

(مقاله پژوهشی)

بررسی عملکرد زنجیره مارکوف تعمیم‌یافته در شبیه‌سازی متغیرهای گسسته در یک مطالعه موردی

میترا محمودی^۱، عنایت‌الله رنجینه خجسته^{۱*}، یوسف شرقی^۱

^۱ - دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

(دریافت: دی ۱۳۹۹، پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۰)

چکیده

مدل‌سازی ناهمگونی رخساره‌های زمین‌شناسی نقشی مهم در شناسایی موقعیت قرارگیری رخساره‌ها ایفا می‌کند. استفاده از روش‌های تخمین و شبیه‌سازی زمین‌آماري مبتنی بر واریوگرام به دلیل دقت بالا و لحاظ کردن عدم قطعیت مدل‌ها، امروزه کاربردهای مؤثر و چشمگیری در مدل‌سازی نهشته‌های معدنی داشته‌اند. با توجه به خطی بودن تخمین‌گرهای مرسوم زمین‌آماري، مدل‌سازی فضایی ویژگی‌های رخساره‌ها با کاستی‌هایی همراه است. الگوریتم شبیه‌سازی شاخص پی‌درپی (SIS) روشی محبوب و پرکاربرد در حیطه مدل‌سازی رخساره‌ها است که بر پایه‌ی آنالیز ساختاری متغیر شاخص و مبتنی بر برآورد تابع توزیع احتمال محلی با کمک کریجینگ شاخص اجرا می‌شود. این روش نیز زمانی که حجم داده‌های اولیه پایین است عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهد. روش زنجیره مارکوف تعمیم‌یافته (GCMC) یکی از مناسب‌ترین روش‌های زنجیره مارکوف در شبیه‌سازی متغیرهای گسسته در نهشته‌های رسوبی است. این روش برای شبیه‌سازی از روابط بین کلاسی و احتمالات گذار استفاده می‌کند. در این تحقیق از سه روش تخمین کریجینگ شاخص، روش‌های شبیه‌سازی SIS و GCMC در مدل‌سازی واحدهای کربناته یک مقطع انتخابی از نهشته آهک ارشتان بستان آباد استفاده شده است. در ادامه نتایج حاصل از هر سه روش باهم مقایسه شده و میزان بازتولید مقادیر نسبت حجمی و واریوگرام‌ها مورد بحث قرار گرفت. در روش کریجینگ شاخص روند عمومی قرارگیری کلاس‌ها به‌خوبی تولید شده، اما هموارشدگی به‌صورت واضح در مقطع دیده می‌شود. در نتایج GCMC نحوه تولید الگوها نسبت به دو روش دیگر انطباق بهتری با واقعیت زمین‌شناسی منطقه دارد. این تحقیق نشان می‌دهد که روش SIS در تولید الگوها عملکرد ضعیف‌تری نسبت به GCMC داشته و الگوهای تولیدی متفاوت از وضعیت واقعی لایه‌بندی بوده و پراکندگی بیشتری از خود نشان می‌دهند. با توجه به نتایج منطقی و پیاده‌سازی آسان، روش GCMC ابزاری مناسب جهت پیش‌بینی اولیه و مدل‌سازی کلاس‌ها در محیط‌های رسوبی است.

کلمات کلیدی:

زمین‌آمار، متغیر گسسته، شبیه‌سازی شاخص پی‌درپی، زنجیره مارکوف جفت‌شده تعمیم‌یافته (GCMC)، احتمالات گذار

* عهده‌دار مکاتبات: khojasteh@sut.ac.ir

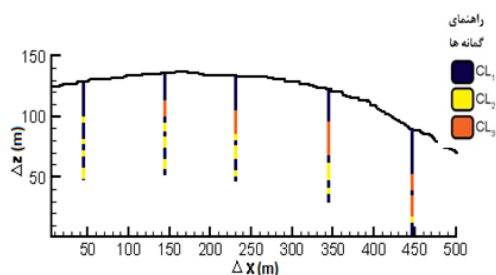
۱- مقدمه

پیش‌بینی دقیق زمین‌شناسی و تعیین ناهمگونی‌های زیرسطحی در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله مدل‌سازی ذخایر آهنی اهمیت بسزایی دارد و گام مهمی قبل از هر تصمیم مهندسی در مورد برنامه‌های اکتشافی در داخل یا اطراف مناطق مورد نظر است. شناسایی و تفسیر ناهمگنی‌های زیرسطحی به‌ویژه رخساره‌های سنگی، در بازسازی شکل هندسی ذخیره معدنی، در اکتشاف معدن نقشی اساسی دارد [۱]. از طرفی به دلیل محدودیت‌های فنی و اقتصادی، برنامه‌های حفاری اکتشافی متراکم و نمونه‌برداری جامع برای اندازه‌گیری خواص متغیرها در منطقه مورد نظر امکان‌پذیر نیست. از این رو با مدل‌سازی رخساره‌ها و تعیین نحوه قرارگیری آن‌ها و شناسایی لایه‌های مختلف، میزان پتانسیل ماده معدنی تخمین زده می‌شود [۲]. به همین منظور روش‌های متنوعی برای مدل‌سازی متغیرهای گسسته بخصوص ویژگی‌های رخساره‌های سنگی ارائه شده‌اند که از بهترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های زمین‌آماري اشاره کرد؛ زیرا اجرای روش‌های زمین‌آماري بستر مناسبی را برای ایجاد مدل‌های دقیق و درعین‌حال قابل ارزیابی از نظر عدم اطمینان فراهم می‌آورد [۳]. از روش‌های زمین‌آماري کاربردی در مدل‌سازی متغیرهای گسسته می‌توان به روش‌های شبیه‌سازی شاخص پی‌درپی^۱، شبیه‌سازی چند گوسی^۲، شبیه‌سازی شیء مبنا^۳، شبیه‌سازی چند نقطه‌ای^۴، شبیه‌سازی زنجیره مارکوف^۵ و غیره اشاره کرد.

جهت تخمین و شبیه‌سازی رخساره‌های زیرسطحی روش‌های زمین‌آماري مرسوم (کریجینگ و شبیه‌سازی شاخص) بر پایه واریوگرام قابل استفاده است. این روش‌ها به دلیل خطی بودن تخمین‌گرهای کریجینگ، در بررسی روابط بین کلاسی و مدل‌سازی فضایی ویژگی‌های رخساره‌ها مخصوصاً در لایه‌هایی با وسعت زیاد، توالی نامتقارن کلاس‌ها، روابط بین دو کلاس مجاور هم^۶ و نیز همبستگی متقابل بین چندین نوع رخساره (کلاس)^۷ دارای کاستی‌هایی هستند [۴-۹]. در مقابل روش‌های نوین زمین‌آماري زنجیره مارکوف که به‌افتخار "آندری مارکوف" ریاضیدان اهل روسیه این‌گونه نام‌گذاری شده‌اند، در شبیه‌سازی متغیرهای گسسته نهشته‌های رسوبی، در علوم زمین کاربرد پیدا کرده‌اند. عملکرد این روش‌ها بر پایه‌ی

محاسبه ماتریس‌های احتمال گذار^۸ با توجه به جهت و تغییرات مکانی بین کلاس‌ها در جهات مختلف است. از طرفی اعمال این روش‌ها و نیز تفسیر نتایج حاصله آسان‌تر از روش‌های بر پایه واریوگرام است [۱۰، ۱۱]. استفاده از روش زنجیره مارکوف اولین بار توسط کرومبین برای شبیه‌سازی توالی چینه‌شناسی در یک بعد انجام شد [۱۱]. کارل و فاگ با توجه به کاستی‌های کریجینگ در بازتولید ویژگی‌های رخساره‌ها، با ترکیب احتمالات گذار و مدل‌های زنجیره مارکوف با روابط کریجینگ شاخص، روش شبیه‌سازی زمین‌آماري مبتنی بر احتمال گذار را ارائه کردند که رابطه‌ای بین کریجینگ شاخص و زنجیره‌های مارکوف، جهت مدل‌سازی سبب‌دی ساختارهای زیرسطحی بود [۵]. آن‌ها همچنین نرم‌افزار TPROGS^۹ را جهت مدل‌سازی سبب‌دی ساختارهای زمین‌شناسی ارائه کردند [۱۲]. الفکی و دکنگ مدل زنجیره مارکوف کوپل شده دوبعدی^{۱۰} (CMC) را ارائه کردند که با شرطی کردن زنجیره‌های تشکیل‌شده به داده‌های چاه‌های اکتشافی، دقت شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد که البته دارای مشکلات کم تخمینی و بیش تخمینی در کلاس‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر بود [۱۳]. لی و چانگ با ارائه مدل زنجیره مارکوف سه‌گانه^{۱۱} با شرطی کردن به نمونه‌ها و تغییر مسیر زنجیره‌های تشکیل‌شده افقی و قائم، علاوه بر افزایش سرعت محاسبات، عدم قطعیت در مدل‌سازی توصیف لیتولوژی را کاهش دادند [۱۴]. پارک و همکاران روش CMC را به مدل سبب‌دی ارتقا دادند [۱۵]. یون گی موون و همکاران از این روش برای مدل‌سازی سبب‌دی ساختارهای زیرسطحی جهت بررسی الگوی آلودگی خاک‌های اطراف باطله‌های معدنی استفاده کردند [۱۶]. پارک و همکاران الگوریتم اصلی CMC را بازنویسی کرده و نام آن را به زنجیره مارکوف تعمیم‌یافته^{۱۲} (GCMC) تغییر دادند [۱۰]. در الگوریتم جدید اجرای آن به‌جای سطر به سطر، در یک مسیر تصادفی انجام می‌پذیرد. سپس خصوصیات ناپایی احتمالی در لایه‌ها به‌وسیله محاسبه ماتریس احتمالات گذار در جهات مختلف، در الگوریتم اصلی اعمال می‌شود [۳، ۹]. هان و همکاران در مدل‌سازی زمین‌آماري ناهمگونی‌های زیرسطحی و بررسی میزان نشت گاز دی‌اکسید کربن از پوش‌سنگ‌ها، از روش‌های شبیه‌سازی GCMC و SIS استفاده کردند [۱۷]. دنگ و همکاران با استفاده از روش برآورد حداکثر درست‌نمایی^{۱۳} (MLE)، الگوریتم GCMC را تغییر داده و از این مدل اصلاح‌شده جهت مدل‌سازی

