(\mu_{ki})^{q}x_{kj}}{\sum_{k=1}^{n}(\mu_{ki})^{q}} \qquad (۲)$$

که در آن C_{ij} مقدار متغیر jام از مرکز خوشه iام و x_{kj} مقدار متغیر jام در نمونه kام است. q معرف شدت شولایی یا فاز شدگی متغیر j در نمونه kام است که معمولا معادل ۲ در نظر گرفته می‌شود.

۳- پس از محاسبه مراکز جدید خوشه‌ها لازم است درجه عضویت هر نمونه به هر مرکز خوشه جدید بر مبنای فاصله اقلیدسی از رابطه زیر محاسبه شود:

$$\mu_{ki}=\frac{(d_{ik}^{2})^{-1/(q-1)}}{\sum_{i=1}^{c}(d_{ik}^{2})^{-1/(q-1)}} \qquad (۳)$$

که در آن d_{ik} فاصله نمونه kام تا مرکز خوشه iام است و به طریق زیر محاسبه می شود :

$$(d_{ik})^{2}=\sum_{j=1}^{m}[(x_{kj}-c_{ij})/s_{j}]^{2} \qquad (۴)$$

که در آن s_j انحراف معیار متغیر jام است.

۴- محاسبه تابع هدف J در محیطی با درجه فازی شدگی q با استفاده از رابطه زیر[۵،۱]:

$$J_{q}=\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(\mu_{ik})^{q}(d_{ik}^{2})^{q} \qquad (۵)$$

۵- تکرار محاسبات از مرحله دوم تا چهارم تا جایی که اختلاف بین دو مرحله متوالی محاسبه J_q کمتر از دقت مورد نیاز بشود. مثلا اگر بخواهیم با دقت ۰/۰۱ مراکز خوشه‌ها محاسبه شود، محاسبات باید آن‌قدر ادامه یابد تا اختلاف مقدار تابع هدف در دو مرحله متوالی کمتر از ۰/۰۱ بشود. چه در روش تحلیل خوشه‌ای بی‌انعطاف و چه در روش تحلیل خوشه‌ای فازی تعداد مناسب خوشه‌ها براساس ملاحظات تجربی و یا به روش سعی و خطا تعیین می شود. دو پارامتر H که آنتروپی کلاس‌بندی[۹] و F که ضریب جداسازی[۱۰] نامیده میشوند، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = -\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}\frac{\mu_{ik}\log(\mu_{ik})}{n} \quad 0 \le H \le \log(c) \qquad (۶)$$

$$F = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}\frac{\mu_{ik}^2}{n} \qquad \frac{1}{c} \le F \le 1 \qquad (۷)$$

مقدار F به نوعی نسبت پراش درون خوشه‌ای به پراش بین خوشه‌ای را معرفی می‌کند. این مقدار باید نزدیک به یک باشد تا تحلیل خوشه‌ای معتبر باشد. هم‌چنین برای معتبر بودن تحلیل خوشه‌ای لازم است مقدار H نزدیک صفر باشد. این دو پارامتر بیشتر خصوصیات مدل خوشه‌بندی را نسبت به داده‌ها توصیف می‌کنند. حد بالا و پایین این دو پارامتر بستگی به تعداد خوشه‌ها دارد . اگر ایده‌ای خاص در مورد انتخاب مناسب تعداد خوشه‌ها نداشته باشیم می‌توان از معیار محدوده تغییرات این پارامترها سود جست[۵،۱]. داده‌ها باید با استفاده از روش تحلیل خوشه‌یابی فازی میان-مرکز، کلاس‌بندی شده و مختصات و عیار مرکز خوشه‌ها مشخص شوند. تعداد این مراکز بستگی به میزان تغییرپذیری ذخیره دارد. هر چه تغییر پذیری عیار در ذخیره بیشتر باشد باید تعداد این مراکز افزایش یابد. بنابراین با توجه به تغییرپذیری عیار در ذخیره و همچنین پارامترهای F و H تحلیل خوشه‌ای تعداد خوشه‌ها انتخاب می‌شود. به دلیل وجود متغیر عیار در فرآیند خوشه‌بندی مرز بین کانسنگ و باطله به خوبی قابل جدایش خواهد بود. لازم به یادآوری است که باید دامنه تغییرات مختصات و عیار تقریبا مشابه باشد. برای این منظور می‌توان همه این متغیرها را بین صفر و یک استاندارد کرد [۵،۱].

