

تأثیر فاکتورهای خود همبستگی کمینه-بیشینه در شبیه‌سازی شرطی توأم

المیرا تجویدی^۱، مسعود منجری^{۱*}، امید اصغری^۲

۱- دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی معدن
۲- دانشگاه تهران - دانشکده مهندسی معدن - آزمایشگاه شبیه‌سازی و پردازش داده‌ها

(دریافت ۱۴ بهمن ۱۳۹۱، پذیرش ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۲)

چکیده

از دیدگاه اقتصادی، شناسایی و کمی‌سازی عدم قطعیت عباری دارای اهمیت بالایی می‌باشد. برای کمی‌سازی عدم قطعیت می‌توان از تکنیک‌های شبیه‌سازی شرطی استفاده نمود. این روش‌ها، برای یک عنصر قابل کاربرد می‌باشند، اما در کانسارهایی که هدف استخراج چند عنصر با هم است، که در آن‌ها لحاظ نمودن همبستگی فضایی از اهمیت بسزایی برخوردار است، به ندرت استفاده می‌شوند. برای این منظور می‌توان از روش‌هایی نظیر شبیه‌سازی شرطی توأم (CCS)، تبدیل شرطی متوالی (SCT) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و روش جدید فاکتورهای خود همبستگی کمینه/بیشینه (MAF) استفاده نمود. در سال‌های اخیر، روش MAF با توجه به مزایای متعدد نسبت به سایر روش‌ها به طور موفقیت‌آمیزی برای شبیه‌سازی کانسارهای چند عنصره به کار گرفته شده است. این روش نسبت به روش‌های قبل، در مدل‌های واریوگرام با بیش از یک ساختار فضایی قابل کاربرد می‌باشد. علاوه بر این به وسیله این روش می‌توان همبستگی را در کلیه فواصل گام‌ها حذف کرده و به دلیل عدم نیاز به مدلسازی واریوگرام‌های متقابل، انجام سریع‌تر شبیه‌سازی‌ها امکان‌پذیر می‌شود. هم‌چنین این روش بازتولید خوبی از همبستگی بین عناصر ایجاد می‌نماید. در این تحقیق روش MAF برای شبیه‌سازی شرطی توأم در یک کانسار چند عنصره مس پورفیری استفاده و اثر آن روی منحنی تناژ-عیار بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که روش MAF می‌تواند به طور مؤثری برای بازتولید همبستگی‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

عدم قطعیت عباری، کانسارهای چند عنصره، خود همبستگی کمینه-بیشینه، شبیه‌سازی شرطی

۱-۲- منطقه مورد مطالعه و بررسی آماری داده‌ها

در این پروژه، کانساری در قسمت مرکزی ایران، واقع بر کمربند ماگماتیک ارومیه-دختر مورد مطالعه قرار گرفت. براساس مطالعات اولیه، همچون بررسی‌های صحرایی، ژئوفیزیکی و مطالعات سنگ‌شناسی و کانه نگاری، این منطقه از لحاظ وجود ذخیره مس-مولیبدن-طلای پورفیری و همچنین نقره بعنوان محصول فرعی کانسارهای مس-طلای پورفیری شناخته شده است [۱۰].

برای انجام این تحقیق از اطلاعات مربوط به ۲۴ گمانه با ۱۷۷۴ نمونه از مغزه‌های دومتری اکتشافیکه شامل عناصر مس، مولیبدن و نقره می‌باشند، استفاده شده است. در این مرحله پارامترهای آماری جامعه مورد نظر محاسبه شده‌اند. توزیع فراوانی و پارامترهای آماری داده‌های موجود به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شده‌اند. طبق نتایج بدست آمده، توابع توزیع فراوانی عناصر نرمال نیستند و برای انجام تحقیق نیاز به تبدیل نرمال اولیه دارند.

۲-۲- نرم افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق، برای انجام مطالعات آماری از نرم افزار SPSS، برای بررسی‌های زمین آماری و ساخت مدل‌های هندسی و بلوکی، از نرم افزار DATAMINE، برای انجام تبدیل نرمال از نرم افزار WINGSLIB، برای تخمین و شبیه‌سازی کانسار از نرم افزار SGeMS و برای انجام تبدیل MAF (به علت چند عنصر بودن کانسار) از نرم افزار MATLAB استفاده گردید.

۲-۳- روش مدل خطی هم منطقه‌ای (LMC)

برای مدلسازی ماتریس واریوگرام $\Gamma_Z(h)$ از مدل خطی هم منطقه‌ای (LMC) استفاده می‌شود. این مدل، ماتریس واریوگرام را به صورت مجموعه‌ای از چندین مدل واریوگرام طبق رابطه (۱) در نظر می‌گیرد [۸]:

$$\Gamma_Z(h) = \sum_{k=1}^S B_k \gamma_k(h) \quad (1)$$

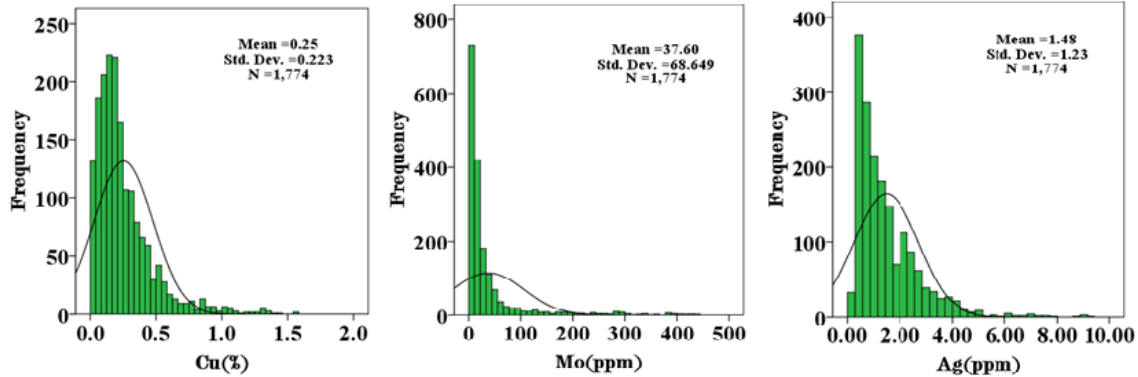
که در این رابطه γ_k مدل‌های واریوگرام استاندارد، B_k ماتریس مثبت با اندازه $n \times n$ برای k ساختار می‌باشد. مجموع همه ماتریس‌های B_k برابر ماتریس کواریانس-واریانس B می‌باشد. ماتریس‌های B_k عموماً ماتریس‌های هم منطقه‌ای هستند که در مقیاس فضایی مختلف، دامنه‌های یکسانی از واریوگرام به ساختار فضایی چند متغیره برازش می‌شود [۸].

روش‌های شبیه‌سازی زمین آماری به منظور کمی‌سازی ریسک و عدم قطعیت در زمینه‌های مختلف پروژه‌های معدنی استفاده می‌شوند [۱-۳]. روش‌های مذکور در حالت تک عنصره کارآمد هستند. با این حال، در بسیاری از کاربردها بازتولید همبستگی فضایی و شبیه‌سازی توأمدر موارد چند عنصره دشوار بوده و به ندرت استفاده می‌شوند.

