

تخمین خاکستر زغال سنگ کانسار پروده ۴ طبس با استفاده از کریجینگ عام و پیشنهاد نقاط بهینه حفاری تکمیلی

حسین ملایمت^۱، فرهاد محمد تراب^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه یزد، hmhttp@gmail.com

۲- استادیار و عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، fmtorab@yazd.ac.ir

(دریافت ۸ تیر ۱۳۹۲، پذیرش ۱۹ بهمن ۱۳۹۲)

چکیده

بزرگترین کانسار زغال سنگ ایران، کانسار پروده است که در ۸۵ کیلومتری جنوب غربی شهر طبس در استان خراسان جنوبی واقع شده و در حال تولید سالانه ۱/۵ میلیون تن زغال سنگ کک شو می باشد. بزرگترین بخش این کانسار، پروده ۴ نام داشته و در مرحله تجهیز قرار دارد. به منظور اکتشاف کانسار پروده ۴، تعداد ۱۶۸ حلقه حفاری اکتشافی انجام شده و مغزه های به دست آمده برای پارامترهای کیفی آنالیز شدند. خاکستر زغال سنگ به عنوان مهمترین پارامتر در ارزیابی های اکتشافی و خوراک دهی به کارخانه فراوری مورد توجه است. هدف از این پژوهش، استفاده از روش زمین آماری کریجینگ عام در مدل سازی و تخمین درصد خاکستر لایه B₂ (به دلیل وسعت زیاد و اهمیت بالا) در پروده ۴ می باشد. بدین منظور، بانک اطلاعاتی ۱۵۴ گمانه ای که لایه B₂ را قطع کرده اند ساخته و بررسی نرمال بودن و تحلیل روند داده های اولیه انجام و از نرم افزار Surpac برای محاسبه و رسم واریوگرام ها و تحلیل ساختار حاکم بر توزیع فضایی خاکستر استفاده شد. در ادامه، مرزهای ساختمانی و غسل های محدوده کننده در نظر گرفته شدند و به دلیل وجود روند در تغییرات خاکستر، عملیات تخمین آن برای هر بلوک استخراجی با استفاده از کریجینگ عام در مدل بلوکی انجام شد. نتایج کریجینگ عام نشان می دهد که درصد وزنی خاکستر بلوک های استخراجی از ۱۳/۰٪ تا ۴۱/۶٪ با میانگین ۲۸/۰٪ تغییر می کند. این تخمین که با حداقل خطا همراه است، تغییرات خاکستر، خطای تخمین و نقاط بهینه حفاری تکمیلی در این لایه را به خوبی نشان داده و می تواند پایه طرح های استخراجی و اختلاط ماده معدنی باشد.

کلمات کلیدی

زمین آمار، کریجینگ عام، زغال سنگ، تخمین خاکستر، کانسار پروده ۴.

۱- مقدمه

مرحله اکتشاف تخمین زده شود تا با طراحی و به کارگیری روش های مناسب زغال شویی به کاهش درصد وزنی آن اقدام گردد.

۱-۱- کلیات

در این پژوهش به بررسی تغییرات و تخمین خاکستر ذاتی لایه B₂ به عنوان مهمترین لایه زغالی از کانسار پروده ۴ طبس پرداخته شده است.

۲-۱- کانسار زغال سنگ پروده ۴ طبس

این کانسار در استان خراسان جنوبی و به عنوان یکی از تقسیمات مجموعه کانسارهای پروده در فاصله ۸۵ کیلومتری جنوب شهر طبس واقع شده است (شکل ۱). مختصات جغرافیایی آن برابر با "۰۰' ۱۵" ۵۷° طول شرقی و "۰۰' ۴۰" ۳۳° عرض شمالی می باشد. زغال سنگ در کانسار پروده ۴ در یک ناودیس بزرگ همراه با سنگ های شیل، ماسه سنگ، سیلت و سنگ های کربناته با سن تریاس فوقانی تشکیل شده است [۳]. با توجه به شواهد زمین شناسی و رسوب شناسی به نظر می رسد این واحدهای سنگی در یک محیط دریایی آزاد راسب شده باشند. زغال سنگ های کانسار پروده ۴ از نوع بیتومینه کک شو با درصد گوگرد بالا هستند. همچنین این کانسار بزرگترین بخش از مجموعه پروده می باشد (شکل ۲) [۴].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی کانسار پروده طبس بر روی تصویر Google Earth

تولید کک از زغال سنگ و استفاده از آن در ذوب کانه های آهن، انقلاب صنعتی قرن هجدهم میلادی را سرعت بخشید اما سودمندی محصولات فرعی زغال سنگ از قرن هفدهم مورد توجه قرار گرفته بود. از سال ۱۹۲۵ میلادی عملیات نفت و گاز جایگزین زغال سنگ شعله کوتاه به منظور تولید انرژی شدند. اگر چه استفاده از نفت در دوره زمانی حاضر از زغال سنگ پیشی گرفته است اما به دلایل مختلفی پیش بینی می شود که نقش زغال سنگ در آینده انرژی جهان رفته رفته پررنگ تر شود [۱].

انواع زغال سنگ همواره دارای مقادیر متفاوتی از مواد نامرغوب هستند. حذف کامل این مواد از زغال سنگ بسیار مشکل و بعضاً غیر ممکن است. مشخصات هر زغال سنگ همچون ناخالصی ها، کربن موجود و مقدار مواد فرار، کاربرد نهایی آن را مشخص خواهد کرد و ارزش اقتصادی زغال سنگ با کاربرد نهایی آن بستگی مستقیم دارد. به عنوان مثال زغال سنگ کک شو باید دارای ناخالصی اندک، بسیار واکنش گر و نیز مقاوم در مقابل فشارهای زیاد موجود در کوره های ذوب باشد. در مقابل، زغال سنگ مورد استفاده در نیروگاه های برق، کیفیت مصرفی در متالورژی را ندارد اما در آنجا هم استفاده از زغال سنگ کم گوگرد، کم خاکستر و کم رطوبت ترجیح داده می شود [۲].

یکی از پارامترهای اصلی تعیین کیفیت زغال سنگ، خاکستر آن است. زغال سنگ ها حاوی مواد غیر آلی و مواد زائدی مثل رس، سولفیدها، سولفات ها، کربنات ها و ... هستند که پس از سوزاندن زغال سنگ بر جا می مانند که به "خاکستر" معروفند. خاکستر زغال سنگ از نظر منشا به دو گروه خاکستر ذاتی و خاکستر ثانویه تقسیم می شود. مواد غیر سوختنی همراه اجزای تشکیل دهنده را خاکستر ذاتی یا ساختمانی می گویند [۲]. به هنگام استخراج، زغال سنگ معمولاً با گرد و خاک های سنگ های کمر بالا و پایین نیز آغشته می شود و میزان ناخالصی آن افزایش می یابد که به عنوان خاکستر ثانویه در نظر گرفته می شود. معمولاً سعی می شود با اصلاح روش های استخراج زغال سنگ، مقدار آغستگی به خاکستر ثانویه کمتر شود.