۲-۲- انتخاب شعاع جستجو و اجرا تخمین

پس از تعیین موقعیت و عیار مراکز خوشه‌ها لازم است یک ملاک فازی برای انتخاب شعاع تاثیر هر یک از مراکز خوشه‌ها تعیین کرد. شعاع جستجو به وسیله تابع زیر تعریف می‌شود:

$$r_i = \min[d_i(c_i, c_k)] \qquad (۸)$$

بر اساس این رابطه، شعاع جستجو برای خوشه iام (r_i) برابر است با فاصله مرکز آن خوشه (c_i) تا مرکز نزدیک‌ترین خوشه اطرافش (c_k).

آخرین مساله در یک تخمین فازی، درون یابی یا برون یابی آن است که به طریق زیر مشخص می شود:

۱- اگر نقطه مورد تخمین در داخل محدوده جستجوی یکی از خوشه‌ها مثلا C_i باشد تاثیر آن خوشه روی نقطه مورد تخمین را درون‌یابی فازی می‌نامیم.
۲- اگر نقطه مورد تخمین خارج از دامنه جستجوی خوشه C_i باشد ولی در دامنه جستجوی خوشه C_j باشد، به طوری که فاصله آن تا C_i کمتر از فاصله آن تا C_j باشد، در این صورت تاثیر خوشه C_j روی نقطه مورد تخمین را برون‌یابی فازی می‌نامیم.
۳- اگر نقطه مورد تخمین خارج از محدوده جستجوی همه خوشه‌ها قرار داشته باشد، تخمین زده نمی‌شود [۵،۱].

در نهایت برای تخمین هر بلوک، درجه عضویتش نسبت به مرکز خوشه‌هایی که قابلیت انجام درون‌یابی یا برون‌یابی روی این بلوک دارند را از تابعی نمایی به شکل زیر به دست می‌آوریم:

$$\mu_{ki} = EXP[-0.5(\frac{d_{ik}}{\sigma})^2] \qquad (۹)$$

در رابطه بالا μ_{ki} تعلق بلوک kام به خوشه iام و σ مقدار ثابتی است که معمولا برابر ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه تعلق بلوک‌ها، عیار در مرکز هر بلوک با استفاده از رابطه زیر تخمین زده خواهد شد:

$$x_j = \frac{\sum_{k=1}^{c}(\mu_{kj})^q c_k}{\sum_{k=1}^{c}(\mu_{kj})^q} \qquad (۱۰)$$

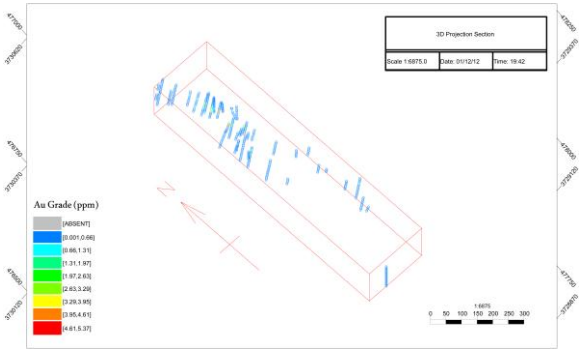
که در آن x_j عیار در نقطه j ، c تعداد خوشه‌ها، μ_{kj} درجه عضویت نقطه مطلوب j به خوشه kام و c_k مقدار عیار در مرکز خوشه kام است[۵،۱].

