



مقاله پژوهشی

تخمین زمین آماری آنومالی شماره چهار سنگ آهن سنگان

رضا روکی<sup>۱\*</sup>، محمد ناصر محمدی<sup>۲</sup>، محسن صفری<sup>۳</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، rooki@birjandut.ac.ir  
۲. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد اکتشاف معدن از دانشگاه صنعتی بیرجند و کارشناس معدن سنگ آهن سنگان، mine.mohammadi1362@gmail.com  
۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، safari@birjandut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

چکیده

در این مطالعه به ارزیابی و تخمین ذخیره کانسار شماره IV (معدن جو)، یکی از آنومالی‌های شرقی معدن سنگ آهن سنگان، با استفاده از روش‌های زمین آماری پرداخته شده است. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های توپوگرافی و اطلاعات ۴۹ حلقه گمانه به متر از کلی ۸۵۴۹ متر است. محدوده مورد مطالعه حدود ۱۳۲ هکتار و تغییرات عیار آهن در محدوده از ۰/۶۶ درصد تا ۶۴ درصد است. مدل‌سازی کانسار در این محدوده با نرم‌افزار SURPAC و تحلیل‌های آماری به کمک SPSS انجام شده است. ابعاد بلوک‌ها با توجه به فواصل کارهای اکتشافی، در راستای X و Y معادل ۲۵ متر و در امتداد محور Z با توجه به ارتفاع پله‌های استخراجی در آنومالی‌های غربی و مرکزی برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شد. همچنین زیربلوک‌هایی در امتداد مرزهای ماده معدنی در مدل اضافه شده و تعداد ۲۱۰۰ بلوک ساخته شد. تخمین ذخیره کانسار IV بر اساس مقادیر مختلف عیار حد و با روش کریجینگ و عکس مجذور فاصله ارایه شده است. تناژ برآورد شده بر اساس عیار حد ۲۰ درصد با روش کریجینگ معادل ۱۲۹۸۵۹۷۹ تن و در روش عکس مجذور فاصله ۱۲۹۰۷۷۴۸ تن است.

کلمات کلیدی

تخمین ذخیره، سنگ آهن سنگان، کانسار IV (معدن جو)، روش‌های زمین آماری، نرم‌افزار SURPAC.

\* نویسنده مسئول مکاتبات.

## ۱- مقدمه

همکاران، ۱۳۹۰: مجدی فر و کمالی، ۲۰۱۳: شرکت مهندسی مشاور کاوشگران، (۱۳۹۴).

در مطالعه حاضر، به ارزیابی و تخمین ذخیره کانسار IV، یکی از آنومالی شرقی معدن سنگان با استفاده از نرم افزار SURPAC پرداخته می شود که نتایج تحقیق می تواند در طراحی های استخراجی معدن استفاده شود.

## ۲- محدوده مورد مطالعه

معدن سنگ آهن سنگان خواف در استان خراسان رضوی در ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد، ۶۸ کیلومتری جنوب غربی تایباد، ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف، ۱۸ کیلومتری شمال شرقی سنگان و ۴۰ کیلومتری مرز افغانستان در منطقه ای به عرض جغرافیایی ۲۴' و ۳۴° و طول جغرافیایی ۱۶' و ۶۰° واقع شده است. شکل ۱ (طرح جامع معدن سنگان، ۱۳۹۲). مجموعه معدن سنگ آهن سنگان با ذخیره زمین شناسی ۱/۲ میلیارد تن یکی از بزرگترین معدن سنگ آهن در خاورمیانه است که به صورت روباز استخراج می شود و در کنار آن کارخانه گندله سازی سنگان و خط آهن خواف-سنگان-هرات به عنوان یکی از بزرگترین پروژه های ملی شرق کشور معرفی شده است. محدوده معدن سنگان از لحاظ وضعیت ساختمانی جزو سازند ایران مرکزی است و سنگ های مختلف آذرین درونی و بیرونی، دگرگونی و رسوبی در این منطقه وجود دارند. بومری، منشا کانسارهای سنگ آهن سنگان را از نوع اسکارن و کانی سازی را همزمان با تشکیل اسکارن می داند (بومری، ۱۳۷۱).