از آنجایی که با افزایش خاکستر در کک، راندمان تولید فولاد به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و همچنین خاکستر اضافی باعث افزایش مصرف مواد اولیه و افزایش حجم سرباره کوره می شود، همیشه سعی بر آن است که مقادیر خاکستر در

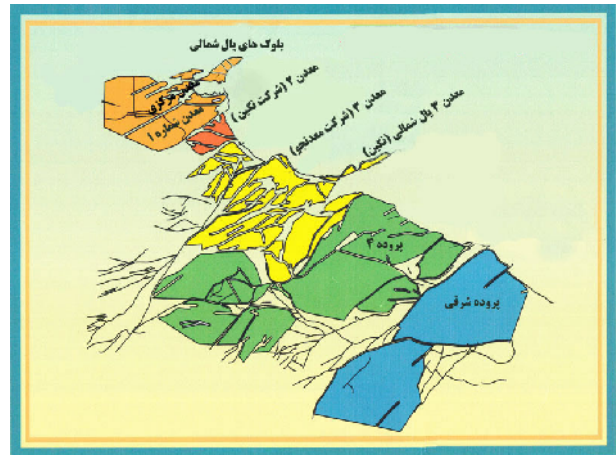
کافی در ابعاد اقتصادی می باشند که لایه B_2 به دلیل ضخامت و اهمیت بیشتر مورد بحث این پژوهش است.

۳-۱- مروری بر پژوهش های مشابه

به عنوان مثالی از به کارگیری زمین آمار در ارزیابی ذخایر زغال سنگ، می توان به پژوهش هریاوان و کویکه بر روی کانسار زغال سنگ برائو در شرق اندونزی اشاره کرد [۶]. این بررسی منجر به تخمین پارامترهای کیفی و کمی ذخیره مثل درصد خاکستر، درصد وزنی گوگرد، ضخامت و درصد وزنی سدیم شد. درصد وزنی سدیم با روش کو-کریجینگ تخمین زده شد که نتیجه حاصل منجر به افزایش مساحت تخمین زده شده گردید [۶].

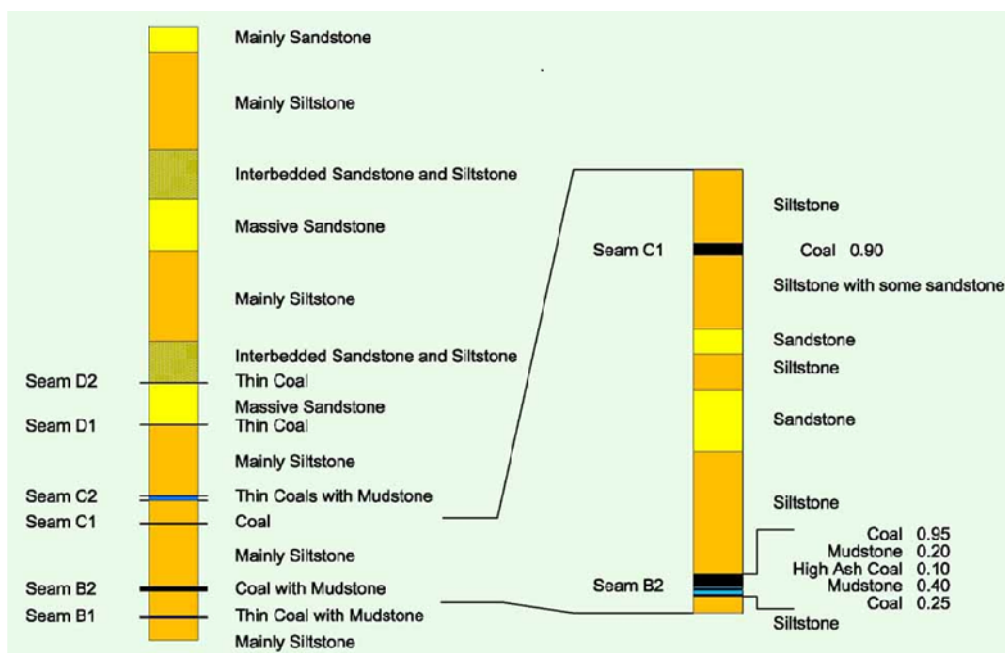
بررسی دیگری توسط واتسون و دیگران بر روی حوضه زغال خیز پیتسبورگ در شرق ایالات متحده انجام شد که در آن از کریجینگ معمولی و کریجینگ بلوکی برای تخمین درصد وزنی گوگرد استفاده شده است [۷].

به عنوان مثال هایی دیگر از کاربرد زمین آمار در تخمین پارامترهای کمی و کیفی ذخایر زغال سنگ می توان به تخمین ارزش حرارتی زغال توسط هیندستان و همکاران در معدن بویکودوز ترکیه اشاره کرد [۸]. این تخمین با در نظر گرفتن ناهمسانگردی مقادیر ارزش حرارتی برای بلوک های استخراجی، منجر به پیاده سازی طرح اختلاط ماده معدنی به منظور ثابت نگه داشتن ارزش حرارتی محصول فروشی معدن گردید [۸].



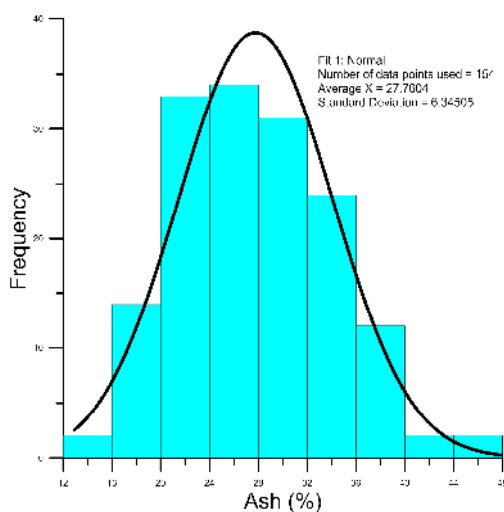
شکل ۲: تقسیمات مجموعه معدن پروده طبس [۱۱]

مطالعات اکتشافی اولیه در مناطق زغالدار پروده برای نخستین بار در سال ۱۳۴۵ شمسی آغاز شد و پس از تاسیس واحد اکتشافی طبس در سال ۱۳۵۹، اطلاعات اولیه زمین شناسی - معدنی گرد آوری شدند. در سال ۱۳۶۹ منطقه پروده مورد مطالعه امکان سنجی قرار گرفت. با وجود حجم قابل توجهی از داده های اکتشافی در پروده ۴، تا کنون هیچ گونه مطالعه زمین آماری بر روی این کانسار انجام نشده است. در پروده ۴، تعداد ۳ لایه زغال سنگ با ضخامت بیش از ۴۰ سانتی متر وجود دارد که از قدیم به جدید عبارتند از: B_1 ، C_1 و B_2 . این سه لایه به فاصله نزدیک به هم و در درون یک زون با ضخامت تقریبی ۱۰۰ متر قرار گرفته اند (شکل ۳) [۵]. در این میان، تنها دو لایه C_1 و B_2 دارای گسترش و پیوستگی