سیلیس به واحدهای مختلف متمایز شده اند. میزان کانی های رسی و مقدار سیلیس باعث تغییر رنگ در واحدهای مورد نظر شده، به نحوی که در نمونه های دستی این واحدها با اختلاف رنگ از هم قابل تفکیک هستند. با توجه به اختلاف در ترکیب واحدهای موجود، منطقی است که ابتدا این واحدها از هم تفکیک شده و در مرحله بعد نسبت به تعیین خصوصیات عیاری داخل هر واحد اقدام شود. در این مطالعه یکی از پروفیل های حفاری موجود در بلوک C این ذخیره انتخاب و نسبت به مدل سازی واحدهای موجود در آن اقدام شد. مقطع پروفیل منتخب در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مقطع، ۵ گمانه اکتشافی به فاصله تقریبی صد متر و متوسط عمق ۷۷ متر حفر شده که سه واحد آهکی متفاوت در آن ها قابل تشخیص است. این واحدها بر روی یک لایه شیلی قرار گرفته اند. واحدهای آهکی در این نهشته بر اساس تفاوت در ترکیب شیمیایی و رنگ به صورت کلاس های یک (cl_1)، دو (cl_2) و سه (cl_3) تفکیک شده اند. کلاس یک فراوان ترین نوع سنگ آهک در این ذخیره بوده و در مغزه ها به رنگ کرم دیده می شود. متوسط عیار CaO در این نوع سنگ آهک بالا و حدود ۵۵ درصد و عیار Al_2O_3 و SiO_2 در آن از دیگر کلاس ها کمتر است. سنگ آهک کلاس دوم به دلیل وجود کانی های رسی از نوع کلریت به رنگ سبز زیتونی بوده، متوسط عیار CaO در آن به طور متوسط ۵۲ درصد و در مقابل عیار Al_2O_3 که بخش اصلی تشکیل دهنده کانی های رسی است و عیار SiO_2 که بخش اصلی کانی های سیلیکاته از نوع چرت را تشکیل می دهد افزایش می یابد. متوسط عیار CaO در کلاس ۳ حدود ۵۰ درصد و پایین تر از انواع دیگر است. رنگ آن خاکستری و به دلیل وجود ناخالصی هایی از نوع چرت و سنگ آهک چرتی، میزان SiO_2 این کلاس از دیگر بخش های آهکی بیشتر است. درصد حجمی کلاس یک در گمانه ها ۵۲/۷ درصد، کلاس دو ۲۴/۹ درصد و کلاس سه ۲۲/۴ درصد است.



شکل ۱- شکل شماتیک از نحوه قرارگیری گمانه ها و واحدهای مختلف

چینه شناسی برای اهداف ژئوتکنیکی استفاده کردند [۱۸]. در مطالعه حاضر برای مدل سازی واحدهای آهکی، از روش تخمین کریجینگ شاخص، روش شبیه سازی SIS و روش شبیه سازی GCMC ارائه شده توسط پارک و همکاران استفاده شده است. پیش از این کارایی روش GCMC در مقایسه با روش SIS برای مدل سازی الگوهای موجود در رسوبات نامتراکم با داده های کم و پراکنده و نیز گونه های سنگی بررسی شده است [۱۰، ۹]. به همین دلیل این تحقیق برای پاسخ به این سؤال که آیا اعمال الگوریتم GCMC به عنوان یکی از روش های کارآمد زنجیره مارکوف عملکرد مناسب تری در مدل سازی رخساره های سنگی همراه با روش SIS و کریجینگ شاخص دارد یا خیر، انجام شد. در این راستا الگوریتم GCMC برای شبیه سازی رخساره ها در یک نهشته آهک استفاده شده و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از اعمال روش کریجینگ شاخص و شبیه سازی SIS مقایسه شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

نهشته آهک ارشتناب به سن زمین شناسی میوسن در شمال غرب بستان آباد واقع شده است [۱۹]. سنگ آهک ارشتناب به منظور تأمین نیازهای کارخانه تولید آلومینا از نفلین سینیت رزگاه (سراب) مورد اکتشاف و ارزیابی قرار گرفته است. سنگ آهک در پروسه تولید آلومینا از نفلین سینیت و محصولات جانبی آن نقش اساسی دارد. سنگ آهک در سه مرحله سینتراسیون، سیلیس زدایی عمیق و تولید سیمان از گل بلیت که از فرایندهای تولید آلومینا از نفلین سینیت هستند، دارای نقش مهم و اثرگذاری است. با توجه به تنوع لیتولوژی محدوده ارشتناب به چهار بلوک A، B، C و D تقسیم شده است. با توجه به کمیت و کیفیت کانسنگ بلوک C، اولویت مطالعات به این بلوک داده شده است. به منظور اکتشاف آهک در بلوک C محدوده ارشتناب، شبکه حفاری به صورت ۱۰۰×۱۰۰ متر طراحی و اجرا شده است. مقدار سیلیس و اکسید آهن موجود ارشتناب لایه های کربناته مختلف با کیفیت سنگ متفاوت وجود دارد. با توجه به اهمیت میزان CaO و ناخالصی های موجود در سنگ آهک در فرایند پخت نفلین سینیت، لایه های آهک موجود در کانسار ارشتناب بر اساس میزان CaO و درصدهای مختلف رس و

۲-۲- مفهوم زنجیره مارکوف

در حالت کلی مسائل زنجیره مارکوف با یک ماتریس احتمال گذار توصیف می‌شوند. به صورتی که تعداد احتمالات گذار به فراوانی گذارها از یک حالت بخصوص به حالتی دیگر مرتبط است (در مطالعه حاضر هر رخساره یک حالت در نظر گرفته می‌شود). به این صورت که تعداد گذار از حالت i به j در یک سیستم شمارش شده و از رابطه (۱) مقادیر احتمالات گذار حالت‌ها به دست می‌آید.

$$P_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k=1}^n T_{ik}} \quad (1)$$

در رابطه بالا P_{ij} مقدار احتمال گذار از حالت i به حالت j ، T_{ij} مقادیر شمارش شده گذار از حالت i به حالت j و n تعداد کل حالات موجود در سیستم است. به‌طور مثال در صورت وجود ۳ حالت یا کلاس در یک سیستم، ۹ احتمال گذار محاسبه خواهد شد. این احتمالات گذار به‌صورت یک ماتریس مربعی شکل در رابطه (۲) نشان داده می‌شوند.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & p_{lk} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & \dots & \dots & \dots & p_{nk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این ماتریس p_{lk} احتمال گذار از حالت S_l به S_k بوده و n تعداد حالات سیستم (تعداد کلاس‌ها یا رخساره‌ها) را نشان می‌دهد؛ بنابراین احتمال گذار از حالت S_l به $S_1, S_2, \dots, S_n$ در ردیف اول به‌صورت p_{1l} نشان داده می‌شود. احتمال گذار بقیه حالات نیز به همان صورت خواهد بود [۱۳].