کانی سازی فلزی موجود در منطقه شامل منیتیت، هماتیت، پیریت، پیرویت، کالکوپیریت و کوولیت است که اغلب این کانی ها در نسل های مختلف تشکیل شده اند. پردازش تصاویر ماهواره ای نقش گسل ها را در کانی سازی تایید کرده و روند اصلی گسل های مهم منطقه شرقی- غربی است که منطبق با روند کانی سازی است (آراسته و همکاران، ۱۳۷۰).

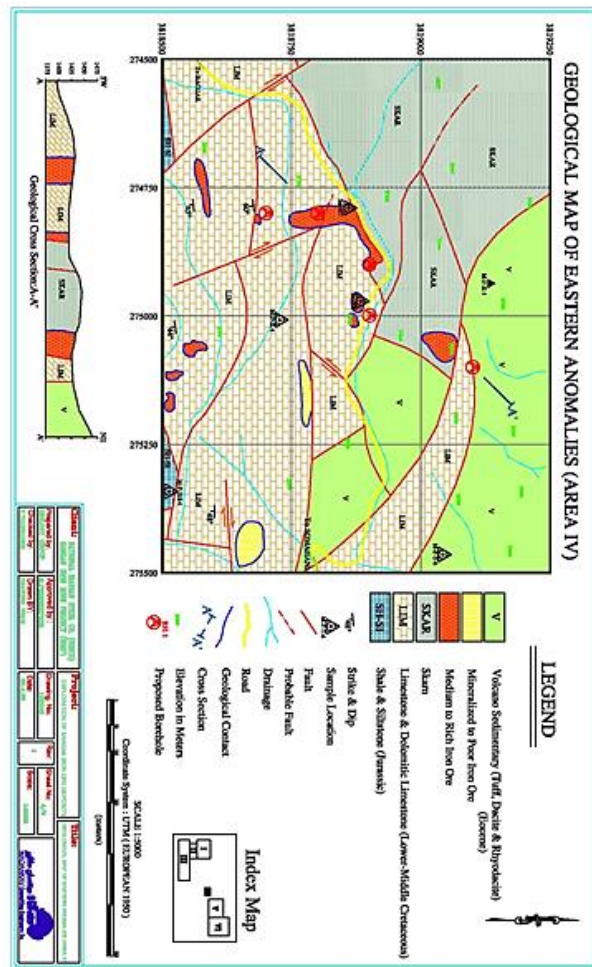
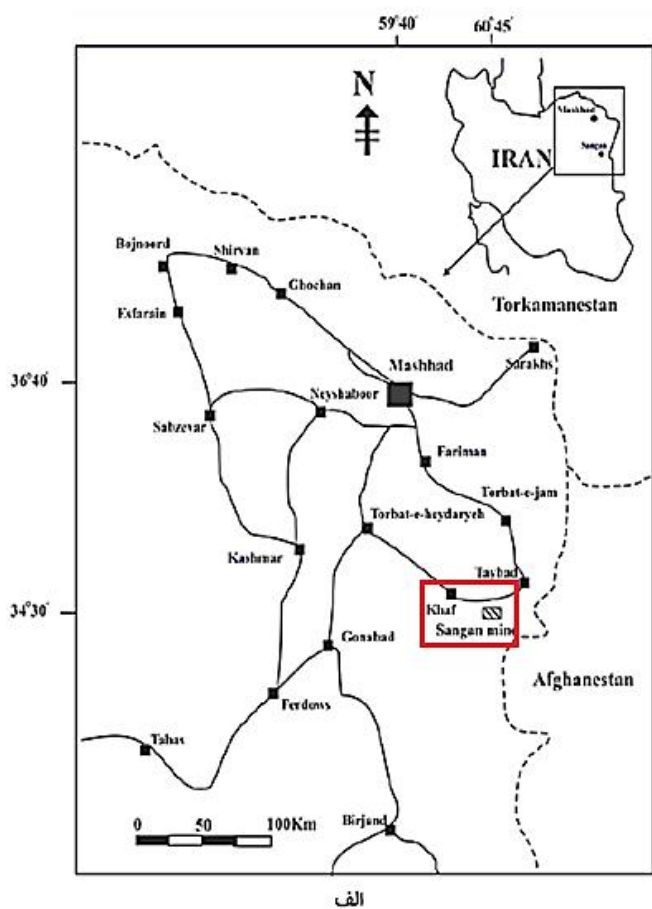
معدن سنگ آهن سنگان به سه آنومالی غربی (پنج کانسار تپه قرمز، A، B، C شمالی و C جنوبی)، مرکزی (دو کانسار باغک و دردوی) و شرقی بزرگ (۹ کانسار شامل کانسارهای شماره I (سنجدک)، II (باغک شرقی)، III، IIIw (بغل بید)، IV (معدنچو)، V (سم آهنی)، VIN (فرزنده شمالی)، VIS (فرزنده جنوبی)، VIw (فرزنده غربی)) تقسیم می شود (شکل ۲). در آنومالی غربی و مرکزی اکتشافات تقریباً تمام شده و تخمین ذخیره انجام گرفته است.

