

ارزیابی عملکرد روش‌های تخمین زمین‌آماري غيرخطي در تخمین عيار - تناژ کانسار سنگ آهن چاه باشه،

استان یزد

رضا احمدی

گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

حسین فریدونی

دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۴

rezahmadi@gmail.com

چکیده

در پژوهش حاضر عیار و ذخیره کانسار آهن چاه باشه یزد با استفاده از روش‌های زمین‌آماري لاگ کریجینگ معمولی بلوکی، کریجینگ شاخص و شبیه‌سازی متوالی گوسی و نیز روش آماری عکس مجذور فاصله (برای مقایسه)، ارزیابی شده است. برای این منظور ابتدا مطالعات آماری داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی از طریق تعیین آماره‌های توصیفی مختصر، ترسیم هیستوگرام و نمودار فراوانی تجمعی داده‌ها صورت گرفت. همچنین برای مدل‌سازی کانسار، از طریق ترسیم واریوگرام‌های امتدادی مختلف با استفاده از نرم‌افزار SGeMS، توابع موجود در نرم‌افزار MATLAB و کدنویسی‌های کوتاه در این محیط، واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی انجام شد. سپس مدل‌سازی سه‌بعدی بلوکی کانسار، تعیین متوسط عیار، تخمین میزان ذخیره و ترسیم نمودارهای عیار-تناژ، با استفاده از نرم‌افزار Datamine صورت گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که روش‌های شبیه‌سازی متوالی گوسی، کریجینگ شاخص، لاگ کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله به‌ترتیب دارای کمترین مقدار واریانس تخمین می‌باشند. اگرچه تمام روش‌های انتخاب شده از دقیق‌ترین روش‌های تخمین زمین‌آماري هستند، اما نتایج روش شبیه‌سازی متوالی گوسی با اعمال فیلترهای مختلف بر روی داده‌ها همانند استفاده از نقشه‌های باقیمانده، دقیق‌ترین بوده و از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: لاگ کریجینگ معمولی، کریجینگ شاخص، شبیه‌سازی متوالی گوسی، نرم‌افزار Datamine، کانسار آهن چاه باشه یزد

مقدمه

از مهم‌ترین روش‌های غیرخطی زمین‌آماري می‌باشند. هر یک از این روش‌ها دارای پیچیدگی‌های خاص خود بوده و برای یکسری داده بسته به شرایط، یک یا چند تا از این روش‌ها به‌طور متناسب، قابل استفاده خواهند بود. به هر جهت در تمام این روش‌ها انتخاب بهینه پارامترهای تخمین، نقش مهمی در دقت محاسبات دارد.

هدف از پژوهش حاضر مقایسه عملکرد روش‌های غیرخطی لاگ کریجینگ معمولی، کریجینگ شاخص و شبیه‌سازی متوالی گوسی و روش آماری عکس مجذور فاصله به‌منظور تخمین عیار-تناژ زون جنوبی کانسار سنگ آهن چاه باشه یزد می‌باشد. روش‌های مذکور براساس وضعیت ماده معدنی، میزان و نحوه کارهای اکتشافی انجام شده و اطلاعات اکتشافی موجود، تعیین شده و پارامترهای تخمین نیز از طریق اعمال فیلترهای مناسب، انتخاب شده است. کانسار سنگ آهن چاه باشه در ۶۲ کیلومتری جنوب‌خاوری شهرستان نائین در استان یزد قرار دارد. مختصات جغرافیایی مرکز کانسار $30^{\circ} 17' 53''$ طول خاوری و $28^{\circ} 32'$ عرض شمالی است. راه دسترسی به محدوده کانسار از طریق جاده آسفالت نائین-عقدا، طی مسافت ۲۰ کیلومتر جاده آسفالت از عقدا به سمت جنوب‌باختری به روستای مزرعه نو و حسین‌آباد و سپس طی مسافتی در حدود ۲۵ کیلومتر جاده خاکی به سمت باختر، امکان‌پذیر است. در کانسار مورد مطالعه، تعداد ۸۲ حلقه گمانه اکتشافی (به نام‌های BH-4 تا BH-107) به طول کلی $7618/8$ متر حفاری و تعداد ۹۷۷ مغزه جمعاً به طول $3673/5$ متر از آنها تهیه شده است. اطلاعات اکتشافی به‌ویژه نتایج عیارسنجی برای عناصر آهن، منگنز، گوگرد و اکسیدهای آلومینیوم، منیزیم، کلسیم و سیلیسیم حاصل از مغزه‌های عمدتاً ۲ متری مربوط به تعداد ۷۵ حلقه گمانه اکتشافی در دسترس می‌باشد (مطابق جدول ضمیمه).

ارزیابی ذخایر معدنی با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که تفاوت این روش‌ها در الگوریتم محاسبه، دقت، سرعت، وضعیت ماده معدنی و مشخصات کارهای اکتشافی است. تمام روش‌های تخمین به نحوی نیازمند تحلیل داده‌های اکتشافی هستند و برای تحلیل داده‌های اکتشافی نیز از روش‌های آماری متعددی می‌توان استفاده کرد. اما به‌دلیل اثرات نامطلوب عدم قطعیت در افزایش ریسک سرمایه‌گذاری، لازم است بهترین روش تخمین متکی بر دقیق‌ترین روش تحلیل داده‌ها به کار گرفته شود تا بتواند حداقل خطای تخمین را تضمین نماید. به‌طور کلی روش‌های تخمین ذخایر معدنی را می‌توان به دو دسته روش‌های کلاسیک (هندسی) و زمین‌آماري (وزن‌دهی آماری) طبقه‌بندی کرد (Madani, 1997; Hassani-Pak and Sharafodin, 2001; Ahmadi, 2010). پایه و اساس روش‌های کلاسیک تخمین ذخایر، آمار کلاسیک و هندسه روش محاسبه است، درحالی‌که اساس روش‌های زمین‌آماري متغیر ناحیه‌ای، تجزیه و تحلیل ساختار فضایی و انجام تخمین‌ها با استفاده از روش کریجینگ می‌باشد.

روش‌های تخمین زمین‌آماري به علت ناریب بودن و داشتن حداقل خطای تخمین (Rendu, 1981; Annels, 1991) در میان تمام روش‌های تخمین ذخیره، از دقت بالاتری برخوردارند. در واقع در روش‌های زمین‌آماري برای هر یک از نمونه‌های درون و بیرون یک بلوک، وزن آماری مشخص به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که واریانس تخمین مبتنی بر آنها کمترین باشد. روش‌های تخمین زمین‌آماري نیز خود به دو دسته روش‌های خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. روش کریجینگ معمولی از جمله روش‌های خطی و روش‌های لاگ کریجینگ، کریجینگ شاخص، کریجینگ گسسته و شبیه‌سازی متوالی گوسی

تنها به مقدار کمی افت پیدا می‌کند. با کاهش محاسبات می‌توان اندازه نقاط در برگیرنده همسایگی را افزایش داد که امکان تولید نتایج بهتری را در آمار فضایی می‌دهد. خروجی این مطالعه استفاده بهینه از روش SGS است که حداکثر دقت را در بازتولید ساختار کوواریانس داشته باشد و درعین حال محاسبات مورد نیاز نیز به حداقل برسد.

زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه چاه باشه در برکه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نائین و سرو بالا قرار دارد. این ناحیه مطابق برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نائین (علائی مهابادی و همکاران، ۱۳۸۳)، از واحدهای سنگی دگرگونه (ماسه‌سنگ ریزدانه تا متوسط-دانه دگرگون شده به رنگ سبز تیره و دولومیت خاکستری تا کرم قهوه‌ای) مربوط به زمان پالئوزوئیک و بر پایه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سرو بالا (عمیدی و همکاران، ۱۳۶۸)، از واحدهای سنگی توف گرانیتی، ریولیتی، دولومیت و ریوداسیت) پرکامبرین پسین تشکیل شده است. متاسوماتیسم بارزترین ویژگی ناحیه چاه‌باشه می‌باشد (Yousefi et al., 2013).

ناحیه کانسار چاه باشه در گستره جنوبی زون کالردملانژ نائین شمالی قرار گرفته و با گسلی بزرگ با راستای شمالی- جنوبی (گسل نائین- بافت) به دو بلوک خاوری و باختری تقسیم می‌شود. بلوک باختری (پایین افتاده) از نهشته‌های کربناته آتشفشانی- تخریبی کرتاسه بالایی و پالئوژن تشکیل می‌شود که با سنگ‌های کوه زرد در ناحیه کانسار بنوید مشابه است. بلوک خاوری (بالا آمده) در زون تکتونیکی پرتکاپویی قرار گرفته و از نهشته‌های ژوراسیک دگرگون شده و کرتاسه پایینی تشکیل شده است. از نظر ساختمانی سنگ‌های کربناتی، گودال‌های ناودیس‌های کوچک یا بلوک‌های تکتونیکی مدفون را تشکیل می‌دهند. عموماً تمام زون کانه‌دار متشکل از یکسری بلوک‌های تکتونیکی خطی کشیده شده در راستای شمال‌باختری است که متحمل جابه‌جایی قائم و افقی شده است. به دلیل نبود بقایای فسیل در سنگ‌های در برگیرنده، تشخیص آنها توسط عوارض لیتولوژی صورت گرفته است. در نقشه‌های زمین‌شناسی نهشته‌های مربوط به ژوراسیک، کرتاسه، پالئوژن و کواترنر شناسایی شده‌اند. سیستم ژوراسیک با توده سنگ سیلیسی همراه با برگورگی مشخص می‌شود و دارای گسترش ناحیه‌ای زیادی است. بخش پایینی مقطع قابل دید به ضخامت حدود ۱۰۰ متر یا بیشتر، از لایه‌های فیلیت سیاه یا خاکستری تیره و شیل‌های رسی دارای باقیمانده‌هایی از ماسه‌سنگ دانه‌ریز و لای‌سنگ تشکیل می‌شود. این واحدهای سنگی در بستر رودخانه نمک برون‌زد دارند. در بخش بالایی آنها تناوب غیریکنواختی از ماسه‌سنگ، سیلت‌استون، اسلبیت و اینتراکلاست‌هایی از سنگ آهک‌های مرمری شده و دولومیتی شده، کوارتزیت و پیکره‌های لایه‌بندی از دیوریت- دیاباز و دیاباز با ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر را تشکیل می‌دهد که توسط افقی از کوارتزیت خاکستری روشن به ضخامت ۲۰ تا ۸۰ متر پوشیده شده است. سن توده سنگ در مقایسه با نواحی مجاور کانسار از سمت جنوب، ژوراسیک در نظر گرفته شده است.

