Researches in Earth Sciences

Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

Research Article

Modeling and ore reserve evaluation of Feyz-Abad Pb-Zn deposit using non-linear geostatistical methods

Reza Ahmadi[1*], Abdoreza Gharah-Sheikh Bayat[1]

1-Department of Mining Engineering, Earth Sciences Engineering College, Arak University of Technology, Arak, Iran

Received: 15 Sep 2020 Accepted: 06 Jan 2021

Extended Abstract

Introduction

In the present research, geological-exploratory modeling of Feyz-Abad Pb-Zn deposit located in Isfahan province has been carried out as well as evaluation in terms of grade and amount of reserve. The exposed lithology units of the area with possible Paleozoic age from bottom to top, include chlorite schist, carbonate assemblages and green schists. Occurrence of zinc-lead mineralization with carbonate host in a metamorphic sedimentary volcanic sequence is one of the significant mineralization features in this region. The slightly altered limestone and dolomite, perform as host rocks of the deposit.

Materials and Methods

The studied deposit area based on the topography of the region and amount and type of available exploratory information, has been divided into two distinct areas of Aghahesab and Kharzan Mountain. So, modeling of the deposit and reserve evaluation of each region and the whole district have been undertaken separately. To know the statistical distribution of total Pb-Zn assay data and the correct choice of estimation method, first the initial statistical processing of the data was performed. Afterwards in order to fully understand and imagine the status of the deposit lithology, the log of all boreholes and drill holes, 3-D lithology model of the deposit and cross sections of lithology corresponding to a large number of the region designated profiles, were mapped. Depending on the mineral state, amount and type of carried out exploratory works and available exploratory information, among the variety of reserve estimation methods, accurate non-linear geostatistical methods containing ordinary log-kriging and indicator kriging have been employed. Then tonnage-grade curves have been plotted for cut off grades of 1.5, 2, 2.5 and 3 percent.

Results and Discussion

The results of the research show that although both applied geostatistical methods are the most accurate of reserve estimation methods, however the difference between the results of estimation (grade and reserve) by means of the two methods is relatively high. The lack of sufficient exploratory information and the nature of the employed methods are the most important reasons for this subject but in general, the results of the indicator kriging method are more reliable. The amount of reserve calculated for various cut off grades in the study zones with the ordinary log kriging method is higher than the indicator kriging. This is due to higher blending of ore and gangue in ordinary log-kriging method than the other. For this reason, in general, the average grade for the variety of cut off grades in the indicator kriging method is higher than the ordinary log-kriging. The difference between the amount of reserve calculated by these two methods for the whole of Feyz-abad lead-zinc deposit for cut off grades of 1.5, 2, 2.5 and 3%, is equal to 26.9, 22, 27 and 17.8%, respectively.

Conclusion

Nonlinear geostatistical estimation methods have their own complexities, however, understanding the theoretical concepts of these methods properly and selecting their parameters correctly during estimation, will lead to very accurate, useful and desirable results. To increase the accuracy of ore reserve estimation of the studied area, it is suggested that the density of the minerals in various parts of the deposit to be determined by laboratory method with high accuracy. Then, through the index simulation method and determination of material type, an exact density is assigned to each block.

Keywords: Geostatistical estimation, Feyz-Abad Pb-Zn deposit, Indicator kriging, Log-kriging, SGeMS software.

Citation: Ahmadi, R. and Gharah-Sheikh Bayat, A., 2021. Modeling and ore reserve evaluation of Feyz-Abad Pb-Zn deposit using non-linear geostatistical methods, *Res. Earth. Sci:* 12(1), (1-20) DOI: 10.52547/esrj.12.1.1

* Corresponding author E-mail address: Rezahmadi@gmail.com

Copyright: © 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مدل‌سازی و ارزیابی ذخیره کانسار سرب و روی فیض‌آباد با استفاده از روش‌های زمین‌آماری غیرخطی

رضا احمدی*، عبدالرضا قره‌شیخ‌بیات[1]

۱-گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

(علمی – پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۶/۲۵ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

چکیده

در پژوهش حاضر مدلسازی زمین‌شناسی- اکتشافی کانسار سرب و روی فیض‌آباد واقع در استان اصفهان انجام شده و از نظر عیار و میزان ذخیره، مورد ارزیابی قرار گرفته است. محدوده کانسار مورد مطالعه براساس توپوگرافی منطقه، میزان و نوع اطلاعات اکتشافی موجود خود به دو منطقه مجزای تپه آقاحساب و کوه خارزن تقسیم شده و مدلسازی کانسار و ارزیابی ذخیره هر منطقه و نیز کل محدوده، به‌طور مجزا صورت گرفته است. برای آگاهی از نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی و انتخاب درست روش تخمین، ابتدا پردازش آماری اولیه داده‌ها انجام شد. سپس به‌منظور شناخت کامل و طرح تصویری از وضعیت لیتولوژی کانسار، نگار لیتولوژی تمام گمانه‌های اکتشافی، مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار و مقاطع عرضی لیتولوژی نظیر تعداد زیادی از پروفیل-های شاخص محدوده، ترسیم شد. براساس وضعیت ماده معدنی، میزان و نوع کارهای اکتشافی انجام‌شده و اطلاعات اکتشافی موجود، از میان روش‌های مختلف تخمین ذخیره، روش‌های زمین‌آماری دقیق غیرخطی لاگ کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص، مورد استفاده قرار گرفته و نمودارهای عیار- تناژ ذخیره به‌ازای عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد ترسیم شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه هر دو روش زمین‌آماری مورد استفاده، از دقیق‌ترین روش‌های تخمین ذخیره می‌باشند، اختلاف نتایج تخمین عیار و ذخیره کانسار با روش‌های مذکور نسبتاً زیاد است. فقدان اطلاعات اکتشافی کافی و ماهیت روش‌های مورد استفاده از مهم‌ترین دلایل این امر هستند ولی در مجموع نتایج روش کریجینگ شاخص قابل اعتمادتر است.

واژه‌های کلیدی: تخمین زمین‌آماری، کانسار سرب و روی فیض‌آباد، کریجینگ شاخص، لاگ کریجینگ، نرم‌افزار SGeMS.

*- نویسنده مسئول: Email: Rezahmadi@gmail.com

مقدمه

یکی از اهداف مهم عملیات اکتشاف، محاسبه ذخیره کانسار است و تنها پس از این مرحله است که می‌توان در مورد کانسار قضاوت نمود و امکان استخراج اقتصادی آن را بررسی کرد (مدنی، ۱۳۷۶). ذخیره معدنی آن قسمت از منابع کشف شده است که بتوان از آن، کانی و یا فلز با ارزش را به‌صورت اقتصادی و سودآور تحت شرایط اقتصادی، سیاسی، قانونی، محیطی و فناوری حاضر، بهره‌برداری نمود. از آنجایی‌که ذخایر معدنی بسیار متنوع بوده و به شکل‌های گوناگونی تشکیل می‌شوند (Annels, 1991)، ارزیابی ذخایر معدنی با روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که تفاوت این روش‌ها در الگوریتم محاسبه، دقت، سرعت، وضعیت ماده معدنی و مشخصات کارهای اکتشافی است (مدنی، ۱۳۷۶؛ احمدی، ۱۳۸۸). به طورکلی آنچه که در ارزیابی ذخایر معدنی اهمیت ویژه‌ای دارد، استفاده از تمام اطلاعات اکتشافی موجود و به کارگیری دقیق‌ترین روش‌های تخمین است. به‌طورکلی روش‌های تخمین ذخایر معدنی به دو دسته روش‌های هندسی (کلاسیک) و روش‌های زمین‌آماری (وزن‌دهی آماری) تقسیم می‌شوند. روش‌های تخمین زمین‌آماری به علت نا اریب بودن و داشتن کمترین خطای تخمین (Goovaerts, 1997; Annels, 1991; Rendu, 1981) در میان تمام روش‌های تخمین ذخیره، از دقت بالاتری برخوردارند. در واقع در روش‌های زمین‌آماری 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 زمین‌آماری خود به دو دسته روش‌های خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند (Choudhury, 2015). روش کریجینگ معمولی ازجمله روش‌های خطی و روش‌های لاگ کریجینگ[1]، کریجینگ شاخص[2]، کریجینگ گسسته[3] (Webster and Oliver, 2007) و شبیه‌سازی متوالی گوسی[4] (Soares et al, 2008) از مهم‌ترین روش‌های غیرخطی زمین‌آماری می‌باشند. هر یک از این روش‌ها دارای پیچیدگی‌های خاص خود بوده و برای یک سری داده بسته به شرایط، یک یا چند تا از این روش‌ها به‌طور متناسب، قابل استفاده خواهند بود. به هرجهت در تمام این روش‌ها انتخاب بهینه پارامترهای تخمین، نقش مهمی در دقت محاسبات دارد. هدف از پژوهش حاضر، مدلسازی کامل کانسار سرب و روی فیض‌آباد از دیدگاه زمین‌شناسی-اکتشافی و ارزیابی ذخیره این کانسار است. محدوده کانسار مورد مطالعه براساس توپوگرافی منطقه، میزان و نوع فعالیت‌های اکتشافی، خود به دو منطقه مجزای تپه آقاحساب و کوه خارزن تقسیم شده و مدلسازی کانسار و ارزیابی ذخیره هر منطقه و نیز کل محدوده، به‌طور مجزا صورت گرفته است. هریک از مناطق مذکور خود به بلوک‌های مختلف تقسیم شده‌اند که نامگذاری این بلوک‌ها براساس موقعیت مکانی آنها می‌باشد. منطقه تپه آقاحساب به سه بلوک کوچک به نام‌های بلوک شمالی (بلوک ۲)، بلوک میانی (بلوک ۱) و بلوک جنوبی (بلوک ۳) تقسیم شده که حد و مرز این بلوک‌ها در محل جابه‌جایی‌های مهم گسلی و تغییرات ارتفاعی و ساختاری مهم قرار دارد (واحد اکتشافات شرکت گسترش صنایع، معادن و ذوب فلزات رنگین مرکزی، ۱۳۹۴). بلوک شمالی با عرض حدود ۱۲۰ متر و طول حدود ۲۳۰ متر به‌عنوان کوچک‌ترین بلوک تپه آقاحساب و بلوک میانی با عرض حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر و طول حدود ۳۰۰ متر، عریض‌ترین بلوک تپه آقاحساب است. این بلوک با داشتن بیشترین حجم و عیار استخراجی ماده معدنی، مهم‌ترین بلوک از نظر میزان ذخیره است. بلوک جنوبی، بکرترین بلوک تپه آقاحساب بوده و به علت