۲-۳- تعریف شاخص‌ها و تغییر سیستم مختصاتی

برای مدل‌سازی ساختارهای تغییرپذیری متغیرهای گسسته (یا کلاس‌ها)، با روش‌های مدل‌سازی IK ، SIS و $GCMC$ ، یک متغیر شاخص به‌صورت رابطه (۳) برای کلاس k ام تعریف شده و برای نقاط نمونه تخصیص داده می‌شود.

$$I(x, k) = \begin{cases} 1, & \text{اگر } z(x) = k \\ 0, & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (3)$$

به عبارت دیگر، در نقاط نمونه‌برداری، مقدار متغیر شاخص در صورت وجود یک کلاس، یک و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد بود. پس از استخراج شاخص‌ها و تبدیل مختصات به مختصات چینه‌شناسی، واریوگرام‌های

شاخص محاسبه شده و متعاقب آن کریجینگ و شبیه‌سازی شاخص اعمال شدند. در سیستم‌های رسوبی که دارای چین‌خوردگی بوده و جابجایی‌هایی در اثر شکستگی‌ها به وجود می‌آید، برای یافتن یک مدل تغییرات بهتر و شبکه پیش‌بینی مناسب به‌خصوص برای سیستم‌های رسوبی که کانی‌سازی در امتداد لایه دارای تداوم است، اجرای یک سیستم مختصات چینه‌شناسی توصیه می‌شود [۲۰]. از این‌رو مختصات اولیه کارتیزین به مختصات چینه‌شناسی یا باز شده^{۱۴} تبدیل می‌شود. در مدل‌سازی دوبعدی نهشته‌های رسوبی به نظر می‌رسد فقط تبدیل مختصات قائم به مختصات چینه‌شناسی کافی باشد که اعمال این تغییرات از رابطه (۴) انجام می‌گیرد [۲۰]:

$$Z_{relative} = \frac{Z_i - Z_{bottom}}{Z_{top} - Z_{bottom}} \cdot T_{average} \quad (4)$$

در این رابطه Z_{bottom} و Z_{top} به ترتیب پایین‌ترین و بالاترین نقطه لایه و $T_{average}$ متوسط ضخامت لایه مزبور است [۲۰]. در این مطالعه مختصات قائم به مختصات چینه‌ای تبدیل شد و تمامی محاسبات مربوط به واریوگرام‌ها و احتمالات گذار در این مختصات انجام گرفت و سپس نتایج حاصله با حالت معکوس رابطه (۴) به مختصات اولیه برگردانده شد.

۲-۴- روش‌های تخمین و شبیه‌سازی

۲-۴-۱- روش تخمین کریجینگ شاخص چندگانه

کریجینگ یک روش زمین‌آماري غیر پارامتری است که می‌تواند برای تخمین تابع توزیع تجمعی شرطی^{۱۵} (ccdf) کلاس‌های مورد مطالعه، با شرطی کردن به داده‌های اطراف بکار رود [۲۱]. پس از مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر شاخص با استفاده از واریوگرام شاخص، می‌توان مقادیر متغیر گسسته را در نقاط مجهول با استفاده از کریجینگ شاخص پیش‌بینی کرد. احتمال حضور کلاس $Z(u)$ در سلول u با اعمال کریجینگ ساده به‌صورت رابطه (۵) خواهد بود:

$$I^*(u, k) - E\{I(u, k)\} = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(u) (I(u_{\alpha}, k) - E\{I(u_{\alpha}, k)\}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $E\{I(u_{\alpha}, k)\}$ احتمال حاشیه‌ای کلاس k است. با داشتن برآورد شاخص اندازه‌گیری احتمال وقوع

برای همه کلاس های موجود در هر گره یا سلول، تابع چگالی محلی همه کلاس های موجود را می توان محاسبه کرد. کلاس با بالاترین متغیر شاخص برآورد شده (به عنوان مثال با بیشترین احتمال وقوع) می تواند به عنوان کلاس تخمینی (محتمل ترین) به آن سلول یا گره اختصاص یابد.

۲-۴-۲- روش شبیه سازی SIS

SIS یکی از پرکاربردترین روش های زمین آماری در زمینه مدل سازی متغیرهای گسسته است که کارایی خوبی در بازتولید واریوگرام ها و نیز تعیین ناهمگونی های زیرسطحی دارد. عملکرد SIS متکی بر نتایج کریجینگ شاخص است به طوری که در هر نقطه از شبکه مقدار تابع چگالی احتمال شرطی محاسبه می شود. این الگوریتم با ترکیب الگوی شاخص و نیز توزیع غیر پارامتری متغیرها به صورت پی در پی اجرا می شود [۲۱]. به طوری که پس از انتخاب تصادفی یک گره از شبکه و با توجه به بازه همسایگی تعریف شده، مقدار تابع چگالی احتمال شرطی در هر گره با در نظر گرفتن داده های اصلی و نیز مقادیر شبیه سازی شده قبلی محاسبه می شود و به این ترتیب تمام گره های شبکه شبیه سازی می شوند. در نهایت به میزان دلخواه مقادیر تحقق^{۱۶} با میزان احتمال برابر ایجاد می شود که در نهایت جهت ارزیابی ناهمگونی های منطقه مورد نظر به کار می رود [۲۲]. شبیه سازی SIS کنترل ساختاری کمتری را فراهم می کند. در خروجی های SIS انتقال های زمین شناسی بین کلاس های مختلف تا حدودی غیرواقعی هستند و همبستگی متقابل بین کلاس های مختلف در نظر گرفته نمی شود [۲۳].

۲-۴-۳- روش شبیه سازی GCMC

عملکرد بسیاری از روش های زمین آماری مرسوم جهت توصیف ساختارهای زیرسطحی و ناهمگونی های ذخایر، مبتنی بر محاسبه و تفسیر واریوگرام ها است. در مقابل روش های زمین آماری زنجیره مارکوف که بر پایه ی احتمالات شرطی انجام می گیرند روابط بین کلاسی را نیز در محاسبات لحاظ می کنند و تفسیر نتایج آن ها آسان تر از واریوگرام ها و توابع کوواریانس است [۱۳]. این خصوصیت باعث تولید الگوهای مطلوب تر در تحقق های شبیه سازی شده و مقاطع واقعی تری را در شبیه سازی های زمین شناسی ارائه می دهد که از این حیث برتری نسبی نسبت به روش SIS دارد. در روش CMC که توسط الفکی

معرفی شد دوزنجیره مستقل از هم در جهات افقی و قائم تشکیل می شود به طوری که این زنجیره ها به داده های چاه های اکتشافی اطراف شرطی می شوند و احتمال حضور هر یک از حالات یا ویژگی های زمین شناسی در سلول مجهول به دست می آید [۱۳]. با وجود اینکه مدل CMC مدل جدید و کارآمدی در علوم زمین بود اما کاستی ها و معایبی نیز داشت. کلاس ها یا متغیرهای گسسته مورد مطالعه پس از شبیه سازی، به صورت مایل در جهت حرکت الگوریتم ظاهر می شوند به خصوص زمانی که تعداد داده های شرطی کننده ناکافی باشد، اگر کلاس یا متغیری مربوط به بخش کوچکی از منطقه مورد مطالعه باشد در نتایج شبیه سازی یا حذف می شود و یا بسیار ناچیز شمرده می شود [۱۴، ۱۰]. پارک علت مایل بودن یا جهت دار بودن تصاویر را، سطر به سطر اجرا شدن الگوریتم CMC عنوان کرد [۱۰]. سپس وی الگوریتم را تعمیم داد و مسیر تصادفی را برای شروع و اجرای الگوریتم تعریف کرد. در روش CMC محاسبه احتمالات گذار در جهت قائم از روی داده ها انجام می گیرد، سپس احتمالات گذار افقی طبق قانون والتز^{۱۷} محاسبه می شود [۴]. قانون والتز بیان می کند توالی رخساره هایی که در توالی های رسوبی عمودی مشاهده می شوند نیز باید در جهت افقی و در مقیاس دیگری رسوب کنند؛ اما در روش GCMC جهت سهولت محاسبه احتمالات گذار، ابتدا با استفاده از داده های در دسترس، سلول های خالی با روش نزدیک ترین همسایگی تخمین خورده و بدین ترتیب تصویر آموزشی از منطقه تهیه می شود، سپس مقادیر احتمالات گذار در جهات اصلی در فاصله گام اول از این نقشه یا تصویر آموزشی اولیه استخراج می شوند [۱۰]. در محاسبه ماتریس احتمالات گذار بخصوص در جهت قائم، گاهی به علت یکسان نبودن فاصله گام ها یا تعداد آن ها و یا نوع توالی چینش شناسی، مقادیر ماتریس محاسبه شده در دو جهت مخالف هم ممکن است بنا به دلایلی یکسان نباشند [۹]. این اختلاف در نمودارهای احتمالات گذار ترنزیوگرام ها^{۱۸} (اولین بار توسط لی این گونه نامیده شد [۸]) به صورت تعداد پیک های متفاوت نیز دیده می شود [۲۴].

در بازنویسی دوباره رابطه GCMC، این الگوریتم با اعمال تغییراتی ارتقا پیدا کرد. در رابطه جدید، نامتقارن بودن یا غیر همسان بودن مقادیر احتمالات در دو جهت مخالف هم یا غیر ایستایی جهتی، لحاظ شد [۹]. این الگوریتم در مدل سازی متغیرهای گسسته و ناهمگونی های

داده‌های شرطی کننده در جهات اصلی جغرافیایی است. توضیح کلی روش GCMC به تفصیل در [۱۰، ۹] آمده است.