تاکنون روش‌های شبیه‌سازی توأم نظیر شبیه‌سازی توأم متداول و شبیه‌سازی توأم هم مختصاتی برای ذخایر چند عنصره استفاده شده‌اند؛ اما ایراد این روش‌ها آن است که باز نظر محاسباتی برای کاربرد عملی بسیار زمان‌بر هستند. به طوری که برای حل مجموعه معادلات برای نقاط شبیه‌سازی شده و نیز تولید واریوگرام‌های متقابل و سایر ساختارهای حاصل از مدیریت داده‌ها، به توان پردازش کامپیوتری بالایی نیاز می‌باشد. عدم کارایی محاسباتی با تعداد متغیرهایی که قرار است به صورت توأم شبیه‌سازی شوند افزایش می‌یابد [۲، ۴]. بر این اساس، جایگزین مناسبی برای روش‌های ذکر شده توسط دیوید (۱۹۸۸) پیشنهاد شد. وی شبیه‌سازی توأم را براساس حذف همبستگی بین متغیرها با استفاده از PCA معرفی کرد. تحقیقات بسیاری در ارتباط با PCA صورت گرفته است؛ اما به دلیل اینکه PCA همبستگی متقابل را در فاصله‌هایی به غیر از صفر در نظر نمی‌گیرد کارایی آن محدود شده است. دسبارتاز و دیمیتراکوپولوس (۲۰۰۰) شاخه‌ای از روش PCA را به منظور شبیه‌سازی توأم متغیرهای چندگانه ارائه دادند و روش PCA را با روش MAF جایگزین کردند. مزیت روش MAF این است که قادر به فراهم آوردن فاکتورهای غیروابسته‌ای است که از مدل خطی هم منطقه‌ای (LMC) پیروی می‌کند. این روش، متغیرها را به طور فضایی مستقل می‌سازد و فاکتورهای غیر وابسته‌ای را تولید می‌کند که به صورت مجزا شبیه‌سازی شده و به فضای اصلی تبدیل معکوس می‌گردند، از این رو همبستگی متغیرهای اصلی را بازتولید می‌کنند. شبیه‌سازی توأم براساس MAF نشان می‌دهد که در صورت وجود دو یا چند متغیر یک روش مؤثر و کارآمد در ارزیابی عدم قطعیت است [۴-۸].

این نتایج مشابه تحقیقات دیگر (دسبارتاز و دیمیتراکوپولوس، ۲۰۰۰؛ فونسکا و دیمیتراکوپولوس، ۲۰۰۳؛ بوچر و دیمیتراکوپولوس، ۲۰۱۲؛ روندون، ۲۰۱۲) می‌باشد [۱، ۴، ۸، ۹].

هدف از این تحقیق، استفاده از روش MAF به منظور شبیه‌سازی توأم متغیرها (مس، مولیبدن، نقره) در یک کانسار مس-مولیبدن پورفیری در منطقه مرکزی ایران و بررسی تأثیر آن در شبیه‌سازی توأم است.



شکل ۱. توزیع فراوانی نمونه‌های هم طول مس، مولیبدن و نقره.

جدول ۱. پارامترهای آماری نمونه‌های هم طول مس، مولیبدن و نقره

چولگی	کشیدگی	بیشینه	کمینه	انحراف معیار	میانگین	تعداد داده‌ها	زون
۲/۱۶۹	۶/۳۹۱	۱/۵۸۱	۰/۰۰	۰/۲۲۳۲۶۵	۰/۲۵۳۱	۱۷۷۴	مس (%)
۳/۴۲۹	۱۲/۵۱۷	۴۴۴	۰/۸۴	۶۸/۶۴۸	۳۷/۶۰	۱۷۷۴	مولیبدن (ppm)
۲/۱۲۷	۶/۸۰۱	۹/۴۰	۰/۱۸	۱/۱۵۰	۱/۴۷۸۳	۱۷۷۴	نقره (ppm)

تصحیح فاکتورهای PCA به دو روش، بر اساس مدل حاصل از شبیه‌سازی و بر اساس داده انجام می‌گیرد. در روش اول، واریوگرام‌های مستقیم و متقابل برای تبدیل متغیرهای ورودی به فاکتورهای مستقل در تمام گام‌ها، مدل می‌شوند. این روش توسط وارگاس-گوزمان (۲۰۰۳) ارائه و توسط بوچر و دیمیتراکوپولوس (۲۰۰۹) برای شبیه‌سازی توأم مستقیم بلوکی توسعه داده شد [۶، ۱۱]. روش دوم، توسط سوئیترز و گرین (۱۹۸۴) برای تصویر فضایی چند متغیره ارائه شد و تبدیل فاکتورها بدون نیاز به مدلسازی فضایی مستقیم و متقابل متغیرها انجام می‌گیرد. این روش، حذف همبستگی بین فاکتورهای به دست آمده را حداقل در فواصل گام کوتاه‌تری امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین این روش توسط دسبارتاز و دیمیتراکوپولوس (۲۰۰۰) برای شبیه‌سازی توزیع متغیر ناحیه-ای استفاده شده است [۸].

۲-۴-۲- حذف همبستگی با استفاده از روش MAF بر اساس مدل شبیه‌سازی

برای حذف همبستگی بر اساس مدلسازی لازم است دو مرحله کلیدی انجام شود. اولین مرحله استفاده از روش PCA با استفاده از یک مدل خطی هم منطقه‌ای برای متغیرهای ورودی طبق رابطه (۴) می‌باشد:

۲-۴-۲- روش‌های حذف همبستگی

۲-۴-۲-۱- حذف همبستگی با استفاده از PCA

تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تبدیل مجموعه‌ای از مؤلفه‌های تصادفی همبسته را به مجموعه‌ای از فاکتورهایی که هیچ همبستگی در گام صفر ندارند امکان‌پذیر می‌سازد. فرض می‌شود که ساختار همبستگی میدان بردار تصادفی توسط مدل LMC بازتولید می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که حذف همبستگی در گام صفر به معنی مستقل بودن متغیرها در هر گامی نمی‌باشد [۸]. برای حذف همبستگی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ابتدا تجزیه برداری ماتریس واریانس-کواریانس بر اساس رابطه (۲) صورت می‌گیرد:

$$B = Q^T \Lambda Q \quad (2)$$

که در آن، Λ ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه ماتریس کواریانس و Q ماتریس متعامد شامل بردارهای ویژه ماتریس کواریانس می‌باشد. فاکتورهای PCA بر اساس رابطه (۳) تعیین می‌شوند:

$$Y_{PCA}(u) = \Lambda^{-\frac{1}{2}} Q Z(u) = AZ(u) \quad (3)$$

توأم‌متغیرهای همبسته با استفاده از روش MAF به صورت زیر انجام می‌گیرد [۹]:

- تبدیل نرمال استاندارد متغیرهای موجود
- استفاده از تبدیل MAF برای تولید فاکتورهای غیر وابسته (MAF)
- رسم واریوگرام برای هر فاکتور
- شبیه‌سازی بشرطی هر فاکتور
- اعتبارسنجی فاکتورهای شبیه‌سازی شده
- تبدیل معکوس فاکتورهای شبیه‌سازی شده
- تبدیل معکوس متغیرهای امتیازات نرمال
- تبدیل معکوس متغیرهای شبیه‌سازی شده از حالت نرمال به داده‌های خام
- اعتبارسنجی نتایج نهایی.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی توأم‌مس، مولیبدن و نقره