انجام مطالعات و حفاری‌های کمتر نسبت به بلوک-های دیگر، تاحدی ناشناخته باقی مانده است. کوه خارزن بزرگ‌ترین بخش کانسار فیض‌آباد و در واقع امیدبخش‌ترین قسمت کانسار است. این بخش در قسمت جنوب باختری تپه آقاحساب قرار دارد و از نظر مساحت در حدود ۱۰ برابر تپه آقاحساب است (واحد اکتشافات شرکت گسترش صنایع، معادن و ذوب فلزات رنگین مرکزی، ۱۳۹۴). با تجزیه و تحلیل فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در منطقه مورد مطالعه، ترسیم نقشه‌ها و مقاطع زمین-شناسی-اکتشافی مختلف و ارزیابی و مقایسه آنها، محدوده مورد مطالعه به‌طور کامل، ارزیابی شده و تخمین ذخیره محدوده با استفاده از روش‌های دقیق زمین‌آماری غیرخطی صورت گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

کانسار سرب و روی فیض‌آباد در ۱۳/۵ کیلومتری جنوب‌باختری شهرستان نائین در استان اصفهان واقع شده است. این منطقه در پهنه ساختاری ایران مرکزی، در حاشیه کمربند ارومیه دختر، بر روی نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ نائین و برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ کجان قرار دارد. واحدهای سنگی رخنمون‌دار منطقه با سن احتمالی پالئوزوئیک از پایین به بالا شامل کلریت شیست، مجموعه کربناتی و شیست‌های سبز می‌باشد (افروخته و همکاران، ۱۳۹۳). این مجموعه در نقشه‌های زمین‌شناسی نائین و کجان، تحت عنوان مجموعه دگرگونی منسوب به پالئوزوئیک معرفی شده است. محدوده مورد مطالعه از شمال‌باختر تا جنوب‌خاور امتداد داشته و به دو منطقه مجزا و مستقل تپه آقاحساب و کوه خارزن تقسیم‌بندی می‌شود. دو منطقه مذکور به‌صورت تپه‌ماهور و کوهستان نسبت به دشت مجاور دیده می‌شوند که تپه آقاحساب در شمال‌باختر و کوه خارزن در جنوب‌خاور قرار دارند. شکل ۱ موقعیت مناطق تپه آقاحساب و کوه خارزن را نسبت به فیض‌آباد و شهر نائین نشان می‌دهد.

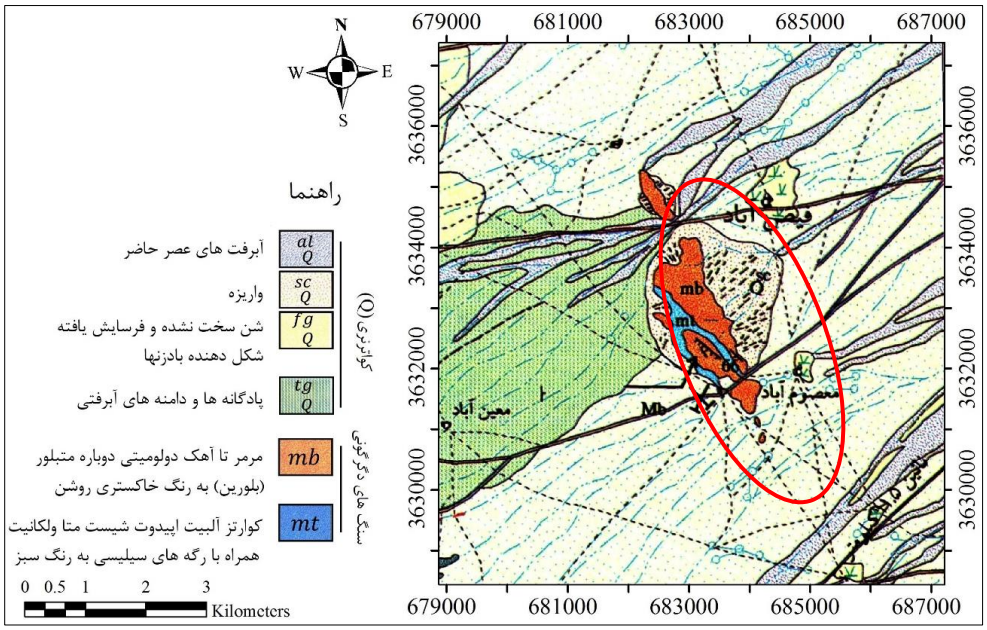
شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه نسبت به فیض‌آباد و شهر نائین (برگرفته از Google Earth).

در کوه خارزن ساختار تاقدیس گسله به‌هم ریخته و درهمی مشاهده می‌شود که به‌واسطه گسل-خوردگی شدید، زون‌های با لیتولوژی و دگرسانی متفاوت به‌عنوان سازندگان تاقدیس‌های چین‌خورده دیده می‌شوند و هسته آن را مجموعه دگرگونی- ماگمایی با واحد شیست‌های دگرگونی ضعیف می‌سازد (صانعی، ۱۳۹۲). این مجموعه شیستی احتمالاً به تریاس پسین- ژوراسیک زیرین تعلق دارد که در زمان پالئوژن دستخوش نفوذ ماگمای دیوریتی به‌صورت استوک و دایک شده و رخساره‌ای از بلورین کامل تا میکرودیوریت و دیاباز تیره رنگ دارد (واحد اکتشافات شرکت گسترش صنایع، معادن و ذوب فلزات رنگین مرکزی، ۱۳۹۴). رخداد کانه‌زایی روی- سرب با میزبان کربناته در یک توالی آتشفشانی رسوبی دگرگون شده از ویژگی‌های قابل توجه کانه‌زایی در این منطقه می‌باشد. پهنه کانه‌دار از پایین به بالا شامل دو بخش است: بخش سولفیدی و اولیه شامل کانی-های گالن، اسفالریت و پیریت و بخش اکسید کربناتی و ثانویه که عمدتاً از کانی‌های اسمیت-زونیت، سروزیت و همی‌مورفیت تشکیل شده است (افروخته و همکاران، ۱۳۹۳). سنگ‌های دربرگیرنده کانسار را سنگ‌های آهکی و دولومیتی که به مقدار کم دگرگون شده‌اند، تشکیل می‌دهند. کانی‌های کوارتز، کلسیت و دولومیت نیز به‌عنوان کانی‌های باطله این کانسار حضور دارند. براساس برداشت‌های میدانی و ویژگی‌های لیتولوژی-رخساره‌ای، به‌طور کلی سه مجموعه کاملاً متفاوت از یکدیگر قابل تفکیک است که عبارتند از مجموعه پی‌سنگ با رخساره شیستی- ماگمایی که در هسته تاقدیس و پیرامون بخش‌های مرتفع دیده می‌شود؛ مجموعه کربناتی و کربناتی- رسی دگرسان و دگرنهادی[۵] که اصلی‌ترین واحد سنگ چینه‌ای را می‌سازد و رخنمون بسیار کوچکی از سنگ‌های آذرآواری- توفی و توف‌آرنایت به سن پالئوژن و به احتمال زیاد پالئوسن- ائوسن. عمده‌ترین واحد زمین‌شناسی سازند تپه آقاحساب و کوه خارزن مجموعه‌ای کربناته متغیر از نظر رنگ، ریخت-شناسی، بافت و میزان دگرسانی می‌باشد که به‌دلیل شدت درهم‌شدگی ساختاری و گسله‌شدن، تفکیک چندان بارزی را نمی‌توان در آن انجام داد. در بررسی‌های میدانی ملاحظه می‌شود که پایه این واحد سنگی یک کنگلومرای پی با قطعات فرسایشی از پی‌سنگ دگرگونی (MRF)[۶] است (واحد اکتشافات شرکت گسترش صنایع، معادن و ذوب فلزات رنگین مرکزی، ۱۳۹۴). در شکل ۲ برشی از نقشه زمین‌شناسی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ کجان نشان داده شده که محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد به صورت یک بیضی قرمزرنگ بر روی آن قابل مشاهده است. در این نقشه واحدهای سنگی mb و mt معرف سنگ‌های دگرگونی است.

فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در محدوده

مرحله اول اکتشاف شامل مطالعات لیتوژئوشیمیایی بوده و سپس ۶ پروفیل اکتشافی، طراحی و برداشت شده است. بر روی هر پروفیل یک حلقه گمانه مایل با زاویه شیب ۶۰ درجه حفاری شده و پس از بررسی و نگاربرداری[۷] نمونه‌های مغزه، برش مغزه و تجزیه شیمیایی برای عناصر سرب و روی انجام گرفته است. در مراحل بعد به‌طورکلی تعداد ۲۱۳ حلقه چال پودری با طول کلی ۴۶۴۱ متر با استفاده از دستگاه دریل‌واگن و تعداد ۱۷ حلقه گمانه مغزه-گیری (اغلب به صورت مایل و منشعب از یک نقطه با آزیموت‌های مختلف) با طول کلی ۸۱۵ متر حفاری شده است. کمینه، متوسط و بیشینه عمق چال‌های پودری به‌ترتیب برابر با ۴، ۲۲ و ۲۸ متر بوده درحالی‌که کمترین، متوسط و بیشترین عمق گمانه‌های مغزه‌گیری به‌ترتیب برابر با ۹/۴، ۴۸ و ۷۹ متر است. از این میزان حفاری، تعداد ۱۵ حلقه

گمانه مغزه‌گیری به‌طول ۷۲۶/۳ متر و ۸۴ حلقه چال پودری به‌طول ۱۷۷۸ متر در منطقه تپه آقاحساب حفاری شده است. اغلب حفاری‌های اکتشافی انجام شده در منطقه خارزن به صورت چال‌های پودری هستند که به‌طورکلی تعداد ۱۲۹ حلقه چال پودری با مجموع طول ۲۸۶۳ متر و تنها دو گمانه مغزه‌گیری با مجموع طول ۸۸/۵ متر در این منطقه حفاری شده است.