۳- تخمین بر اساس منطق فازی اصلاح شده

بر خلاف الگوریتم FCM معمولی که در ابتدا ماتریس تعلق کل نمونه‌ها به مراکز خوشه را به صورت تصادفی ایجاد می‌کند، در این روش ابتدا جامعه داده‌ها به چند زیر مجموعه تقسیم می‌شود. بدین منظور با توجه به اطلاعات در دسترس از وضعیت زمین‌شناختی کانسار و تغییرپذیری عیار و همچنین پارامترهای اقتصادی تاثیرگزار، داده‌ها را براساس عیار به چند زیرجامعه تقسیم خواهیم کرد. حال الگوریتم FCM را به‌طور مجزا (بدون حضور داده‌های دیگر زیرجامعه‌ها) در هر زیرجامعه اجرا خواهیم کرد. با این عمل از اختلاط داده‌های آنومال، با حجم زیاد داده‌های زمینه و اثر هموارسازی جلوگیری کرده‌ایم و در واقع قادر خواهیم بود با قدرت بیشتری مرز کانسنگ و باطله را تشخیص دهیم. حال با توجه به پارامترهای H و F به دست آمده از هر زیرجامعه تعداد مناسب خوشه‌ها و پارامترهای آن شامل موقعیت فضایی و عیار را به دست می‌آوریم. مراکز اولیه به دست آمده از هر زیر جامعه که به‌طور هدفمند تعیین شدند به الگوریتم تخمین فازی معرفی می‌شوند و عملیات تخمین براساس مراکز خوشه جدید صورت می‌پذیرد. ویژگی بارز این روش تشخیص تعداد مناسب خوشه‌ها، مکان و عیار آن‌ها است.

۴- معرفی کانسار طلای دره‌اشکی و داده‌های موجود

کانسار طلای دره‌اشکی در شمال شرق معدن موته قرار دارد. این معدن در زون دگرگونی سنندج – سیرجان ودر ۵۵ کیلومتری گلپایگان قرار گرفته است. کانه‌زایی طلا در این کانسار درکمپلکس پرمین رخ داده است. کانه‌زایی طلا در این منطقه اکثرا همراه با رگه‌های کوارتزی و عموما در ارتباط با پیریت گزارش شده است. دراین کانسار ابتدا طلا همراه با کانه‌های سولفیدی با بافت افشان تشکیل شده سپس در شکستگی‌ها به صورت رگه و رگچه تمرکز یافته است[۳]. در این مطالعه از ۵۳۹ داده منظم شده گمانه استفاده شده است. شکل شماره ۱ موقعیت این داده‌ها و عیار مربوط به آن‌ها را در منطقه نمایش می‌دهد. جدول شماره ۱ نیز پارامترهای آماری داده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمای سه بعدی از داده‌های اکتشافی

جدول ۱: مشخصات آماری داده‌های اکتشافی

Statistics		
Mean		0.162
Std. Deviation		0.564
Variance		0.319
Skewness		5.967
Kurtosis		40.337
Minimum		0.001
Maximum		5.276
Percentiles	25	0.001
	50	0.018
	75	0.06

۵- روش

در این مطالعه سه روش تخمین عنوان شده در بالا بر روی منطقه اجرا و توسط هر کدام از روش‌ها عیار در موقعیت داده‌های تست تخمین زده شده و با محاسبه خطای مربع میانگین ریشه (RMSE)[۱۱] برای هر روش دقت آن سنجیده خواهد شد. همچنین پارامترهای آماری حاصل از تخمین هرکدام از روش‌ها با داده‌های تست مقایسه شده تا نقاط ضعف و قوت آن‌ها بررسی شود. نمودار فراوانی تجمعی و واریوگرام غیر جهتی مقادیر تخمین خورده توسط سه روش نیز با داده‌های واقعی مقایسه شده است.