۳-۱-۱- تبدیل امتیازات نرمال

تبدیل امتیازات نرمال بر پایه مرتب‌سازی رتبه داده‌ها و کاهش تأثیر داده‌های خارج از ردیف می‌باشد [۲]. توزیع داده‌های اصلی مس، مولیبدن و نقره به توزیع نرمال تبدیل می‌شوند. جدول (۲) ضرایب همبستگی بین متغیرهای خام (بالای قطر اصلی) و همبستگی مربوطه را بعد از تبدیل امتیازات نرمال (پایین قطر اصلی) نشان می‌دهد. تبدیل نرمال، تقریباً روی تمامی ضرایب همبستگی تأثیر گذار بوده است. بیشترین تأثیر تبدیل نرمال روی متغیر مولیبدن با افزایش ضریب همبستگی از ۰/۲۱ به ۰/۳۸۹ مشاهده شده است. ضرایب همبستگی بین مس و مولیبدن و همچنین، مولیبدن و نقره بعد از تبدیل افزایش می‌یابد، در حالی که ضرایب همبستگی بین مس و نقره بعد از تبدیل کاهش یافته است.

بر اساس یافته‌های محققان مختلف (روندون، ۲۰۱۲؛ بوچر و همکاران، ۲۰۰۹) عناصری که ضرایب همبستگی بین آن‌ها در حالت قبل و بعد از نرمال مشابه باشد، همبستگی را در نتایج خروجی به خوبی بازتولید می‌کنند [۵، ۱۳]. در صورت وجود همبستگی ضعیف بین عناصر، بازتولید خوبی از همبستگی صورت نمی‌گیرد [۱۲].

$$\Gamma_{Y_{PCA}}(h) = B_1 \gamma_1(h) + (B - B_1) \gamma_2(h) \quad (۴)$$

با برازش مدل LMC، ماتریس متعامد و قطری B_1 به دست می‌آید. از تجزیه برداری ماتریس V بر اساس رابطه (۵) ماتریس متعامد Q_1 و ماتریس مقادیر ویژه Λ_1 تعیین می‌شوند.

$$V = Q_1^T \Lambda_1 Q_1 \quad (۵)$$

مرحله دوم تعیین فاکتورهای MAF با تبدیل مجدد فاکتورهای PCA با استفاده از بردارهای ویژه V و بر اساس رابطه (۶) می‌باشد:

$$F_{MAF}(u) = Q_1 \gamma_{PCA}(u) = Q_1 \Lambda^{-\frac{1}{2}} QZ(u) = MZ(u) \quad (۶)$$

تبدیل دوم نشان می‌دهد که مدل خطی برای فاکتورهای MAF در همه گام‌ها قطری می‌باشد. بنابراین فاکتورهای MAF در هر گامی، غیر همبسته بوده و امکان شبیه‌سازی فاکتورها به صورت مستقل وجود دارد.

۳-۴-۲- حذف همبستگی با استفاده از روش MAF بر اساس داده

در این روش، ماتریس تبدیل دوم Q_1 ، مستقیماً از داده‌های ورودی و بدون نیاز به برازش مدل خطی به دست می‌آید. نکته مهم این است که با فرض مدل LMC، بردارهای ویژه $\Gamma_{Y_{PCA}}(h)$ مستقل از فاصله جدایش h و برابر با بردارهای ویژه ماتریس V می‌باشند. لذا وقتی که $\Gamma_{Y_{PCA}}(h)$ می‌تواند با استفاده از داده‌های ورودی محاسبه شود، نیازی به برازش LMC برای تعیین ماتریس V نمی‌باشد. فاکتورهای MAF در صورت یک یا دو ساختار بودن مدل هم منطقه‌ای، همبستگی فضایی نخواهند داشت [۷، ۸].

کارایی شبیه‌سازی توأم با استفاده از MAF را می‌توان با شبیه‌سازی در پایه بلوکی افزایش داد. پایه بلوکی که در آن کانسار به صورت عددی نمایش و مدل‌سازی می‌شود با پایه داده‌های موجود تفاوت دارد [۵].

روش معمول برای ایجاد مدل‌های عددی در پایه بلوکی، ریز بلوک‌سازی هر بلوک به مجموعه عددی از نقاط، انجام شبیه‌سازی در پایه نقطه‌ای و میانگین‌گیری مقادیر در پایه نقطه‌ای شبیه‌سازی شده در هر بلوک است [۱۲].

در این پژوهش از روش MAF بر اساس مدل برای حذف همبستگی در شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی

جدول ۲. ضرایب همبستگی بین مس، مولیبدن و نقره قبل (بالای قطر اصلی) و بعد از تبدیل نرمال (پایین قطر اصلی)

عناصر	مس	مولیبدن	نقره
مس	۱/۰۰۰	۰/۲۱۰	۰/۷۲۷
مولیبدن	۰/۳۸۹	۱/۰۰۰	۰/۲۷۸
نقره	۰/۶۸۹	۰/۳۲۱	۱/۰۰۰

۳-۱-۲- تبدیل MAF و تحلیل‌های واریوگرام

واریوگرام‌های مستقیم و متقابل متغیرها با استفاده از داده‌های تبدیل شده محاسبه و مدل LMC با دو ساختار بر اساس رابطه (۴) برازش می‌شود. هر دو ساختار مربوط به مدل‌های کروی همگن با دامنه‌های ۴۶ متر برای ساختار اول و ۱۵۰ متر برای ساختار دوم می‌باشند. فاکتورهای MAF طی مراحل زیر به دست می‌آیند:

➤ محاسبه ماتریس‌های هم منطقه‌ایدر گام $h=0$:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0.389 & 0.698 \\ 0.389 & 1 & 0.321 \\ 0.698 & 0.321 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.92 & 0.35 & 0.62 \\ 0.35 & 0.64 & 0.18 \\ 0.62 & 0.18 & 0.17 \end{bmatrix}$$

$$B - B_1 = \begin{bmatrix} 0.08 & 0.039 & 0.0782 \\ 0.039 & 0.36 & 0.141 \\ 0.0782 & 0.141 & 0.3 \end{bmatrix}$$

➤ تجزیه ماتریس کواریانس $B(0)$ بر اساس رابطه (۲):

$$Q = \begin{bmatrix} 0.636034 & 0.463493 & 0.616956 \\ 0.258683 & -0.88132 & 0.395417 \\ 0.72701 & -0.0919 & -0.68045 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.960754 & 0 & 0 \\ 0 & 0.741917 & 0 \\ 0 & 0 & 0.297329 \end{bmatrix}$$

➤ محاسبه ماتریس PCA با استفاده از رابطه (۳):

$$A = \begin{bmatrix} 0.45422 & 0.33103 & 0.44059 \\ 0.30032 & -1.02319 & 0.45907 \\ 1.333281 & -0.16854 & -1.24789 \end{bmatrix}$$

➤ محاسبه ماتریس کواریانس فاکتورهای PCA در گام دلخواه ($h=50$):

$$V = \begin{bmatrix} 0.102807 & -0.04647 & -0.14516 \\ -0.04647 & 0.162147 & 0.031216 \\ -0.14516 & 0.031216 & 0.207932 \end{bmatrix}$$