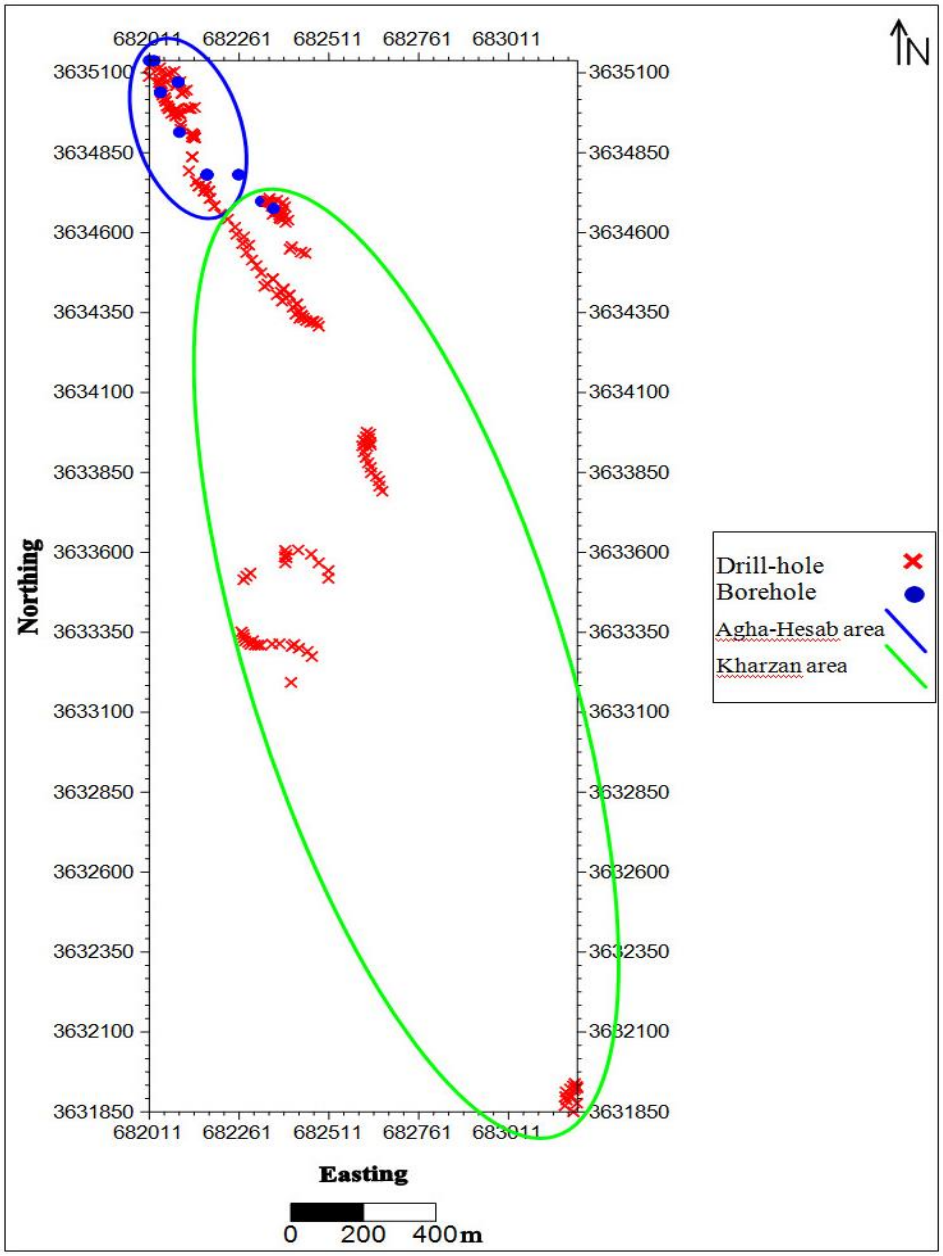


شکل ۲: برشی از نقشه زمین‌شناسی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ کجان. بیضی قرمزرنگ نشان‌دهنده محدوده اکتشافی فیض‌آباد می‌باشد (امینی و همکاران، ۱۳۸۲).

در شکل ۳ نقشه موقعیت مکانی گمانه‌ها و چال‌های اکتشافی حفر شده در محدوده فیض‌آباد با نمایش مناطق تپه آقاحساب و بلوک خارزن نشان داده شده است. در این شکل ضربدرهای قرمزرنگ موقعیت چال‌های پودری و دوایر توپر آبی‌رنگ موقعیت گمانه‌های مغزه‌ای را نشان می‌دهند. گفتنی است که برخی از دوایر توپر آبی‌رنگ نشان دهنده موقعیت دهانه چند گمانه مغزه‌ای با آزیموت‌ها و شیب‌های مختلف هستند.

مواد و روش‌ها

به‌منظور شناخت کامل و طرح تصویری از وضعیت لیتولوژی کانسار سرب و روی فیض‌آباد، لاگ لیتولوژی تمام گمانه‌های اکتشافی، مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار و مقاطع عرضی لیتولوژی نظیر تعداد زیادی از پروفیل‌های محدوده، با استفاده از نرم‌افزار Rockworks16 برای دو منطقه تپه آقاحساب و بلوک خارزن به‌طور مجزا ترسیم شد. از آنجایی‌که نرم‌افزار Rockworks مجموعه کاملی از ابزارهای مورد نیاز برای تصویرسازی، مدل‌سازی و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی است و انجام مدل‌سازی‌های مختلف و نیز تهیه برش‌های مختلف از درون ساختارها را براساس نوع و میزان داده‌ها و اطلاعات اکتشافی در دسترس برای کاربران امکان‌پذیر می‌سازد، به همین دلیل برای این هدف انتخاب شده است.



شکل ۳: نقشه موقعیت پراکندگی چال‌های پودری و گمانه‌های مغزه‌ای در کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد. منطقه تپه آقاحساب با بیضی آبی رنگ و منطقه کوه خارزن با بیضی سبزرنگ مشخص شده است.

برای تعیین و تشخیص مناطق پرپتانسیل، نقشه‌های هم‌عیار و هم‌ضخامت ماده معدنی منطقه به‌ازای عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد با استفاده از نرم‌افزار Surfer15 ترسیم شد. برای این منظور ابتدا عیار متوسط وزن‌دار هر یک از گمانه‌ها اعم از مغزه‌ای و پودری محاسبه شد. مقادیر عیار حد، براساس ارزش اقتصادی کانسار متناسب با شرایط مختلف همانند تکنولوژی استحصال، قیمت روز فلز، زمان و غیره، انتخاب شده است. برای محاسبه ذخیره محدوده مورد مطالعه نیز از روش‌های تخمین دقیق زمین‌آماری مبتنی بر کریجینگ به‌کمک نسخه ۲ نرم‌افزار SGeMS (Remy et al., 2006, 2009; Bohling, 2007) استفاده شد. کریجینگ یک تخمینگر خطی نا اریب با کمترین

واریانس تخمین است، بنابراین به‌دلیل دقت بالای این روش تخمین (Journel, 1989)، در پژوهش حاضر برای محاسبه ذخیره انتخاب شده است. براساس نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی در کل محدوده فیض‌آباد و مناطق تپه آقاحساب و بلوک خارزن، از روش کریجینگ شاخص (IK) نیز به‌عنوان یکی از روش‌های تخمین غیرخطی کریجینگ برای محاسبه ذخیره محدوده استفاده شد. کریجینگ شاخص یک تکنیک تخمین زمین‌آماری غیرخطی است که توسط جورنل[۸] (Journel, 1983) معرفی شده است. هدف اصلی جورنل براساس کار سویتزر[۹] (Switzer, 1977) و دیگران، تخمین محلی توسط فرایند تابع توزیع تجمعی[۱۰] 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 به‌جای 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 موردنظر 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 به‌راحتی ترسیم کرد (حسنی پاک و خالصی، ۱۳۸۲). 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 آیند که مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰):

رابطه ۱)

$$I(x;Zk)=\begin{cases}1 & \text{if } Z(x)\le Zk\\ 0 & \text{Otherwise}\end{cases}\qquad k=1,\dots,k$$

که در آن $I(x,z_k)$ مقدار شاخص نمونه i ام، Z_k حد آستانه و k تعداد کل آستانه‌ها می‌باشد. بدین صورت که به مقادیر اصلی کوچک‌تر از حد آستانه منتخب، کد ۱ و به مقادیر بزرگ‌تر، 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 تبدیل‌شده 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.