۵-۱- تخمین به روش زمین‌آماری(کریجینگ معمولی)

پس از آماده‌سازی داده شامل تبدیل مقادیر خارج از ردیف و داده‌های آنالیز نشده، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار

SGeMS به حالت نرمال درآمده و واریوگرافی در جهات مختلف برای پوشش کامل کانسار و همچنین واریوگرافی غیرجهتی نیز انجام شد[۹]. مشخصات سه جهت اصلی ناهمسانگردی و همچنین واریوگرام غیر جهتی در جدول شماره ۲ ملاحظه می‌شود. بیشترین دامنه تاثیر در جهت قائم بوده و کمترین آن نیز در جهت شرقی- غربی، که تاثیرپذیر از چگالی کم داده‌ها در این راستا است. مدل برازش شده بر واریوگرام‌ها از نوع کروی بوده که از فرمول زیر قابل محاسبه است.

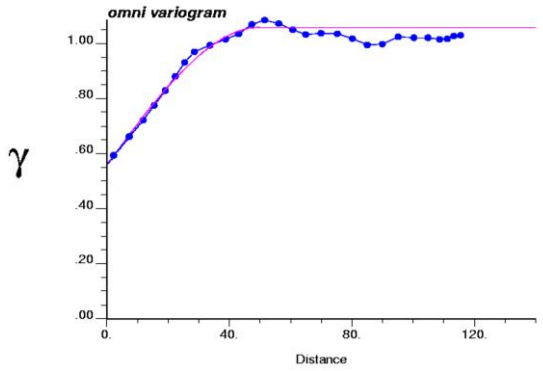
$$\begin{cases}\gamma(h)=c_0+c\left(1.5(\frac{h}{r})-0.5(\frac{h}{r})^3\right)\rightarrow for(h\le r)\\ \gamma(h)=c_0+c\rightarrow for(h>r)\end{cases} \quad (۱۱)$$

در این رابطه h طول گام، c_0 مولفه تصادفی پراش، c مولفه ساختاردار پراش و r دامنه تاثیر است[۹].

جدول ۲: مشخصات واریوگرام‌ها

دامنه (متر)	سقف (٪)^۲	اثرقطعه‌ای (٪)^۲	امتداد (درجه)
۳۰	۱.۰۵	۰.۵۰	۹۰
۵۰	۱.۰۰	۰.۴۵	۰
۷۰	۱.۰۰	۰.۵۰	قائم
۴۰	۱.۰۵	۰.۵۵	غیرجهتی

در شکل زیر واریوگرام غیرجهتی و مدل کروی برازش شده به آن قابل مشاهده است.



شکل۲: واریوگرام غیرجهتی و مدل برازش شده

در نهایت تخمین با استفاده از روش کریجینگ معمولی بر روی موقعیت داده‌های تست انجام شد. پارامترهای آماری مقادیر تخمین خورده توسط این روش با مقادیر داده‌های تست در جدول ۳ مقایسه شده است.

۵-۲- تخمین فازی بر اساس الگوریتم FCM معمولی

در ابتدا بر روی داده‌ها، خوشه‌بندی فازی معمولی انجام شد. بر اساس پارامتر H و F به دست آمده، تعداد ۱۰ خوشه از بین تعداد کل حالات ممکن برای تعداد خوشه‌ها، اعتبار بیشتری برخوردار بود. موقعیت این مراکز خوشه‌ها و عیار نظیر آن‌ها و همچنین شعاع تاثیر هر خوشه با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد. پس از محاسبه تعلق موقعیت هر داده تست با استفاده از رابطه (۹) و انجام درونیابی و برونیابی فازی مقادیر عیار در موقعیت هر داده تست با استفاده از رابطه (۱۰) تخمین زده شد. پارامترهای آماری مقادیر تخمین خورده توسط این روش نیز در جدول شماره ۳ آورده شده است.