➤ تجزیه ماتریس کواریانس فاکتورهای PCA بر اساس

رابطه (۵):

$$Q_1 = \begin{bmatrix} -0.56221 & 0.304993 & 0.768698 \\ 0.069344 & 0.943622 & -0.32368 \\ -0.82408 & -0.12867 & -0.55167 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 0.326482 & 0 & 0 \\ 0 & 0.148025 & 0 \\ 0 & 0 & -0.00162 \end{bmatrix}$$

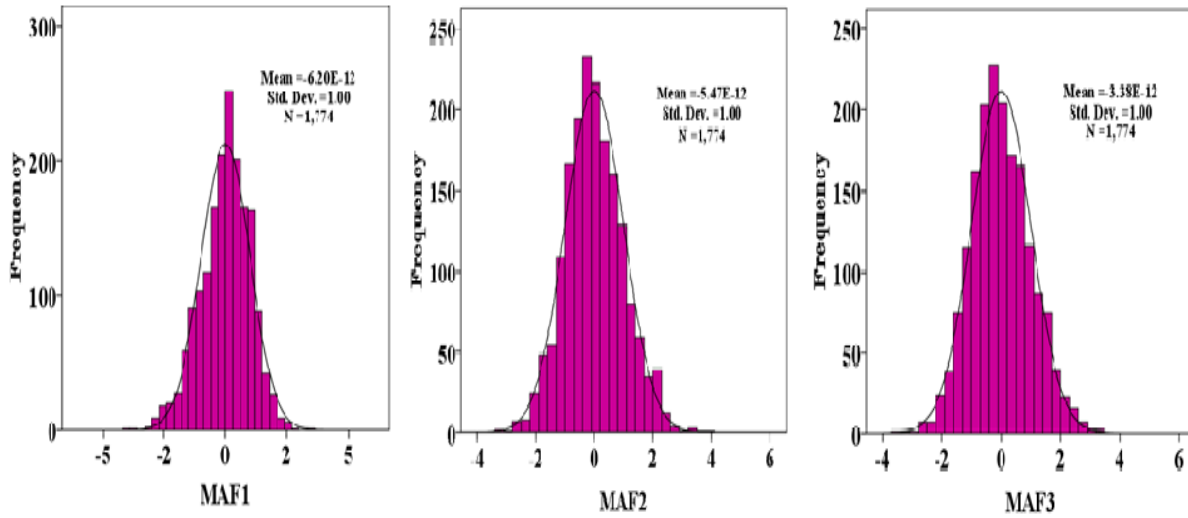
➤ محاسبه ماتریس MAF با استفاده از رابطه (۶):

$$M = \begin{bmatrix} 0.861118 & -0.62772 & -1.06695 \\ -0.11667 & -0.888 & 0.867658 \\ -1.14849 & -0.04814 & 0.26626 \end{bmatrix}$$

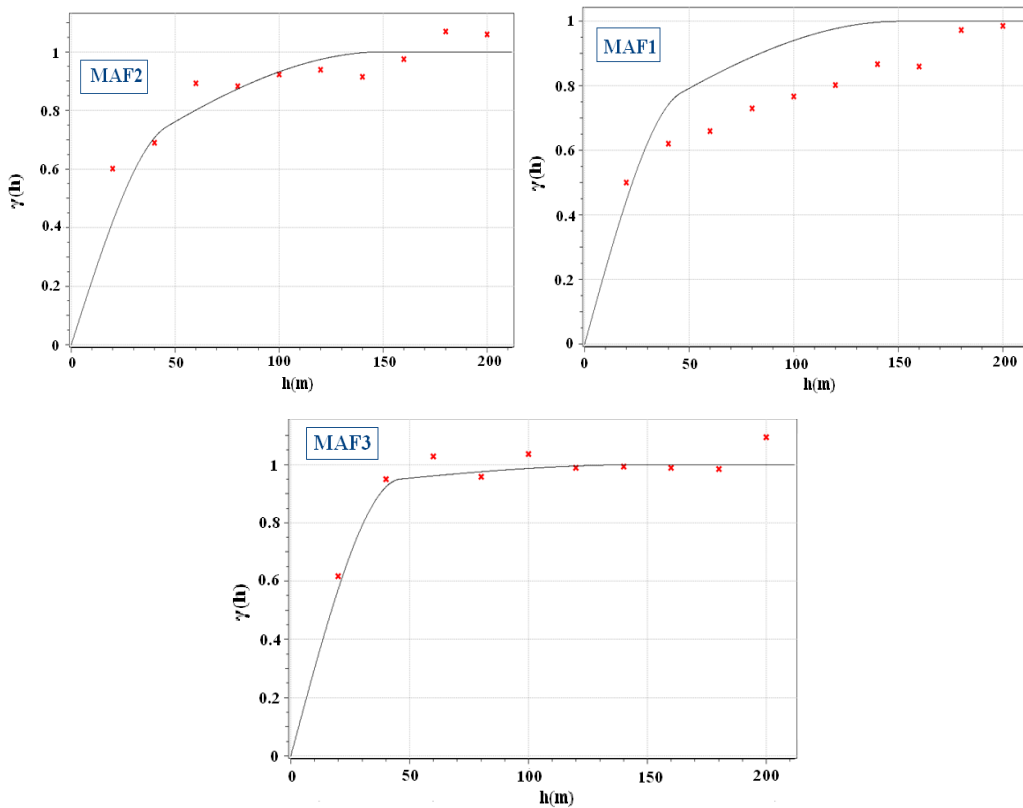
فاکتورهای MAF، از ضرب بردار متغیرهای مس، مولیبدن و نقره در یک مؤلفه از ماتریس تبدیل M به دست می‌آید. گام مورد استفاده در معادله تبدیل، ۵۰ متر است.