به‌طور کلی ناحیه کانسار چاه باشه از دیدگاه تنوع لیتولوژی از واحدهای سنگی شیست، کوارتزیت، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ آهک و ماسه‌سنگ دگرگونی مربوط به ژوراسیک و سنگ‌های توف، کربناته، کربناته مرمری شده و متاسوماتیتی شده و سیلت‌استون کرتاسه پایینی تشکیل شده است. سنگ‌های نفوذی محدوده اکتشافی به شکل سیل، دایک و استوک، نزدیک به پنج درصد گستره مورد بررسی را به خود اختصاص داده و در دو مرحله تشکیل شده‌اند. مرحله نخست احتمالاً در زمان کرتاسه روی داده و شامل واحدهای سنگی گابرو، دیاباز، گرانودیوریت و میکروگابرو است که سبب قطع واحدهای سنگی

در راستای پژوهش حاضر تعدادی فعالیت پژوهشی صورت گرفته که به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. Zakary و همکاران (2005) با استفاده از نرم‌افزار Surpac به مدل‌سازی زمین‌آماری و تخمین ذخیره آهن آنومالی شماره ۳ معدن گل‌گهر سیرجان پرداختند. در مطالعه آنها مدل‌سازی بلوکی کانسار با استفاده از تخمینگر کریجینگ و واریوگرافی برای ۱۰ متغیر صورت گرفت و در نهایت میزان ذخیره سنگ آهن آنومالی شماره ۳ این معدن محاسبه شد. Salsabilian (2006) در پژوهش خود با استفاده از روش کریجینگ شاخص به بررسی فضای تخمین در توده مرکزی کانسار آهن آنومالی شمالی بافق، با مشخص کردن مرز کانسنگ و باطله پرداخت. Hekmat-Nejad و Hassani-Pak (2011) با استفاده از تخمین‌گر غیرخطی کریجینگ گسسته به تخمین توزیع عیار مس در معدن مس سونگون پرداختند. آنها برای تخمین نقاط مجهول، با توجه به هیستوگرام داده‌های اولیه، ضرایب چندجمله‌ای‌های هرمیتی را محاسبه کرده و مقدار چندجمله‌ای‌های هرمیتی را در نقاط مجهول تخمین زدند. در نهایت از ترکیب خطی ضرایب مربوط به چندجمله‌ای‌های هرمیتی و مقدار تخمینی آنها در نقاط مجهول، مقدار متغیر مورد نظر را به دست آوردند. Daya (2012) به تخمین ذخیره قسمت مرکزی آنومالی شمال چغارت با استفاده از روش کریجینگ معمولی پرداخت. در این پژوهش ۲۳۲۹ داده به‌دست آمده از ۲۶ گمانه جهت تخمین ذخیره استفاده شده است. مطالعات صورت گرفته حاکی از تک جامعه بودن داده‌های عیاری بوده و برای استفاده از کریجینگ معمولی نیز از برازش مدل کروی بر واریوگرام تجربی استفاده شده است. Ghajar و Soltani-Mohammadi (2015) به مدل‌سازی آماری و زمین‌آماری عیار آهن، گوگرد و فسفر در معدن سنگ آهن جلال‌آباد در استان کرمان پرداختند. مطالعات آنها بر پایه ۸۶ گمانه اکتشافی بوده که تقسیم‌بندی ذخیره در چهار طبقه براساس عیار مورد نیاز برای کارخانه فرآوری انجام پذیرفته است. Sharif و Karim-Zadeh (2015) به واریوگرافی داده‌های اکتشافی ذخیره آهن کورکورا ۲ از محدوده معدنی شهرک واقع در استان کردستان و برآورد ذخیره این کانسار پرداختند. Rasera و همکاران (2015) الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی را به‌صورت موازی اجرا کردند. آنها از استراتژی عدم اختلاط، سطح- مسیر موازی برای شبیه‌سازی متوالی استفاده کردند و با توجه به ترتیبی که در گروه‌های شبیه‌سازی وجود دارد، یک فرآیند طبقه‌بندی خودکار به‌منظور بررسی گروه‌های شبیه‌سازی شده به‌صورت موازی، طراحی کردند. مزیت روش آنها این است که نتایج با یکدیگر اختلاط ندارند و می‌توانند به‌صورت مستقل یک خروجی دقیق را حاصل نمایند. Jalloh و همکاران (2016) از تلفیق روش‌های هوش مصنوعی و زمین‌آماری تحت عنوان ANNMG برای بهینه‌سازی تخمین ذخیره استفاده کردند. در این روش بعد از آموزش و آزمون داده‌های معین در الگوریتم هوش مصنوعی، داده‌های تخمینی حاصل شده با مقادیر عیار به‌دست آمده از گمانه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. سپس مدل اعتبارسنجی شده برای پیش‌بینی عیار در موقعیت‌های مکانی شناخته شده و ناشناخته، به کار گرفته شده و در نهایت از عیار به‌دست آمده به‌عنوان داده اولیه در مطالعات زمین‌آماری استفاده شده است. تحلیل رگرسیون بین مقادیر عیار تخمینی و پیش‌بینی شده، نشان از نزدیکی زیاد بین مقادیر عیار واقعی و پیش‌بینی شده دارد. از این روش می‌توان برای بهینه کردن مدل بلوکی در طراحی معادن بهره برد. در مطالعه Nussbaumer و همکاران (2018) از طریق یک مطالعه موردی و استفاده از یک مسیر ثابت، استفاده از این روش، مورد ارزیابی قرار گرفته و مزایا و محدودیت‌های آن به‌صورت سیستماتیک بررسی شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که در عین کم شدن حجم قابل توجه محاسبات، دقت شبیه‌سازی‌ها

(شکل ۳) نقشه زمین‌شناسی- معدنی کانسار چاه‌باشه و تفکیک منطقه به دو زون، همراه با موقعیت گمانه‌های اکتشافی را نشان می‌دهد. تعداد گمانه‌های زون ۱، ۷۰ عدد و تعداد گمانه‌های زون ۲، ۱۲ عدد می‌باشند.

پردازش آماری داده‌ها

برای آگاهی از نحوه توزیع داده‌ها (نرمال بودن یا نبودن تابع توزیع)، قبل از انجام هرگونه عملیات مدل‌سازی، لازم است که روی آنها مطالعات آماری صورت گیرد. آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی آهن منطقه چاه‌باشه، در (جدول ۱) خلاصه شده است. در (شکل ۴الف و ب) نیز به ترتیب فراوانی‌نما و نمودار توزیع احتمال جمع‌های عیارسنجی آهن منطقه مورد مطالعه، نشان داده شده است.

با توجه به داده‌های (جدول ۱) و (شکل ۴الف و ب) مشاهده می‌شود که توزیع داده‌های آهن از نوع نرمال نبوده و به توزیع لگاریتمی شباهت دارد که برای تبدیل آنها به توزیع نرمال، از روش لگاریتم سه پارامتری استفاده شد و نتایج آن در (شکل ۴ج و د) نشان داده شده است.

ژوراسیک شده‌اند. مرحله دوم ماگماتیسم بعد از کرتاسه بالایی (احتمالاً در پالئوژن) رخ داده است. این مرحله با واحدهای سنگی دیوریت، پورفیرهای دیوریتی، گرانودیوریت و گرانیت پورفیری مشخص می‌شود که احتمالاً شواهد اسکارنی شدن و متاسوماتیسم در محدوده اکتشافی، حاصل نفوذ و تاثیر این مرحله از ماگماتیسم است (شکل ۱).

براساس بررسی‌های تکنولوژیکی و محتوای فلز، دو نوع ماده خام شناسایی شده است؛ کانه و سنگ آهک دگرگون شده (مرمر) کانی‌سازی شده. کانسار آهن به صورت اکسید فریک (Fe_2O_3) حضور دارد (شکل ۲) و کانه آهن منگن‌دار عمدتاً متشکل از کانی‌های اکسیده آهن به‌ویژه از نوع لیمونیت است. کانه توده‌ای و توده‌ای- لکه‌دار اغلب در نتیجه پر شدن شکاف‌ها یا جایگزینی انتخابی اینترکلاست‌های مجزای آهکی، در بخش‌های جلویی زون‌های کانه‌ای، شکل گرفته است (Yousefi et al., 2013). در طیف وسیعی از محدوده کانسار چاه‌باشه، ماده معدنی دارای ضخامت بسیار کم و حالت رگه‌ای است. مقدار داده‌های عیاری اولیه آهن از ۰/۵۸٪ تا ۴۶٪ متغیر است. عیار آهن در حالت کلی در مقایسه با کانسارهای نوعی اقتصادی آهن، اندکی پایین‌تر است.



شکل ۱- شواهد متاسوماتیسم در سنگ‌های کربناته مرمری منطقه مورد مطالعه. بخش‌های تیره گابرو و دیاباز هستند.



شکل ۲- نمایی از رخنمون هماتیته (محدوده مشخص شده با خط چین قرمز رنگ) در کانسار چاه‌باشه (دید به سمت شمال‌خاوری). در مجاورت بخش هماتیته (قسمت بالا سمت چپ تصویر)، توده سنگ آهکی قهوه‌ای رنگ وجود دارد.

جدول ۱- نتایج آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی آهن.

آماره توصیفی	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	دامنه تغییرات	میانگین	میانه	واریانس	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
مقدار	۰/۵۸	۴۹/۴۶	۴۸/۸۸	۱۴/۸۵	۱۲/۰۸	۹۳/۷۸	۹/۶۸	۰/۹۹	۰/۳۵

ملاحظات

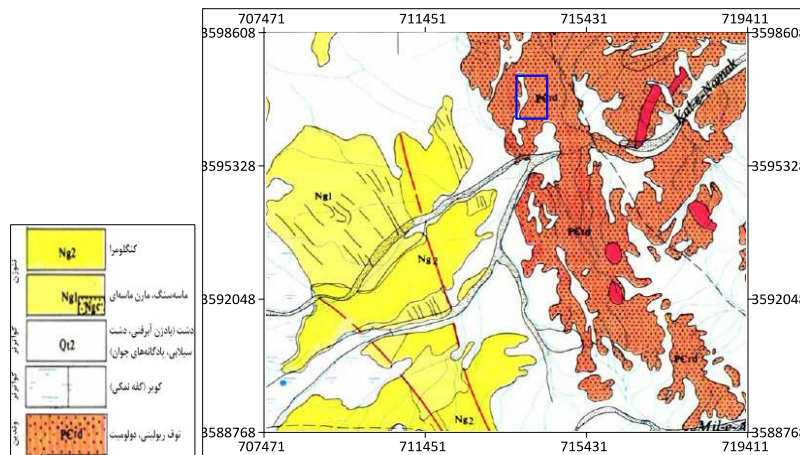
قبل از انجام فرآیند تخمین بایستی یکسری ملاحظات مد نظر قرار گیرد. از نظر فرآیند تخمین، محدوده‌های مناسب است که در آن باطله به کمترین مقدار ممکن برسد. بنابراین حد و مرز محدوده جهت تخمین ذخیره، با گسترش محدوده به اندازه شعاع تاثیر گمانه‌ها (نصف فاصله بین گمانه‌ها) در نظر گرفته شد. در جهت قائم نیز مرز پایینی فضای تخمین به آخرین منظم‌سازی (ترکیب کردن یا کامپوزیت) کانسنگ در هر گمانه محدود شد. البته در مورد گمانه‌هایی که نقطه انتهایی آنها در کانسنگ قرار دارد نه در باطله، می‌توان به اندازه نصف ترکیب یا طولی از آن را اضافه کرد و فضا را تا آن حد گسترش داد.

تخمین چگالی در شش بلوک مکعبی به حجم‌های ۰/۴-۰/۲ متر مکعب صورت گرفت که بسته به میزان تخلخل، از ۲/۲۷ تا ۳/۱۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر بود. بنابراین مقدار چگالی برای مرمر کانی‌سازی شده ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای کانه اصلی در بلوک‌ها برابر با ۲/۶۹ گرم بر سانتی‌متر

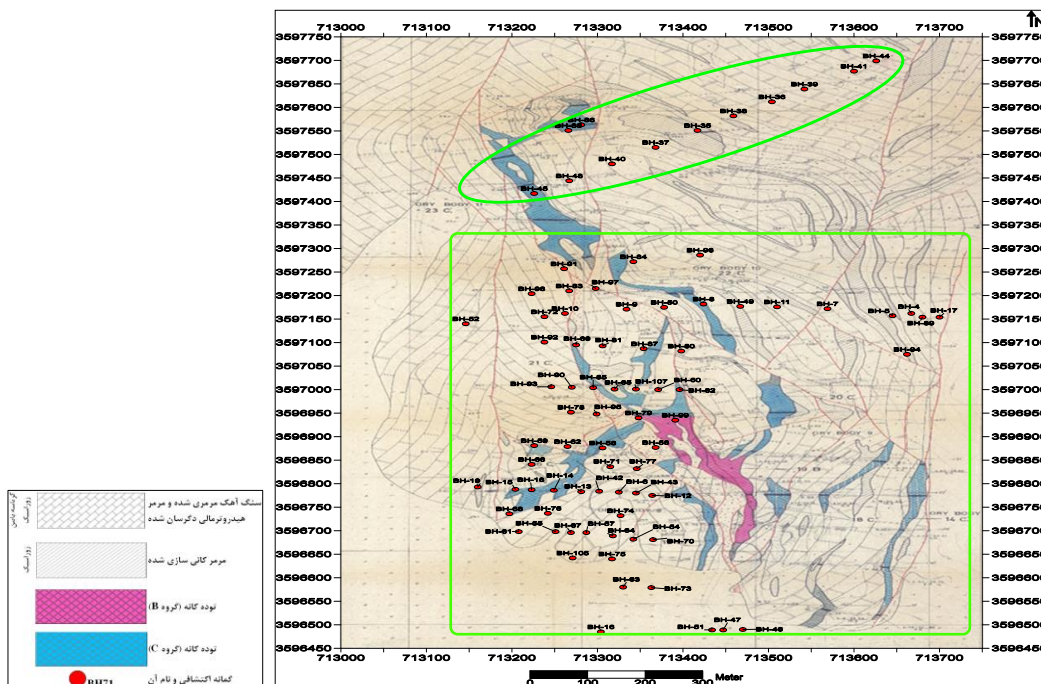
مکعب منظور شد. براساس نوع کانی‌زایی، توپوگرافی منطقه، نحوه پراکندگی گمانه‌های اکتشافی کانسار چاه باشه و فاصله آنها از یکدیگر محدوده به دو زون ۱ (جنوبی) و ۲ (شمالی) تقسیم شد و تخمین برای زون جنوبی صورت گرفت.