۵-۳- تخمین فازی براساس الگوریتم FCM اصلاح شده

ابتدا جامعه داده‌ها را بر اساس عیار حدهای اقتصادی به چند زیر مجموعه تقسیم می‌کنیم. با توجه به این که کارخانه فرآوری موته با عیاری در حدود ۱ppm طراحی شده است[۳]، عیارهای تخمینی بیشتر از این مقدار را به عنوان بخش کانسنگ در نظر می‌گیریم. طبق مطالعاتی که اخیرا در بحث‌های اقتصادی و فرآوری طلا در این منطقه در حال انجام است و روند افزایشی قیمت طلا در حال حاضر احتمال می‌رود مواد معدنی با عیار بیش از ۰.۲ ppm نیز برای انجام عملیات معدن‌کاری اقتصادی باشند. لذا با توجه به این دو عیار حد، داده‌ها به سه جامعه کانسنگ (Au>1ppm)، حدواسط (0.2<Au<1ppm) و باطله (Au<0.2ppm) تقسیم شده‌اند. الگوریتم FCM در هر کلاس به طور مجزا به کار گرفته شد. تعداد مناسب خوشه‌ها بر اساس پارامترهای H و F در هر کلاس بررسی شد که در جامعه کانسنگ ۴ خوشه، حدواسط ۶ خوشه و باطله ۹ خوشه به دست آمد. برخلاف حالت قبل که موقعیت اولیه و عیار خوشه‌ها به طور تصادفی تعیین می‌شد، در این روش

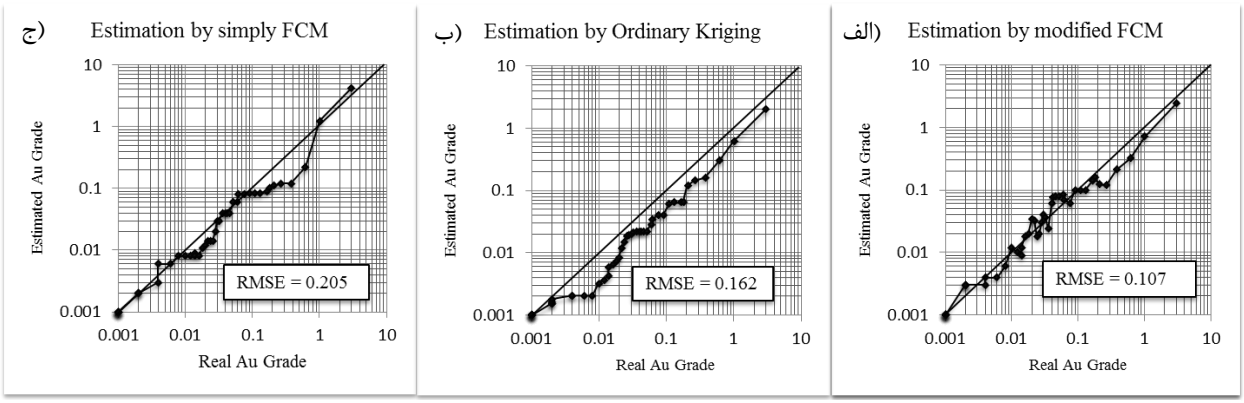
مکان و عیار ۱۹ خوشه به دست آمده از جوامع مختلف به عنوان مراکز اولیه به الگوریتم تخمین معرفی شدند. براساس موقعیت مراکز خوشه به دست آمده در روش اصلاحی و با استفاده از روابط بند ۲-۲، عیار در موقعیت داده‌های تست تخمین زده شد. پارامترهای آماری مقادیر تخمین خورده توسط این روش نیز در جدول شماره۳ ملاحظه می‌شود.