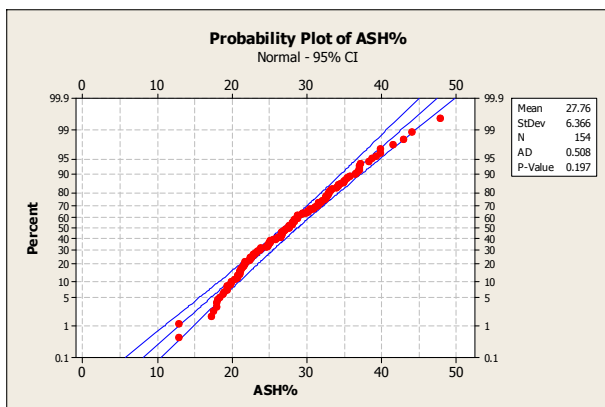


شکل ۳: ستون چینه شناسی کانسار زغال سنگ پروده ۴ [۱۱]

جمله استفاده از فرضیات پایایی و رسم واریوگرام، با شرط نرمال بودن توزیع داده‌ها برقرار است [۱۳]. با بررسی هیستوگرام و آزمون نرمال بودن، مشخص شد که مقدار خاکستر دارای توزیع نرمال می باشد (شکل های ۴ و ۵). در ادامه به منظور کشف و حذف داده های خارج از ردیف از نمودارهای باکس پلات (Box plot) استفاده شد چرا که وجود مقادیر خارج از ردیف در داده‌ها باعث افزایش شدید خطای تخمین می‌شود. همانگونه که در شکل ۶ مشخص است، مقادیر خاکستر فاقد داده خارج از رده می باشند چرا که داده‌های با مقادیر غیرعادی خاکستر، زغال کثیف قلمداد شده و جزو لایه نیستند.



شکل ۵: هیستوگرام درصد وزنی خاکستر



شکل ۶: تابع احتمال مقادیر درصد وزنی خاکستر

با توجه به نتایج آزمون های انجام شده بر روی مقادیر خاکستر می توان اینگونه عنوان کرد که مقدار خام این پارامتر کیفی بدون نیاز به تبدیلات آماری قابلیت استفاده در بررسی های زمین آماری را دارا می باشد.

اخیرا در تخمین پارامترهای کمی و کیفی کانسارهای زغال سنگ، استفاده از روش هایی که مختصات فضایی محل نمونه ها (حفاری، ترانشه ها و ...) را در نظر نمی گیرند کاربرد گسترده تری پیدا کرده است. به عنوان نمونه می توان به تخمین گازخیزی لایه های زغال سنگ معدن پروده ۱ طبس توسط ملایمت و محمد تراب (۱۳۹۱) به وسیله شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی اشاره کرد [۹]. پژوهش مورد بحث نشان داد که مقادیر عمق و ضخامت لایه بیشترین شباهت آماری با مقادیر گازخیزی را از خود نشان می دهند. دقت تخمین به وسیله دو روش ذکر شده، بیش از ۹۰٪ می باشد که به نسبت روش های آمار کلاسیک، سطح بالاتری از اعتبار در تخمین گازخیزی را ارائه می کنند.

در تحقیقی مشابه، مسرقلی و همکاران (۲۰۰۹) با به کارگیری تکنیک های رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی به تخمین ارزش حرارتی زغال سنگ ۲۵ ناحیه معدنی در کشور ایالات متحده اقدام نمودند [۱۰]. نتیجه این پژوهش، معرفی روش رگرسیون چندمتغیره غیر خطی به عنوان تخمین گر بهینه ارزش حرارتی بر اساس پارامترهای کیفی زغال سنگ بود.

۲- بحث

داده‌هایی که در عملیات تخمین خاکستر استفاده می‌شوند شامل اطلاعات حفاری های اکتشافی به روش مغزه گیری، توزیع گسل ها و مرزهای تکتونیکی کانسار، نقشه‌های توپوگرافی و زمین شناسی می‌باشند.

در کانسار زغال سنگ پروده ۴ طبس مجموعا ۱۶۸ حلقه حفاری اکتشافی مغزه گیری انجام شده که ۱۵۴ گمانه به لایه B₂ برخورد کرده است. عمق متوسط گمانه‌ها ۲۶۷ متر می باشد (عمیقترین گمانه: ۷۶۹/۱۵ متر - کم عمق ترین گمانه: ۳۸/۸۶ متر) [۱۱].

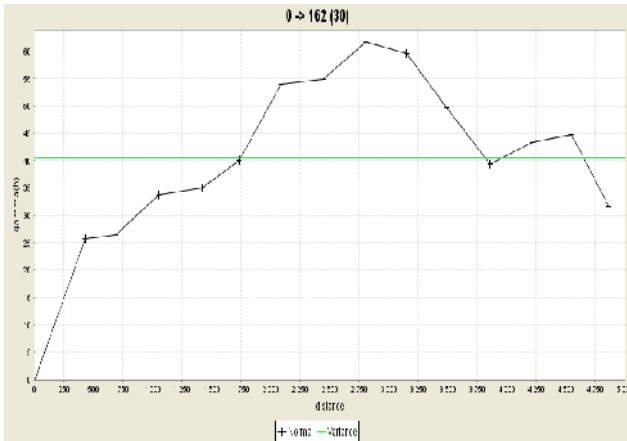
۲-۱- بررسی آماری

بررسی آماری داده‌های خامی که در تخمین شرکت می‌کنند و شناخت ویژگی‌های آماری آنها، به خصوص ماهیت توزیع داده‌ها، کمک شایانی به تخمین صحیح و تجزیه و تحلیل مناسب تر نتایج حاصل از آن می‌کند [۱۲].

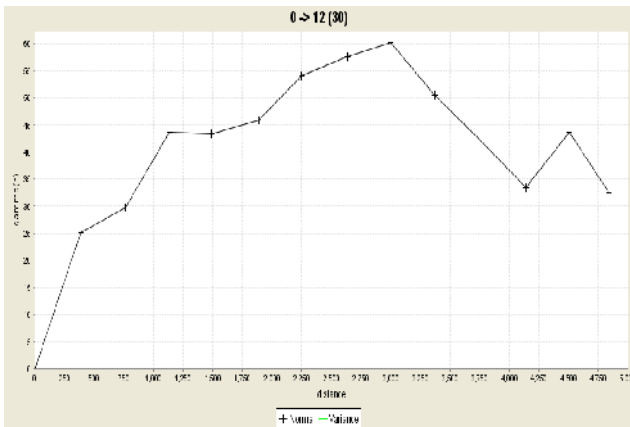
در این پژوهش مقادیر "درصد وزنی خاکستر" (به اختصار خاکستر) به عنوان مهمترین پارامتر کیفی ذخیره، مورد ارزیابی آماری و تخمین قرار گرفته است.

روش‌های آماری گاوسی فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها را یدک می‌کشند. پیش نیاز برخی از مفهوم های زمین آماری، از

در بررسی ژنز کانسار پروده و به خصوص پروده ۴، باتلاق تورب از نظر توالی زمانی از غرب به شرق تشکیل شده است [۱۴] و نتیجتاً وجود شعبات زغالی بیشتر در شرق محدوده (و در بخش پروده ۴)، منجر به همراهی خاکستر بیشتر با زغال سنگ گردیده است. این فرآیند وجود روند در تغییرات خاکستر و عدم پایایی پارامتر مذکور را تایید می کند. به منظور برازش مدل واریوگرام می بایست این روند کشف و حذف گردد. کلیه مراحل انجام این کار با عنوان کریجینگ عام شناخته می شود.