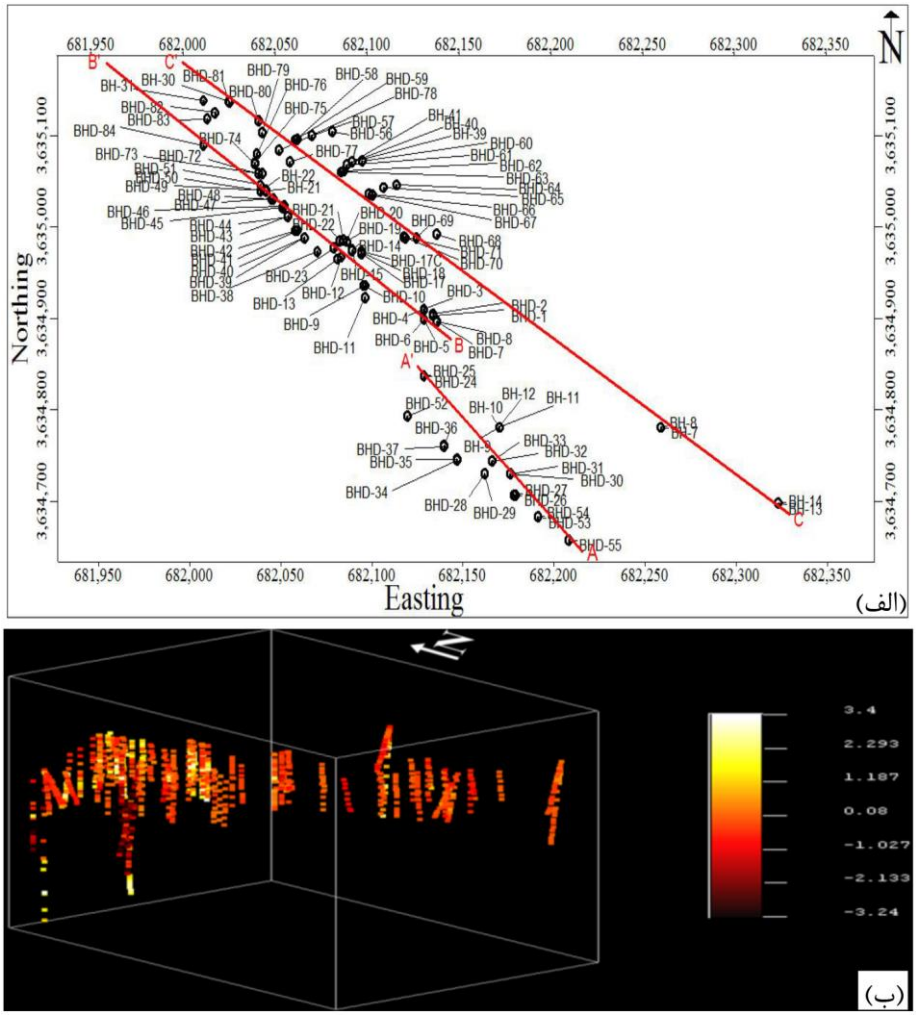
مدل‌سازی کانسار مورد مطالعه

بررسی منطقه تپه آقاحساب

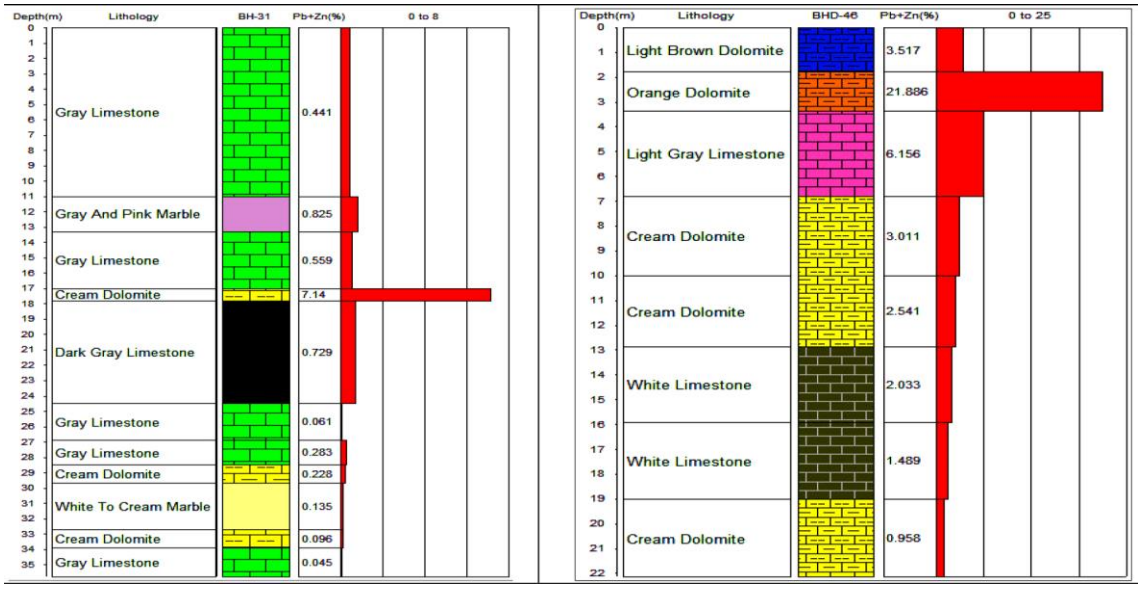
شکل ۴الف نقشه موقعیت پراکندگی گمانه‌ها و چال‌های اکتشافی همراه با موقعیت سه پروفیل اکتشافی، به صورت خطوط قرمزرنگ را در منطقه تپه آقاحساب نشان می‌دهد. مبنای انتخاب پروفیل‌های اکتشافی (مقاطع عرضی)، شاخص بودن آنها و دربر داشتن تعداد زیادی گمانه عمیق و چال اکتشافی می‌باشد. در شکل ۴ب نیز موقعیت فضایی گمانه‌ها و چال‌های اکتشافی در این منطقه همراه با نمایش تغییرات لگاریتم عیار مجموع سرب و روی مغزه‌های گمانه‌ها و نمونه‌های پودری چال‌ها به‌صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است. در شکل ۵ به‌عنوان نمونه چاه‌نگار[۱۱] لیتولوژی تعدادی از

گمانه‌های منطقه تپه آقاحساب نشان داده شده که در این نگارها علاوه بر ستون لیتولوژی، هیستوگرام تغییرات عمقی عیارسنجی مجموع سرب و روی هم نمایش داده شده است. مطابق این شکل‌ها عیار ماده معدنی در بعضی فواصل عمقی گمانه‌هایی نظیر BHD-46 نسبتاً بالاست و به بیش از ۲۰ درصد می‌رسد. شکل ۶ نیز مدل سه‌بعدی لیتولوژی این کانسار را نشان می‌دهد که در این شکل به‌طور واضح می‌توان واحدهای سنگی را مشاهده نمود. در شکل ۷ هم مقطع عرضی لیتولوژی منطبق بر پروفیل 'CC (در شکل ۴الف) مشاهده می‌شود.

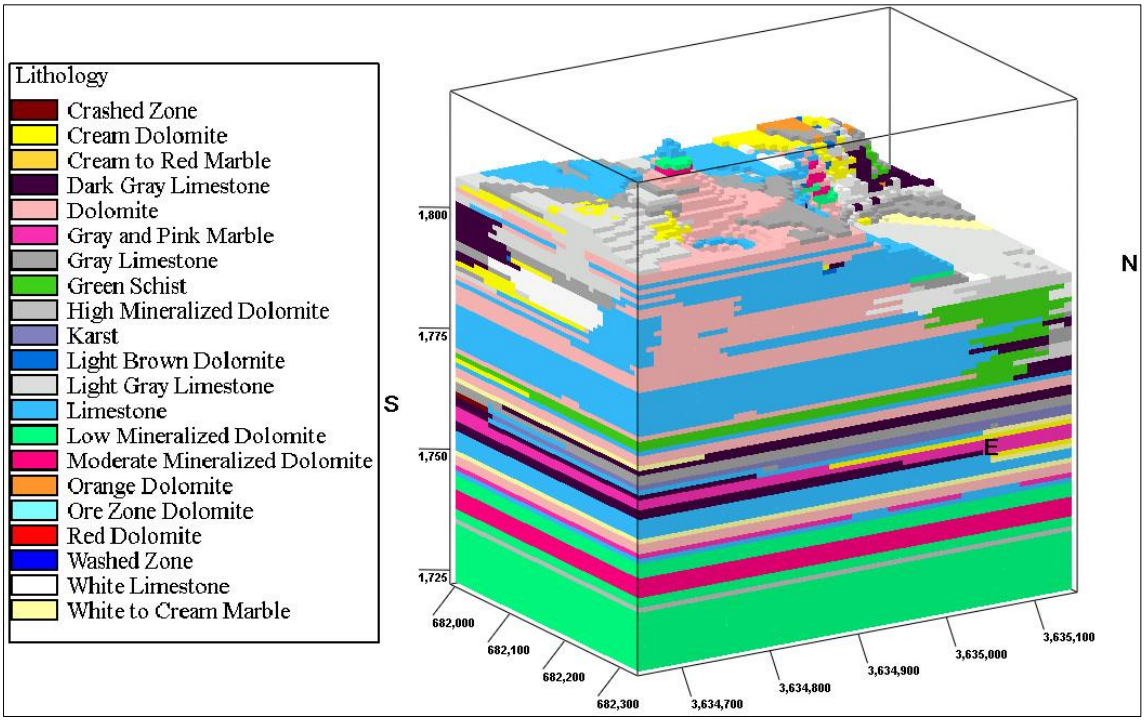
مطابق این شکل‌ها در محدوده کانسار، سنگ‌های کربناته بیشترین سطح رخنمون‌ها را به خود اختصاص داده‌اند و بخش بالایی محدوده نیز از سنگ‌های آهکی و دولومیتی، سنگ‌آهک خاکستری، دولومیت قهوه‌ای روشن و مرمر خاکستری و صورتی تشکیل شده است. اغلب کانه-زائی نیز در داخل دولومیت‌های با رنگ‌های مختلف صورت گرفته است. بخش عمده سنگ‌های منطقه در اعماق را سنگ‌های کربناته تشکیل می‌دهد و سنگ کف کانسار هم در اغلب نقاط، دولومیت کم-کانه‌دار یا بدون کانه‌زائی است.



شکل ۴: الف) نقشه موقعیت پراکندگی گمانه‌ها و چال‌های اکتشافی همراه با نمایش پروفیل های اکتشافی، ب) نمایش موقعیت فضایی و تغییرات لگاریتم عیاری گمانه‌ها و چال‌های اکتشافی در منطقه تپه آقاحساب به صورت سه‌بعدی.



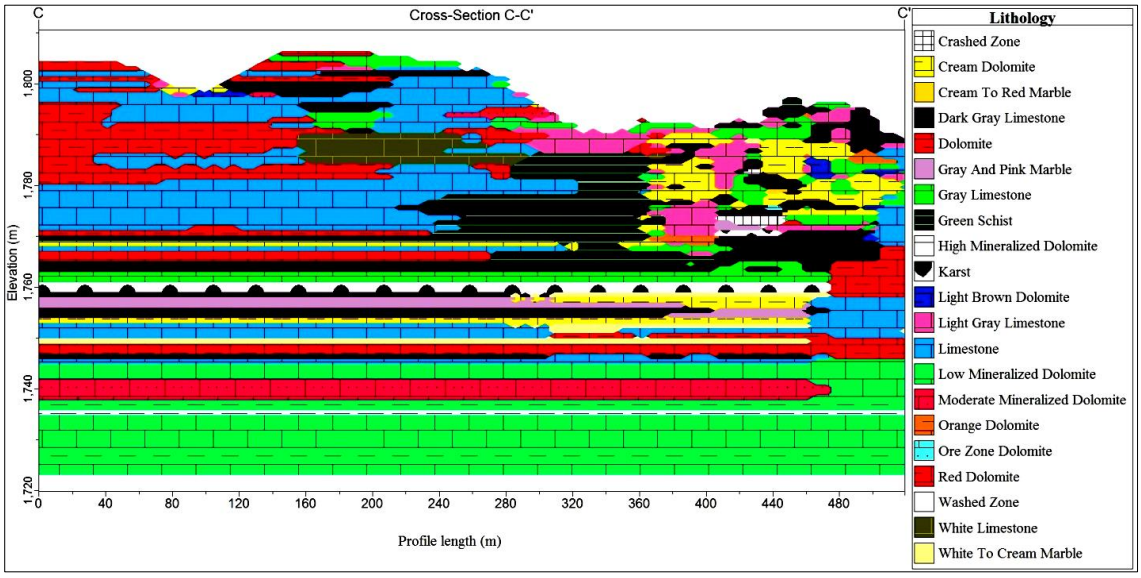
شکل ۵: چاه‌نگار گمانه‌های BHD46 و BH31 منطقه تپه آقاحساب



شکل ۶: مدل سه‌بعدی (جامد) لیتولوژی منطقه تپه آقاحساب

به‌منظور تعیین و تشخیص مناطق پرپتانسیل، نقشه‌های هم‌عیار و هم‌ضخامت ماده معدنی منطقه به‌ازای عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد ترسیم شد. برای این منظور ابتدا عیار متوسط هر یک از گمانه‌ها اعم از مغزه‌ای و پودری محاسبه شد. به عنوان نمونه در شکل ۸ نقشه هم‌عیار و هم‌ضخامت گمانه‌های حفرشده در قطعه (بلوک) شمالی منطقه تپه آقاحساب با اعمال عیار حد ۲ درصد نشان داده

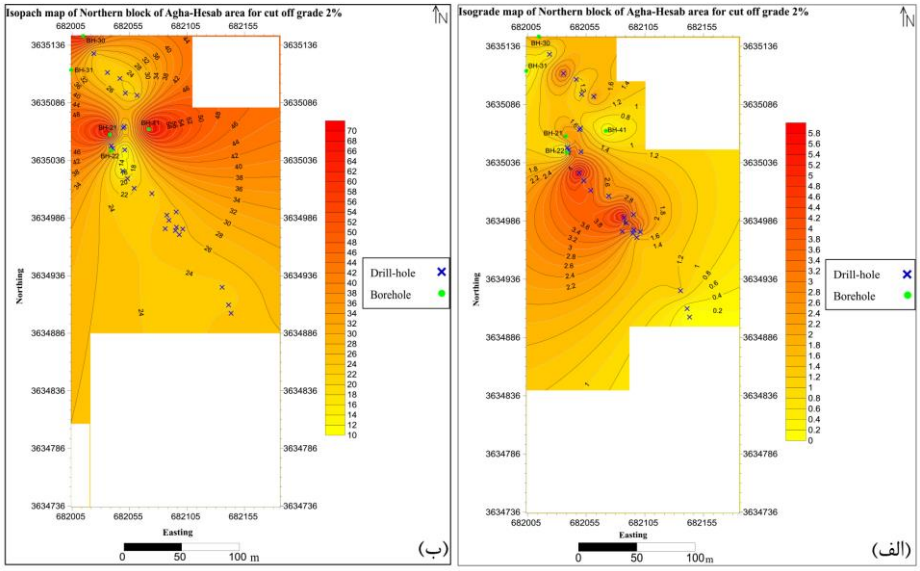
شده است. با مشاهده نقشه هم‌عیار شکل الف می‌توان نتیجه گرفت که محدوده پرعیار بلوک شمالی منطقه تپه آقاحساب با عیار حد ۲ درصد، در نیمه بالایی منطقه به‌صورت یک کشیدگی در راستای شمال‌باختری- جنوب‌خاوری است. با مشاهده نقشه هم‌ضخامت شکل ب نیز ملاحظه می‌شود که محدوده حاوی ماده معدنی با ضخامت بیشتر قطعه شمالی منطقه تپه آقاحساب با عیار حد ۲ درصد، در دو محدوده تقریباً مجزا در یال خاور و باختر قسمت بالایی منطقه قرار دارد.