روش‌شناسی پژوهش

مرحله نهایی عملیات ارزیابی ذخیره، تخمین عیار در کل فضای تخمین به صورت سه بعدی و محاسبه میزان ذخیره است. بدین منظور ابتدا ابعاد بهینه بلوک‌های تخمینی براساس نحوه گسترش فضایی ماده معدنی و طراحی پله‌های استخراجی معدن به خصوص ضخامت تناوب‌های تبدیل کانسنگ به باطله و باطله به کانسنگ، انتخاب شد و سپس عیار آنها برآورد گردید. از آنجایی که توزیع داده‌های عیار آهن در کل محدوده مورد مطالعه، از نوع لاگ نرمال است، بنابراین برای تخمین ذخیره، روش‌های تخمین زمین‌آماري غیرخطی لاگ کریجینگ معمولی، کریجینگ شاخص و شبیه‌سازی متوالی گوسی و نیز روش آماری عکس مجذور فاصله به کار برده شد و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردید.

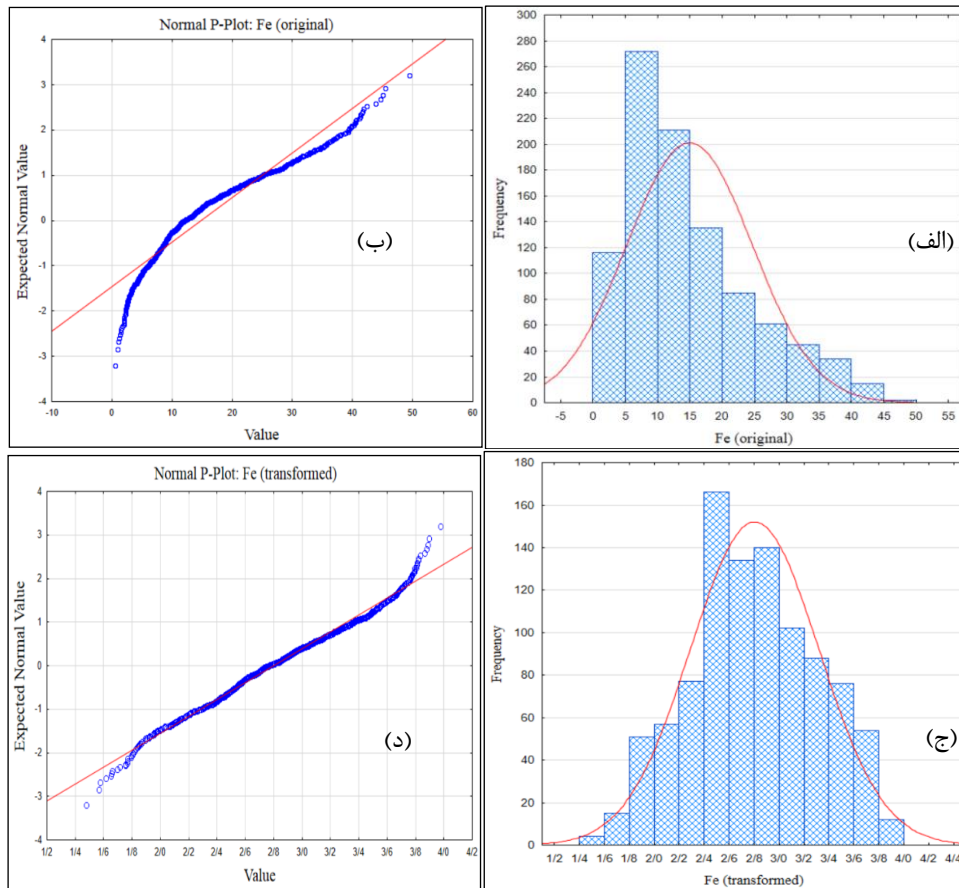


(الف)



(ب)

شکل ۳-الف) برشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سرو بالا (عمیدی و همکاران، ۱۳۶۸) و موقعیت کانسار چاه باشه بر روی آن (مستطیل آبی رنگ)؛ (ب) نقشه زمین‌شناسی - معدنی منطقه‌ای کانسار چاه باشه و موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی در منطقه (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۲). بیضی، زون شمالی و مستطیل با گوشه‌های گرد، زون جنوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- هیستوگرام و نمودار توزیع احتمال تجمعی داده‌های آهن (الف و ب) و داده‌های تبدیل یافته آهن (ج و د) کانسار چاه باشه.

مبانی نظری روش کریجینگ شاخص

کریجینگ شاخص (IK) یک تکنیک تخمین زمین‌آماری غیرخطی است که در سال ۱۹۸۳ توسط جورنل معرفی شده است. هدف اصلی جورنل براساس کار سویتزر (۱۹۷۷) و دیگران، تخمین محلی توسط فرایند تابع توزیع تجمعی محلی (cdf) بود. ویژگی اصلی کریجینگ شاخص، غیرپارامتری بودن آن است و بر فرض مدل توزیع خاصی برای نتایج، استوار نمی‌باشد. دستگاه معادلات کریجینگ شاخص همانند دستگاه معادلات کریجینگ معمولی است با این تفاوت که در کریجینگ شاخص از مقادیر واریوگرام شاخص به جای واریوگرام معمولی استفاده می‌شود. برای محاسبه واریوگرام شاخص، ابتدا باید داده‌های خام را به متغیرهای شاخص تبدیل نمود. از این روش می‌توان برای تعیین ذخیره کانسار با عیار بالاتر از حد مورد نظر همراه با احتمال رخداد آن استفاده کرد. همچنین می‌توان نقشه توزیع فضایی احتمال پیدایش بلوک‌هایی از کانسار با عیار بالاتر یا مساوی یک حد آستانه را به راحتی ترسیم کرد (Hassani-Pak, 2003). یکی از کاربردهای اصلی کریجینگ شاخص، تعیین مرز ماده معدنی و باطله در کانسار است (Gossage, 1998). در واقع کریجینگ شاخص در جدا کردن باطله از کانسنگ کارایی بالاتری دارد. برای انجام کریجینگ شاخص ابتدا لازم است داده‌های اولیه به مقادیر شاخص تبدیل شوند. برای این منظور لازم است عیار حدی در نظر گرفته شود و متغیرهای شاخص از طریق تابع شاخص به‌دست آید که مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود

$$I(x; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z(x) \leq z_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (1) \text{ رابطه (۱)}$$

که در آن مقدار شاخص نمونه i ام، Z_k حد آستانه و k تعداد کل آستانه‌ها می‌باشند. بدین صورت که به مقادیر اصلی کوچک‌تر از حد آستانه منتخب، کد ۱ و به مقادیر ر، کد صفر تعلق می‌گیرد. بدین ترتیب کلیه داده‌های موجود به صفر (بزرگ‌تر از عیار حد) و یک (کوچک‌تر یا مساوی عیار حد) تبدیل شده و سپس براساس داده‌های تبدیل شده به صفر و یک، کلیه مراحل کریجینگ انجام می‌شود.

مزیت تخمین‌گر کریجینگ شاخص آن است که نسبت به داده‌های خارج از ردیف حساس نمی‌باشد و با تقسیم تابع توزیع تجمعی به قسمت‌های کوچک‌تر، در آن قسمت‌ها تابع توزیع حالت نرمال به خود گرفته و نیازی به نرمال کردن ندارد.

مبانی نظری روش شبیه‌سازی متوالی گوسی

روش شبیه‌سازی متوالی گوسی (SGS) به‌عنوان شبیه‌سازی توابع تصادفی گوسی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی شناخته می‌شود. براساس فرض چندگوسی یک مدل تابع تصادفی، SGS به‌طور تصادفی یک مقدار شبیه‌سازی شده را در هر موقعیت از یک تابع توزیع تجمعی شرطی تخمینی (ccdf) ترسیم می‌کند. توسط میانگین و واریانس کریجینگ محاسبه شده از اطلاعات همسایگی تعیین می‌شود. در هنگام اجرای SGS تبدیل اولیه داده‌های اصلی به توزیع گوسی ضروری است و معمولاً توسط تبدیل متغیر توزیع نرمال شکل می‌گیرد (Goovaerts, 1997; Remy et al., 2009). تمام توزیع‌های شرطی، گوسی بوده و کریجینگ ساده تنها روشی است که تخمین‌ها را به‌طور دقیق حاصل می‌کند. یک تکنیک شبیه‌سازی مونته کارلو برای ترسیم مقدار شبیه‌سازی شده از توزیع شرطی تخمینی در هر گره، مورد

های امتدادی در جهات مختلف در این زون، بیشترین شعاع تاثیر در راستای آزیموت ۱۳۵ درجه و کمترین آن در جهت حفر گمانه‌ها با شیب ۹۰ درجه حاصل شد.

برای از بین بردن تغییرپذیری در مقیاس کوچک، ابتدا منظم‌سازی نمونه‌ها انجام شد. برای این منظور نخست مطالعات آماری بر روی طول مغزه‌ها انجام گرفت که بیشترین فراوانی طول مغزه‌ها مربوط به انواع ۲ متری بوده، میانه آنها برابر با ۳ متر و طول ۸۰ درصد مغزه‌ها کمتر از ۶ متر می‌باشد. در منظم‌سازی نباید نمونه‌های با طول زیاد به نمونه‌های کوچک‌تر تفکیک شود، زیرا مقداری اثر قطعه‌ای وارد محاسبات خواهد شد و بهتر است که به پایه‌های بزرگ‌تر ترکیب شوند. بنابراین منظم‌سازی برای طول‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ متری صورت گرفت. در نهایت از طریق ترسیم هیستوگرام و تعیین آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های منظم‌سازی شده طول‌های مختلف مغزه‌ها، طول ۲ متر به عنوان مناسب‌ترین ترکیب در نظر گرفته شد.

واریوگرام‌های امتدادی ترسیم شده در جهات مختلف و داده‌های (جدول ۲) نشان می‌دهند که داده‌های عیارسنجی آهن در زون جنوبی کانسار چاه باشه، دارای ناهمسان‌گردی از نوع هندسی و ناحیه‌ای است. به‌عنوان یک قاعده کلی، فواصل نمونه‌برداری باید به‌طور متوسط حدود یک سوم تا یک پنجم شعاع تاثیر اندازه‌گیری شده باشد، در غیر این صورت نیاز به نمونه‌گیری مجدد خواهد بود. با توجه به وضعیت کانسار در طیف وسیعی از محدوده کانسار چاه باشه، امکان انتخاب ابعاد بزرگ بلوک‌ها میسر نیست. با این نگرش اندازه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، ۵×۵×۵ متر انتخاب شد و مدل بلوکی سنگ به فضای تخمین محدود گردید؛ یعنی ابتدا سطح بالای رویه توپوگرافی از فضای تخمین حذف شد، سپس مناطق خارج از فضای تخمین از مدل بلوکی حذف شدند. در (شکل ۷) نحوه توزیع عیار آهن در داخل مدل بلوکی زون جنوبی کانسار چاه باشه نشان داده شده است. مطابق این شکل نواحی پرعیار بسیار محدودند.