سنگ آهن یکی از کالاهای استراتژیک جهان است و ماده اولیه اصلی مورد استفاده در تولید فولاد به شمار می رود. به عبارتی حدود ۹۸ تا ۹۹ درصد کل مصرف سنگ آهن مربوط به صنایع تولید فولاد و چدن است بنابراین ماده جایگزینی برای آن در سطوح مصرف فعلی وجود ندارد.

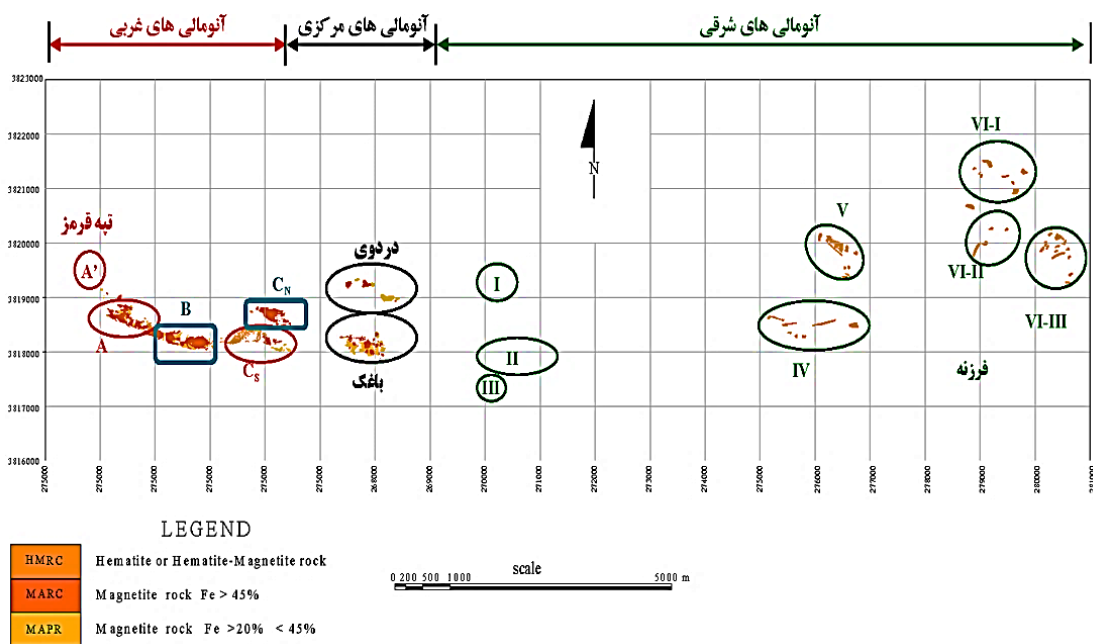
در مسایل معدنی به کارگیری روش های توانمند در تخمین ذخیره ماده معدنی نقش مهمی را در ارزیابی، طراحی و برنامه ریزی های معدن ایفا می کند. برای حل مسایل مرتبط با کانسار، برای مثال طراحی شبکه حفاری، تخمین ذخیره و رسم منحنی های عیار ذخیره و طراحی معدن، لازم است بر اساس داده های به دست آمده از اندازه گیری نمونه ها، ذخیره کل تخمین زده شود. روش های مختلفی برای تخمین وجود دارد که در یک تقسیم بندی کلی می توان آن ها را به روش های کلاسیک، روش های زمین آماری و روش های هوش مصنوعی تقسیم بندی کرد. اصول روش های محاسبه ذخیره یکسان است و در واقع اختلاف اساسی روش های مختلف، در چگونگی تقسیم بندی منطقه به قطعه ها و محاسبه ضخامت و عیار متوسط آن هاست. روش های کلاسیک، روش هایی هستند که از آمار کلاسیک برای تخمین استفاده می کنند. در صورتی که در روش های زمین آماری، تخمین بر اساس ساختار فضایی موجود در محیط مورد نظر انجام می گیرد. به طور کلی تخمین زمین آماری فرآیندی است که طی آن می توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به دست آورد (مدنی، ۱۳۷۳: حسنی پاک، ۱۳۹۱: آنلز، ۲۰۱۲: تومز، ۲۰۰۹).