۳-۱-۳- اعتبارسنجی فاکتورهای MAF

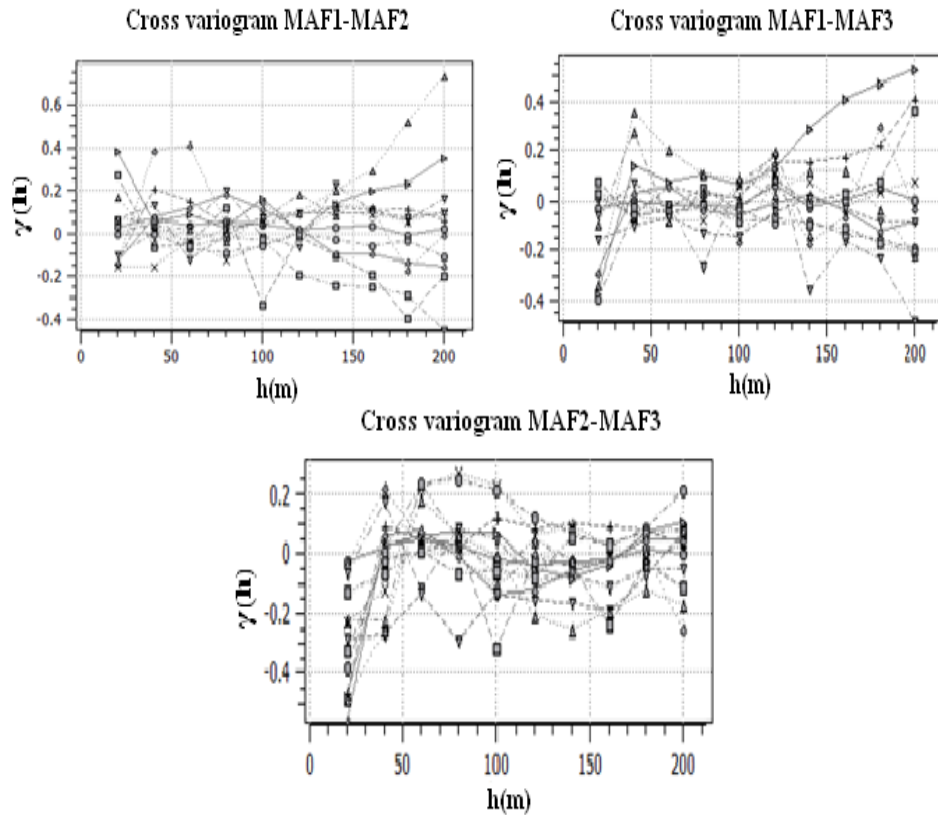
نمودارهای توزیع فراوانی فاکتورهای MAF در شکل (۲) توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار یک را نشان می‌دهند. همچنین به منظور اعتبارسنجی فاکتورهای MAF، واریوگرام‌های مستقیم و متقابل مربوطه رسم و مدل کروی دو ساختار برای هر MAF (شکل (۳) و (۴)). برای فاکتورهای MAF2 و MAF3، مدل LMC با واریوگرام‌های تجربی فاکتورها مطابقت داشته اما در مورد فاکتور MAF1 سقف واریوگرام اختلاف ناچیزی با مدل LMC دارد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مدل‌های واریوگرام تجربی مربوطه، شدیداً به اثر قطعه‌ای و واریوگرام متقابل بین داده‌های ورودی حساس می‌باشند. در صورت عدم تطابق واریوگرام‌های تجربی و تئوری، باید مدل LMC ورودی تصحیح شود [۱۴]. پس از انتخاب بهترین مدل LMC برای واریوگرام‌های تجربی، شبیه‌سازی فاکتورهای MAF انجام شد. با توجه به واریوگرام‌های متقابل، همبستگی بین فاکتورها حذف شده است. لازم به ذکر است اگر چه فاکتورها در هر گامی به لحاظ نظری غیر همبسته هستند، ولی به دلیل استفاده از جفت نقاط نمونه‌برداری متفاوت، مقادیر ناچیزی از همبستگی متقابل تجربی مشاهده می‌شود [۱۵].



شکل ۲. توزیع فراوانیفاکتورهای MAF.



شکل ۳. واریوگرامهای تجربیفاکتورهای MAF و مدل های LMC برازش شده.



شکل ۴. واریوگرام‌های تجربی متقابل فاکتورهای MAF (در جهات مختلف).

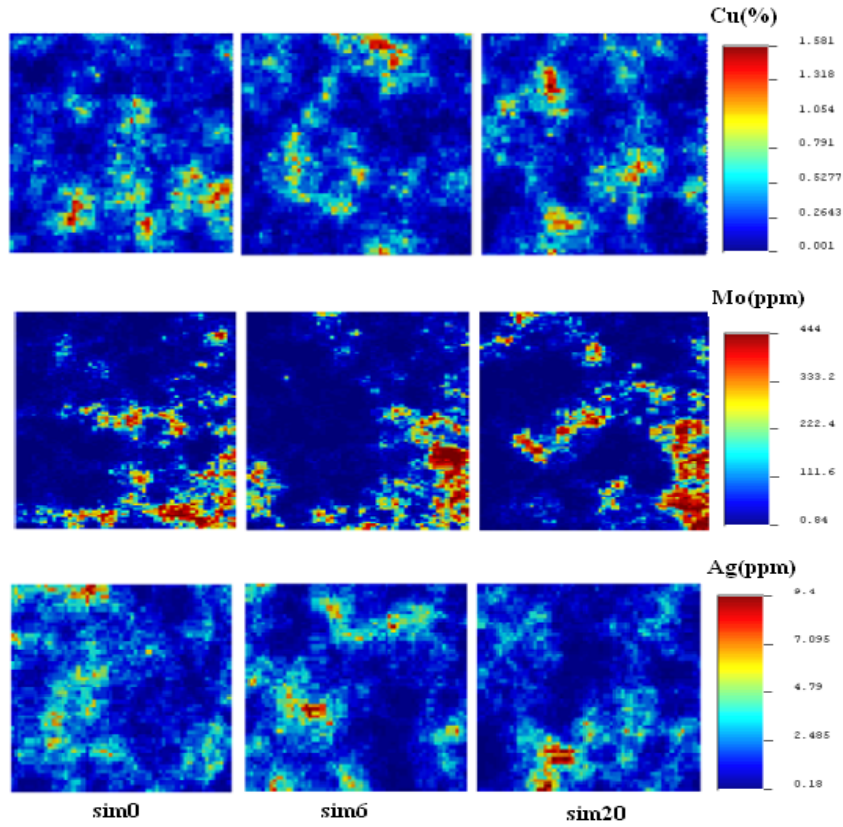
بازتولید شد. شکل (۷) و (۸) به ترتیب میانگین و انحراف معیار تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی را در برابر مقادیر داده‌ها نشان می‌دهد. در مورد هر سه متغیر، میانگین به خوبی بازتولید شد. انحراف معیار حاصل از تحقق‌های شبیه‌سازی در مورد هر سه متغیر نسبت به داده‌های اصلی دارای مقادیر پایین‌تری می‌باشند. این کاهش انحراف معیار به دلیل انجام شبیه‌سازی در پایه بلوکی و میانگین‌گیری می‌باشد. در نهایت تحلیل‌های مربوط به بازتولید همبستگی صورت گرفت. شکل (۹) هیستوگرام ضرایب همبستگی بین متغیرها را نشان می‌دهد. بازتولید همبستگی داده‌ها منطقی می‌باشد. اشکال (۱۰) و (۱۱) مقایسه واریوگرام و واریوگرام متقابل داده‌ها را در مقابل شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. در تمامی حالات، پیوستگی فضایی متغیرها و پیوستگی فضایی توأم آنها به طور منطقی بازتولید شد. توجه به این نکته ضروری است که به علت همبستگی نسبتاً ضعیف متغیرهای مس و مولیبدن و همچنین مولیبدن و نقره، واریوگرام‌های متقابل بین مقادیر شبیه‌سازی شده آنها تغییر پذیری بیشتری نسبت به واریوگرام‌های متقابل متغیرهای مس و نقره دارند.