استفاده قرار می‌گیرد. یک عدد تصادفی بین صفر و یک ایجاد می‌شود و مقدار شبیه‌سازی شده با قرائت چارک مربوطه، از میانگین و واریانس توزیع گوسی تجمعی تخمینی به‌دست می‌آید.

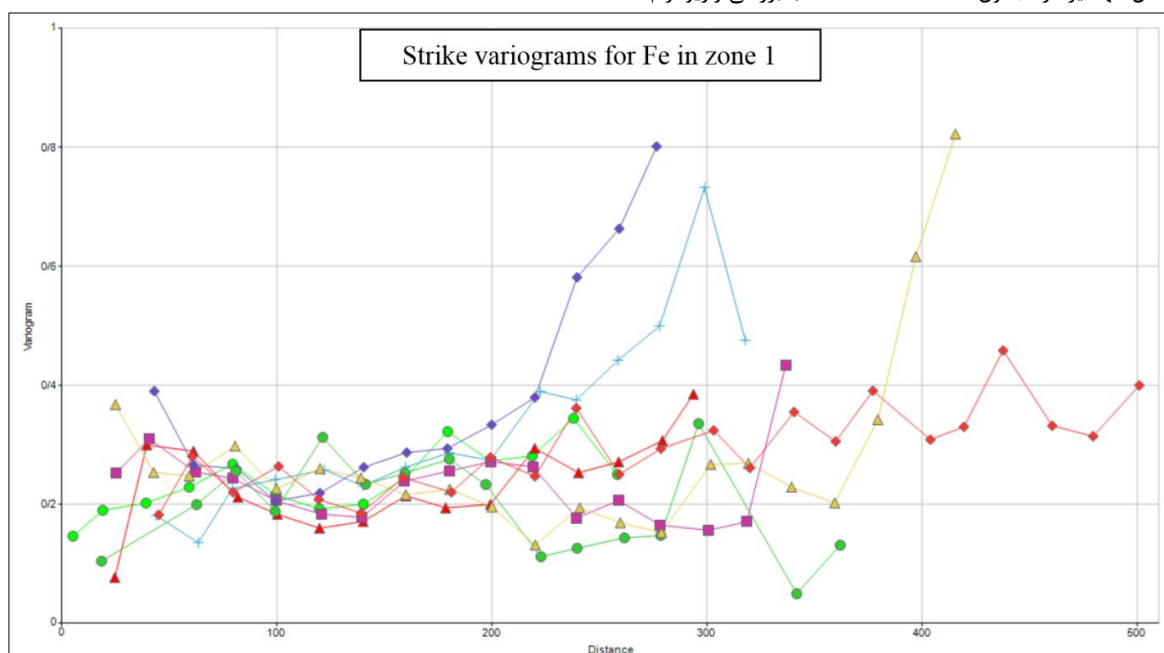
براساس مدل واریوگرام، الگوریتم SGS با ذکر جزئیات به‌صورت مراحل زیر است (Remy et al., 2009):

- ۱- تعیین یک مسیر تصادفی از طریق گره‌های شبکه.
 - ۲- در هر گره u به‌صورت زیر عمل می‌شود:
 - تعریف یک بیضی تجسس برای به‌دست آوردن اطلاعات شرطی (داده‌های خام و مقادیر شبیه‌سازی شده قبلی).
 - تخمین میانگین و واریانس محلی به‌صورت یک توزیع گوسی با استفاده از کریجینگ با مدل واریوگرام $\gamma(h)$.
 - ترسیم یک مقدار تصادفی از $ccdf$ و اضافه کردن مقدار شبیه‌سازی شده به مجموعه داده‌ها.
 - ۳- تکرار این فرآیند تا اینکه تمام گره‌ها شبیه‌سازی شوند.
- تکرار این گام‌های متوالی با مسیرهای تصادفی مختلف، می‌تواند تحقق‌های چندگانه از توزیع فضایی $Z(u)$ در فضای مطلوب، تولید کند.

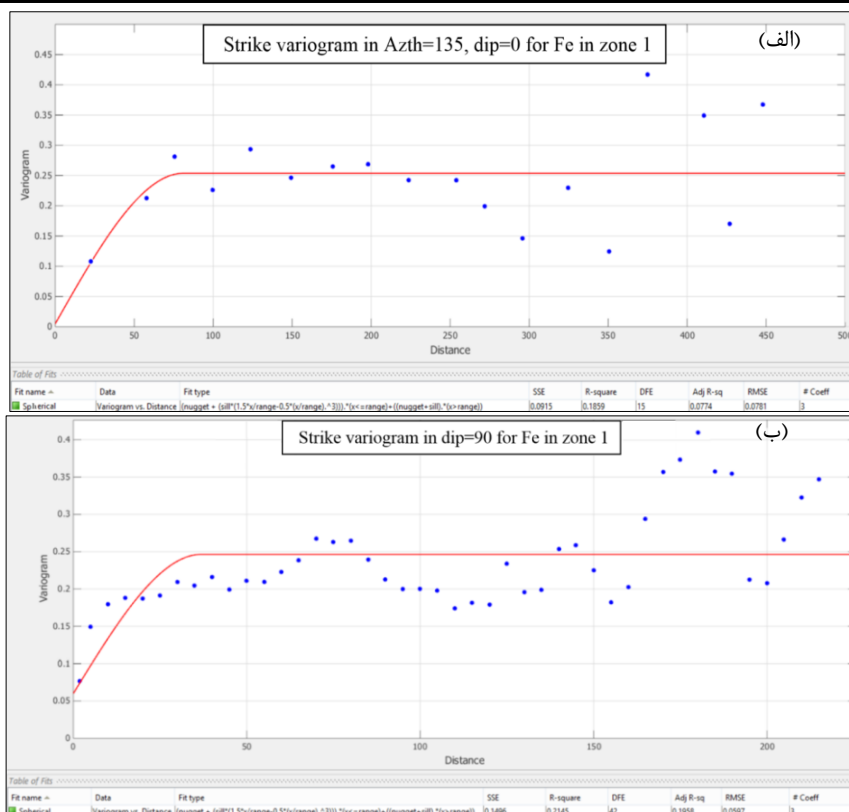
مدل‌سازی کانسار به روش کریجینگ معمولی بلوکی

واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی

به‌منظور تجزیه و تحلیل ساختار فضایی، تعیین وضعیت همسان‌گردی یا ناهمسان‌گردی کانسار و انجام تخمین‌های هرچه دقیق‌تر، واریوگرافی داده‌ها در راستای با آزیموت‌های مختلف با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار SGeMS، توابع موجود در نرم‌افزار MATLAB در فضای سه‌بعدی (Remy et al., 2009; Böhling, 2007) و کدنویسی‌های کوتاه در این محیط و مدل‌سازی‌های زمین‌شناسی و زمین‌آماری با نرم‌افزار Datamine صورت گرفت. مدل واریوگرام‌های این زون عموماً از نوع نمایی و کروی و یا ترکیبی از آنها می‌باشند که مدل‌های واریوگرام انتخاب شده در (شکل‌های ۵ و ۶) نشان داده شده و مشخصات کامل آنها نیز در (جدول ۲) خلاصه شده است. با بررسی واریوگرام-



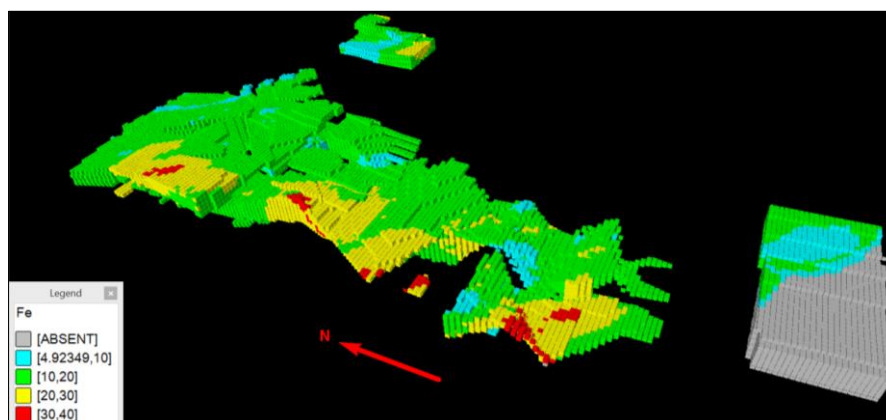
شکل ۵- واریوگرام‌های امتدادی تجربی داده‌های آهن زون ۱ در کانسار چاه باشه.



شکل ۶- واریوگرام های جهتی الف) آزیموت ۱۳۵ (شیب صفر درجه) و ب) شیب ۹۰ درجه برای داده های آهن زون ۱ در کانسار چاه باشه.

جدول ۲- مشخصات واریوگرام های امتدادی داده های آهن زون ۱ کانسار چاه باشه.

مدل واریوگرام	جهت (آزیموت)	شیب (درجه)	اثر قطعه ای	شعاع تاثیر (متر)	سقف
کروی	۰	۹۰	۰/۰۶	۳۷	۰/۲۵
کروی	۱۳۵	۰	۰/۰۰۵	۸۲	۰/۲۵



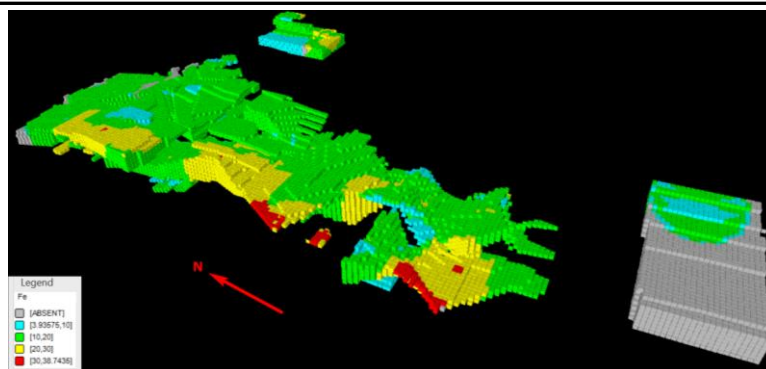
شکل ۷- نحوه توزیع عیار آهن در داخل مدل بلوکی زون جنوبی کانسار چاه باشه به روش کریجینگ معمولی.