شکل ۷: مقطع عرضی لیتولوژی نظیر پروفیل 'CC (در شکل ۴الف) منطقه تپه آقاحساب

بررسی منطقه بلوک خارزن

شکل ۹الف نقشه موقعیت پراکندگی چال‌های اکتشافی همراه با موقعیت سه پروفیل اکتشافی به صورت خطوط قرمزرنگ را در منطقه بلوک خارزن نشان می‌دهد. در این مورد نیز موقعیت پروفیل‌های اکتشافی (مقاطع عرضی) براساس شاخص بودن و دربرداشتن تعداد زیادی گمانه و چال اکتشافی انتخاب شده است. در شکل ۹ب موقعیت فضایی گمانه‌ها و چال‌های اکتشافی در این منطقه همراه با نمایش تغییرات لگاریتم عیار مجموع سرب و روی نمونه‌های پودری چال‌ها و مغزه‌های گمانه‌ها به‌صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ به‌عنوان نمونه چاه‌نگار لیتولوژی چال BHD147 منطقه بلوک خارزن نشان داده شده که در این چاه‌نگار علاوه بر ستون لیتولوژی، هیستوگرام تغییرات عمقی عیارسنجی مجموع سرب و روی هم نمایش داده شده است. مطابق این شکل در اغلب گمانه‌ها کانی‌سازی از سطح تا عمق صورت گرفته ولی عیار ماده معدنی چندان زیاد نیست. در شکل ۱۱ نیز مقطع عرضی لیتولوژی منطبق بر پروفیل 'BB (در شکل ۹الف) مشاهده می‌شود. مطابق این شکل‌ها در محدوده کانسار بلوک خارزن نیز همانند منطقه تپه آقاحساب، سنگ‌های کربناته بیشترین حضور را از سطح تا عمق به خود اختصاص داده‌اند. همچنین در این منطقه علاوه بر سنگ‌های آهکی در بخش‌هایی، شیست سبز نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۸: الف) نقشه هم‌عیار و ب) نقشه هم‌ضخامت گمانه‌های حفر شده در قطعه شمالی منطقه تپه آقاحساب با عیار حد ۲ درصد

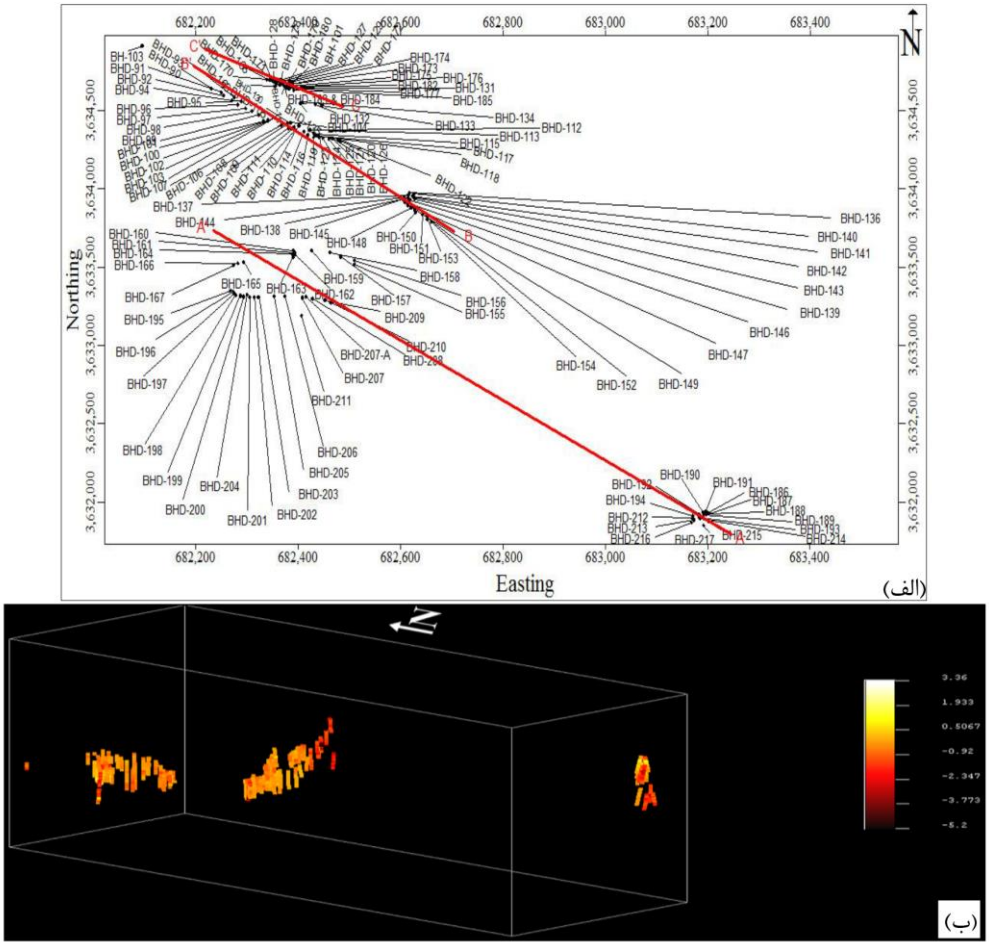
بررسی کل محدوده کانسار فیض‌آباد

- پردازش آماری اولیه داده‌ها

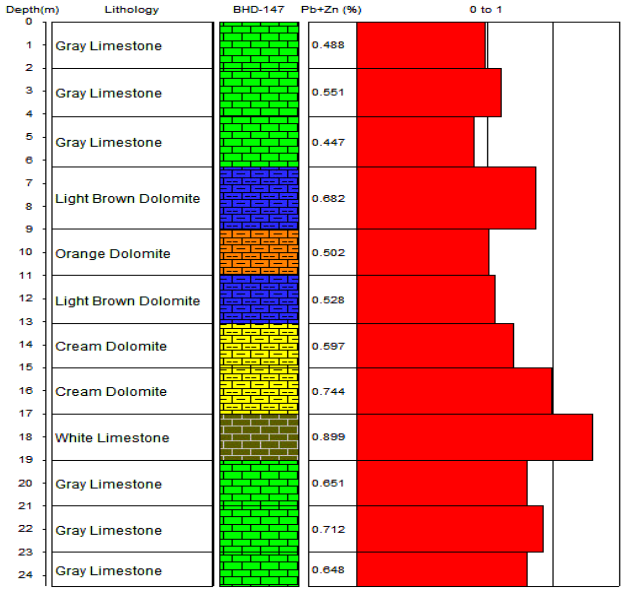
شکل ۱۲(الف و ب) به‌ترتیب هیستوگرام و نمودار توزیع احتمال تجمعی داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی و (ج و د) لگاریتم عیار مجموع سرب و روی را برای کل محدوده اکتشافی کانسار سرب و روی فیض‌آباد نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که توزیع داده‌های عیارسنجی کل محدوده فیض‌آباد از نوع لاگ نرمال بوده و با یک تبدیل لگاریتمی به حالت نرمال تبدیل شدند. افزودنی است که پردازش آماری اولیه داده‌ها برای مناطق تپه آقاحساب و بلوک خارزن نیز به‌طور جداگانه انجام شده ولی به‌منظور اجتناب از افزایش حجم مقاله، از آوردن آنها خودداری شده است.

واریوگرافی کانسار سرب و روی فیض‌آباد

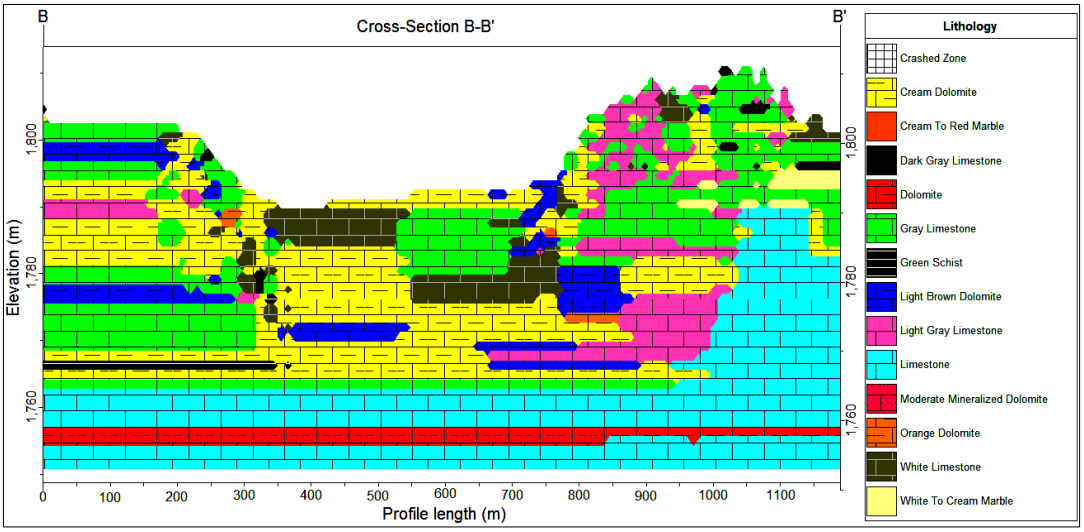
به‌منظور تعیین ارتباط فضایی، فاصله‌ای و پیوستگی کانسار در مقیاس وسیع، واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی در کل محدوده مورد مطالعه در فضای سه‌بعدی از طریق ترسیم حدود ۳۰۰ واریوگرام امتدادی با استفاده از نـرم‌افزار SGeMS انجام شد. بدین طریق وضعیت همسانگردی یا ناهمسانگردی کانسار تعیین شده و تخمین‌های کریجینگ انجام می‌گیرد. برای این منظور از آزیموت ۰ تا ۱۸۰ درجه هر پنج درجه یک واریوگرام و از شیب ۰ تا ۹۰ درجه هر پنج درجه یک واریوگرام با گام‌های مختلف ترسیم شد. به‌عنوان نمونه شکل ۱۳ تعدادی از واریوگرام‌های امتدادی ترسیم شده در راستاهای مختلف در کل محدوده را نشان می‌دهد که اغلب واریوگرام‌های تجربی با مدل تئوری از نوع کروی (Sarma, 2009) انطباق یافتند. براساس واریوگرام‌های امتدادی، کانسار تقریباً همسانگرد بوده، شعاع تجسس تخمین در این محدوده از مناطق تپه آقاحساب و بلوک خارزن قدری بزرگتر و در حدود ۴۰ متر است. افزودنی است که قبل از بررسی زمین‌آماری کل محدوده مورد مطالعه، ابتدا واریوگرافی برای مناطق تپه آقاحساب و بلوک خارزن به‌طور جداگانه انجام شده ولی به‌خاطر اجتناب از افزایش حجم مقاله، از آوردن آنها خودداری شده است.