۳-۱-۴- شبیه‌سازی شرطی

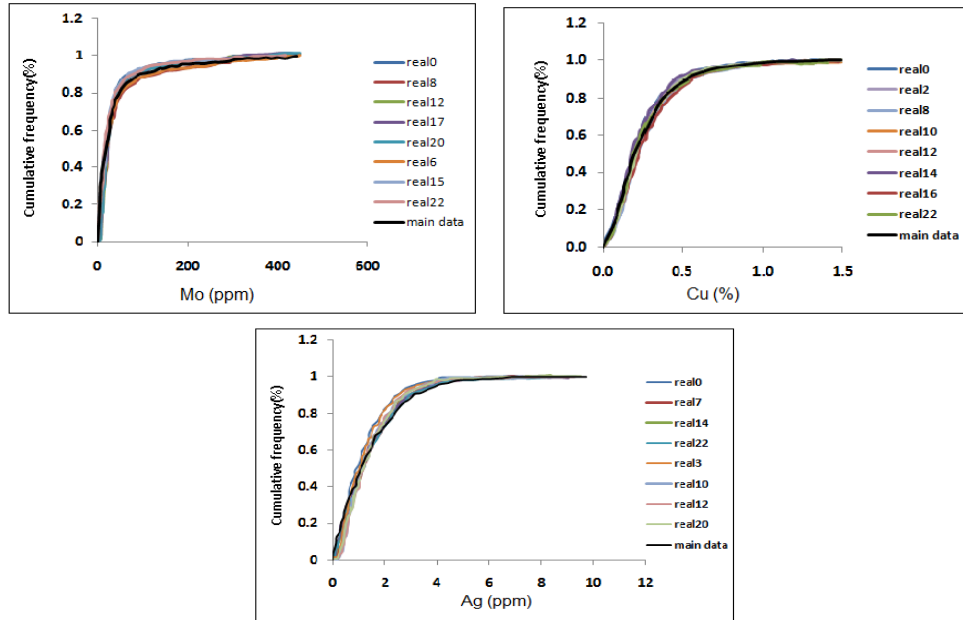
شبیه‌سازی شرطی به‌طور مستقل، بر اساس الگوریتم گوسی متوالی برای هر MAF روی شبکه‌ای به ابعاد $12 \times 15 \times 15$ به صورت بلوکی انجام گرفت. بیست و پنج مورد از شبیه‌سازی‌ها بررسی شده و اعتبارسنجی برای هر MAF به‌منظور بازتولید هیستوگرام و واریوگرام انجام گرفته است. تحقق‌های هر MAF با استفاده از ماتریس معکوس MAF، به متغیرهای نرمال شبیه‌سازی شده و سپس به فضای داده‌های اصلی (مس-مولیبدن-نقره) تبدیل شدند. توزیع عیار مس، مولیبدن و نقره مربوط به سه تحقق در شکل (۵) نشان داده شده است.

۳-۲- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی مشترک مس، مولیبدن و نقره

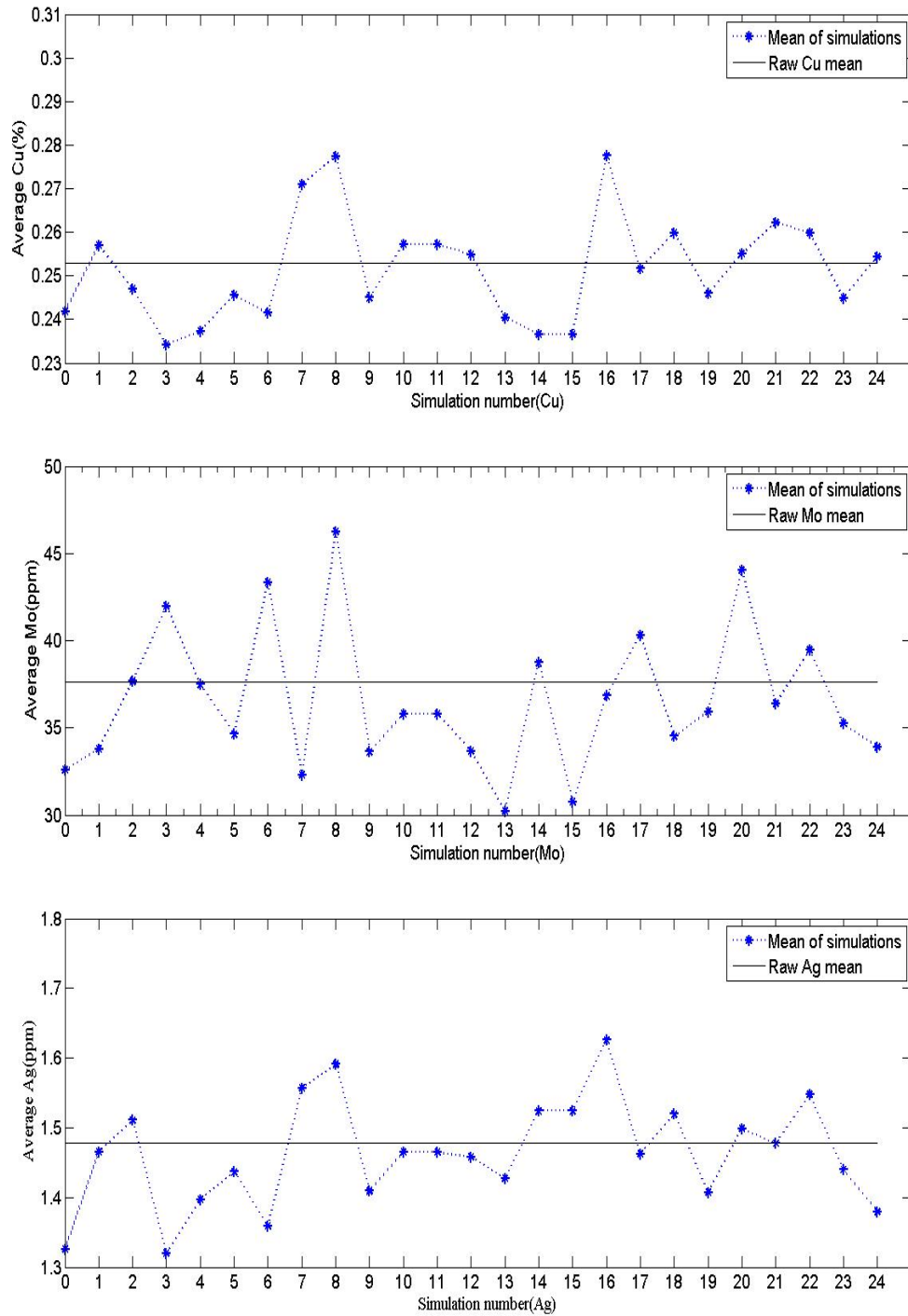
اعتبارسنجی شامل مقایسه توابع توزیع تجمعی، میانگین و انحراف معیار، واریوگرام و واریوگرام متقابل بین داده‌ها و مقادیر شبیه‌سازی انجام شد. شکل (۶) مقایسه توابع توزیع تجمعی داده‌ها را در مقابل هشت تحقق از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. به طور کلی توابع توزیع تجمعی برای تمام متغیرها به خوبی