مدل سازی کانسار به روش عکس مجذور فاصله

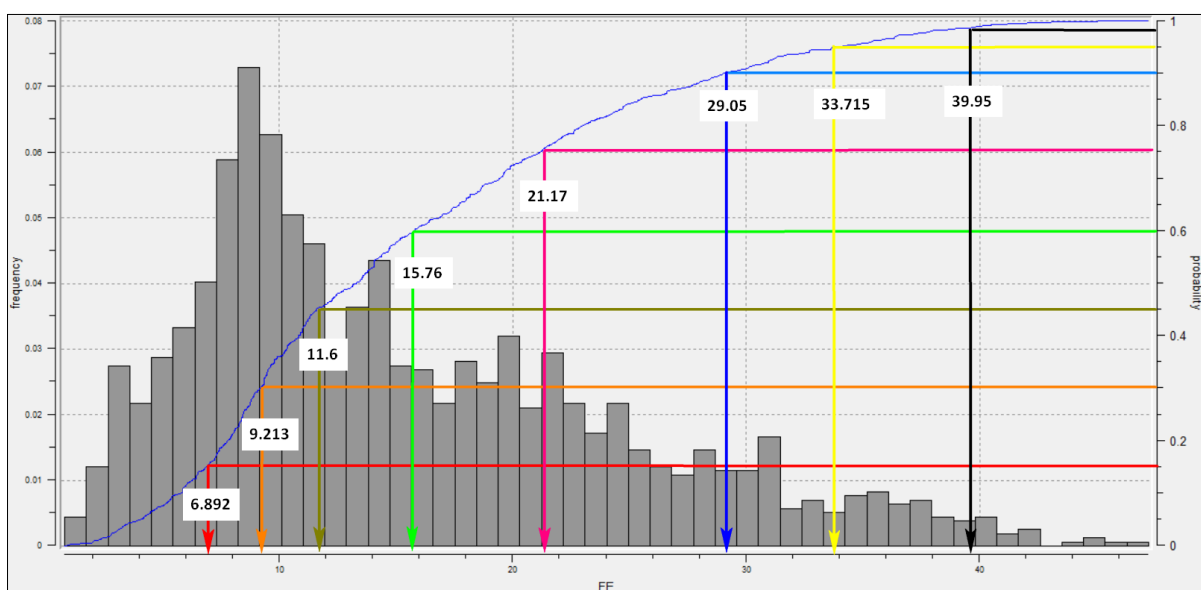
روش عکس مجذور فاصله یکی از دقیق ترین روش های تخمین کلاسیک می باشد. به همین دلیل در پژوهش حاضر علاوه بر روش های زمین آماری، از روش عکس مجذور فاصله نیز برای تخمین عیار و محاسبه ذخیره کانسار چاه باشه و مقایسه نتایج آن با نتایج روش های زمین آماری استفاده شد. نحوه توزیع عیار آهن در داخل مدل بلوکی زون جنوبی کانسار چاه باشه با این روش در (شکل ۸) نشان داده شده است.

اعمال روش IK بر روی داده های منطقه

در پژوهش حاضر مطابق (شکل ۹) تابع توزیع تجمعی به ۹ قسمت تقسیم شده است. در (جدول ۳) متوسط عیار آهن و احتمال مربوط به هر قسمت از تقسیمات تابع توزیع تجمعی عیار در کانسار چاه باشه آورده شده است. برای محاسبه عیار با روش کریجینگ شاخص، واریوگرام در نظر گرفته شده برای همه دسته بندی ها یکسان بوده که نمونه هایی از واریوگرام های برازش داده شده در (شکل ۱۰) نمایش داده شده و مشخصات آنها در (جدول ۴) خلاصه شده است.



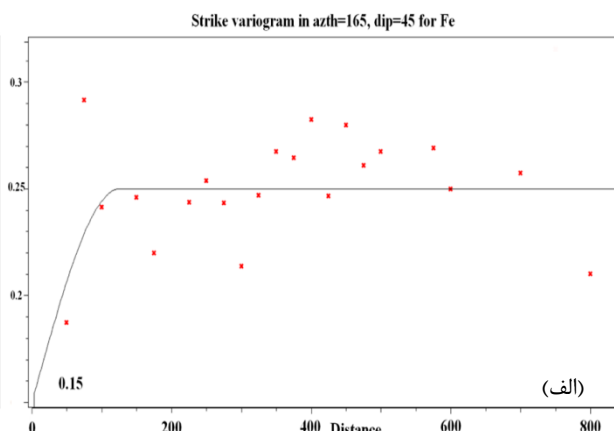
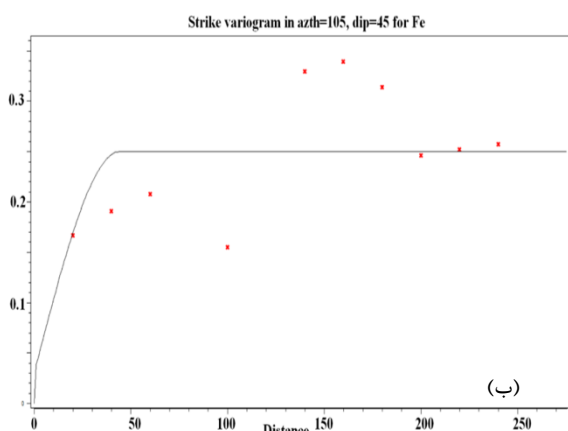
شکل ۸- نحوه توزیع عیار آهن در داخل مدل بلوکی زون جنوبی کانسار چاه باشه با روش عکس مجذور فاصله.



شکل ۹- تقسیم تابع توزیع تجمعی زون جنوبی کانسار چاه باشه به ۹ قسمت به منظور استفاده از کریجینگ شاخص متوالی.

جدول ۳- مشخصات میزان و احتمال تقریب عیار قسمت‌های مختلف تابع توزیع تجمعی در زون جنوبی کانسار چاه باشه.

احتمال (%)	۹۸	۹۵	۹۰	۷۵	۶۰	۴۵	۳۰	۱۵
عیار (%)	۳۹/۹۵	۳۳/۷۱۵	۲۹/۰۵	۲۱/۱۷	۱۵/۷۶	۱۱/۶	۹/۲۱۳	۶/۸۹۲



شکل ۱۰- واریوگرام های جهتی الف) آزیموت ۱۶۵ درجه و شیب ۴۵ درجه، ب) آزیموت ۱۰۵ درجه و شیب ۴۵ درجه جهت عملیات کریجینگ شاخص برای داده‌های آهن زون ۱ در کانسار چاه باشه.

جدول ۴- مشخصات واریوگرام‌های امتدادی داده‌های آهن در زون جنوبی کانسار چاه باشه.

مدل واریوگرام	جهت (آزیموت)	شیب (درجه)	اثر قطعه‌ای	شعاع تاثیر (متر)	سقف
کروی	۱۰۵	۴۵	۰/۰۳	۴۰	۰/۲۲
کروی	۱۶۵	۴۵	۰/۱	۱۲۵	۰/۱۵

مطابق این نمودار تحقق‌ها توانسته‌اند به خوبی پارامترهای آماری داده‌های اولیه (بیشینه، کمینه، میانه و میانگین) را تولید نمایند.

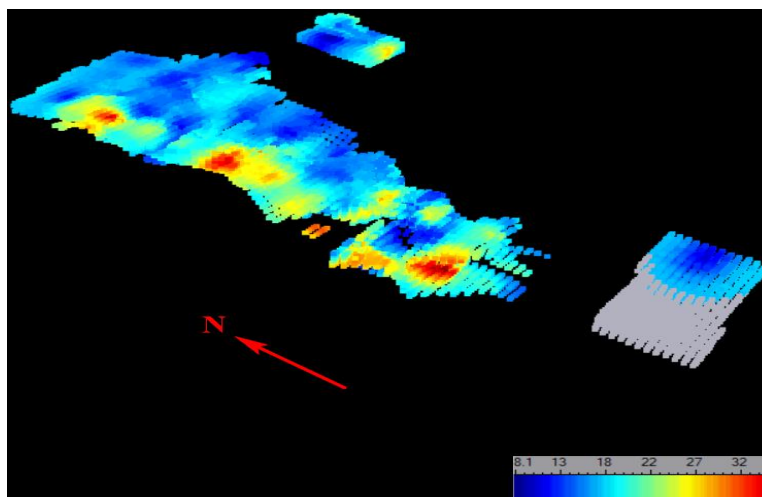
برای اولویت‌بندی تحقق‌ها مقدار تخمینی هر بلوک توسط شبیه‌سازی، با مقدار به‌دست آمده از سه روش دیگر، مقایسه شده و بلوک‌های با اختلاف بیش از ده درصد حذف شدند. تعداد کل پیکسل‌های تخمینی برابر با ۳۵۲۴۰ عدد بوده و رتبه‌بندی ۳۲ تحقق براساس توانایی تعداد پیکسل‌های تخمینی مطابق (جدول ۵) صورت پذیرفته است.

در (شکل ۱۳) واریوگرام مربوط به چهار تحقق اول (شماره های ۱۴۲، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۴۵) با واریوگرام کلی داده‌های اولیه آهن مقایسه شده است. مطابق این شکل واریوگرام ۴ تحقق اول با واریوگرام غیرجهتی داده‌های اولیه، تطابق خوبی داشته و واریوگرام تحقق شماره ۱۴۲ بهترین هم‌خوانی را با داده‌های خام اولیه دارد. در جدول ۶ پارامترهای آماری مربوط به ۴ تحقق اول و نیز داده‌های خام، آورده شده است. در (شکل ۱۴) نیز تصویر مدل بلوکی چهار اولویت اول آورده شده است.

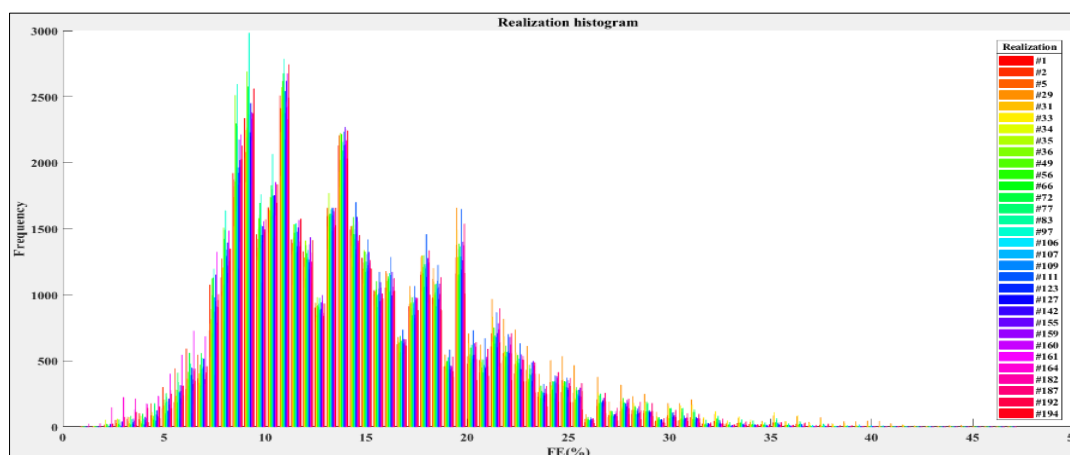
نحوه توزیع عبار آهن در داخل مدل بلوکی زون جنوبی کانسار چاه باشه با این روش در (شکل ۱۱) نشان داده شده است.

اعمال روش SGS بر روی داده‌های منطقه

در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SGeMS، ۲۰۰ تحقق برای منطقه مورد نظر صورت گرفت. در روش‌های معمول برای به‌دست آوردن بهترین تحقق، واریوگرام‌های حاصل با واریوگرام کلی داده‌های اولیه مقایسه شده و تحقق‌های برتر از طریق میزان انطباق، انتخاب می‌شوند. در پژوهش حاضر به منظور سرعت عمل بالا، ابتدا ضریب همبستگی بین ۲۰۰ تحقق صورت گرفته با نتایج حاصل از سه روش کریجینگ معمولی، عکس مجذور فاصله و کریجینگ شاخص پیوسته، تعیین شده و تحقق‌های دارای ضریب همبستگی بیشتر از ۱۰ درصد، انتخاب شدند. در این راستا در نهایت ۳۲ تحقق (مجموعه تحقق‌های به‌دست آمده از سه روش) به‌عنوان تحقق‌های قابل بررسی انتخاب شدند که نمودار فراوانی نمای این ۳۲ تحقق در (شکل ۱۰) آورده شده است.