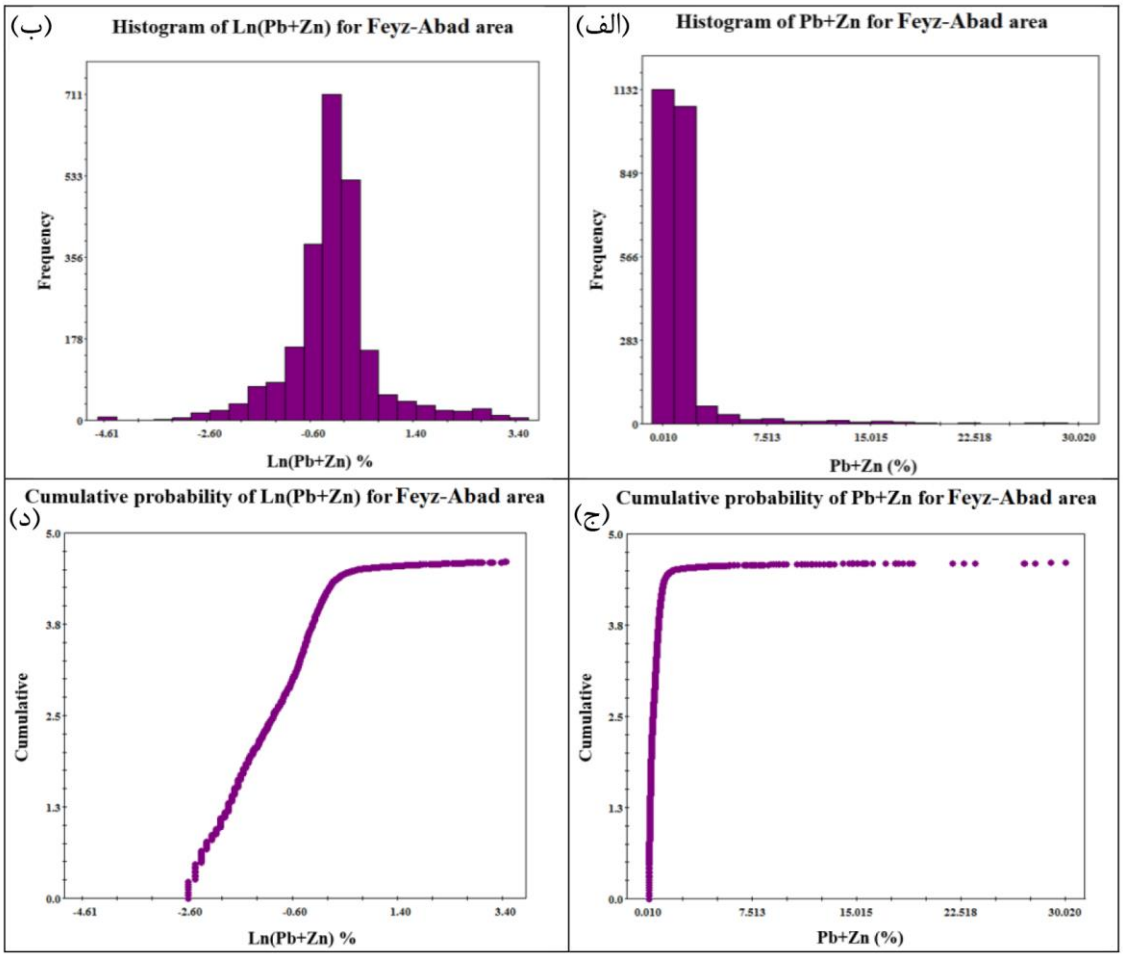
شکل ۹: الف) نقشه موقعیت پراکندگی چال‌ها همراه با نمایش پروفیل‌های اکتشافی، ب) نمایش موقعیت فضایی چال‌ها و گمانه‌های اکتشافی و تغییرات لگاریتم عیاری چال‌ها و گمانه‌ها در منطقه بلوک خارزن به‌صورت سه‌بعدی.



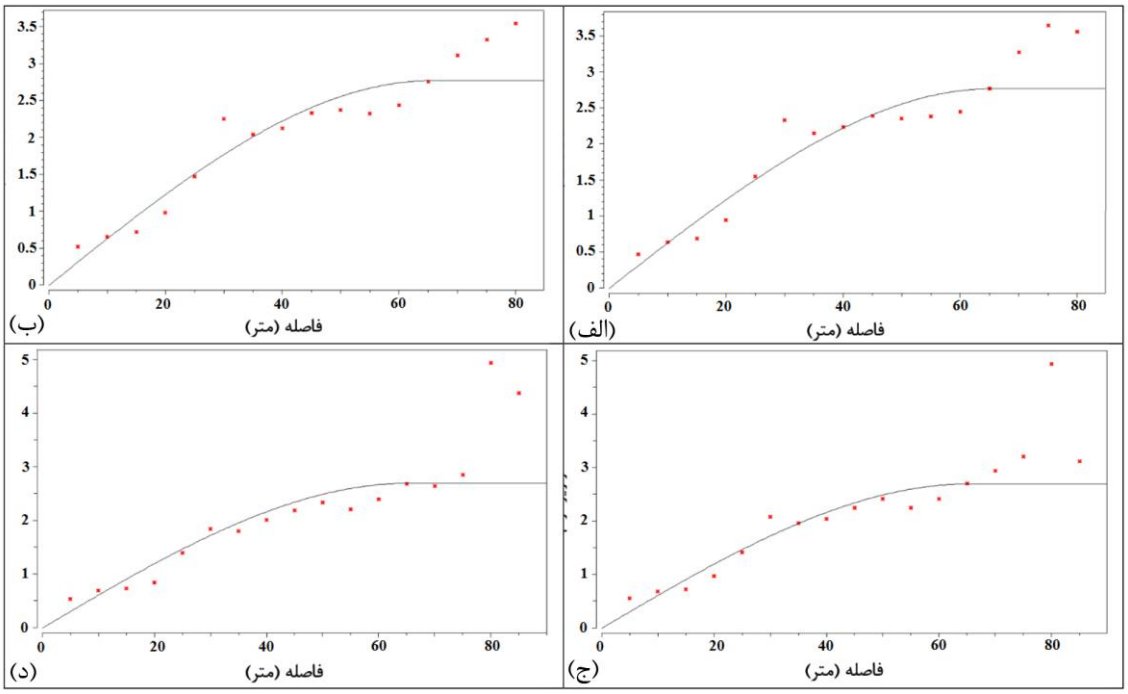
شکل ۱۰: چاه‌نگار چال BHD147 منطقه بلوک خارزن



شکل ۱۱: مقطع عرضی لیتولوژی نظیر پروفیل 'BB منطقه بلوک خارزن



شکل ۱۲: الف و ب) هیستوگرام و ج و د) نمودار توزیع احتمال تجمعی داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی و لگاریتم مجموع سرب و روی کل محدوده اکتشافی فیض‌آباد.



شکل ۱۳: واریوگرام‌های امتدادی کل محدوده اکتشافی فیض‌آباد در راستای آزیموت‌های الف) ۱۳۰ درجه، ب) ۱۳۵ درجه، ج) ۱۴۰ درجه و د) ۱۵۰ درجه با شیب ۶۰ درجه.

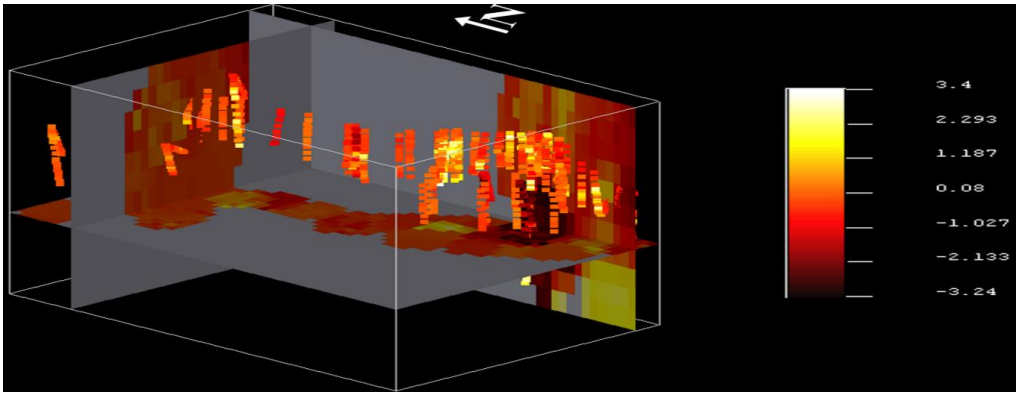
- بررسی وجود روند در داده‌های کانسار فیض‌آباد به‌منظور بررسی وجود یا عدم وجود روند[۱۲] در داده‌های مناطق تپه آقاحساب و بلوک خارزن و همچنین کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد، نمودار پراکندگی مقادیر عیارسنجی در راستاهای افقی خاوری- باختری و شمالی- جنوبی و نیز در راستای قائم عمقی، ترسیم شد. بررسی نمودارها نشان داد که روند خاصی در داده‌های محدوده در این راستاها وجود ندارد.