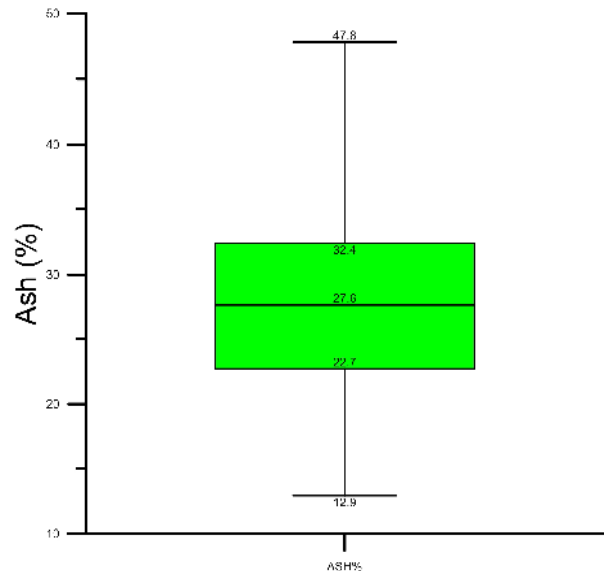


شکل ۷: واریوگرام مقادیر خاکستر با آزمون ۱۶۲ درجه دال بر عدم پایایی



شکل ۸: واریوگرام مقادیر خاکستر با آزمون ۱۲ درجه دال بر عدم پایایی

بدین منظور، پس از برازش معادله ای به متغیر ناحیه ای، تغییرات مقدار آن بر حسب x ، y و z را مدل کرده و مقدار روند را به کمک تابع برازش شده در هر نقطه محاسبه نموده و از مقدار اندازه گیری شده کسر می نمایند. نتیجتاً یک مقدار "باقی مانده" برای هر نقطه به دست خواهد آمد. واریوگرافی این مقادیر باقی مانده نشان خواهد داد که روند از متغیر ناحیه ای حذف شده است و در واقع مقادیر باقی مانده فقط دارای



شکل ۴: نمودار باکس پلات مقادیر درصد وزنی خاکستر

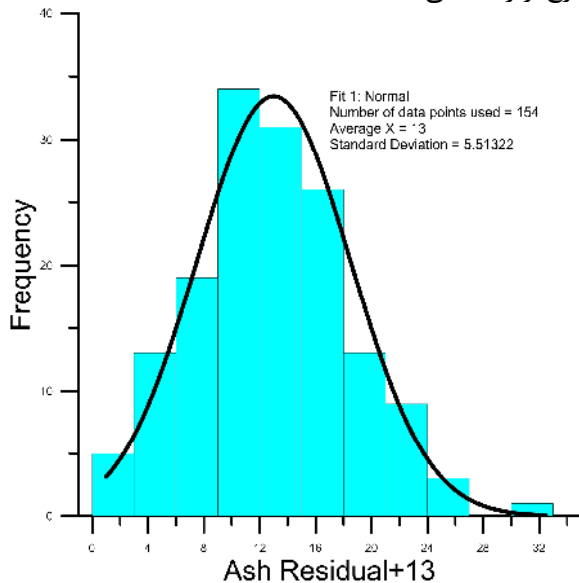
۲-۲- بررسی زمین آماری

۲-۲-۱- واریوگرافی و کریجینگ عام

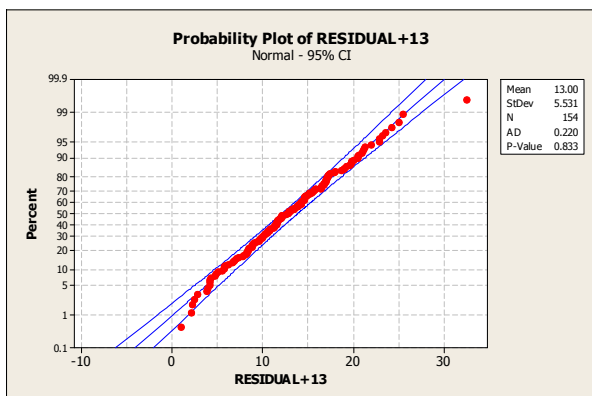
واریوگرافی اساسی ترین بخش از مطالعات زمین آماری برای تخمین ذخیره است. خروجی واریوگرام شامل سه پارامتر اثر قطعه ای، شعاع تاثیر و سقف واریوگرام می باشد. در این پژوهش کانسار به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است و با توجه به تغییرات کم ضخامت لایه، عملاً تغییرات مقادیر خاکستر در صفحه لایه زغالی مورد بررسی و تخمین قرار گرفت. عملیات واریوگرافی با استفاده از نرم افزار Surpac 6.3 و در ۶۰ آزمون مختلف انجام شد. اما تلاش برای مدل کردن هر یک از این واریوگرام ها به شکست انجامید. علت این امر نیز نرسیدن مقادیر واریوگرام تجربی خاکستر به سقف ثابت است. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله (h) ، مقدار واریوگرام خاکستر نیز به طور مداوم افزایش یافته و با یک روند تقریباً خطی از واریانس کلی جامعه عبور می کند (شکل های ۷ و ۸). این پدیده در مواقعی ظاهر می شود که مقادیر متغیر مورد بررسی با مختصات فضایی خود همبستگی داشته و به اصلاح دارای روند باشند.

روندداری مقادیر خاکستر در دو جهت فضایی x و y به صورت مستقل مشاهده نشد ولی عدم پایایی و وجود روند توسط واریوگرام ها به خصوص در آزمون های ۱۶۲ و ۱۲ درجه بر اساس نمودارهای شکل ۷ و ۸ کاملاً مشهود است. برای حذف این روند، بررسی تنها یک جهت فضایی کافی نبوده و روند در دو بعد توأمان بررسی و حذف شد (شکل ۹).

هیستوگرام باقی مانده های تبدیل یافته ترسیم شد. آزمون نرمال بودن و بررسی نقاط خارج از ردیف نیز بر روی داده ها انجام گردید (شکل های ۱۰ تا ۱۲). در نتیجه مشخص شد که مقادیر باقی مانده تبدیل یافته، توزیع نرمال داشته و فاقد داده خارج از ردیف می باشند.



شکل ۱۰: هیستوگرام مقادیر باقی مانده خاکستر در کریجینگ عام



شکل ۱۱: نمودار احتمال مقادیر تبدیل یافته باقی مانده خاکستر

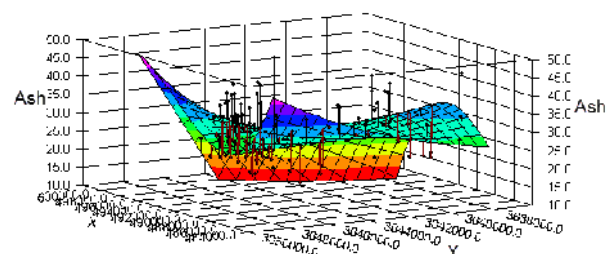
در ادامه به رسم واریوگرام و تعیین بیضوی همسانگردی اقدام شد. بدین منظور ۶۰ واریوگرام در آزمون های ۰ تا ۳۶۰ درجه ترسیم، مقایسه و بررسی شدند که نتیجتاً واریوگرام دو ساختاره کروی با آزمون ۱۰۸ درجه به عنوان واریوگرام جهت اصلی انتخاب شد (شکل ۱۳ و جدول ۱).