۶- بحث و نتایج

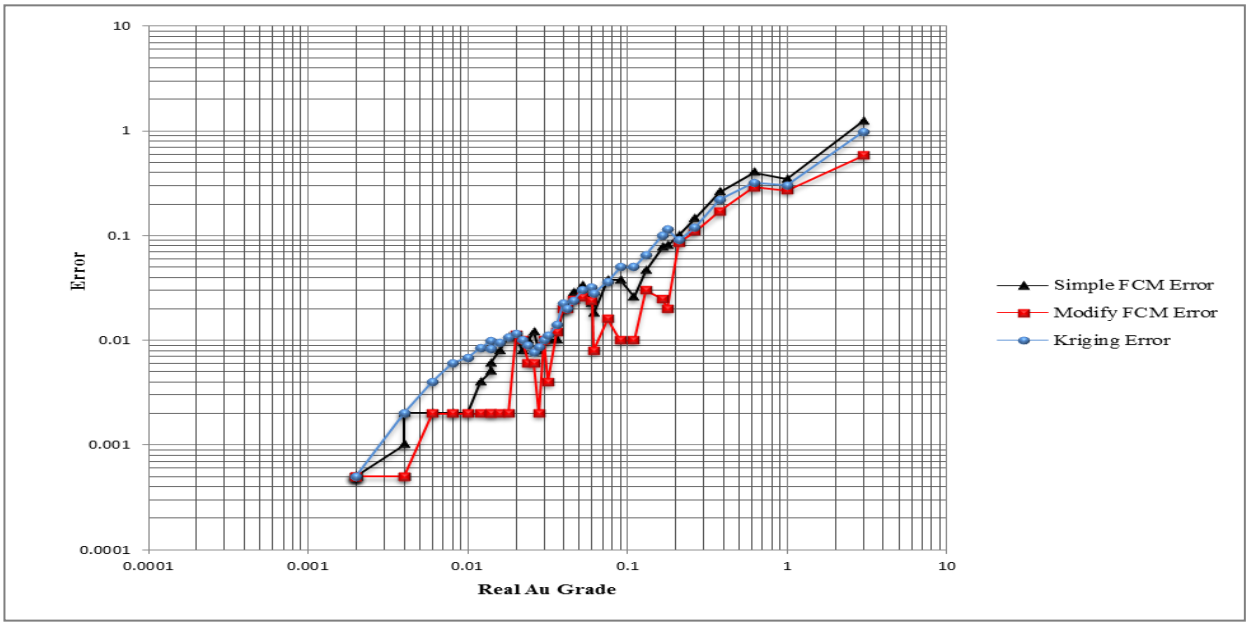
در نمودارهای لگاریتمی شکل ۳ مقادیر عیار تخمین خورده در موقعیت داده‌های تست بر حسب داده‌های واقعی رسم شده است. از طرفی خط ۴۵ درجه که در واقع نشان دهنده انطباق عیارهای تخمین خورده بر عیارهای واقعی است نیز جهت مقایسه آورده شده است. مطابق نمودار ۳(ج) روش تخمین فازی اصلاح نشده در مورد داده‌های آنومال دچار بیش تخمینی شده است. این امر موجب آن می‌شود که کانسار اقتصادی‌تر از آن‌چه هست تخمین زده شود. از طرفی RMSE این روش نیز نسبت به دو روش دیگر بالا است که نمایانگر خطای بالای این روش است. با توجه به نمودار ۳(ب) متعلق به روش کریجینگ معمولی، با توجه به خاصیت هموارسازی روش کریجینگ مقادیری کمتر از مقادیر واقعی را تخمین زده است ولی RMSE این روش به طور قابل توجهی نسبت به روش قبل کاهش یافته است. در نهایت نمودار ۳(الف) متعلق به روش تخمین فازی اصلاح شده با کمترین RMSE نسبت به دو روش دیگر از دقت نسبتا خوبی برخوردار است. مطابق شکل ۴ از جمله ایرادهای هر سه روش این است که با افزایش عیار، خطای تخمین نیز افزایش می‌یابد. در مجموع خطای روش اصلاحی در این شکل نسبت به دیگر روش‌ها کمتر است. در جدول شماره ۳ پارامترهای آماری مقادیر واقعی داده‌های تست، با مقادیر تخمین خورده توسط سه روش با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است روش فازی اصلاح شده نزدیک-ترین مقدار میانگین به داده‌های واقعی را دارد، در حالیکه کریجینگ این مقدار را بسیار کاهش داده است. مقادیر تخمین خورده به روش اصلاح شده نزدیک‌ترین واریانس و انحراف معیار توزیع را نشان داده است. در مورد پارامترهای چولگی و کشیدگی هر دو روش اصلاح شده و کریجینگ نتایج قابل قبولی را ارائه داده‌اند. هر سه روش قادر بوده‌اند مقدار کمینه داده‌ها را به درستی تخمین بزنند ولی در مورد بیشینه داده‌ها روش تخمین فازی اصلاح شده نزدیک‌ترین مقدار به بیشینه واقعی را نشان داده است. در شکل شماره ۵ نمودار فراوانی تجمعی سه روش تخمین در کنار مقادیر حقیقی آورده شده‌است. همانطور که از این شکل پیدا است روش تخمین فازی اصلاح شده با دقت بالایی قادر به بازتولید نمودار فراوانی تجمعی داده‌های حقیقی طلا بوده است. در شکل ۶ واریوگرام غیر جهتی مقادیر تخمین خورده توسط سه روش مختلف تخمین با واریوگرام غیر جهتی مقادیر واقعی مقایسه شده است. روش تخمین فازی عادی و کریجینگ، مقادیر سقف واریوگرام و اثر قطعه‌ای را به طور قابل توجهی کاهش و دامنه تاثیر را افزایش داده‌اند. مطابق شکل ۶ مقادیر تخمین خورده به روش فازی اصلاح شده دامنه تاثیری مشابه مقادیر حقیقی دارد. سقف و اثر قطعه‌ای آن نیز نسبت به دو روش دیگر بیشتر به واقعیت نزدیک است.