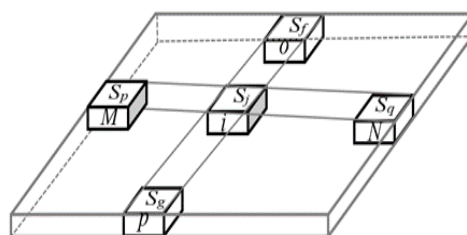
۲-۵- اعتبار سنجی نتایج

در شبیه‌سازی‌های زمین‌آمار، تحقق‌های مختلف تولیدشده امکان ارزیابی عدم قطعیت را فراهم می‌کند. انتخاب بهترین تحقق یا بهترین مدل بر اساس مقایسه معیارها یا اندازه‌های مربوط به نتایج مدل با اندازه‌های مدل‌های مورد انتظار می‌تواند انجام گیرد [۲۵]. نتایج کلیه شبیه‌سازی‌های عددی بایستی هم از لحاظ تفاسیر زمین‌شناسی و نیز معیارهای آماری از جمله بازتولید هیستوگرام‌ها و بازتولید واریوگرام‌ها با مدل‌های مورد انتظار همخوانی داشته باشند [۲۵]. در مطالعه حاضر پس از بررسی تحقق‌های تولیدشده، بهترین تحقق‌ها بر اساس بازتولید مقادیر نسبت حجمی، بازتولید واریوگرام‌ها و بازتولید ترنزیوگرام‌های مربوط به رخساره‌های سنگی بررسی گردیدند. جهت انتخاب بهترین تحقق از دو روش در این مطالعه استفاده گردید که هر دو روش نتایج یکسانی داشتند. یکی از روش‌های انتخاب بهترین تحقق، روش نرخ انحراف^{۱۹} (DR) است که توسط رنجینه خجسته پیشنهاد شده است [۲۶]. در این روش برای تمام تحقق‌ها، ابتدا نرخ انحراف کلاس با بیشترین نسبت حجمی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه‌شده و تحقق‌هایی که کمترین DR را دارند انتخاب می‌شوند.

$$D.R. = \frac{|P_O - P_E|}{P_E} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، P_O و P_E به ترتیب مقدار نسبت حجمی مشاهده‌شده (نتیجه شبیه‌سازی) و نسبت حجمی مورد انتظار (مقدار داده اولیه) است. در استفاده از این روش معیار مقایسه کلاسی است که بیشترین نسبت حجمی را در داده‌های اولیه دارد، سپس از میان چندین تحقق انتخاب‌شده، DR مربوط به کلاس دوم از لحاظ مقدار نسبت حجمی داده‌های اولیه، به عنوان معیار انتخاب در نظر گرفته می‌شود. با توجه به زمان‌بر بودن این روش، در این نوشته، رابطه نرخ انحراف وزن‌دار^{۲۰} (Weighted DR) به شرح زیر تعریف شد که با یک‌بار محاسبه آن می‌توان بهترین تحقق‌ها را از بین تحقق‌های موجود به سادگی انتخاب کرد. در رابطه (۹) با توجه به اهمیت کلاس با نسبت حجمی بیشتر، مقادیر

زیرسطحی در مقایسه با روش شبیه‌سازی متداول SIS، عملکرد بهتری دارد مخصوصاً اگر داده‌های کافی در دسترس نباشد. این الگوریتم زمان کمی برای اجرا نیاز دارد و نحوه اعمال آن بر روی داده‌ها ساده و بدون پیچیدگی است. از این رو ابزاری با کارایی مناسب در مطالعات علوم زمین محسوب می‌شود [۱۰، ۹]. در GCMC تک‌بعدی، با توجه به شکل ۲ احتمال شرطی وقوع حالت S_j در سلول i با وجود حالت S_p در سلول M و S_q در سلول N به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۱۰].



شکل ۲- شکل شماتیک برای محاسبه رابطه زنجیره مارکوف (S_p) حالت سلول M ، S_j حالت سلول i ، S_q حالت سلول N و S_f حالت سلول O و S_g حالت سلول P است [۱۰]

$$Pr(Z_i = S_j | Z_M = S_p, Z_N = S_q) = \frac{-p_{pj}^{M-i} + p_{jq}^{N-i}}{+p_{pq}^{N-M}} \quad (۶)$$

در رابطه بالا f و b به ترتیب بیانگر جهات پسرو و پیشرو در محاسبه احتمالات گذار از سلول‌های معلوم به مجهول و برعکس است. جهت به دست آوردن رابطه دوبعدی GCMC دوزنجیره مستقل از هم تشکیل‌شده در دو جهت افقی و قائم باهم ترکیب می‌شود. رابطه اصلی GCMC دوبعدی با در نظر گرفتن چهار سلول در اطراف سلول مجهول به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود [۱۰]:

$$Pr(Z_i = S_j | Z_M = S_p, Z_N = S_q, Z_O = S_f, Z_P = S_g) = \frac{-p_{pj}^{\delta_w M-i} + p_{jq}^{\delta_e N-i} - p_{fj}^{\delta_n O-i} + p_{fg}^{\delta_s P-i}}{\sum_k^n -p_{pk}^{\delta_w M-i} + p_{kq}^{\delta_e N-i} - p_{fk}^{\delta_n O-i} + p_{kg}^{\delta_s P-i}} \quad (۷)$$

$$\delta_d = \begin{cases} 0 & \phi_d > \lambda_{max}^d \\ 1 & \phi_d \leq \lambda_{max}^d \end{cases}$$

در رابطه (۷) $j=1,2,\dots,n$ بیانگر تعداد حالات سیستم (تعداد کلاس‌ها) بوده δ_d و ϕ_d نشان‌دهنده فاصله از

۳-۲- اعمال روش کریجینگ شاخص چندگانه و

شبیه سازی شاخص پی در پی

کریجینگ شاخص با استفاده از نرم افزار Wingslib در محدود مورد تخمین در شبکه ای به ابعاد 50×77 متر اعمال شد. خروجی کریجینگ شاخص احتمال حضور هر کدام از کلاس ها را در سلول مورد تخمین نشان می دهد. کلاسی که بیشترین احتمال حضور را دارد نوع کلاس سلول را تعیین می کند. شبیه سازی SIS در همان شبکه اولیه مورد استفاده کریجینگ شاخص بر روی داده ها پیاده شد. در طی فرایند شبیه سازی ۵۰ تحقق تولید شد. از بین ۵۰ تحقق تولید شده، جهت انتخاب بهترین تحقق ها از هر دو روش تعیین میزان انحراف مقادیر نسبت حجمی از مقادیر واقعی با روابط ۷ و ۸ استفاده شد. نتایج هر دو در انتخاب بهترین نسبت حجمی بازتولید شده یکسان بود و تحقق های ۱۵، ۱، ۱۲ و ۲۶ به عنوان بهترین تحقق با بهترین نسبت حجمی بازتولیدی انتخاب شدند.

در شکل ۴، مقاطع تحقق های انتخابی و نتیجه روش کریجینگ شاخص در مختصات چینه شناسی و در شکل ۵ مقاطع تحقق های ذکر شده و نتیجه کریجینگ شاخص در مختصات واقعی نشان داده شده اند. در روش های شبیه سازی شرطی داده های اولیه در محل اصلی بازتولید می شوند و اگر چنانچه خطای اندکی در این خصوص ایجاد شود معمولاً ناشی از نوع شبکه بندی است [۲۵].

در مقاطع نتایج شبیه سازی به منظور مشخص شدن این ویژگی، محل گمانه های بازتولیدی در هر دو روش SIS و GCMC متمایز شده اند. حداقل معیارهای لازم جهت ارزیابی مدل و قابل قبول بودن تحقق های تولیدی، طبق نظر لیونگتون و همکاران، بررسی بازتولید ساختار فضایی، با محاسبه و رسم واریوگرام های شاخص و نمودارهای احتمالات گذار است [۲۵]. به همین منظور واریوگرام های شاخص تحقق های انتخابی برای هر سه کلاس و نیز واریوگرام شاخص مقادیر تخمین خورده به همراه واریوگرام های شاخص داده های اولیه و مدل های متناسب برازش شده جهت مقایسه و بررسی بیشتر، در شکل ۳ نشان داده شده اند. جهت ارزیابی واریوگرام های بازتولیدی، شکل کلی واریوگرام ها، مقدار اثر قطعه ای، سقف و نیز مقدار شعاع تأثیر بررسی شد.

نسبت حجمی کلاس ها به عنوان وزن در محاسبه میزان انحراف نتایج شبیه سازی از مقادیر اولیه دخالت داده شده اند:

$$W.D.R. = \sum_{i=1}^n P_i |P_i - P_i^*| \quad (9)$$

در این رابطه P_i نسبت حجمی کلاس i و P_i^* نسبت حجمی نتیجه شبیه سازی کلاس i ام است. سپس تحقق مربوط به کمترین مقادیر به عنوان بهترین تحقق ها انتخاب می شود. در این روش مقادیر نسبت حجمی هر کلاس به طور مستقیم در محاسبه اختلاف مقادیر واقعی از شبیه سازی شده مدنظر قرار می گیرد، به طوری که کلاس با بیشترین نسبت حجمی بیشترین تأثیر را در محاسبه خواهد داشت.