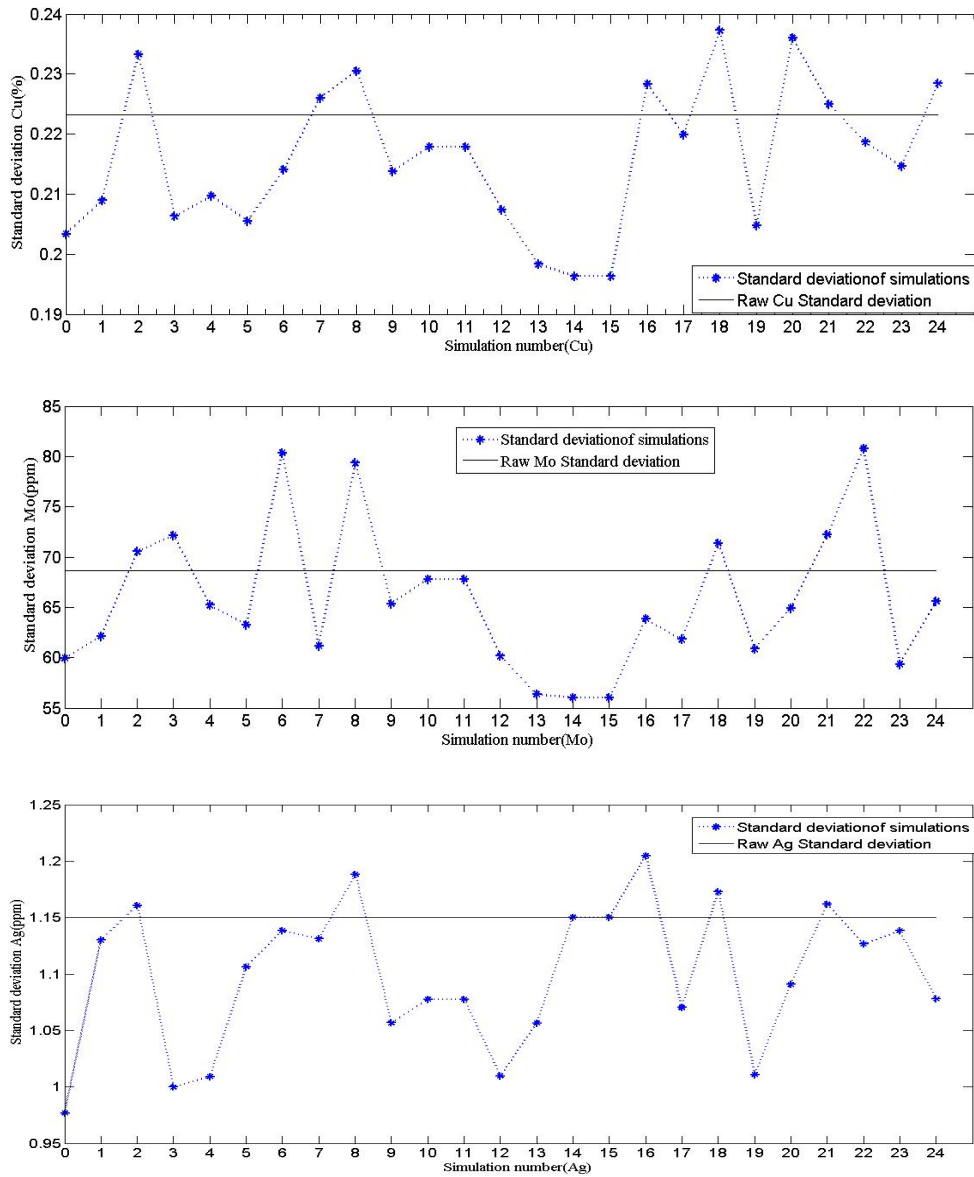
شکل ۵. توزیع عیاری متغیرهای مس، مولیبدن و نقره مربوط به سه تحقق.



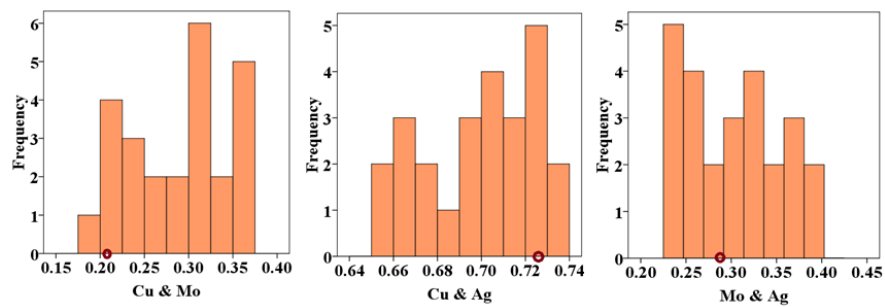
شکل ۶. اعتبار سنجی - مقایسه تابع توزیع تجمعی داده‌ها در برابر شبیه‌سازی‌ها.



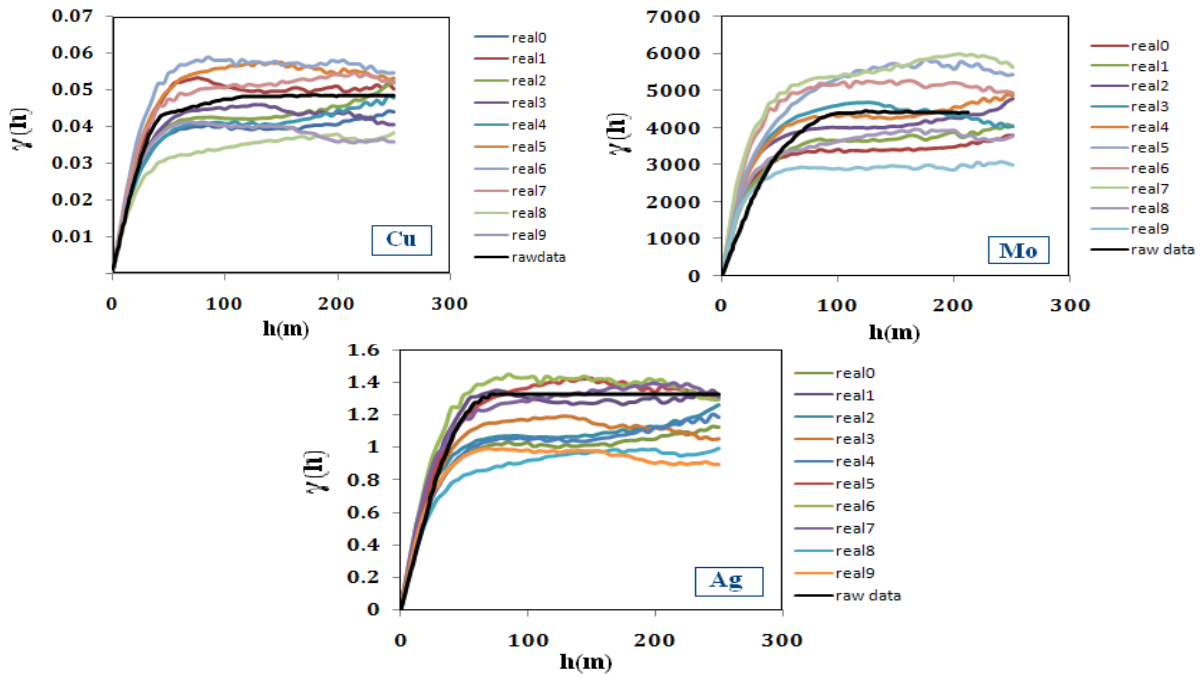
شکل ۷. اعتبار سنجی - مقایسه میانگین‌ها.