امروزه روش زمین آمار یکی از مهم ترین روش ها در تخمین تغییرات عیار و ذخیره با حداقل خطا است که در مطالعات مختلفی برای تخمین ذخیره به کار رفته و کارایی آن مورد تایید قرار گرفته است (کشمیری، ۱۳۸۳: لیاقت و همکاران، ۱۳۸۵: حکمت نژاد و حسنی پاک، ۱۳۹۰: دهقانی، ۱۳۹۰: صفری و همکاران، ۱۳۹۶: احمدی و سادات کودهی، ۱۳۹۷: کسمایی و همکاران، ۲۰۱۰: دینانی، ۲۰۱۰: دایا، ۲۰۱۲: دایا، ۲۰۱۵: کیس و همکاران، ۲۰۱۶: زرزور، ۲۰۲۱).

در مورد تخمین ذخیره آنومالی های مختلف معدن سنگان در استان خراسان رضوی با استفاده از روش های زمین آماری و هوشمند نیز مطالعات زیادی انجام گرفته است (حسینی، ۱۳۸۷: شرکت مهندسی معدنکاو، ۱۳۸۸: غلامی و



شکل ۱- الف - موقعیت جغرافیایی آنومالی های سنگ آهن سنگان (مجدی فر و کمالی، ۱۳۹۲):  
 ب - نقشه زمین شناسی کانسار IV (شرکت مهندسی معدنکاو، ۱۳۸۹)



شکل ۲- موقعیت پراکندگی آنومالی ها در مجموعه معدن سنگ آهن سنگان (معدنکاو، ۱۳۸۸)

آتشباری، نقشه برداری، مقطع زدن، تعیین کاواک بهینه و طراحی معادن روباز و زیرزمینی را دارد. این نرم افزار دارای کارایی و دقت بالا، کاربری ساده، محیط گرافیکی سه بعدی قدرتمند و امکان اتوماسیون جریان کار است (عباداللهی، ۱۳۹۲).

نرم افزار SURPAC مانند سایر نرم افزارهای مشابه برای مدلسازی، نیازمند داده های خاص با قالب بندی منظم و استاندارد است. شبکه حفاری موجود در منطقه به صورت منظم و با فواصل  $100 \times 100$  متر (مربوط به شبکه اکتشافی مقدماتی) است و روند آن شرقی- غربی است که این فواصل از سمت مرکز به سمت شرق در مراحل بعدی اکتشاف برای برخورد به ماده معدنی و بررسی های دقیق تر به مقدار  $50 \times 50$  متر کاهش یافته است. مساحت ناحیه تحت پوشش به وسیله گمانه ها برابر با  $173420$  مترمربع است. داده ها تنها شامل داده های گمانه ای است (شکل ۳). تعداد گمانه های حفر شده ۴۹ حلقه گمانه قائم که تعداد ۳۵ حلقه آن با ماده معدنی برخورد داشته است و طول کل حفاری ها  $8549$  متر است. از میان کل گمانه های حفر شده، حداکثر عمق گمانه حفر شده  $325$  متر است که متعلق به گمانه شماره BHE4K-60 است و حداقل عمق گمانه حفر شده  $977$  متر بوده که متعلق به گمانه شماره BHE4K-34 است.