۷- نتیجه‌گیری

روش تخمین ذخیره فازی از جمله روش‌هایی است که در مواقع ضعف روش‌های زمین‌آماری کاربرد پیدا می‌کند. در این مطالعه نشان داده شده که روش تخمین فازی برای ارائه تخمین‌های هرچه دقیق‌تر نیازمند انجام اصلاحات در الگوریتم‌هایش است. مستلزمه رسیدن به تخمین‌های هرچه دقیق‌تر نیازمند انعطاف دادن به الگوریتم‌های تخمین بر اساس تیپ کانسار، چگونگی تغییرپذیری عیار در کانسار و در کل وضعیت زمین‌ساختی و زمین‌شناختی کانسار است. با انجام این عمل، الگوریتم برای تخمین هر چه دقیق‌تر انعطاف بیشتری از خود نشان داده و علاوه بر داشتن نتایج بهتری در تخمین با خطای کمتری نیز همراه است. در این مطالعه با تفکیک داده‌ها و تقسیم آن‌ها به چند زیر مجموعه به منظورجلوگیری از اثر هموارسازی الگوریتم خوشه‌یابی فازی همچنین فاصله‌گیری از فضای تصادفی، ضعف‌های این الگوریتم در مواجهه با داده‌هایی همچون داده‌های طلا برطرف و تخمین‌هایی دقیق و با خطای پایین حاصل شد.



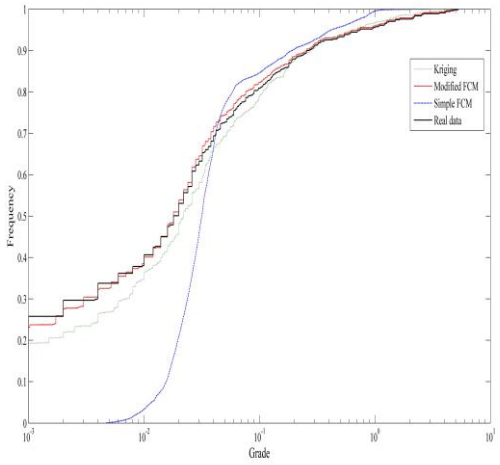
شکل۳: نمودار اعتبار سنجی تخمین بر اساس الف) خوشه‌یابی فازی اصلاح شده ب) کریجینگ معمولی ج) خوشه‌یابی فازی ساده