۳- نتایج و بحث

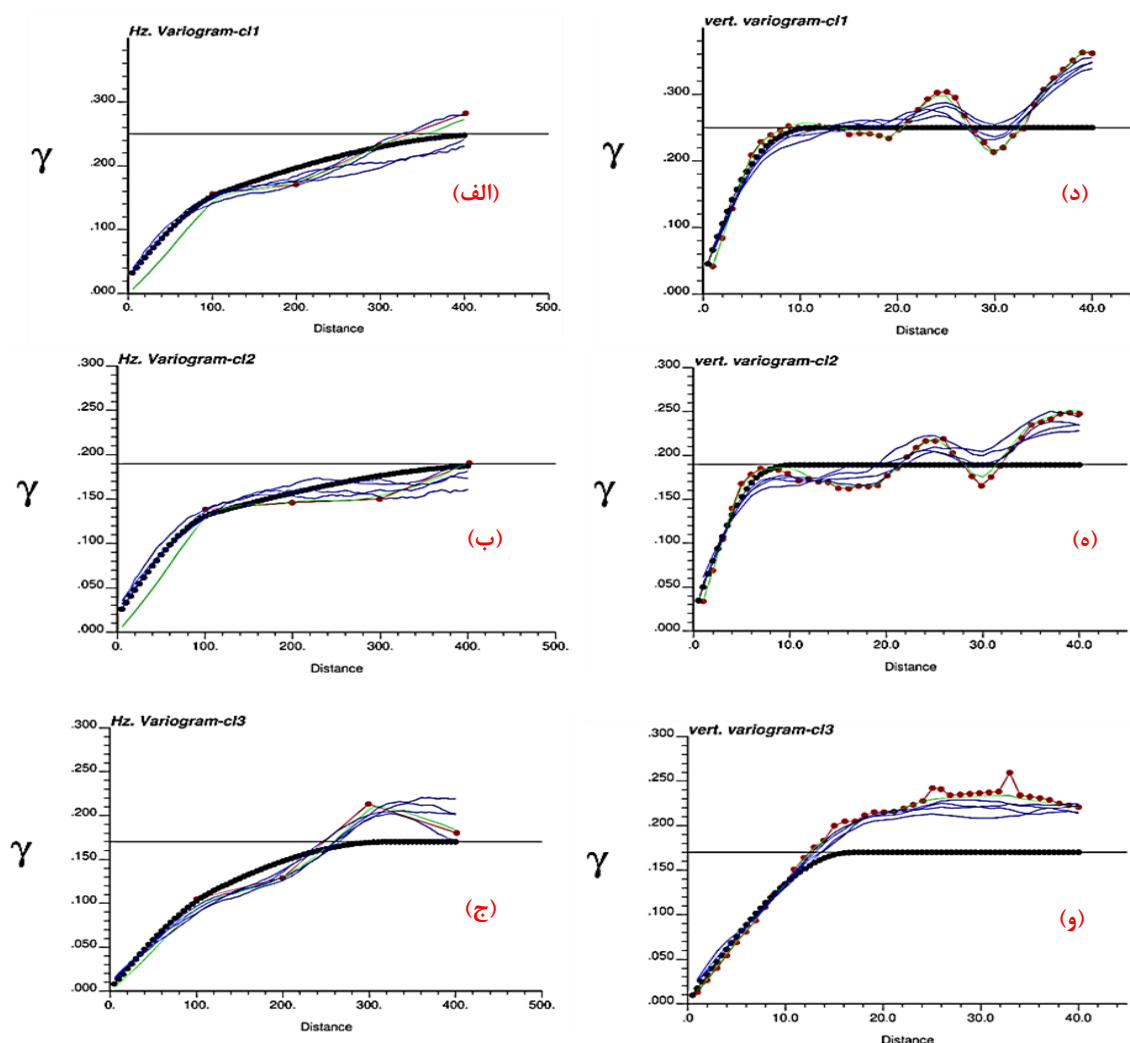
در مطالعه حاضر جهت ایجاد مدل قابل قبول از لحاظ زمین شناسی و بستر مناسب جهت شبکه بندی، ابتدا مختصات دکارتی پنج چاه اکتشافی موجود، به مختصات چینه شناسی طبق رابطه (۴) تبدیل شد. سپس سلول بندی در محدوده تخمین (در شبکه ای با ابعاد سلول به ترتیب ۵ متر در جهت افق و یک متر در جهت قائم) انجام و در ادامه محاسبه واریوگرام ها و احتمالات گذار و نیز شبیه سازی در این مختصات انجام گرفت. در نهایت طبق رابطه (۴) سلول های شبیه سازی شده در مختصات واقعی خود قرار داده شدند.

۳-۱- واریوگرافی و بررسی ساختار فضایی

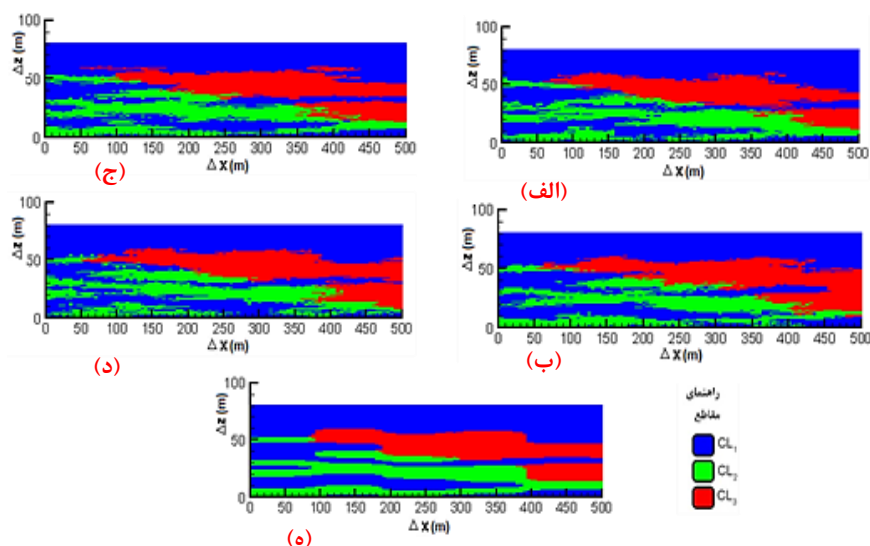
برای ترسیم واریوگرام های تجربی برای هر کدام از کلاس های موجود که قبلاً بر اساس ترکیب شیمیایی و رنگ تعریف شده، از مقادیر شاخص استفاده شد. بدین صورت که در صورت حضور کلاس مورد نظر در محل نمونه برداری مقدار «یک» و در صورت عدم حضور کلاس در آن نقطه، مقدار «صفر» به آن اختصاص یافت. در ادامه، واریوگرام های شاخص هر کلاس در جهات افقی و عمودی محاسبه شدند. واریوگرام های شاخص تجربی و مدل های برازش شده، در دو جهت اصلی افقی و عمودی در شکل ۳ به همراه واریوگرام های شاخص نتایج شبیه سازی نشان داده شده اند. پارامترهای مربوط به مدل های برازش شده در جدول ۱ آورده شده اند.

جدول ۱- پارامترهای مدل کروی چند ساختاره برازش شده در جهات قائم و افقی

	شعاع تأثیر سوم (متر)	شعاع تأثیر دوم (متر)	شعاع تأثیر اول (متر)	سقف	آستانه سوم	آستانه دوم	آستانه اول	اثر قطعه‌ای	کلاس‌ها
جهت قائم	۱۱	۸	۷	۰/۲۵	۰/۱۲۵	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۲۵	Cl1
	-	۱۰	۷	۰/۱۸۹	-	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	۰/۰۱۹	Cl2
	۱۸	۱۶	۱۵	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	Cl3
جهت افقی	۴۵۰	۴۰۰	۱۱۰	۰/۲۵	۰/۱۲۵	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۲۵	Cl1
	-	۴۵۰	۱۱۰	۰/۱۸۹	-	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	۰/۰۱۹	Cl2
	۳۲۰	۳۱۰	۱۲۰	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	Cl3