فواصل نمونه برداری برای آهن ۳ متری است و در نقاطی که باطله وجود دارد، سه متر کمر بالا و سه متر کمر پایین نمونه گرفته می شود.

فایل های مورد نیاز برای وارد کردن به این نرم افزار شامل Assay (عیار عناصر و کانی های مهم از جمله آهن، اکسید آهن، فسفر، گوگرد و وزن مخصوص)، Survey (وضعیت گمانه ها در داخل زمین شامل آزیموت و شیب)، Collar (شماره گمانه و مختصات دهانه گمانه)، Gology (وضعیت زمین شناسی منطقه شامل نوع سنگ) است.

### ۳-۱-۱- پردازش اولیه داده ها

نخستین گام در اجرای مطالعات آماری یک پروژه معدنی، بررسی وضعیت آماری نمونه های بانک اطلاعات اکتشافی است. این مرحله حتی پیش از یکپارچه سازی (کامپوزیت بندی) داده ها و بدون در نظر گرفتن تاثیر طول نمونه ها انجام می شود. هدف شناخت وضعیت آماری نمونه ها به لحاظ نوع توزیع، گستره تغییرات و تعدد جوامع گوناگونی است که شاید درهم آمیخته باشند. ابزار اصلی در این گام، ایجاد نمودارهای گرافیکی از توزیع داده ها و بررسی آماره های گرایش به مرکز و پراکندگی است.

کانسار IV با وسعت  $132$  هکتار بین طول های جغرافیایی  $275600-274400$  و عرض های جغرافیایی  $3819200-3818100$  واقع شده است و به ترتیب (از قدیم به جدید) شامل رخنمون های سنگی شیل، ماسه سنگ، سنگ آهک کریستاله و دولومیتی، ماسه سنگ آهکی متعلق به دوره ژوراسیک، اسکارن، سنگ آهن، توف، مونزودیوریت، لایت (دیاباز)، آلکالی ریولیت، داسیت و ریوداسیت متعلق به ائوسن و رسوبات عهد حاضر متعلق به کواترنری است.

منابع زمین شناسی کانسارهای شرقی، بر اساس مشاهدات صحرایی، نمونه های سطحی، اطلاعات حاصل از نقشه های زمین شناسی با مقیاس  $1:2000$ ، اطلاعات حاصل از نقشه های فاز اول گراویمتری و مگنتومتری (برای تعیین ضخامت توده های آهن دار) بدست آمده است. ضخامت زون آهن دار در کانسارهای شماره I، IV بر اساس اطلاعات مگنتومتری و در سایر کانسارها بر اساس اطلاعات گراویمتری محاسبه شده است. جدول ۱ این اطلاعات را نشان می دهد.