مولفه تصادفی می باشند. در نتیجه می توان از کریجینگ معمولی برای تخمین استفاده کرد و پس از اتمام تخمین، مقدار روند را به مقادیر تخمین زده شده افزود.

به منظور استخراج رابطه ریاضی بین مقادیر خاکستر زغال سنگ و مختصات (x,y) از نرم افزار 9 Datafit استفاده شد. این نرم افزار با روش رگرسیون غیر خطی، بهترین تابع برازش شده بر داده های ورودی را ارائه داده و در عمل با دریافت سه تایی مرتب (x, y, ash) یک تابع درجه دوم بر حسب x و y، مقدار خاکستر را تخمین می زند (رابطه ۱). نمایش سه بعدی این تابع توسط نرم افزار Datafit ارائه می گردد (شکل ۹). سپس این تابع تخمین، مقادیر x و y نقاط اطلاعاتی را دریافت کرده، مقادیر جدیدی برای خاکستر پیشنهاد می کند. تفاضل مقادیر تخمینی و اندازه گیری شده خاکستر، باقی مانده ها را به دست می دهد. رابطه ریاضی مورد بحث به صورت تابعی از مختصات به شکل زیر به دست آمده است:

$$\begin{aligned} \text{ASH}^* = & 8.69\text{E}7 - (4.16\text{E}13/x) - (6.38\text{E}14/y) + \\ & (2.13\text{E}19/x^2) + (2.37\text{E}21/y^2) - (1.39\text{E}19/(x*y)) + \\ & (4.78\text{E}23/x^3) - (4.56\text{E}27/y^3) + (6.82\text{E}26/(x^2*y^2)) - \\ & (8.84\text{E}25/(x^2*y)) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن ASH^* مقدار خاکستر تخمینی و x و y به ترتیب مقادیر طول و عرض جغرافیایی نمونه در سیستم مختصات UTM بر حسب متر می باشند.



شکل ۹: رویه برازش شده بر مقادیر خاکستر در صفحه کاناسار

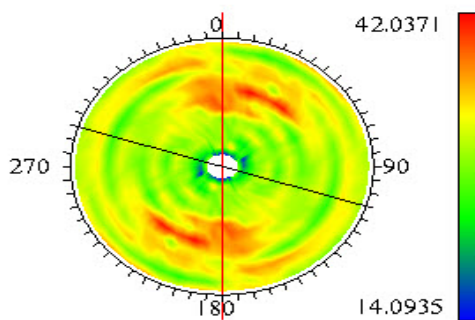
بررسی های آماری و واریوگرافی مقادیر باقی مانده نشان خواهد داد که روند مورد بحث از داده ها حذف شده است. حال می توان از روش کریجینگ معمولی برای تخمین مقادیر باقی مانده خاکستر استفاده کرد و پس از انجام تخمین برای هر بلوک، با تبدیل معکوس در نرم افزار Datafit، مقادیر واقعی خاکستر زغال سنگ لایه B_2 را بازیابی نمود.

حداقل مقدار باقی مانده ها تقریباً برابر با ۱۲/۰۰ می باشد. از آنجایی که استفاده از مقادیر منفی به عنوان عیار در تخمین کریجینگ با نرم افزار Surpac با اشکالاتی همراه است، به همه باقی مانده ها، مقدار ثابت ۱۳ اضافه شد تا همگی مثبت گردند.

۲-۲-۲- تحلیل ناهمسانگردی باقی مانده خاکستر

قطر بزرگ بیضوی ناهمسانگردی باقی مانده خاکستر در راستای آزیموت ۱۰۸ درجه قرار دارد (شکل ۱۷). به عنوان تحلیل ساختاری می توان به رابطه ناهمسانگردی خاکستر به حوضه نهشته گذاری زغال سنگ در محدوده پروده ۴ اشاره کرد. از آنجایی که باتلاق تورب مولد ذخیره زغال سنگ در پهنه ناودیدی با امتداد شرقی- غربی قرار داشته است و با در نظر گرفتن این نکته که زغال سنگ های غرب حوضه قبل از بخش شرقی شکل گرفته و شعبات زغالی در شرق کانسار پروده بیشتر از بخش های شرقی تشکیل شده اند [۱۴]، می-توان پیوستگی متغیر ناحیه ای خاکستر در جهت تقریبی شرقی- غربی را توجیه نمود و در نتیجه جهت عمود بر آن را به عنوان جهت با کمترین پیوستگی ساختاری در نظر گرفت. به منظور مشخص شدن فاکتور ناهمسانگردی خاکستر اقدام به تعیین شعاع تاثیر واریوگرام در هر یک از جهت های مذکور شد. در نتیجه فاکتور ناهمسانگردی باقی مانده خاکستر لایه B₂ به قرار زیر محاسبه گردید:

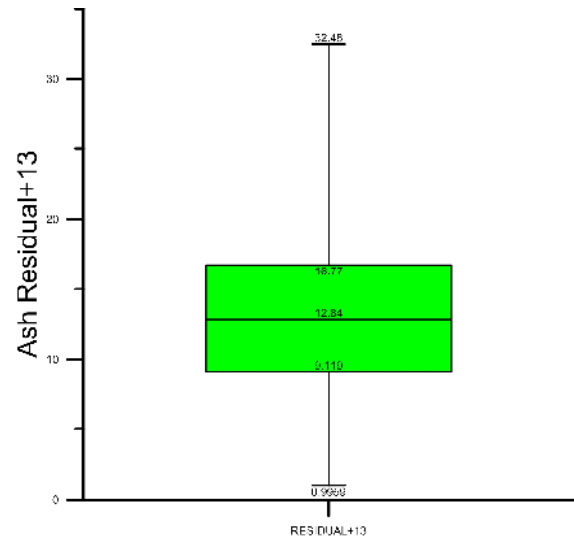
$$\text{Major} / \text{Minor} = 3578/1051 = 3.4$$



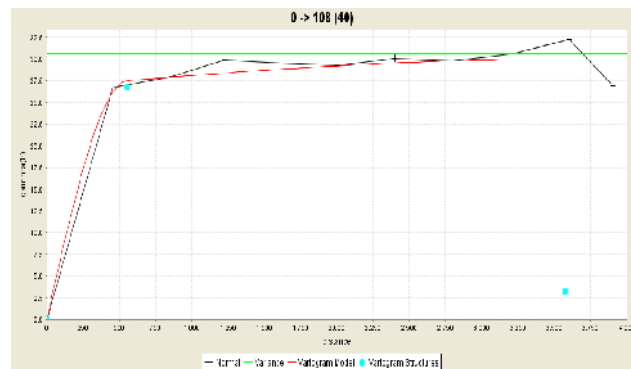
شکل ۱۴: بیضی ناهمسانگردی باقی مانده خاکستر