ارزیابی ذخیره کانسار مورد مطالعه

- تخمین به روش لاگ کریجینگ معمولی

ازآنجایی‌که توزیع داده‌های عیار مجموع سرب و روی در مناطق تپه آقاحساب، بلوک خارزن و نیز کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد، از نوع لاگ‌نرمال می‌باشد، بنابراین برای تخمین ذخیره، روش لاگ‌کریجینگ معمولی بلوکی با اندازه بلوک‌های ۱۰×۱۰×۱۰ متر و تعداد ۱۸۷۰۰ بلوک (تعداد ۵۰ بلوک در راستای شمالی- جنوبی، ۳۴ عدد در راستای خاوری- باختری و ۱۱ بلوک در راستای قائم) در منطقه تپه آقاحساب، تعداد ۹۹۰۰۰۰ بلوک (تعداد ۳۳۰ بلوک در راستای شمالی- جنوبی، ۱۲۰ عدد در راستای خاوری- باختری و ۲۵ بلوک در راستای قائم) در منطقه بلوک خارزن و تعداد ۱۱۲۱۲۵۰ بلوک (تعداد ۳۴۵ بلوک در راستای شمالی- جنوبی، ۱۳۰ عدد در راستای خاوری- باختری و ۲۵ بلوک در راستای قائم) در کل محدوده به کار برده شد. به‌عنوان نمونه در شکل ۱۴ سه نیمرخ عمود برهم از مدل بلوکی تخمین زده شده لاگ کریجینگ در محل سلول شماره ۵ محور خاوری، ۳۰ محور شمالی و ۲ محور قائم همراه با موقعیت گمانه‌های منطقه تپه آقاحساب نشان داده شده است. پس از انجام تخمین لاگ کریجینگ، مقادیر تخمین زده شده با یک تبدیل معکوس به مقادیر واقعی تبدیل شده و با در نظر گرفتن عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد (با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقتصادی

روز و آینده) و حجم ۱۰۰۰ متر مکعبی هر بلوک، نتایج محا سبه عیار متو سط کانسار و ذخیره ماده معدنی با اســتفاده از روش تخمین لاگ کریجینگ معمولی در جدول ۱ خلاصــه شــده اســت. میزان چگالی کانســار نیز به طور متوســط ۲/۹ گرم بر ســانتی‌متر مکعب منظور شــده اســت. واریانس لگاریتم داده‌های اولیه $(\%)^2$۶/۴ و واریانس داده‌های تخمینی نیز $(\%)^2$۲/۱۴ به‌د ست آمده ا ست. نمودار عیار- تناژ مناطق تپه آقاحســاب، بلوک خارزن و کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد با روش لاگ کریجینگ معمولی بلوکی در شکل ۱۵ ترسیم شــده اســت. در این شــکل محور افقی مقدار عیار حد، محور عمودی ســمت چپ، میزان تناژ و محور عمودی سمت راست، مقدار عیار متوسط می‌باشد.



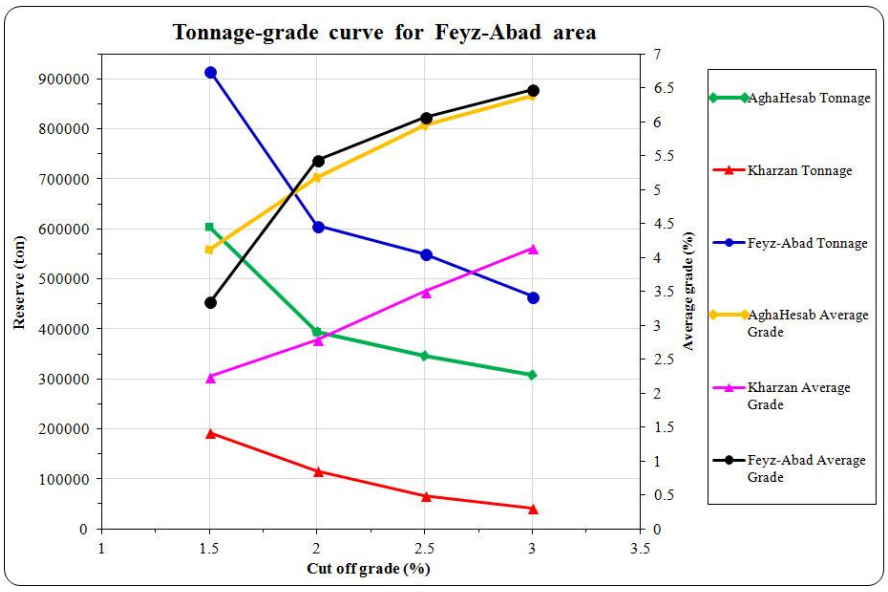
شکل ۱۴: نمایش سه‌بعدی بلوک‌بندی شده تخمین لاگ کریجینگ معمولی در منطقه تپه آقاحساب توسط سه نیمرخ عمودبرهم.

- تخمین به روش کریجینگ شاخص

برای تخمین ذخیره کانسار سرب و روی فیض‌آباد با استفاده از روش کریجینگ شاخص، ابتدا بر روی داده‌های خام عیارسنجی منطقه، عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد اعمال شد. با توجه به تابع شاخص، داده‌های کوچک‌تر یا مساوی با عیارحدها برابر با مقدار ۱ و داده‌های بیشتر از عیار حدها برابر با مقدار صفر منظور شد و ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SGeMS واریوگرافی و سپس تخمین ذخیره با روش تخمین کریجینگ شاخص با اندازه بلوک‌های ۱۰×۱۰×۱۰ متر صورت گرفت. براساس واریوگرافی شاخص، اغلب واریوگرام‌های شاخص تجربی با مدل تئوری از نوع کروی انطباق یافته و کانسار دارای ناهمسانگردی از نوع ناحیه‌ای است که با قدری ساده‌سازی، به صورت همسانگرد با شعاع تجسس در حدود ۳۶ متر در نظر گرفته شد. بعد از انجام تخمین کریجینگ شاخص، مقادیر تخمین زده شده با رابطه مربوط به کریجینگ شاخص ناپیوسته با یکدیگر تلفیق شدند و با اعمال عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد و حجم ۱۰۰۰ متر مکعبی هر بلوک، ذخیره محدوده به‌ازای عیار حدهای مختلف به‌دست آمد. نتایج محاسبه عیار متوسط و میزان ذخیره محدوده به ازای عیار حدهای مختلف، در جدول ۲ خلاصه شده است. نمودار عیار- تناژ مناطق تپه آقاحساب، بلوک خارزن و کل کانسار سرب و روی فیض‌آباد با روش کریجینگ شاخص نیز در شکل ۱۶ ترسیم شده است. در این شکل محور افقی، مقدار عیار حد، محور عمودی سمت چپ، میزان تناژ و محور عمودی سمت راست، مقدار عیار متوسط است. میزان چگالی کانسار نیز همانند قبل به‌طور متوسط ۲/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب منظور شده است.

جدول ۱: نتایج محاسبه ذخیره و متوسط عیار مجموع سرب و روی کانسار مورد مطالعه با روش لاگ کریجینگ معمولی بلوکی.

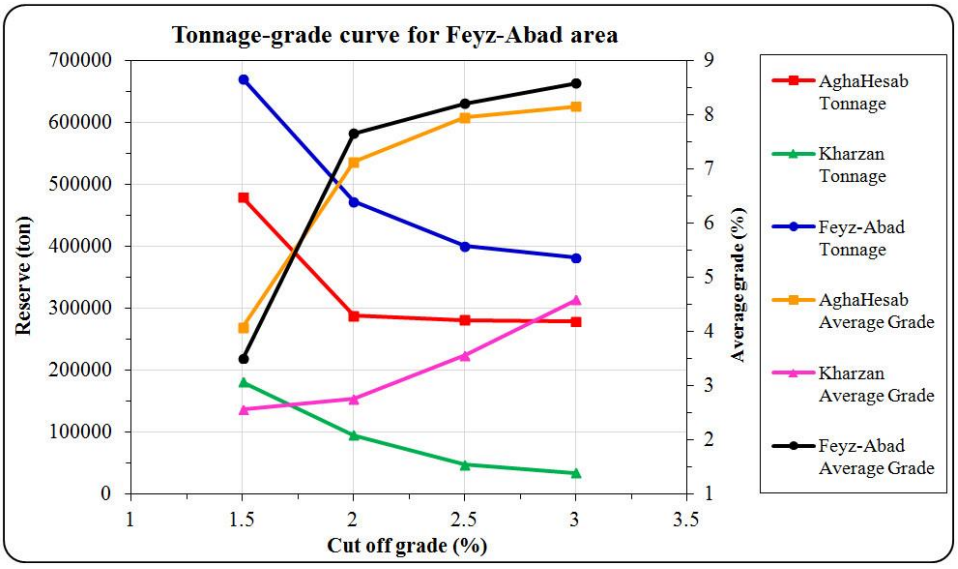
محدوده	منطقه تپه آقاحساب		منطقه بلوک خارزن		کل کانسار سرب و روی فیض‌آباد	
پارامتر عیارحد (٪)	عیار متوسط (٪)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)	عیار متوسط (٪)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)	عیار متوسط (٪)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)
۱/۵	۴/۱۱	۶۰۴۶۷۹/۲	۲/۲۴	۱۹۲۴۹۰/۸	۳/۳۴	۹۱۵۹۲۳/۴
۲	۵/۱۷	۳۹۴۳۰۸/۱	۲/۷۸	۱۱۶۲۸۶/۷	۵/۴۳	۶۰۶۸۶۹/۴
۲/۵	۵/۹۶	۳۴۵۷۳۰/۶	۳/۵	۶۶۹۰۱/۳	۶/۰۶	۵۵۰۲۴۵/۷
۳	۶/۳۹	۳۰۸۴۲۴/۲	۴/۱۴	۴۱۹۹۴/۴	۶/۴۷	۴۶۵۱۵۹/۶



شکل ۱۵: نمودار عیار- تناژ مناطق تپه آقاحساب، بلوک خارزن و کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد با روش لاگ کریجینگ معمولی بلوکی.

جدول ۲: نتایج تخمین متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار سرب و روی فیض‌آباد با روش کریجینگ شاخص.

محدوده	منطقه تپه آقاحساب		منطقه بلوک خارزن		کل کانسار سرب و روی فیض‌آباد	
پارامتر عیارحد (٪)	عیار متوسط (٪)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)	عیار متوسط (٪)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)	عیار متوسط (٪)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)
۱/۵	۴/۰۷	۴۷۸۹۶۴/۴۲	۲/۵۶	۱۸۱۰۰۱/۱۹	۳/۵۰	۶۶۹۹۶۵/۶۱
۲	۷/۱۳	۲۸۸۱۰۴/۳۰	۲/۷۶	۹۵۱۴۰/۸۸	۷/۶۴	۴۷۱۹۲۰/۷۰
۲/۵	۷/۹۵	۲۸۰۹۱۱/۰۸	۳/۵۶	۴۷۷۸۴/۷۰	۸/۲۰	۴۰۰۸۴۶/۱۰
۳	۸/۱۵	۲۷۸۷۵۵/۲۶	۴/۵۸	۳۴۲۹۳/۵۸	۸/۵۷	۳۸۲۲۹۴/۱۳



شکل ۱۶: نمودار عیار- تناژ مناطق تپه آقاحساب، بلوک خارزن و کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد با روش کریجینگ شاخص.