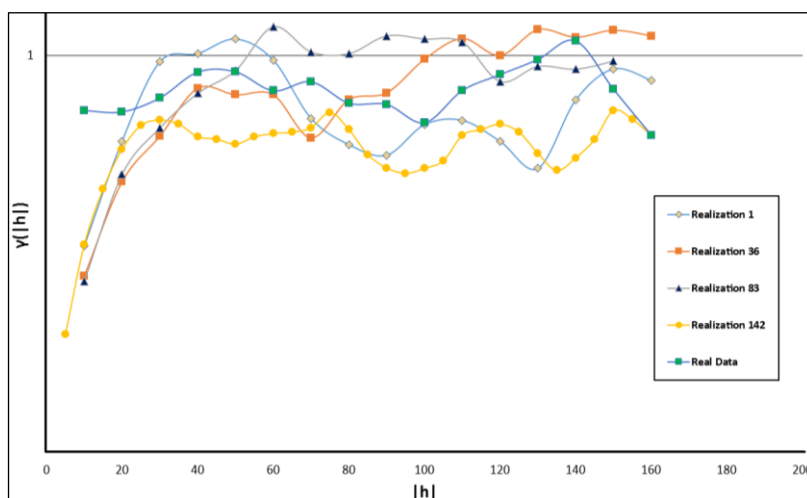
شکل ۱۱- توزیع عبار آهن تخمینی زون جنوبی کانسار چاه باشه با روش کریجینگ شاخص پیوسته بلوکی.



شکل ۱۲- نمودار فراوانی نمای داده‌های عیارسنجی آهن ۳۲ تحقق انتخاب شده.

جدول ۵- اولویت بندی تحقیق های صورت گرفته براساس توانایی تعداد پیکسل های تخمینی.

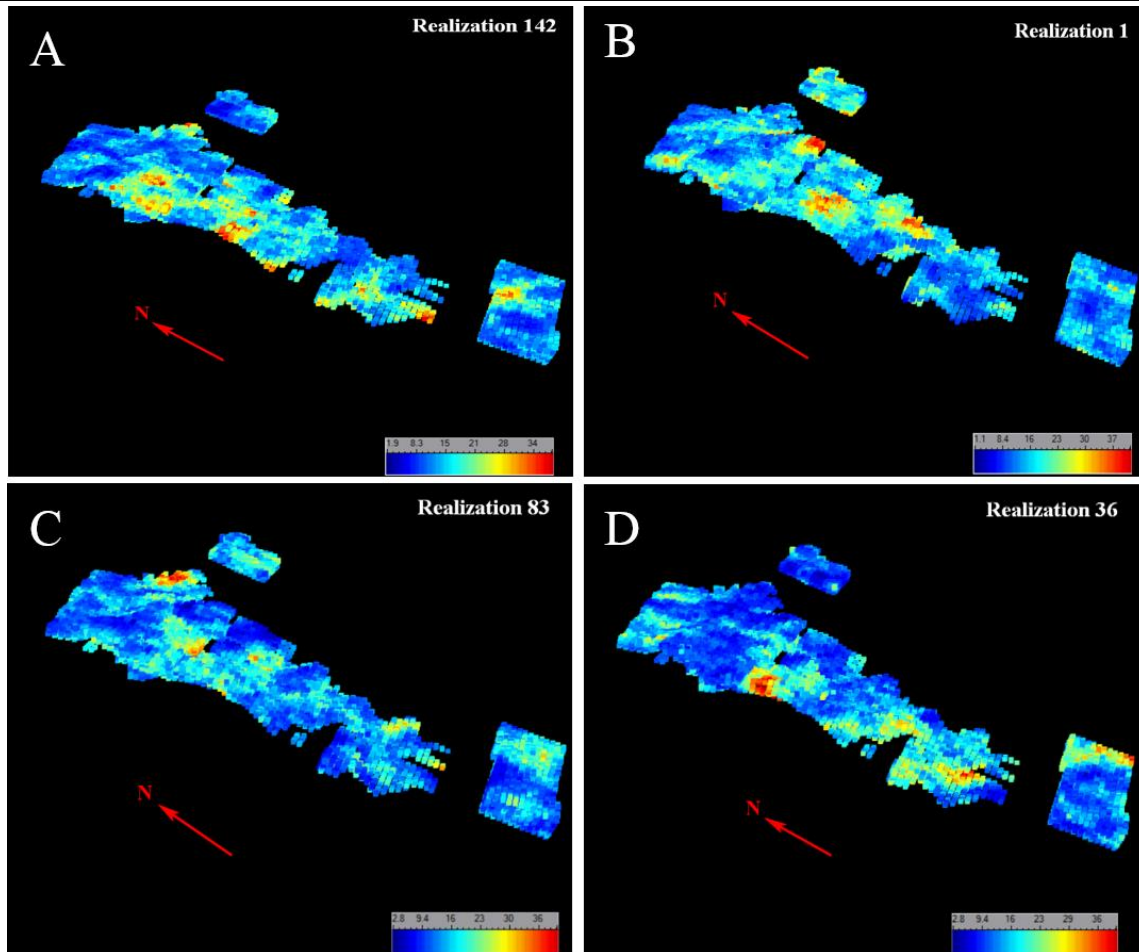
اولویت	شماره تحقق	تعداد بلوک های تخمین زده شده	اولویت	شماره تحقق	تعداد بلوک های تخمین زده شده
۱	۱۴۲	۲۹۹۵۵	۱۷	۵۶	۲۸۱۱۰
۲	۳۶	۲۹۲۱۴	۱۸	۳۱	۲۸۰۹۸
۳	۱	۲۹۱۰۸	۱۹	۳۳	۲۸۰۸۱
۴	۸۳	۲۸۹۰۴	۲۰	۷۲	۲۸۰۵۷
۵	۱۶۴	۲۸۹۰۰	۲۱	۴۹	۲۷۹۳۴
۶	۱۰۹	۲۸۶۷۴	۲۲	۱۲۳	۲۷۹۲۲
۷	۵	۲۸۵۹۵	۲۳	۳۵	۲۷۹۲۱
۸	۱۸۲	۲۸۵۸۳	۲۴	۱۰۷	۲۷۷۵۲
۹	۱۸۷	۲۸۴۸۶	۲۵	۱۰۶	۲۷۶۳۶
۱۰	۱۱۱	۲۸۴۴۶	۲۶	۷۷	۲۷۶۲۰
۱۱	۶۶	۲۸۴۰۸	۲۷	۹۷	۲۷۵۴۳
۱۲	۱۹۲	۲۸۳۶۵	۲۸	۲	۲۷۵۳۸
۱۳	۱۶۰	۲۸۳۱۹	۲۹	۳۴	۲۷۴۰۴
۱۴	۱۵۹	۲۸۳۱۷	۳۰	۱۲۷	۲۷۳۱۶
۱۵	۱۵۵	۲۸۲۷۹	۳۱	۱۶۱	۲۷۱۲۷
۱۶	۱۹۴	۲۸۲۱۷	۳۲	۲۹	۲۶۸۸۰



شکل ۱۳- واریوگرام داده های ۴ تحقق و واریوگرام غیرجهتی داده های اولیه.

جدول ۶- پارامترهای آماری داده های اولیه و ۴ تحقق انتخاب شده.

پارامتر / نوع داده	میانگین	میانه	کمینه	بیشینه	چولگی	انحراف معیار
داده های خام	۱۵/۳۹	۱۲/۶۸	۰/۵۸	۴۹/۴۶	۰/۸۹	۹/۹۸
تحقق شماره ۱	۱۴/۱۵	۱۳/۴۶	۱/۱۴	۴۱/۶۷	۰/۹۶	۴/۳۵
تحقق شماره ۳۶	۱۳/۸۴	۱۲/۴۷	۲/۷۸	۳۹/۹۰	۱/۰۰	۵/۵۴
تحقق شماره ۸۳	۱۴/۹۶	۱۴/۰۵	۲/۷۷	۴۰/۲۲	۰/۹۲۵	۵/۷۸
تحقق شماره ۱۴۲	۱۳/۷۷	۱۲/۹۸	۱/۹۴	۳۷/۷۸	۰/۸۷	۵/۱۱



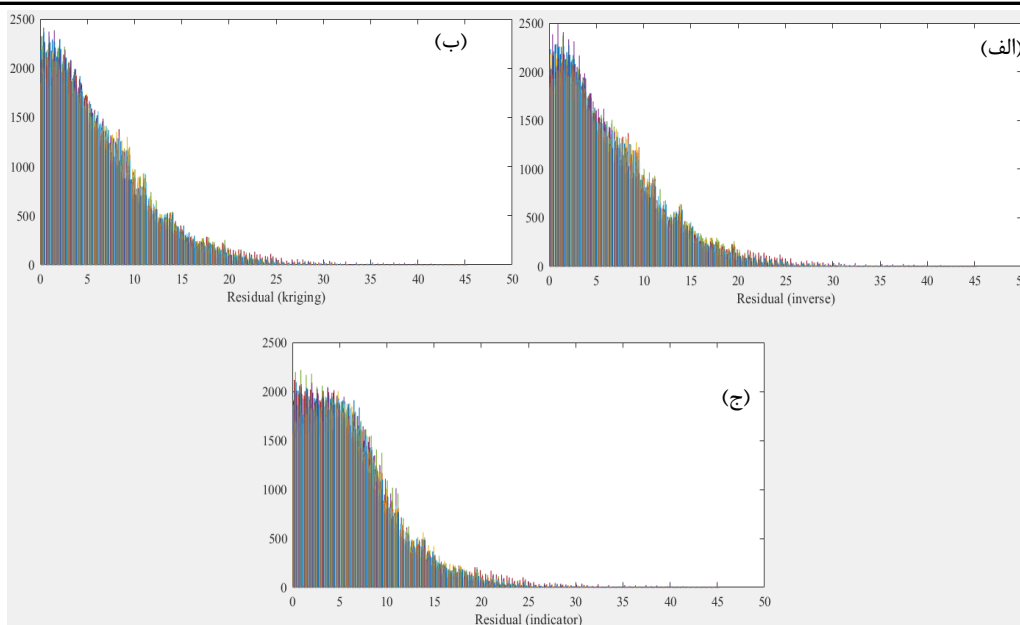
شکل ۱۴- نحوه توزیع عیار آهن مدل بلوکی برای چهار تحقق برتر. (A) تحقق شماره ۱۴۲، (B) تحقق شماره ۸۳، (C) تحقق شماره ۳۶، (D) تحقق شماره ۳۶.

در این پژوهش سعی شده تا با اعمال پردازش‌های مناسب، مشکلات مطرح شده تا حد امکان برطرف شده و پاسخ شبیه‌سازی، معرف مقادیر واقعی‌تری از ذخیره کانسار مورد مطالعه باشد. برای این منظور ابتدا نقشه‌های باقیمانده ۳۲ شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به (شکل ۱۵) مشاهده می‌شود که فراوانی مقادیر باقیمانده اغلب کمتر از ۱۰ درصد (عیاری) می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت که تحقق‌های انجام شده دارای صحت نسبتاً خوبی هستند.

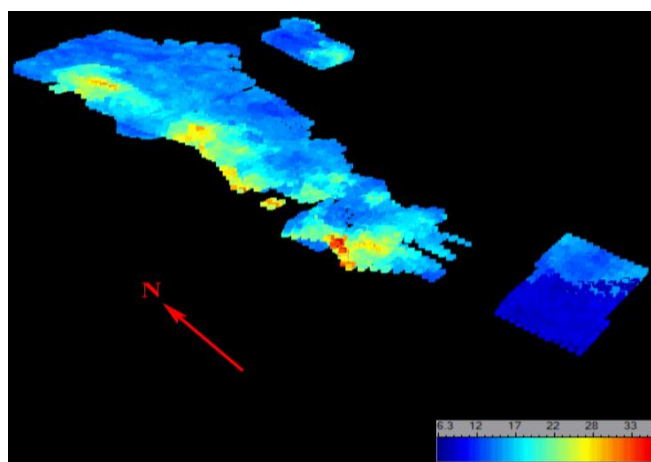
از بین تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده باید بلوک‌هایی که دارای مقادیر باقیمانده بالاتر از ۱۰ درصد (عیاری) می‌باشند، به روشی صحیح مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوط به آن‌ها تصحیح شده و به مقدار واقعی نزدیک‌تر شوند. با توجه به بیشترین مقدار آهن داده‌های خام اولیه و حد بالای میانگین عیار آهن (۳۷ درصد) به دست آمده با روش‌های متداول زمین‌آماري، بنابراین مقادیر باقیمانده ۱۰ تا ۱۲ درصد، مقدار معقولی برای نتایج به دست آمده خواهند بود. پس اگر بلوکی دارای مقدار باقیمانده بیش از این مقدار باشد، مقدار آن بلوک از آن تحقق خارج شده و بلوک توسط آن تحقق خاص، قابل ارزیابی نخواهد بود. برای به دست آوردن نقشه جامع به جای میانگین‌گیری از همه تحقق‌ها (همه پیکسل‌های تحقق‌ها) تنها میانگین‌گیری از بلوک‌های مشخص شده در مرحله قبل صورت می‌پذیرد. بدین ترتیب نقشه خروجی (شکل ۱۶) دارای مقادیر واقع‌گرایانه‌تری نسبت به حالتی است که میانگین‌گیری بین همه تحقق‌ها صورت گیرد.