جدول ۲: نتایج اعتبار سنجی متقابل واریوگرام باقی مانده خاکستر لایه زغال سنگ B₂ در آزیموت ۱۰۸ درجه

MEAN (%)	-۰/۰۶۶۸
VARIANCE	۳۳/۲۰
STD. DEVIATION	۵/۷۶۲
SKEWNESS	-۰/۲۱۱
KURTOSIS	۳/۱۱
NO. OF ASSAYS	۱۵۴
AV KRIG VARIANCE % OF ERRORS WITHIN	۳۱/۰۳
TWOSTD. DEVIATIONS	۹۷/۴



شکل ۱۲: نمودار باکس پلات مقادیر تبدیل یافته باقی مانده خاکستر



شکل ۱۳: واریوگرام با آزیموت ۱۰۸ درجه برای باقی مانده خاکستر

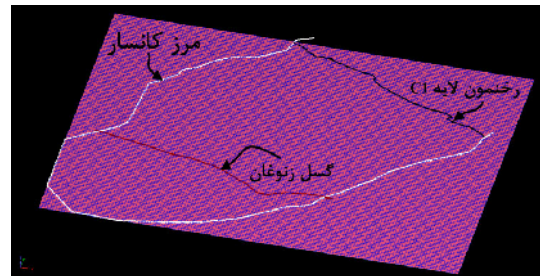
جدول ۱: پارامترهای واریوگرام باقی مانده خاکستر

ساختار ۲		ساختار ۱		اثر قطعه ای	نوع مدل
شعاع	سقف	شعاع	سقف		
تاثیر (متر)	۳۵۷۸	تاثیر (متر)	۲۶/۷		
	۳/۲۵		۵۵۴		

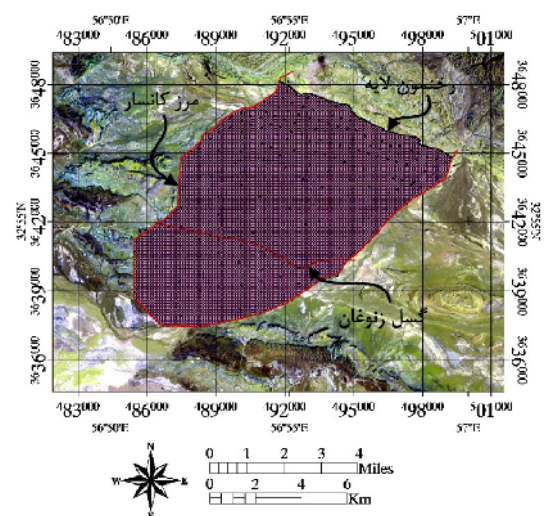
جدول ۲ نتایج اعتبار سنجی واریوگرام جهت اصلی برای باقی مانده خاکستر را نشان می دهد. با توجه به جدول، اختلاف واریانس خطاها با میانگین واریانس خطای کریجینگ ۶/۵ درصد می باشد و این مقدار از سقف مجاز یعنی ۱۵ درصد کمتر و در محدوده ای قابل قبول می باشد. همچنین سطح اعتماد واریوگرام مربوطه برابر با ۹۷/۴ درصد است که توسط نرم افزار مربوطه محاسبه شده است. با توجه به این نتایج واریوگرام رسم شده معتبر در نظر گرفته شد.

۳-۲- تخمین خاکستر

به دلیل اثرات نامطلوب خطای تخمین در افزایش ریسک سرمایه گذاری، لازم است از دقیق ترین روش تخمین که بتواند حداقل خطای تخمین را تضمین نماید استفاده شود. به عبارتی، در هر نقطه از کانسار خطای تخمین مشخص باشد. لازمه‌ی این کار تقسیم کانسار به بلوک‌های متناسب با طرح‌های استخراجی می‌باشد. اگر عیار کانسار ساختار فضایی قوی داشته باشد روش‌های زمین آماری می‌توانند بسیار مفید واقع شوند. با توجه به دو بعدی بودن کانسار و در نظر داشتن این نکته که تغییرات خاکستر لایه زغال سنگ در امتداد قائم (Z) قابل دنبال کردن نیست، کلیه نقاط اطلاعاتی به صورت دو بعدی (بدون در نظر گرفتن بعد Z و در صفحه لایه) به شکل فایل رشته‌ای (String File) در محیط Surpac در آمدند و به منظور تخمین نیز مدل بلوکی به صورت دو بعدی طراحی شد (شکل ۱۵). به پیشنهاد دفتر طراحی معدن پروژه ۴ و به دلیل نیاز به تطابق با ابعاد پهنه‌های استخراجی به روش مکانیزه، ابعاد هر یک از بلوک‌ها 100×100 متر انتخاب شد. مدل مورد بحث چنان طراحی شد که کلیه گمانه‌های اکتشافی در درون آن واقع شوند. سپس مرزهای ساختمانی کانسار بر مدل بلوکی نهایی اعمال گردید (شکل ۱۶).



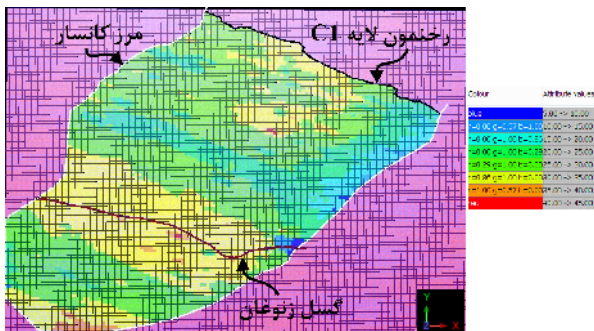
شکل ۱۵: مدل بلوکی کانسار پروژه ۴ در محیط نرم افزار Surpac



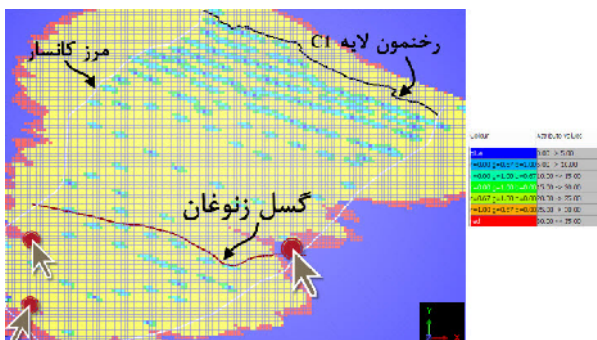
شکل ۱۶: وضعیت مدل بلوکی نسبت به مرزهای تکتونیکی کانسار

۳-۳-۱- تخمین به روش کریجینگ

با بهره‌گیری از نرم افزار Surpac، مقدار خاکستر باقی‌مانده برای سلول‌های مدل بلوکی به روش کریجینگ معمولی تخمین زده و سپس این داده‌ها از طریق معادله (۱) و به شیوه عکس، به مقدار واقعی خاکستر برای هر بلوک تبدیل شدند. در انتها با حذف بلوک‌های قرار گرفته در خارج مرزهای تکتونیکی، تعداد ۸۶۱۷ بلوک در درون کانسار قرار گرفت. با توجه به شکل ۱۷ توزیع مقادیر خاکستر تخمینی در محدوده این کانسار ناهمگون است. به گونه‌ای که بیشترین تعداد بلوک‌های با خاکستر زیاد، در محدوده گسل زنوغان مشاهده می‌شوند. این امر می‌تواند ناشی از تمرکز کانی‌های رسی در زون‌های برشی مجاور گسل‌ها باشد که موجب افزایش درصد خاکستر در این مناطق گردیده است.