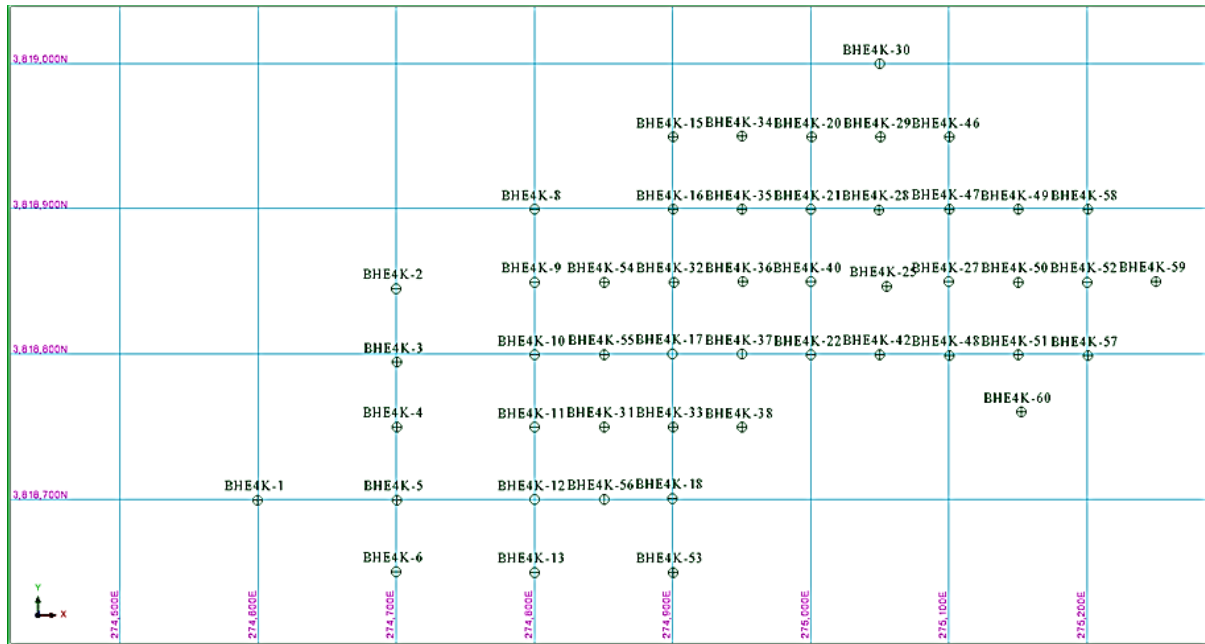
جدول ۱- برآورد منابع زمین شناسی کانسارهای شرقی

ردیف	شماره کانسار	تیپ آهن	میانگین عیار نمونه های سطحی (درصد)	ضخامت توده آهن بر اساس اطلاعات ژئوفیزیک	میزان ذخیره (میلیون تن)
۱	I	مگنتیت	۵۲٫۸۲	۵۰	۱٫۲
۲	II	هماتیت	۴۸٫۷۹	۴۵	۱
۳	IIIW	هماتیت	۳۱٫۰۹	۴۰	۲٫۲
۴	III	هماتیت	۴۳٫۷۵	۴۰	۱۰٫۸
۵	IV	مگنتیت	۵۷٫۳	۶۰	۴٫۹
۶	V	هماتیت	۵۲٫۳۳	۱۰۰	۷٫۸
۷	VIN	هماتیت	۴۷٫۸	۸۰	۷
۸	VIS	هماتیت	۴۶٫۸۱	۸۰	۱۳٫۳
۹	VIW	هماتیت	۵۱٫۱۴	۴۰	۴٫۵

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- مطالعه آماری داده ها

نرم افزار SURPAC یکی از متداول ترین نرم افزارهای زمین شناسی، طراحی و برنامه ریزی معادن است که عملیات پروژه های معدنی را اکثر کشورهای جهان پشتیبانی می کند. این نرم افزار قابلیت استفاده در مواردی، مانند کار بر روی گمانه ها، تخمین ذخیره، ساختن مدل بلوکی، طراحی الگوی