در پژوهش حاضر به منظور دست‌یابی به نتیجه مطلوب، از نقشه‌های باقیمانده استفاده شده است. بدین ترتیب که برای هر پیکسل اختلاف عیار تخمینی توسط شبیه‌سازی با عیار به دست آمده از روش‌های کریجینگ معمولی، عکس مجذور فاصله و کریجینگ شاخص پیوسته محاسبه شده است. در این مرحله ابتدا بلوک‌هایی که توسط روش‌های کریجینگ معمولی، عکس مجذور فاصله و کریجینگ شاخص پیوسته قابل تخمین نبوده است، از خروجی شبیه‌سازی کنار گذاشته شدند. در نقشه‌های باقیمانده، هر شبیه‌سازی که کمترین میانگین را داشته باشد، به عنوان بهترین شبیه‌سازی در نظر گرفته خواهد شد. اما آیا جواب‌های به دست آمده برای عیار در موقعیت‌های مشخص شده درست می‌باشند؟

در تحقیقات گذشته همواره با بررسی واریوگرام‌های مربوط به تحقق‌ها و انطباق آنها با واریوگرام کلی اولیه، یک یا چند تحقق به عنوان تحقق برتر شناخته شده و در نهایت با میانگین‌گیری از همه تحقق‌ها، یک تصویر به عنوان تصویر خروجی در نظر گرفته شده است. اما با دقت در عیار تخمینی و مقایسه آن با سایر روش‌ها، چند سوال مهم مطرح می‌شود: ۱- آیا همه پیکسل‌های یک تحقق باید برای خروجی در نظر گرفته شده است. اما با دقت در عیار تخمینی و مقایسه شبیه‌سازی، صحت لازم را دارد؟ ۲- آیا عیار خروجی حاصل از شبیه‌سازی، صحت لازم را دارد؟ ۳- در شبیه‌سازی همه پیکسل‌ها دارای مقدار خروجی هستند؛ آیا این امر با توجه به آمار فضایی و محدودیت ارتباط نقاط، با توجه به واریوگرام‌های به دست آمده صحیح است؟ ۴- آیا میانگین‌گیری از همه تحقق‌ها برای دست‌یابی به نقشه خروجی، درست می‌باشد؟



شکل ۱۵- نمودار فراوانی نمای مقادیر باقیمانده برای ۳۲ شبیه‌سازی صورت گرفته نسبت به روش‌های الف) عکس مجذور فاصله، ب) کریجینگ معمولی و ج) کریجینگ شاخص.



شکل ۱۶- مدل بلوکی توزیع عیار آهن در زون جنوبی کانسار چاه باشه با روش شبیه‌سازی.

مقایسه

به منظور مقایسه، نتایج آماره‌های توصیفی مقادیر تخمینی، نمودارهای عیار-تناژ و میزان همبستگی نتایج توسط روش‌های تخمین مختلف مورد استفاده در این پژوهش، آورده شده است. آماره‌های توصیفی مقادیر تخمینی توسط روش‌های تخمین مختلف مورد استفاده در پژوهش حاضر بدون در نظر گرفتن عیار حد در (جدول ۷) خلاصه شده است.

داده‌های این جدول نشان می‌دهند که میانگین داده‌های تخمینی به روش شبیه‌سازی متوالی گوسی، بیشترین شباهت و داده‌های تخمینی به روش کریجینگ شاخص، بیشترین اختلاف را با میانگین داده‌های خام (جدول ضمیمه) دارا می‌باشند که البته این نتیجه با توجه به پایه و اساس این دو روش زمین‌آماری، منطقی به نظر می‌رسد. به هر جهت روش‌های کریجینگ شاخص، کریجینگ معمولی، عکس مجذور فاصله و شبیه‌سازی متوالی گوسی به ترتیب بیشترین میزان عیار متوسط را تخمین زده‌اند. همچنین روش‌های شبیه‌سازی متوالی گوسی، کریجینگ شاخص، کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله به ترتیب دارای کمترین مقدار واریانس تخمین می‌باشند.

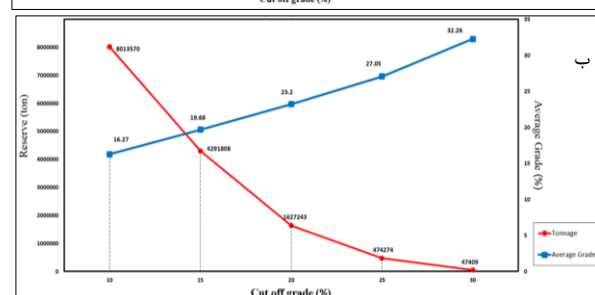
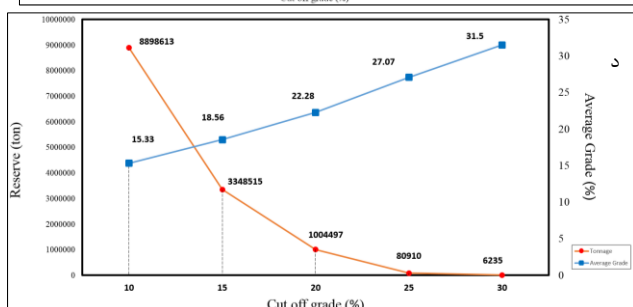
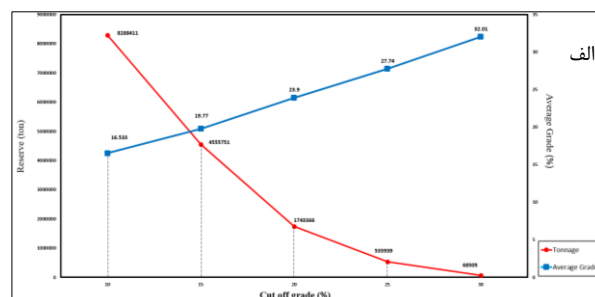
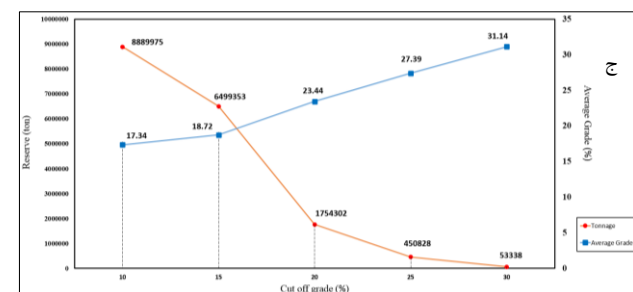
نمودارهای عیار- تناژ کانسار به ازای عیار حدهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد به دست آمده توسط روش‌های مختلف تخمین مورد استفاده، در (شکل ۱۷) نشان داده شده است. مطابق نمودارهای این شکل در مجموع اختلاف میزان ذخیره محاسبه شده با روش‌های مختلف مورد استفاده در این پژوهش، چندان زیاد نمی‌باشد که البته مهم‌ترین دلیل این امر آن است که در پژوهش حاضر از دقیق‌ترین روش‌های تخمین زمین‌آماری استفاده شده ولی قدر مسلم نتایج روش شبیه‌سازی متوالی گوسی از سایر روش‌های دیگر دقیق‌تر بوده و از درجه اعتماد بیشتری برخوردار است. در (جدول ۸) نیز ماتریس همبستگی مقادیر تخمینی عیار آهن زون جنوبی کانسار چاه باشه با روش‌های مختلف تخمین مورد استفاده در این پژوهش، آورده شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که بیشترین میزان همبستگی (در حدود ۰/۸۷) بین نتایج تخمین دو روش کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله و کمترین میزان همبستگی (در حدود ۰/۵۶) بین نتایج تخمین دو روش شبیه‌سازی متوالی گوسی و عکس مجذور فاصله می‌باشد. این امر نیز نشان از دقت بالای روش شبیه‌سازی متوالی گوسی و اختلاف زیاد نتایج این روش با نتایج روش عکس مجذور فاصله می‌باشد.

جدول ۷- مقایسه پارامترهای آماری داده‌های اولیه و خروجی روش‌های تخمین مورد استفاده.

پارامتر	میانگین	میانه	انحراف معیار	واریانس
نوع داده				
داده‌های خام	۱۴/۸۵	۱۲/۰۸	۹/۶۸	۹۳/۷۷۸
کریجینگ معمولی	۱۶	۱۵/۱۲	۴/۹۵	۲۴/۴۸
عکس مجذور فاصله	۱۵/۷۱	۱۴/۹۴	۴/۹۶۳	۲۴/۶۳
کریجینگ شاخص	۱۷/۳۰	۱۶/۳۷	۳/۷۷۷	۱۴/۲۷
شبیه‌سازی متوالی گوسی	۱۴/۷۴	۱۴	۳/۶۱	۱۳/۰۳

جدول ۸- ماتریس هم‌بستگی مقادیر تخمینی عیار آهن زون جنوبی کانسار چاه باشه با روش‌های زمین‌آماری و کلاسیک.

روش تخمین	کریجینگ معمولی	کریجینگ شاخص پیوسته	عکس مجذور فاصله	شبیه‌سازی متوالی گوسی
کریجینگ معمولی	۱	۰/۷۶	۰/۸۷	۰/۶
کریجینگ شاخص پیوسته	۰/۷۶	۱	۰/۷۸	۰/۶۵
عکس مجذور فاصله	۰/۸۷	۰/۷۸	۱	۰/۵۶
شبیه‌سازی متوالی گوسی	۰/۶	۰/۶۵	۰/۵۶	۱



شکل ۱۷- نمودار عیار- تناژ آهن زون جنوبی کانسار چاه باشه با روش (الف) کریجینگ معمولی، (ب) عکس مجذور فاصله، (ج) کریجینگ شاخص و (د) شبیه‌سازی متوالی گوسی.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعات آماری و زمین‌آماری کانسار آهن چاه باشه یزد را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

مطالعات آماری داده‌های عیارسنجی آهن از طریق تعیین آماره‌های توصیفی مختصر، ترسیم هیستوگرام و نمودار توزیع احتمال تجمعی نشان می‌دهد که توزیع داده‌های آهن از نوع لاگ نرمال بوده که برای تبدیل آنها به توزیع نرمال و پردازش آنها، از روش تبدیل لگاریتم سه پارامتری استفاده شد. براساس نوع کانی‌زایی کانسار چاه باشه، توپوگرافی منطقه، نحوه پراکندگی گمانه‌های اکتشافی در دو محدوده مجزا، محدوده به دو زون ۱ (جنوبی) و ۲ (شمالی) تقسیم شد و به دلیل تمرکز زیاد گمانه‌های اکتشافی در زون جنوبی، مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار و تخمین ذخیره، برای این محدوده صورت گرفت. برای این منظور روش‌های تخمین زمین‌آماری غیرخطی لاگ کریجینگ معمولی، کریجینگ شاخص و شبیه‌سازی متوالی گوسی و نیز روش آماری عکس مجذور فاصله به کار برده شد و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردید. مطابق واریوگرافی سه‌بعدی داده‌های عیارسنجی آهن از طریق ترسیم واریوگرام‌های امتدادی در

راستاهای مختلف با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار SGeMS، توابع موجود در نرم‌افزار MATLAB و نیز کدنویسی‌های کوتاه در این محیط، منطقه به-طور کلی ناهمسان‌گرد بوده که هر دو نوع ناهمسان‌گردی هندسی و ناحیه‌ای در منطقه وجود دارد. مدل واریوگرام‌های تئوری انطباق یافته بر داده‌های تجربی عمدتاً از نوع نمایی و کروی و یا ترکیبی از آنها بوده که بیشترین شعاع تأثیر در راستای آزیموت ۱۳۵ درجه و کمترین آن در جهت حفر گمانه‌ها با شیب ۹۰ درجه است.