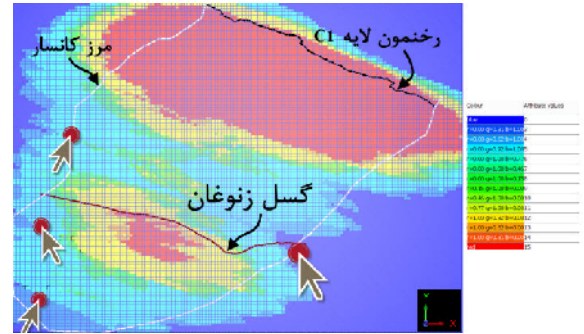
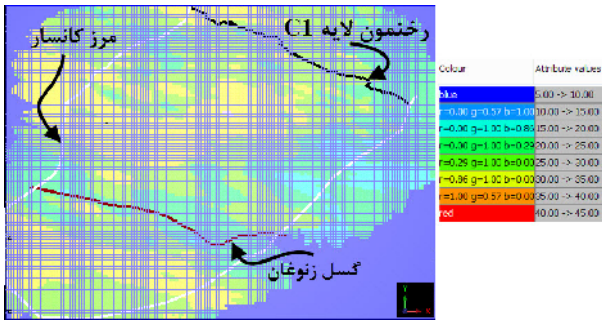


شکل ۱۷: توزیع مقادیر تخمینی خاکستر به روش کریجینگ عام در مدل بلوکی



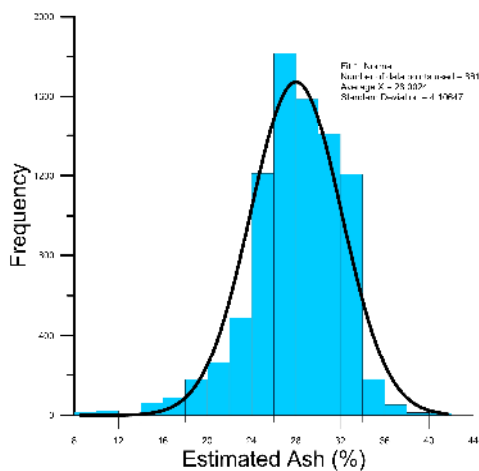
شکل ۱۸: توزیع واریانس تخمین باقی مانده خاکستر (نقاط با واریانس زیاد با فلش مشخص شده‌اند).

در حواشی ذخیره و نقاط محدود به مرزهای تکتونیکی، واریانس تخمین زیاد و تعداد داده‌های قابل دسترسی کم می‌باشد (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). لذا در صورت نیاز به افزایش سطح اعتماد تخمین، پیشنهاد می‌شود که در این نواحی، نمونه‌گیری با تراکم بیشتر (حفاری مغزه‌گیری) انجام پذیرد (شکل ۲۲).



شکل ۲۰: توزیع مقادیر تخمینی خاکستر به روش عکس مجذور فاصله در مدل بلوکی

شکل ۱۹: توزیع تعداد نقاط اطلاعاتی شرکت کننده در تخمین خاکستر هر یک از بلوکها (کریجینگ)



شکل ۲۱: هیستوگرام مقادیر تخمینی درصد وزنی خاکستر به دست آمده از کریجینگ عام

در ادامه بررسی نتایج تخمین، باید بررسی های آماری اولیه مانند بررسی هیستوگرام و تعیین پارامترها آماری را دنبال کرد تا از صحت تخمین اطمینان حاصل گردد (جدول ۳). میانگین و توزیع داده های حاصل از تخمین می بایست به داده های اولیه شبیه باشند و مقادیر تخمینی حتما در بازه مقادیر اولیه قرار گیرند.

به منظور مقایسه، تخمین خاکستر به روش عکس مجذور فاصله انجام شد (شکل ۲۰ و جدول ۳). برای حصول نتیجه بهتر، پارامترهای واریوگرافی و بیضوی ناهمسانگردی در تخمین به روش عکس مجذور فاصله نیز لحاظ شدند. همان طور که در شکل های ۱۷ و ۲۰ مشخص است، توزیع مقادیر خاکستر به دست آمده از کریجینگ عام و عکس مجذور فاصله تفاوت قابل ملاحظه ای دارند. از آنجایی که کریجینگ عام خطای تخمین را به دست می دهد، روش قابل اعتماد تری نسبت به عکس مجذور فاصله محسوب می شود.

جدول ۳: مقایسه مقادیر اولیه درصد وزنی خاکستر در داده های خام با مقادیر حاصل از تخمین بلوکی به روش کریجینگ عام و عکس مجذور فاصله

هیستوگرام مقادیر خاکستر به دست آمده از کریجینگ عام نزدیک به نرمال می باشد (شکل ۲۱). بررسی و مقایسه مقادیر اولیه و تخمین زده شده خاکستر گویای این واقعیت است که روش کریجینگ عام به کار گرفته شده در این پژوهش به خوبی قادر به استخراج ساختار فضایی خاکستر در کانسار است که این مهم به تخمین خاکستر بلوک های استخراجی در کانسار پروده ۴ با کمترین خطا منجر شده است.

پارامتر آماری	داده خام	کریجینگ عام	عکس مجذور فاصله
ماکزیمم (%)	۴۷/۸	۴۱/۶	۴۷/۱
مینیمم (%)	۱۲/۹	۱۳/۰	۱۴/۶
میانگین (%)	۲۷/۸	۲۸/۰	۲۷/۰
واریانس (مربع درصد)	۴۰/۵۲	۱۷/۲۵	۱۵/۵۸
انحراف استاندارد (%)	۶/۳۶۶	۴/۱۵۴	۳/۹۴۸
میانه (%)	۲۷/۶	۲۸/۲	۲۷/۲
کشیدگی	۰/۰۱۸	۱/۹۹	۰/۰۹۷
چولگی	۰/۳۴۸	-۰/۸۶۲	۰/۲۰۲
تعداد داده	۱۵۴	۸۶۱۷	۸۶۱۷

مزیت های ذکر شده برای روش زمین آمار، این روش برای ارزیابی ذخایر زغال سنگ (مشابه ذخایر فلزی) توصیه می شود.

۶- در گوشه های شرق، جنوب و غرب کانسار، واریانس تخمین بسیار بالاست (شکل ۱۸). به همین دلیل، نقاطی برای اجرای عملیات حفاری اکتشافی تکمیلی پیشنهاد می شوند (جدول ۴). نمونه گیری و کسب اطلاعات از این نقاط باعث افزایش دقت تخمین خواهد شد.