نتایج

برای ارزیابی نتایج حاصل از تخمین و دست‌یابی به نوعی دقت تخمینی، لازم است که نتایج تخمین ذخیره به روش‌های زمین‌آماری غیرخطی لاگ کریجینگ معمولی بلوکی و کریجینگ شاخص، با یکدیگر مقایسه شوند. هریک از روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر نسبت به دیگری دارای یک سری مزایا و معایب می‌باشند. به‌عنوان مثال سادگی روش تخمین لاگ کریجینگ معمولی از مزیت‌های این روش است و در مقابل عدم امکان بازیابی درست واریانس واقعی داده‌ها بعد از تخمین، از معایب آن است. جداسازی باطله از کانسنگ از مزایای روش تخمین کریجینگ شاخص است و پیچیدگی نسبی آن، از معایب این روش می‌باشد. با توجه به داده‌های جدول‌های ۱ و ۲ و نمودار شکل-های ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می‌شود که میزان ذخیره محاسبه شده به ازای عیار حدهای مختلف در مناطق مورد مطالعه با روش لاگ کریجینگ معمولی از روش کریجینگ شاخص، بیشتر است و اختلاف میزان ذخیره محاسبه‌شده با استفاده از این دو روش نسبتاً زیاد است. علت این امر آن است که در روش لاگ کریجینگ معمولی، بلوک‌های حاوی ماده معدنی همواره با مقداری باطله همراه می-باشند، به‌عبارت‌دیگر در روش لاگ کریجینگ معمولی، اختلاط کانسنگ و باطله زیاد است ولی در روش کریجینگ شاخص، جداسازی بلوک‌های کانسنگ و باطله صورت می‌گیرد. به‌عبارت دیگر این روش از اختلاط کانسنگ و باطله جلوگیری می-نماید و در نتیجه درجه خلوص بلوک‌های ماده معدنی در این روش از روش‌های دیگر همانند لاگ کریجینگ معمولی بیشتر است. به همین دلیل به-طورکلی متوسط عیار به‌ازای عیار حدهای مختلف در روش کریجینگ شاخص نسبت به روش لاگ کریجینگ معمولی بیشتر است. متوسط عیار کانسار در منطقه بلوک خارزن از منطقه تپه آقاحساب و نیز کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد، کمتر محاسبه شده است. به‌عبارت‌دیگر به طورکلی عیار ماده معدنی در منطقه بلوک خارزن نسبت به منطقه تپه آقاحساب پایین‌تر است. شاید یکی از دلایل این موضوع، عمق کمتر حفاری‌های انجام

شده در منطقه بلوک خارزن باشد، درحالی که ممکن است کانه‌زائی در اعماق بیشتر صورت گرفته باشد. شاید هم به‌لحاظ شرایط زمین‌شناسی، واقعاً کانه‌زائی در این منطقه کلاً ضعیف‌تر از منطقه تپه آقاحساب باشد. میزان ذخیره محاسبه شده برای کل کانسار سرب و روی فیض‌آباد به‌ویژه با روش تخمین لاگ کریجینگ معمولی نسبتاً زیاد و قدری بالاتر از مقدار واقعی به‌نظر می‌رسد؛ چرا که قاعدتاً باید میزان ذخیره این محدوده برابر با مجموع ذخیره محاسبه شده برای دو منطقه تپه آقاحساب و بلوک خارزن باشد، حال آنکه از این مقدار هم قدری بیشتر است و دلیل این امر آن است که در نتیجه واریوگرافی و عملیات تخمین کل محدوده، به‌طور ناخواسته بخش‌هایی از محدوده فاقد اطلاعات اکتشافی در مابین مناطق تپه آقاحساب و بلوک خارزن به عنوان ماده معدنی در محاسبات وارد می‌شوند که شاید فاقد کانه‌زائی و در نتیجه غیرواقعی باشند.

نتیجه‌گیری

از آنجایی‌که توزیع داده‌های عیار مجموع سرب و روی مناطق تپه آقاحساب و کوه خارزن و نیز کل محدوده کانسار مورد مطالعه از نوع لاگ‌نرمال است، متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار با روش‌های تخمین غیرخطی لاگ کریجینگ معمولی بلوکی و کریجینگ شاخص به‌کمک نرم‌افزار SGeMS به‌ازای عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد محاسبه شده و نمودارهای عیار- تناژ ذخیره ترسیم شده است. اگرچه هر دو روش زمین‌آماری لاگ کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص از دقیق‌ترین روش‌های تخمین ذخیره می‌باشند، به هرجهت اختلاف نتایج تخمین عیار و میزان ذخیره کانسار با روش‌های مذکور نسبتاً زیاد است. به‌عنوان مثال اختلاف میزان ذخیره محاسبه شده توسط این دو روش برای کل محدوده کانسار سرب و روی فیض‌آباد به‌ازای عیار حدهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد به‌ترتیب برابر با ۲۶/۹، ۲۲، ۲۷ و ۱۷/۸ درصد است. البته یکی از دلایل این میزان اختلاف، فقدان اطلاعات اکتشافی کافی می‌باشد و دلیل دیگر به ماهیت روش‌های مورد استفاده ارتباط دارد، ولی در مجموع نتایج روش کریجینگ شاخص قابل اعتمادتر است. به‌طورکلی برای دست‌یابی به بهترین پاسخ و مطلوب‌ترین نتیجه، بهتر است که برای محاسبه ذخیره یک کانسار از چند روش مختلف به‌ویژه از روش‌های نوین و دقیق زمین‌آماری استفاده نمود. چرا که تکیه بر نتایج تنها یک روش، از ریسک بالایی برخوردار است و احتمال خطاهای نظام‌دار وجود دارد. در مورد کانسارهایی که پراکندگی داده‌های عیارسنجی آنها از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند، یکی از روش‌های معمول تخمین، روش لاگ کریجینگ معمولی است ولی از آنجایی- که در این روش بازگرداندن واریانس واقعی داده‌ها بعد از تبدیل لگاریتمی داده‌های خام و عملیات تخمین، تقریباً امکان‌پذیر نیست، بنابراین استفاده از روش‌های تخمین زمین‌آماری غیرخطی همانند کریجینگ شاخص گریزناپذیر است. اگرچه روش- های تخمین زمین‌آماری 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. معقولانه ترین تصمیم، استفاده از چند روش مختلف و متوسط‌گیری از نتایج روش‌های آنها می‌باشد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور افزایش دقت تخمین ذخیره محدوده مورد مطالعه، وزن مخصوص ماده معدنی در نقاط مختلف کانسار به‌روش آزمایشگاهی و با دقت زیاد تعیین شود؛ سپس با روش شبیه- سازی شاخصی و تعیین جنس، به هر بلوک، وزن

مخصوص دقیق آن نسبت داده شود. نتایج این پژوهش برای کلیه کاربران علوم زمین به‌ویژه مهندسین اکتشاف معدن و زمین‌شناسان اقتصادی که همواره با موضوع تخمین دقیق ذخایر معدنی درگیر می‌باشند، قابل استفاده است.

پانوشت

1-Log-kriging
2-Indicator kriging
3-Disjunctive kriging
4-Sequential Gaussian Simulation
5-Metasomatic
6-Metamorphic Rock Fragments
7-Logging
8-Journel
9-Switzer
10-Cumulative distribution function
11-Strip-log
12-Trend

منابع

-احمدی، ر.، ۱۳۸۸. کاربرد الگوهای آماری در ارزیابی ذخایر معدنی با نگرشی بر معدن مس علی آباد یزد، گزارش طرح پژوهشی طرف قرارداد با دانشگاه علم و صنعت اراک، ۱۰۲ ص.

-افروخته، ا.، موسیوند، ف. و طاهری، ع.، ۱۳۹۳. ساخت و بافت و کانی‌شناسی در کانه‌زایی روی-سرب در توالی دگرگون شده پالئوزوئیک در جنوب غرب نائین، ششمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

-امینی، ب.، امینی چهرق، م.ر. و امامی، ه.، ۱۳۸۲. نقشه زمین‌شناسی ایران، سری ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه شماره ۶۵۵۵ کجان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

-حسنی‌پاک، ع.ا. و خالصی، م.ر.، ۱۳۸۲. مدیریت خطا و ریسک در اکتشاف، موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۲ ص.

-حسنی‌پاک، ع.ا. و شرف الدین، م.، ۱۳۸۰. تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷ ص.

-صانعی، ص.، ۱۳۹۲. گزارش کلی اکتشافات سال ۱۳۹۲ معدن سرب و روی فیض آباد، شرکت گسترش صنایع، معادن و ذوب فلزات رنگین مرکزی، ۵۴ ص.

-مدنی، ح.، ۱۳۷۶. اصول پی جویی، اکتشاف و ارزیابی ذخایر معدنی، انتشارات خانه فرهنگ، ۸۱۶ ص.

-واحد اکتشافات شرکت گسترش صنایع، معادن و ذوب فلزات رنگین مرکزی، ۱۳۹۴. گزارش کلی اکتشافات سال ۱۳۹۳ معدن سرب و روی فیض آباد، شرکت گسترش صنایع، معادن و ذوب فلزات رنگین مرکزی.

-Annels, A.E., 2012. Mineral deposit evaluation: a practical approach, Springer Science & Business Media.

-Annels, A.E., 1991. Mineral Deposit Evaluation: A Practical Approach, Chapman & Hall, London, XV, 436 p.

-Bohling, G., 2007. SGeMS Tutorial Notes.

-Choudhury, S., 2015. Comparative study on linear and non-linear geostatistical estimation methods: A case study on iron deposit, Procedia earth and planetary science 11, p. 131-139.

-Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation; Oxford University Press, Applied Geostatistics Series; 483 p.

-Gossage, B., 1998. The application of indicator kriging in the modeling of geological data.
http://www.goldensoftware.com/Surfer15,Http://www.rockware.com/Rockworks16.
-Journel, A.G., 1983. Nonparametric estimation of spatial distributions: Mathematical Geology, v. 15, p. 445-468.
-Journel, A.G., 1989. Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons, Short Course in Geology: Volume 8, American Geophysical Union, 57 p.
-Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2006. SGeMS User's Guide, 129 p.
-Remy, N., Boucher, A. and 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 p.
-Sarma, D.D., 2009. Geostatistics with Applications in Earth Sciences, Springer Netherlands, 206 p.
-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.
-Soares, A., Pereira, M.J. and Dimitrakopoulos, R., 2008. geoENV VI– Geostatistics for environmental applications, Springer, 500 p.
-Switzer, P., 1977. Estimation of spatial distributions from point sources with application to air pollution measurement: Bulletin of the International Statistical Institute., v. 47, p. 123-137.
-Webster, R. and Oliver, M.A., 2007. Geostatistics for Environmental Scientists, John Wiley & Sons Ltd., 333 p.