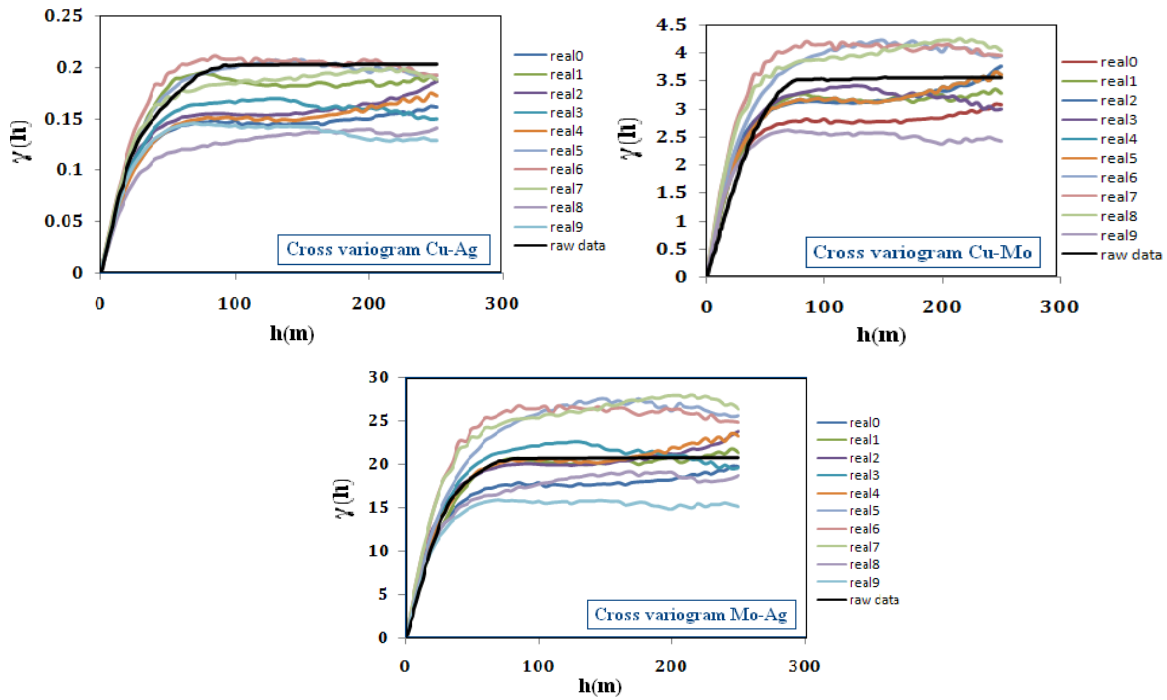
شکل ۸. اعتبار سنجی - مقایسه انحراف معیارها.



شکل ۹. اعتبار سنجی - مقایسه توابع توزیع تجمعی ضرایب همبستگی بین متغیرها.



شکل ۱۰. اعتبار سنجی - مقایسه واریوگرام داده‌ها در برابر شبیه‌سازی‌ها (مس-مولیبدن-نقره).



شکل ۱۱. اعتبار سنجی - مقایسه واریوگرام متقابل داده‌ها در برابر شبیه‌سازی‌ها (مس و مولیبدن-مس و نقره-مولیبدن و نقره).

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق استفاده از روش MAF برای انجام شبیه سازی شرطی یک کانسار چند عنصره (مس-مولیبدن و نقره) ارائه شده است. همان طور که نتایج نشان داد، همبستگی بین متغیرها قبل از انجام شبیه سازی به خوبی حذف شد. بنابراین منجر به انجام سریع تر شبیه سازی ها شد. همچنین اعتبارسنجی نتایج بیانگر بازتولید مناسبی از همبستگی، میانگین، انحراف معیار، واریوگرام های مستقیم و متقابل متغیرها می باشد. بر این اساس روش MAF توانست به عنوان روش کارایی در انجام شبیه سازی های کانسارهای چند عنصره مورد استفاده قرار گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

برخود لازم می دانیم از جناب آقای دکتر خاویر امری به دلیل کمک های بی دریغشان در انجام این تحقیق و خانمها مهندس ثریا فروغی و دکتر آسیه حکمتو آقای حسن رضایی به دلیل همکاری های صمیمانه شان نهایت تشکر و قدردانی را بنماییم.

منابع

- [6] Boucher, A., Dimitrakopoulos, R., *Block Simulation of Multiple Correlated Variables*. Mathematical Geosciences, 2009. 41(2): p. 215-237.
- [7] Emery, X., Ortiz, J.M., *Enhanced coregionalization analysis for simulating vector Gaussian random fields*. Comput. Geosci., 2012. 42: p. 126-135.
- [8] Rondon, O., *Teaching Aid: Minimum/Maximum Autocorrelation Factors for Joint Simulation of Attributes*. Mathematical Geosciences, 2012. 44(4): p. 469-504.
- [9] Desbarats, A.J., Dimitrakopoulos, R., *Geostatistical simulation of regionalised pore-size distribution using min/max autocorrelation factors*. Mathematical Geology, 2000. 32(8): p. 919-942.
- [10] Afzal, P., Fadakar, Y., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., Asadi Haroni, h., *Application of power-spectrum-volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran*. Journal of Geochemical Exploration, 2012: p. 131-138.
- [11] Vargas-Guzmán, A., Dimitrakopoulos, R., *Computational properties of min/max autocorrelation factors*. Computers & Geosciences, 2003. 29(6): p. 715-723.
- [12] Emery, X., Ortiz, J.M., *Two approaches to direct block-support conditional co-simulation*. Computers & Geosciences, 2011. 37(8): p. 1015-1025.
- [13] Li, S., Dimitrakopoulos, R., Scott, J., Dunn, D., *Quantification of Geological Uncertainty and Risk Using Stochastic Simulation and Applications in the Coal Mining Industry*. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, 2009. 14: p. 253-259.
- [14] Rondon, O., Tran, T., *Multivariate Simulation Using Min/Max Autocorrelation Factors: Practical aspect and case studies in the Mining Industry*. Geostats, 2008. 1: p. 267-278.
- [15] Riquelme, R., Caceres, A., Emery, X., Zapata, S., *Spatial Prediction Using Minimum/Maximum Autocorrelation Factors and Multigaussian Kriging: Case Study in Mining Industry*. Ninth International Geostatistics Congress, Oslo, Norway, 2012.
- [1] Dimitrakopoulos, R., Fonseca, M B., *Assessing risk in grade-tonnage curves in a complex copper deposit, northern Brazil, based on an efficient joint simulation of multiple correlated variables*. Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries (Southern African Institute of Mining and Metallurgy: Marshalltown). 2003: p. pp 373-382.
- [2] Lopes, J.A., et al., *Risk quantification in grade-tonnage curves and resource categorization in a lateritic nickel deposit using geologically constrained joint conditional simulation*. Journal of Mining Science, 2011. 47(2): p. 166-176.
- [3] Emery, X., Ortiz, J.M. and Rodriguez, J.J., *Quantifying uncertainty in mineral resources by use of classification schemes and conditional simulations*. Mathematical Geology, 2006. 38(4): p. 445-464.
- [4] Boucher, A., Dimitrakopoulos, R., *Multivariate Block-Support Simulation of the Yandi Iron Ore Deposit, Western Australia*. Mathematical Geosciences, 2012. 44(4): p. 449-468.
- [5] Boucher, A., Dimitrakopoulos, R., *A new efficient joint simulation framework and application in a multivariable deposit, in Orebody Modelling and Strategic Mining Planning, second edition (ed: R Dimitrakopoulos)*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne, 2007: p. pp 345-354.