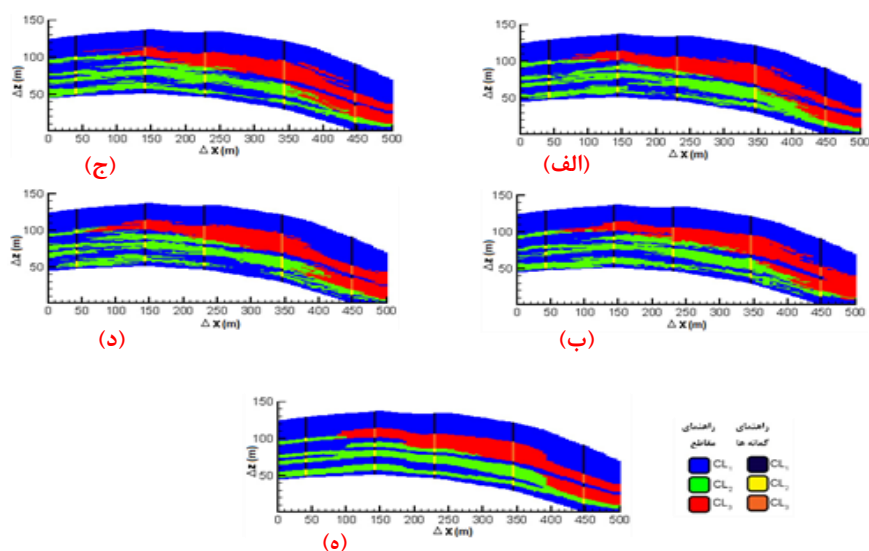


شکل ۳- واریوگرام‌های شاخص داده‌های اولیه (به رنگ قرمز)، مدل‌های کروی برازش شده (خطوط مشکی)، واریوگرام شاخص بازتولید شده روش کریجینگ (خطوط سبز رنگ) و واریوگرام‌های شاخص بازتولید شده تحقق‌های منتخب روش SIS (خطوط آبی رنگ) برای (الف، ب، ج) در جهت افقی و (د، ه، و) در جهت قائم به ترتیب برای کلاس‌های اول، دوم و سوم



شکل ۴- مقاطع مربوط به تحقق های منتخب شبیه سازی SIS و مقطع کریجینگ در مختصات چینه شناسی

(الف) تحقق ۱، (ب) تحقق ۱۵، (ج) تحقق ۱۲، (د) تحقق ۲۶ و (ه) نتیجه کریجینگ شاخص



شکل ۵- مقاطع مربوط به تحقق های منتخب شبیه سازی SIS و مقطع کریجینگ در مختصات تبدیل یافته از چینه شناسی به واقعی (الف) تحقق ۱، (ب) تحقق ۱۵، (ج) تحقق ۱۲، (د) تحقق ۲۶ و (ه) نتیجه کریجینگ شاخص، (جهت متمایز شدن مقاطع و گمانه ها، از دو راهنما با رنگ های متفاوت استفاده شده است)

GCMC که توسط آقای پارک در محیط فرترن تهیه شده، ماتریس های احتمال گذار در دو جهت قائم و افقی به طور مستقیم از روی تصویر آموزشی محاسبه گردیده و این روش در شبکه تعریف شده پیاده شده و ۵۰ تحقق به دست آمد. مقادیر احتمالات گذار گام اول در جهات افقی و قائم در جدول ۲ و شعاع تأثیر کلاس ها در جدول ۳ آورده شده اند. جهت انتخاب بهترین تحقق ها از دو رابطه ۷ و ۸ استفاده شد که در هر دو، تحقق های ۱۸، ۲۳، ۲۹ و ۳۸ انتخاب شدند که دارای کمترین انحراف بین مقادیر واقعی و شبیه سازی شده را دارا بودند. در شکل ۶ مقاطع مربوط به این تحقق ها در مختصات چینه شناسی و شکل ۷ مقاطع

شکل کلی واریوگرام های اولیه و بازتولیدی، باوجود نوسانات در واریوگرام های نتایج شبیه سازی، بسیار به هم شبیه است. سقف واریوگرام های بازتولیدی کریجینگ شاخص کمی از واریوگرام داده های اولیه افتادگی نشان می دهد که به خاصیت هموارسازی کریجینگ مربوط می شود.

۳-۳- اعمال شبیه سازی GCMC

شبیه سازی GCMC در همان محدوده تخمین و شبیه سازی کریجینگ شاخص انجام شد. متغیرهای ورودی مورد استفاده در این شبیه سازی نیز همانند متغیرهای تعریف شده برای SIS و IK هستند. در الگوریتم شبیه سازی

واقعی در مختصات کارتزین (مختصات واقعی) نشان داده شده‌اند.

جدول ۲- مقادیر احتمالات گذار در جهت افقی و قائم

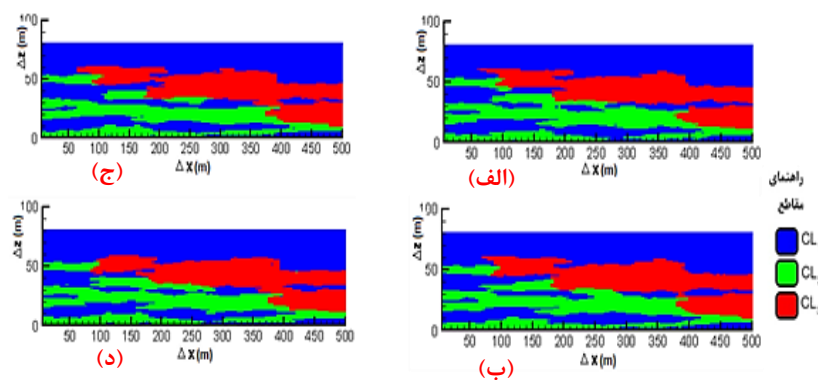
ماتریس احتمال گذار در جهت افقی			
	Cl1	Cl2	Cl3
Cl1	۰/۹۸۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵
Cl2	۰/۰۱۳	۰/۹۷۲	۰/۰۱۴
Cl3	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۹۸۸
ماتریس احتمال گذار در جهت قائم			
	Cl1	Cl2	Cl3
Cl1	۰/۹۱۸	۰/۰۶۵	۰/۰۱۶
Cl2	۰/۱۱۱	۰/۸۶۶	۰/۰۲۱
Cl3	۰/۰۵۹	۰/۰۰۱	۰/۹۳۹

جدول ۳- مقادیر شعاع تأثیر کلاس‌ها در جهت افقی و قائم

	Cl1	Cl2	Cl3
جهت افقی (متر)	۳۶۱/۹	۱۷۹	۴۲۸/۹
جهت قائم (متر)	۱۲/۲۲	۷/۴۹	۱۶/۶

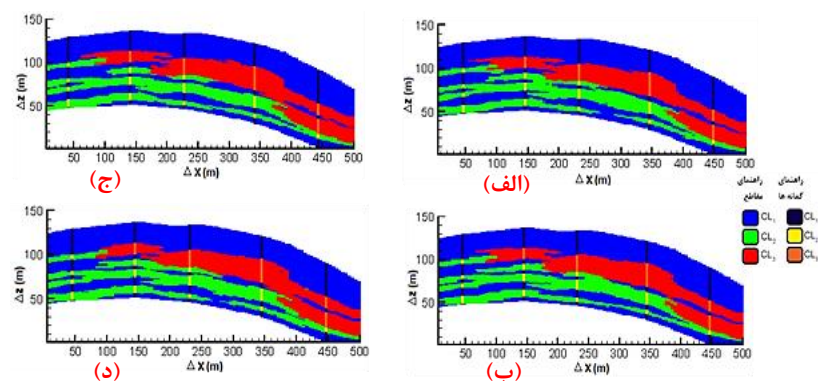
الگوهای کلی مشاهده شده در تحقیقات تولید شده با شبیه‌سازی GCMC و مقطع کریجینگ شاخص مشابه هم هستند و تفاوت‌های موجود عدم قطعیت مکانی را نشان می‌دهند؛ اما الگوهای تولید شده در نتایج SIS بخصوص در نحوه قرارگیری کلاس سوم متفاوت از دو روش دیگر هستند. تحقیقات حاصله از روش GCMC نشان می‌دهند در داده‌های محدود مشابه مقطع مورد مطالعه، GCMC در تولید لایه‌ها و الگوهای مختلف عملکرد بهتر و سازگارتر با واقعیت‌های زمین‌شناسی منطقه نسبت به SIS دارد. بر اساس پیشنهاد لیونگتون و همکاران، نتایج شبیه‌سازی از لحاظ بازتولید مقادیر نسبت حجمی و ساختار فضایی بایستی بررسی گردند [۲۵]. شکل ۸ مقادیر نسبت حجمی کلاس‌ها در داده‌های اولیه و مقادیر نسبت حجمی هر سه کلاس در نتایج شبیه‌سازی‌ها را باهم نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقادیر نسبت حجمی در هر دو روش شبیه‌سازی به‌خوبی بازتولید شده‌اند که می‌تواند ملاکی بر صحیح بودن پارامترهای انتخابی مدل‌ها باشد. علاوه بر این معیار،