مقایسه نتایج تخمین عیار میانگین، واریانس خطای تخمین، میزان ذخیره و ترسیم نمودارهای عیار- تناژ به ازای عیار حدهای مختلف با روش‌های تخمین مورد استفاده نشان می‌دهد که اگرچه همه روش‌های انتخاب شده از دقیق‌ترین روش‌های تخمین می‌باشند، به هر جهت روش‌های شبیه‌سازی متوالی گوسی، کریجینگ شاخص، کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله به ترتیب دارای کمترین مقدار واریانس تخمین هستند. در این پژوهش با اعمال یک سری پردازش‌های مناسب در مرحله اعمال شبیه‌سازی متوالی گوسی بر روی داده‌ها

های تخمین زمین آماری غیرخطی همانند کریجینگ شاخص و شبیه‌سازی متوالی گوسی، گریزنایپذیر است. اگرچه روش‌های تخمین زمین آماری غیرخطی از پیچیدگی‌های خاص خود برخوردارند، به‌هرجهت در صورت فهم درست مفاهیم نظری این روش‌ها و انتخاب درست پارامترهای آنها به هنگام تخمین، منجر به نتایج بسیار دقیق، سودمند و مطلوبی می‌شوند. نتایج این پژوهش برای کلیه کاربران علوم زمین به‌ویژه مهندسیین اکتشاف معدن و زمین‌شناسان اقتصادی که همواره با موضوع تخمین دقیق ذخایر معدنی درگیر می‌باشند، قابل استفاده است.

همانند استفاده از نقشه‌های باقیمانده، نتایج مطلوب‌تری حاصل شده که از درجه اعتبار بیشتری نیز برخوردارند. در مجموع، نزدیک بودن نتایج تخمین عیار و میزان ذخیره کانسار با روش‌های دقیق زمین‌آماري کریجینگ شاخص و روش شبیه‌سازی متوالی گوسی نیز دلیلی بر صحت نتایج و عملکرد پژوهش می‌باشد. بنابراین در مورد کانسارهایی که پراکنندگی داده‌های عیارسنجی آنها از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند و در نتیجه بازگرداندن واریانس تخمین داده‌ها بعد از تبدیل لگاریتمی داده‌های خام و تخمین به روش لاگ کریجینگ، امکان پذیر نمی‌باشد، استفاده از روش-

منابع

- علائی مهابادی، س.، فودازی، م.، داوری، م.، بهره مند، م.، ۱۳۸۳، نقشه زمین‌شناسی سرو بالا با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- عمیدی، س.م.، نبوی، م.ح.، ملاعلی، ع.، جلیلیان، م.، حسینی، ز.، افشاریان زاده، ا.، ماهوتی، ر.، ۱۳۶۸، نقشه زمین‌شناسی نائین با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یوسفی، م.، جعفرزاده، ا.، کریمی، ا.، فریدونی، ح.، ۱۳۹۲، گزارش اکتشاف تفصیلی محدوده کانسار چاه باشه: طرح اکتشاف عمومی و تفصیلی آنومالی‌های سنگ آهن فلات مرکزی ایران، معاونت اکتشاف شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۶۷ صفحه.
- Ahmadi, R., 2010. Application of statistical patterns for ore reserve estimation emphasis to Ali-abad, Yazd copper mine. Arak University of Technology, Vice Chancellor for Research, Arak, 102 pp.
- Annels, A.E., 1991. Mineral Deposit Evaluation: A Practical Approach, Chapman & Hall, London, XV, 436 pp.
- Bohling, G., 2007. SGeMS Tutorial Notes, 26 pp.
- Daya, A., 2012. Reserve estimation of central part of Choghart north anomaly iron ore deposit through ordinary kriging method. International Journal of Mining Science and Technology, 22 (4): 573-577.
- Ghajar, Y. and Soltani-Mohammadi, S., 2015. Statistical and geostatistical modeling of Fe, S and P grade in Jalal-abad Iron ore mine. 33rd National Geosciences Symposium, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for Natural Resources Evaluation; Oxford University Press, Applied Geostatistics Series; 483 pp.
- Gossage, B., 1998, The application of indicator kriging in the modeling of geological data.
- Hassani-Pak, A.A. and Sharafodin, M.S., 2001. Exploration data analysis. Tehran University Press, 987 pp.
- Hassani-Pak, A.A., 2003, Error and risk management in exploration; Tehran university press, 272 pp.
- Hekmat-nejad, A. and Hassani-pak, A.A., 2011. Estimation of copper grade distribution using disjunctive kriging nonlinear estimator, case study: Sungon mine. Iranian Journal of Mining Engineering, 6(12): 11-19.
- Jalloh, A.B., Sasaki, K., Jalloh, Y. and Barrie, A.K., 2016. Integrating artificial neural networks and geostatistics for optimum 3-D geological block modeling in mineral reserve estimation: a case study. International Journal of Mining Science and Technology, 26(4): 581-585.
- Madani, H., 1997. Principles of prospecting, exploration and evaluation of ore reserves, Khane Farhang, 816 pp.
- Nussbaumer, R., Mariethoz, G., Gravey, M., Gloaguen, E., Holliger, K., 2018, Accelerating Sequential Gaussian Simulation with a constant path; Computers & Geosciences, 112, 121-132.
- Rasera, L., Felipe, L., Costa, C., 2015, A conflict-free, path-level parallelization approach for sequential simulation algorithms; Computers & Geosciences, 80, 49-61.
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2006. SGeMS User's Guide, 129 pp.
- Remy, N., Boucher, A., Wu, J., 2009, Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide.
- Rendu, J.M., 1981. An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation, South African Institute of Mining and Metallurgy monograph series, Johannesburg, 84 pp.
- Salsabilian, F., 2006. Iron deposit reserve estimation of northern anomaly of Bafg using indicator kriging. 5th Students Mining Engineering Conference, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Sharif, A.J. and karim-zadeh, V., 2015. Variography of exploration data of Korkora2 iron ore deposit for determination of required parameters in order to reserve estimation. 33rd National Geosciences Symposium, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Yousefi, M., Jaafarzadeh, A.O., Karami, A. and Fereidooni, H., 2013, Detailed exploration report of the region of Chah-bashe deposit, Iran Minerals Supply and production Co., Tehran, 125R4-02, 67 pp.
- Zakary, M., Rasouli, V. and Tokhmchi, B., 2005. Geostatistical modeling and reserve estimation of Gol-Gohar iron ore (3) anomaly using Surpac software. 9th Symposium of Geological Society of Iran, Tehran, Iran.

جدول ضمیمه: بخشی از داده های عیارسنجی و اطلاعات گمانه های اکتشافی کانسار سنگ آهن چاه باشه یزد.

BHID	From	To	Mn	Fe	Lithology
BH-4	0.0	2.5	3.21	21.96	Manganous iron ore, spotted, with marble relics.
BH-4	2.5	6.0	2.68	16.90	Marble mineralized, spotted.
BH-4	6.0	6.5	1.50	7.97	Mylonite, greenish-white in colour, friable, with marble blocks.
BH-4	7.00	8.10	2.25	16.21	Mylonite, greenish-white in colour, friable, with marble blocks.
BH-4	14.6	20.0	1.50	11.13	Marble, greyish-brown in colour, spotted, with manganous iron ore veinlets.
BH-4	21.2	25.8	3.00	22.05	Fine-spotted manganous iron ore.
BH-4	25.8	29.5	1.18	9.08	Marble, greyish-brown in colour, with relics of fragmental limestone
BH-4	33.6	35	1.39	8.66	Marble, brown, massive
BH-4	35	36	2.14	15.46	Alteration of manganous iron ore, mineralized marble and greyish-brown hydrothermally altered marble.
BH-4	36	37	3.45	38.06	Alteration of manganous iron ore, mineralized marble and greyish-brown hydrothermally altered marble.
BH-4	37	37.50	2.41	18.07	Alteration of manganous iron ore, mineralized marble and greyish-brown hydrothermally altered marble.
BH-4	37.5	38	4.18	40.67	Alteration of manganous iron ore, mineralized marble and greyish-brown hydrothermally altered marble.
BH-4	38.0	40.4	1.82	13.67	Alteration of manganous iron ore, mineralized marble and greyish-brown hydrothermally altered marble.
BH-4	40.4	41.8	3.32	29.81	Alteration of manganous iron ore, mineralized marble and greyish-brown hydrothermally altered marble.
BH-4	41.8	44	1.88	10.99	Marble, yellowish-brown, hydrothermally altered, spotted.
BH-4	44	47.5	1.45	7.35	Marble, yellowish-brown, hydrothermally altered, spotted.
BH-4	47.5	48.4	1.34	7.21	Marble, yellowish-brown, hydrothermally altered, spotted.
BH-4	48.4	51.0	2.86	20.20	Marble, greyish-brown in colour, mineralized, spotted.
BH-4	51.00	54.20	2.02	9.48	Marble, greyish-brown in colour, mineralized, spotted.
BH-4	54.20	55.90	3.82	25.01	Manganous iron ore, spotted, with sections of mineralized marble.
BH-4	55.90	56.30	2.33	11.54	Manganous iron ore, spotted, with sections of mineralized marble.
BH-4	56.30	59.00	3.98	25.97	Manganous iron ore, spotted, with sections of mineralized marble.
BH-4	59.00	60.50	3.02	16.76	Manganous iron ore, spotted, with sections of mineralized marble.
BH-4	60.50	61.30	5.25	39.43	Manganous iron ore, spotted, with sections of mineralized marble.
BH-4	61.30	63.10	2.97	18.41	Marble, mineralized, massive, with manganous iron ore veinlets.
BH-4	63.10	64.60	2.81	18.62	Marble, mineralized, massive, with manganous iron ore veinlets.
BH-4	64.60	66.00	2.12	11.54	Marble, mineralized, massive, with manganous iron ore veinlets.
BH-4	66.00	69.00	2.12	9.07	Marble, mineralized, massive, with manganous iron ore veinlets.
BH-4	69.00	72.60	1.86	9.62	Dolomitic marble, medium-grained, yellowish-brown in colour.
BH-5	4.1	4.5	4.03	31.26	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, with 0.4m thickness interbed of manganous iron ore.
BH-5	9.0	10.6	1.53	7.62	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, with interbeds and relics of grey massive marble.
BH-5	12.20	13.00	1.69	8.66	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, with interbeds and relics of grey massive marble.
BH-5	13.0	16.0	1.90	9.89	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, with interbeds and relics of grey massive marble.
BH-5	17.0	20.6	1.69	7.69	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, with interbeds and relics of grey massive marble.
BH-5	23.70	26.40	0.69	3.02	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered.
BH-5	26.4	29	0.58	2.68	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered.
BH-5	29	32	1.95	11.33	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered.
BH-5	34	35	1.21	6.66	Marble, grey, massive, with interbeds of greyish-brown spotted marble.
BH-5	37	38.60	1.16	9.48	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	38.5	42	0.76	5.87	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	42.0	44.0	0.81	5.16	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	44.0	46.0	2.58	0.58	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	46.0	47	0.51	5.09	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	47	48.0	0.56	5.09	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	48.0	49.7	0.66	5.52	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	49.00	50.70	1.27	7.57	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	50.70	51.70	1.58	9.34	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	51.70	53.20	0.22	7.43	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.
BH-5	53.20	55.80	0.50	8.92	Marble, greyish-brown in colour, hydrothermally altered, predominantly massive, in places mineralized.