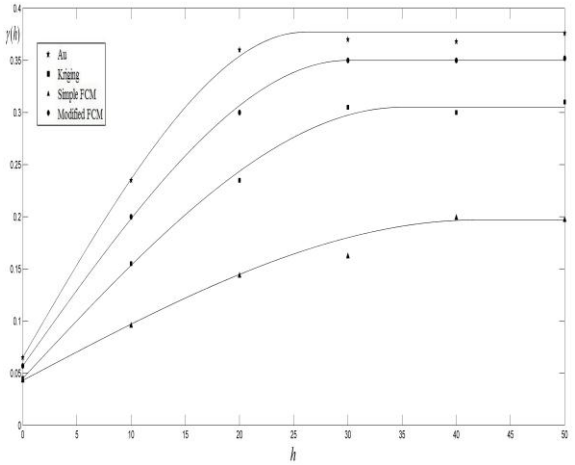
شکل۴: مقایسه خطای تخمین سه روش با توجه به افزایش عیار

جدول ۳: مقایسه پارامترهای آماری سه روش تخمین با داده‌های واقعی

	Au	Kriging	Simple FCM	Modified FCM
Mean	0.021	0.010	0.013	0.020
Std. Deviation	0.448	0.296	0.616	0.352
Variance	0.201	0.088	0.381	0.124
Skewness	5.700	6.056	6.330	6.095
Kurtosis	35.55	39.12	41.90	39.67
Minimum	0.001	0.001	0.001	0.001
Maximum	3.000	2.020	4.240	2.420
Percentiles 25	0.002	0.001	0.002	0.003
50	0.021	0.010	0.013	0.020
75	0.065	0.035	0.080	0.081



شکل۵: نمودار فراوانی تجمعی سه روش تخمین و مقادیر حقیقی



شکل۶: واریوگرام‌های غیرجهتی سه روش تخمین و مقادیر حقیقی

منابع

[1] A.A, Hassanipak. 2005; Exploration data analysis, University of Tehran.

[2] Z. Yousefi; R. Shamsipour. 2010; Geochemical and alteration investigation of Darre-Ashki gold deposit, Fifth national conference of geology and environment.

[3] National geoxciences database of Iran. 2004; website: www.ngdir.ir

[4] B. Tutmez, A. Erhan Terkan; 2007; *Fuzzy Modeling for Reserve Estimation Based on Spatial Variability;* Mathematical Geology, Vol.39.No.1.

[5] T. D. Pham; 1997; *Grade Estimation Using Fuzzy-Set Algorithms*; Mathematical Geology, Vol.29.No.2.

[6] S. N. Sivanandam, S. Sumathi; 2007*;* *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*; Springer, pp. 212-230.

[7] S. Nascimento, B. Mirkin; 1999; *A Fuzzy Clustering Model of Data and Fuzzy C-Means*; Department of Computer Science, Birkbeck College, London, UK.

[8] Miyamoto, Sadaaki, Ichihashi; 2008; *Algorithms for Fuzzy Clustering*; Springer, pp. 86-132.

[9] W, Simon; 2000; Practical *Geostatistics: Modeling and Spatial Analysis*; springer.

[10] B. Tutmez; 2005; *An uncertainty oriented fuzzy methodology for grade estimation;* Computers & Geosciences, Vol.33.No.2.

پی‌نوشت

۱ Nugget effect
۲ Sill
۳ Fuzzy c-mean clustering
۴ Random Functions
۵ Anisotropy Elliptical
۶ Best Linear Unbiased Estimator
۷ Krige
۸ Membership function
۹ Classification Entropy
۱۰ Partition Coefficient
۱۱ Root Mean Square Error