تحقیقات بایستی از لحاظ بازتولید ساختاری نیز بررسی شوند. همچنین از نظر وضعیت زمین‌شناسی، بایستی الگوهای تولید شده منطقی و سازگار با وضعیت زمین‌شناسی منطقه باشند. جهت ارزیابی مدل GCMC و معیار مناسب برای تأیید تحقیقات انتخابی، بازتولید احتمالات گذار بررسی شد. احتمالات گذار داده‌های اولیه و احتمالات گذار تحقیقات منتخب در دو جهت افقی و قائم محاسبه شدند و مقادیر احتمالات گذار مربوطه در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ترنزیوگرام‌های خودبه‌خودی^{۲۱} و مقاطع^{۲۲}، نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با ترنزیوگرام‌های داده‌های اولیه، بازتولید خوبی داشته‌اند و انطباق بسیار خوبی باهم نشان می‌دهند. جهت مقایسه کمی میزان انطباق داده‌های اولیه با نتایج شبیه‌سازی‌ها و میزان بازتولید داده‌ها در محل اصلی، نزدیک‌ترین مقادیر سلول‌های واقع در محل داده در مقاطع شبیه‌سازی، با مقادیر داده‌ها مقایسه شد. تقریباً در تمامی موارد، برای هر دو روش SIS و GCMC، انطباق تقریباً کاملی بین این دو مقدار وجود دارد. جهت برآورد عدم قطعیت مکانی توزیع هر کلاس در شبیه‌سازی زمین‌آماري، مقاطع توزیع احتمال گروهی^{۲۳} (EPD) تهیه شد. نقشه‌های EPD، از نتایج تعداد تحقیقات تولید شده به دست می‌آیند، به‌طوری‌که احتمال حضور هر کلاس در هر گره یا سلول شبکه شبیه‌سازی برابر با تعداد دفعات تولید هر کلاس در هر گره یا سلول تقسیم بر تعداد کل تحقیقات تولید شده است. در نهایت مقاطع احتمال تولید شده، می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت تعیین عدم قطعیت مکانی در توزیع کلاس‌ها یا میزان احتمال حضور هر کلاس در فواصل افقی یا قائم و در اعماق مختلف و به‌طور دقیق‌تر در هر گره یا سلول باشد [۱۰]. به جهت اینکه تقسیم‌بندی کلاس‌ها بر مبنای میزان CaO و SiO_2 بوده، کلاس‌ها بسیار به هم نزدیک هستند و احتمال وقوع خطا وجود خواهد داشت که اجتناب‌ناپذیر است، لذا می‌توان این عدم قطعیت را با محاسبه توزیع احتمال گروهی کلاس‌ها نشان داد. مقاطع EPD تولید شده از روش شبیه‌سازی SIS برای سه کلاس محدود مورد مطالعه، در شکل ۱۰ و مقاطع EPD مربوط به روش شبیه‌سازی GCMC در شکل ۱۱ به همراه گمانه‌ها نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها میزان احتمال حضور هر کلاس در محدوده مورد مطالعه مشخص شده و بیشترین احتمال حضور هر کلاس، در اطراف محل همان کلاس در گمانه‌ها است.



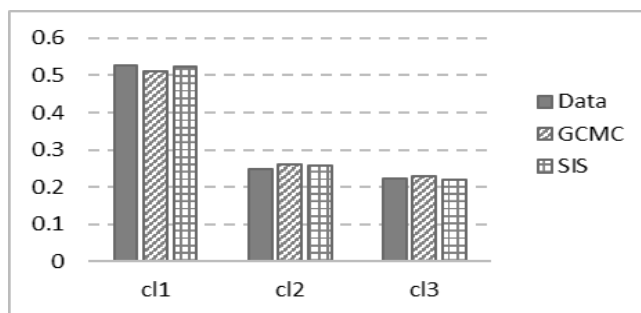
شکل ۶- مقاطع مربوط به تحقق های منتخب شبیه سازی GCMC در مختصات چینه شناسی

(الف) تحقق ۱۸، (ب) تحقق ۲۳، (ج) تحقق ۲۹ و (د) تحقق ۳۸

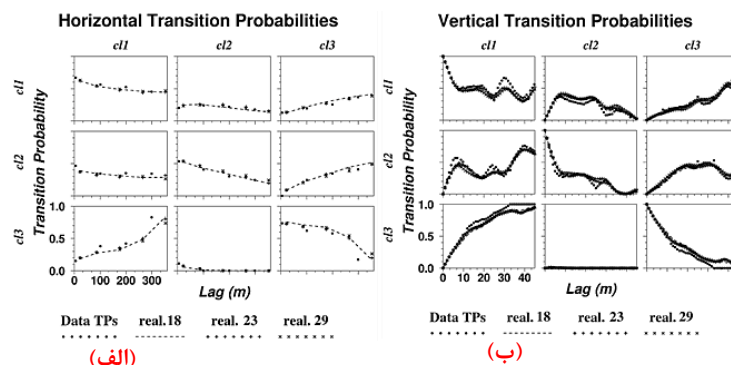


شکل ۷- مقاطع مربوط به تحقق های منتخب شبیه سازی GCMC در مختصات تبدیل یافته از چینه شناسی به واقعی

(الف) تحقق ۱۸، (ب) تحقق ۲۳، (ج) تحقق ۲۹ و (د) تحقق ۳۸، (جهت متمایز شدن مقاطع و گمانه ها، از دو راهنما با رنگ های متفاوت استفاده شده است)



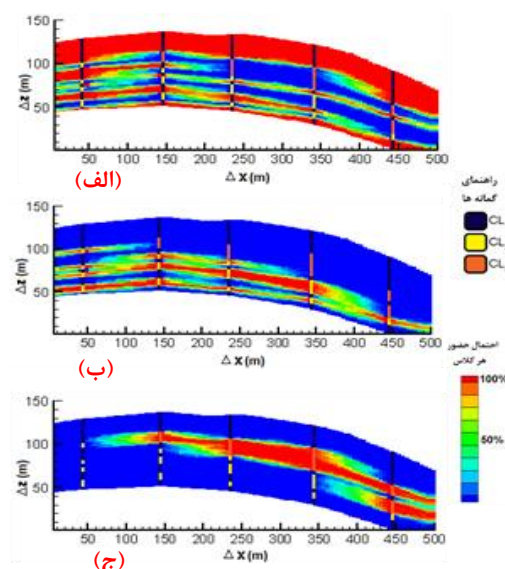
شکل ۸- مقادیر نسبت حجمی کلاس ها در داده های ورودی در مقایسه با مقدار میانگین مقادیر نسبت حجمی باز تولیدی روش های SIS و GCMC



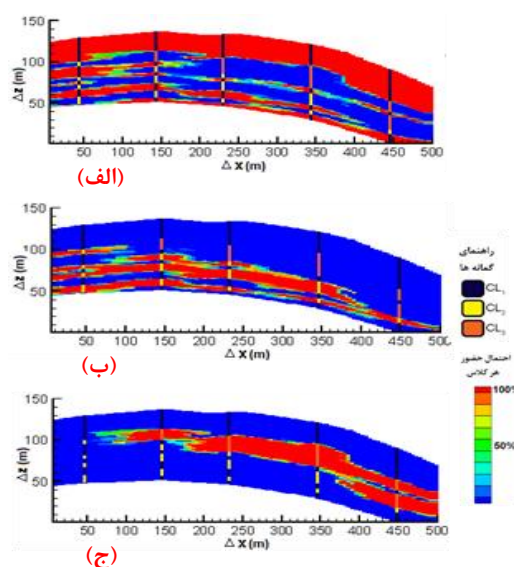
شکل ۹- احتمالات گذار داده های اولیه محدود مورد مطالعه و تحقق های منتخب ۱۸، ۲۳ و ۲۹، در (الف) جهت افقی، (ب) جهت قائم

به‌منظور بررسی نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات فضایی متغیرها بررسی شد و مدل به‌کاررفته از لحاظ بازتولید ساختار فضایی (با رسم واریوگرام‌های نتایج شبیه‌سازی و ترنزیوگرام) و نیز بازتولید مقادیر نسبت حجمی و نحوه قرارگیری الگوها مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت شناسایی بهترین تحقق‌ها و انتخاب بهترین مدل، ۴ مورد از آن‌ها انتخاب و بازتولید واریوگرام‌ها و ترنزیوگرام‌ها در آن‌ها بررسی شد. با توجه به اینکه از ویژگی‌های ذاتی شبیه‌سازی شرطی زمین‌آماري بازتولید مقادیر داده‌ها در محل اصلی گمانه‌هاست، در مقاطع هر دو نوع روش شبیه‌سازی شرطی به‌کاررفته در این مدل‌سازی، مقادیر داده‌های اولیه در محل خود بازتولید شده و در نحوه قرارگیری کلاس‌ها در محل گمانه‌ها انطباق تقریباً کاملی با داده‌های اولیه دیده می‌شود.