جدول ۴. مختصات پیشنهادی برای نقاط بهینه حفاری

تکمیلی
(UTM WGS-84)

ID	Easting (X (m))	Northing (Y (m))
1	494180	3641050
2	486600	3641340
3	487800	3643800
4	486620	3638600

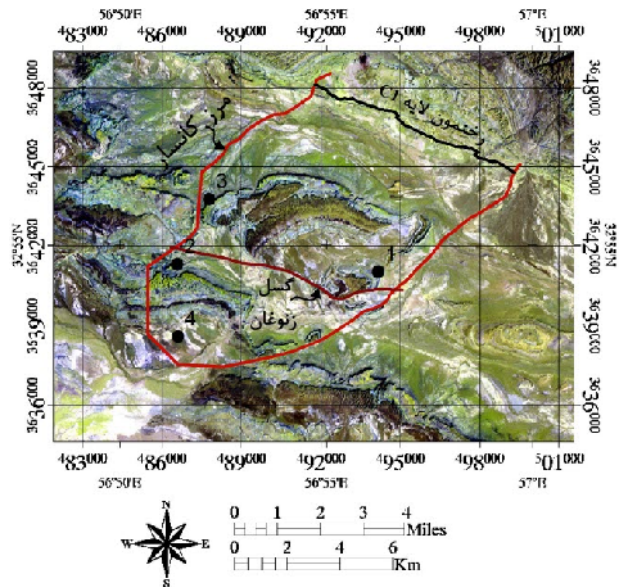
۷- توصیه می شود که با پیش برد عملیات استخراج لایه B₂، مقادیر خاکستر در عمل اندازه گیری گردد و با مقادیر تخمین زده شده مقایسه شوند تا هم صحت تخمین مورد ارزیابی قرار گیرد هم تخمین های آتی با نتایج بهتری همراه شوند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مدیریت و کارشناسان محترم شرکت زغال سنگ پروده طبس، دفتر طراحی معدن پروده ۴ طبس و به خصوص آقایان مهندس جراحی، مهندس محمدی و سرکار خانم احمدزاده که مولفین را در انجام این تحقیق یاری نمودند صمیمانه سپاسگزاری می گردد.

مراجع

- [1] Maggio, G.; Gacciola, G.; 2012; *When will oil, natural gas, and coal peak?*, Fuel, Volume 98, August 2012, 111-123.
- [2] Merritt, Roy D.; 1986; *Coal explorations, mine planning and development*, Noyes publications.
- [3] Ahangaran, D.K., Afzal, P., Yasrebi, A.B., Wetherelt, A., Foster, P.J., Darestani, R.A., 2011;



شکل ۲۲: محل قرارگیری نقاط پیشنهادی حفاری تکمیلی

۳- نتیجه گیری

۱- توزیع آماری مقادیر خاکستر لایه زغال سنگ B₂ در پروده ۴ نرمال می باشد. لذا بدون نیاز به انجام تبدیلات آماری می توان به واریوگرافی آن اقدام نمود.
۲- توزیع فضایی مقادیر خاکستر ناهمسانگرد بوده و آزمون بیشترین پیوستگی (۱۰۸ درجه) تقریباً بر کشیدگی بستر رسوب زغال سنگ منطبق است.
۳- تخمین به روش کریجینگ نشان می دهد که بلوک های قرار گرفته در اطراف گسل زنوگان مقادیر بالایی از خاکستر را دارا می باشند. این امر می تواند ناشی از تمرکز کانی های رسی در زون های خردشده و گسله باشد.

۴- با توجه به مقادیر تخمین زده شده خاکستر با روش کریجینگ عام برای بلوک های استخراجی می توان طرح های اختلاط ماده معدنی را پایه ریزی و اجرا کرد. حداقل مقدار خاکستر ۱۳٪، حداکثر ۴۱٪ و میانگین آن برابر با ۲۸٪ می باشد.

۵- این پژوهش به طور کلی نشان می دهد که زمین آمار در تخمین پارامترهای کمی و کیفی و ارزیابی ذخایر زغال سنگ می تواند کارآمد بوده، در صورت تفسیر مناسب، ابزار خوبی برای استخراج ساختار فضایی داده ها و ناهمسانگردی آنها می باشد. در مقابل، روش عکس فاصله وزن دار قرار دارد که نه تنها قابلیت حذف روند در داده ها را ندارد بلکه خطای تخمین را نیز به دست نمی دهد. لذا با توجه به

- [۹] ملایمت، حسین؛ محمد تراب، فرهاد؛ جراحی، علی؛ ۱۳۹۱؛ تخمین گازخیزی در معدن زغال سنگ پروژه ۱ طبس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیر خطی، اولین کنگره زغال سنگ ایران، شاهرود، ۸-۱۰ شهریورماه ۱۳۹۱.
- [10] Sh. Mesroghli; E. Jorjani; S. Chehreh Chelgani; 2009; *Estimation of gross calorific value based on coal analysis using regression and artificial neural networks*, International Journal of Coal Geology, 79, 49-54.
- [۱۱] جراحی، علی؛ ۱۳۸۶؛ گزارش زمین شناسی و اکتشاف مقدماتی معدن پروژه ۴ طبس، دفتر طراحی معدن زغال سنگ پروژه ۴ طبس.
- [۱۲] مدنی، حسن؛ ۱۳۷۳؛ مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (واحد تفرش).
- [۱۳] حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۸۹؛ زمین‌آمار (ژئواستاتیسیتیک)، انتشارات دانشگاه تهران.
- [14] Adam Consulting Engineers; 1992; *Tabas Coal Mine Project: Geological Report (Mine No.1)*; Prepared for National Iranian Steel Company.
- An Evaluation of the Quality of Metallurgical Coking Coal Seams within the North Block of Eastern Parvadeh Coal Deposit, Tabas, Central Iran*; Journal of Mining and Metallurgy; 47 A (1), 1 – 16.
- [۴] شریعت نیا، م. ح؛ ۱۳۷۴؛ ویژگی های زمین شناسی گستره پروژه از حوضه زغال دار طبس، ایران مرکزی، فصل نامه علوم زمین، شماره ۱۵ - ۱۶، ۵۰ - ۶۰.
- [۵] قربانی، منصور؛ ۱۳۸۷؛ زمین شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه های معدنی ایران، انتشارات آراین زمین، ۵۴۷ - ۵۴۹.
- [6] Heriawan, Mohamad Nur; Katsuaki Koike; 2008; *Identifying spatial heterogeneity of coal resource quality in a multilayer coal deposit by multivariate geostatistics*, International Journal of Coal Geology, 73, 307-330.
- [7] Watson, William D.; Leslie F. Ruppert; Linda J. Bragg; Susan J. Tewalt; 2001; *A geostatistical approach to predicting sulfur content in the Pittsburgh coal bed*, International Journal of Coal Geology, 48, 1-22.
- [8] Hindistan, Mehmet Ali; Abdullah Erhan Tercan, Bahtiyar Ünver; 2010; *Geostatistical coal quality control in longwall mining*, International Journal of Coal Geology, 81, 139-150.