در مقاطع مربوط به هر سه روش روند عمومی قرارگیری الگوها بسیار مشابه است. در مقطع مربوط به کریجینگ شاخص روند عمومی قرارگیری کلاس‌ها به‌خوبی تولید شده است اما حالت هموارشدگی به‌صورت واضح در مقطع دیده می‌شود. در نتایج مقاطع SIS، حالت پراکندگی و پخش‌شدگی در کلاس‌ها دیده می‌شود. با در نظر داشتن این واقعیت که سن نه‌چندان زیاد و تقریباً جوان لایه‌های زمین‌شناسی آهکی، به‌ویژه به علت رسوبی بودن لایه‌ها یا ویژگی ذاتی لایه‌های رسوبی، انتظار پیوستگی بالاتر در این لایه‌ها وجود دارد که در مدل ساخته‌شده توسط روش شبیه‌سازی SIS، میزان پیوستگی در این‌باره نسبتاً کمتر ایجاد شده است درحالی‌که در مدل مربوط به GCMC، میزان پیوستگی بالاتر است که با زمین‌شناسی مورد انتظار، انطباق بهتری دارد. مدل GCMC عموماً در پیش‌بینی کلاس‌ها در مکان‌های صحیح و پیش‌بینی توزیع فضایی کلاس‌ها در داده‌های کم به علت لحاظ کردن همبستگی متقابل بین کلاس‌های مختلف، عملکرد خوبی دارد. در استفاده از این الگوریتم نیاز به پیش‌پردازش بر روی داده‌ها نیست و استفاده از داده‌های اولیه بدون انجام پیش‌پردازش خاصی است. همچنین تحلیل‌های آماری و زمین‌آماري و زمین‌شناسی تصدیق‌کننده واقع‌بینانه بودن مدل‌های تولیدشده توسط روش GCMC است. لذا این روش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب جهت پیش‌بینی اولیه و مدل‌سازی کلاس‌ها در محیط‌های رسوبی به کار رود. درنهایت نقشه‌های EPD دو روش شبیه‌سازی برای هر سه کلاس تهیه شد که چارچوب مناسبی جهت پیش‌بینی حضور هر



شکل ۱۰- مقاطع EPD حاصل از ۵۰ تحقق روش SIS برای: الف) کلاس ۱، ب) کلاس ۲ و ج) کلاس ۳



شکل ۱۱- مقاطع EPD حاصل از ۵۰ تحقق روش GCMC برای: الف) کلاس ۱، ب) کلاس ۲ و ج) کلاس ۳

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر مدل‌سازی لایه‌های زیرسطحی یک پروفیل از نهشته آهک ارشتناب با استفاده از روش تخمین کریجینگ شاخص و روش‌های شبیه‌سازی SIS و GCMC انجام گرفت. جهت ساخت این مدل‌ها ابتدا مختصات داده‌های اولیه به مختصات چینه‌شناسی تبدیل شد. در مختصات چینه‌شناسی پس از ترسیم واریوگرام‌های شاخص و محاسبه احتمالات گذار، تخمین و شبیه‌سازی متغیرها با روش‌های منتخب صورت گرفت.

- [12] Carle, S.F. (1999). T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software. Version 2.1 User's Guide. University of California, Davis, CA.
- [13] Elfeki, A., and Dekking, M. (2001). A Markov chain model for subsurface characterization: theory and applications. *Mathematical Geology*. 33(5).
- [14] Li, W., Zhang, C., Burt, J. E., Xing Zhu, A., and Feyen, J. (2004). Two-dimensional Markov Chain Simulation of Soil Type Spatial Distribution. *Soil Science Society of America Journal*. 68, 1479–1490.
- [15] Park, E., Elfeki, A., M., and Dekking, M. (2005). Characterization of subsurface heterogeneity: Integration of soft and hard information using multi-dimensional Coupled Markov chain approach. *Developments in Water Science*. 52, 193–202.
- [16] Moon, Y., Zhang Y., Song Y., Park E., and Moon H. (2012). Multivariate statistical analysis and 3D-coupled Markov Chain modelling approach for the prediction of subsurface heterogeneity of contaminated soil management in abandoned Guryong Mine Tailings, Korea. *Environmental Earth Sciences*. 68, 1527–1538.
- [17] Han, W. S., Kim, K., Y., Choung, S., Jeong, J., Jung, N., H., and Park, E. (2014). Non-parametric simulations-based conditional stochastic predictions of geologic heterogeneities and leakage potentials for hypothetical CO₂ sequestration sites. *Environmental Earth Sciences*. 71, 2739–2752.
- [18] Deng, Z., P., Jiang, S., H., Niu, J., T., Pan, M., and Liu, L., L. (2020). Stratigraphic uncertainty characterization using generalized coupled Markov chain. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 79, 5061–5078.
- [19] J TSAHAND. (2010). Mineral resource estimation for Areshtenab limestone. in Persian.
- [20] Rossi, M. E., and Deutsch, C., V. (2014). *Mineral Resource Estimation*. Springer, 43.
- [21] Remy, N., Boucher, A., and Wu, J. (2009). *Applied Geostatistics with SGEMS*, Cambridge University Press: New York. 113.
- [22] Deutsch, C.V., and Journel, A.G. (1992). *GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide*. Oxford Univ. Press, New York. p.151-152. *Computers & Geosciences*. 32, 1669–1681.
- [23] Deutsch, C., V. (2006). A sequential indicator simulation program for categorical variables with point and block data: BlockSIS. *Computers & Geosciences*. 32, 1669–1681.
- [24] Li, W. (2007). Transiograms for Characterizing Spatial Variability of Soil Classes. *Soil Science Society of America Journal*. 71(3), 881–893.
- [25] Leuangthong, O., McLennan, J., A., and Deutsch, C., V. (2004). Minimum Acceptance Criteria for 593 Geostatistical Realizations. *Natural Resources Research*. 13 (3), 131–141.
- [26] Ranjineh Khojasteh, E. (2013). Geostatistical three-dimensional modelling of the subsurface 617 unconsolidated materials in the Göttingen area. PhD Thesis, Georg-August-University School of 618 Science (GAUSS), Göttingen, 162.

کلاس در مکان مشخص را نشان می دهد. به منظور ارزیابی کامل روش GCMC و تعمیم نتایج حاصل از این تحقیق پیشنهاد می شود مدل سازی با این روش در شرایط متفاوت دیگر همچون پراکندگی داده ها، تعدد کلاس ها، وجود کلاس هایی با نسبت حجمی مختلف در داده ها و نیز شرایط سه بعدی انجام و نتایج حاصله با روش های مرسوم مقایسه شود.

مراجع

- [1] Elfeki, A., and Dekking, M. (2007). Reducing geological uncertainty by conditioning on boreholes: the coupled Markov chain approach. *Hydrogeology Journal*. 15(8), 1439–1455.
- [2] Deutsch, C. V. (2002). *Geostatistical Reservoir Modelling*. Oxford: Oxford University Press, Print. 21–22.
- [3] Mahmoudi, M., Ranjineh Khojasteh, E., R., and Sharghi, Y. (2019). Geostatistical modelling of the subsurface geological-geotechnical heterogeneities in Tabriz Subway, East Azarbayjan Province, Iran. *ZDGG (journal of applied and regional geology)*. band 170, heft 2, 145 – 159.
- [4] Elfeki, A., and Dekking, M. (2005). subsurface heterogeneity by coupled Markov chains: Directional dependency, Walther's law and entropy. *Geotechnical and Geological Engineering*. 23, 721–756.
- [5] Carle, S. F., and Fogg, G. E. (1996). Transition probability-based indicator geostatistics. *Mathematical Geology*. 28(4), 453–476.
- [6] Weissmann, G., S., Carle, S., F., and Fogg, G., E. (1999). Three-dimensional hydrofacies modelling based on soil surveys and transition probability geostatistics. *Water resources research*. 35(6), 1761–1770.
- [7] Carle, S.F. (2000). Use of a Transition Probability/Markov Approach to Improve Geostatistical simulation of Facies Architecture. *Applied Reservoir Characterization Using Geostatistics*. The Woodlands, Texas.
- [8] Li, W. (2006). Transiogram: a spatial relationship measure for categorical data. *International Journal of Geographical Information Science*. 20(6), 693–699.
- [9] Park, E., (2010). A multidimensional, generalized coupled Markov chain model for surface and 614 subsurface characterization. *Water Resources Research*. 46(11).
- [10] Park, E., Elfeki, A., M., Song, Y., and Kim, K. (2007). Generalized Coupled Markov Chain model for characterizing categorical variables in Soil mapping. *Soil Science Society of America Journal*. 71(3), 909–917.
- [11] Krumbein, W. C. (1967). Fortran computer programs for Markov chain experiments in geology: *Computer Contribution 13*, Kansas Geological Survey, Lawrence, KS.

-
- ¹ Sequential Indicator Simulation (SIS)
 - ² Pluri-Gaussian Simulation
 - ³ Object based modelling
 - ⁴ Multiple Point Simulation (MPS)
 - ⁵ Markov Chain (MC)
 - ⁶ Juxtapositional tendencies
 - ⁷ Cross correlation
 - ⁸ Transition probability (TP)
 - ⁹ Transition Probability Geostatistical Software (TPROGS)
 - ¹⁰ Coupled Markov Chain (CMC)
 - ¹¹ Triplex Markov Chain (TMC)
 - ¹² Generalized Coupled Markov Chain (GCMC)
 - ¹³ Maximum Likelihood Estimation (MLE)
 - ¹⁴ Stratigraphic or Unfolded Coordinate System (SCS or UCS)
 - ¹⁵ Conditional Cumulative Distribution Function (CCDF)
 - ¹⁶ Realization
 - ¹⁷ Walther's law
 - ¹⁸ Transiogram
 - ¹⁹ Deviation Rate (DR)
 - ²⁰ Weighted DR(WDR)
 - ²¹ Auto Transiogram
 - ²² Cross Transiogram
 - ²³ Ensemble Probability Distribution (EPD)