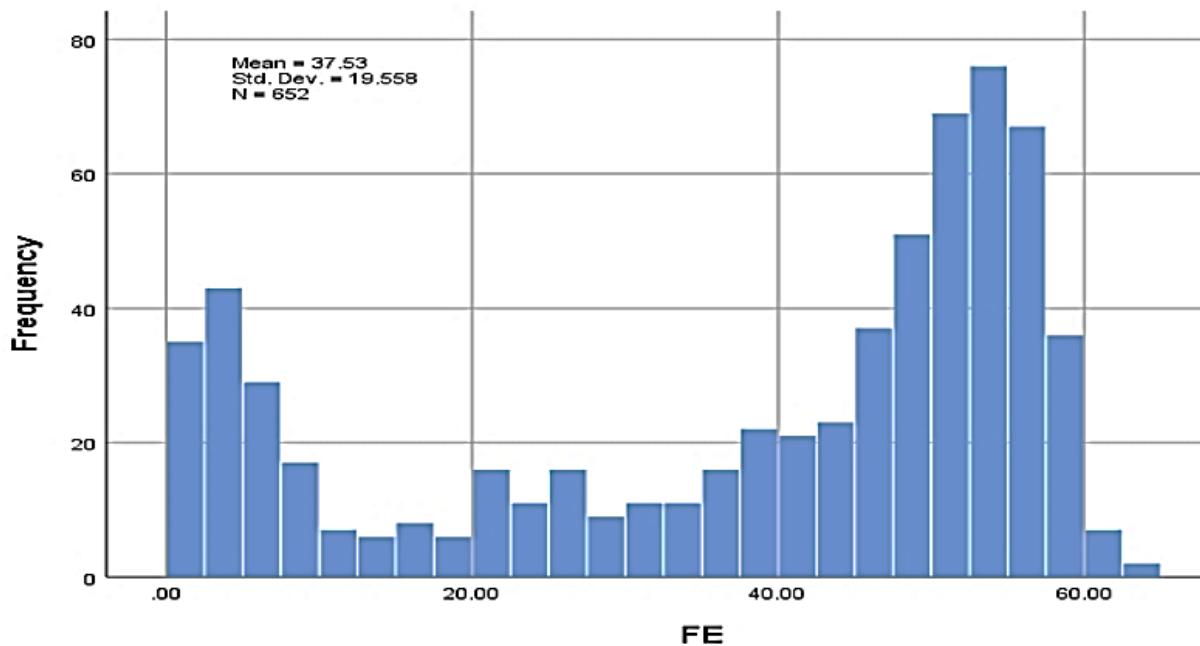


شکل ۳- موقعیت گمانه‌های اکتشافی

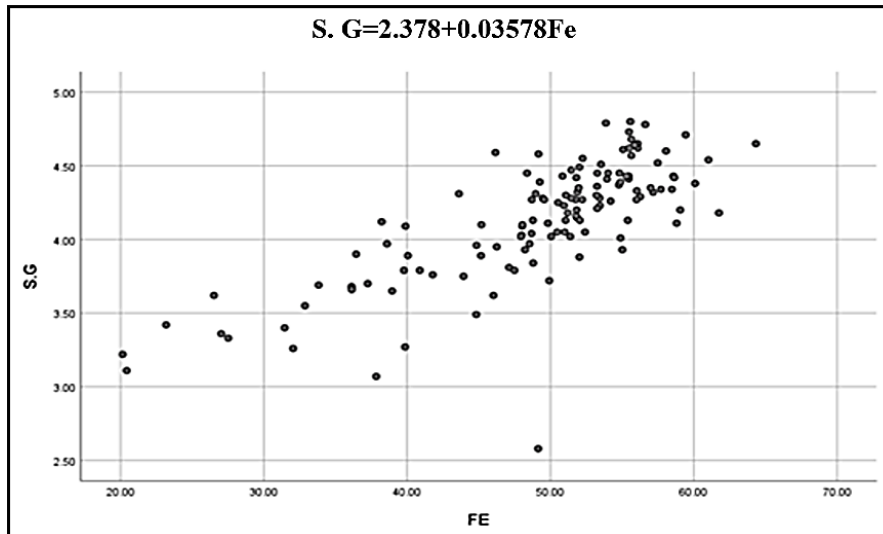
آماره‌های این متغیر آورده شده است. بالاترین درصد آهن مربوط به گمانه BHE4K-21 با میزان ۶۴/۳۳ درصد و پایین‌ترین درصد آهن در گمانه BHE4K-51 و برابر ۰/۶۶ درصد ثبت شده است.

شکل ۵ نمودار و نتایج همبستگی بین آهن و وزن مخصوص (S.G) را نشان می‌دهند. ضریب همبستگی بین متغیرهای آهن و وزن مخصوص ۰/۷۶۷ است که حاکی از همبستگی بالا بین این دو متغیر است و نشان‌دهنده کنسار آهنی با کیفیت خوب است.

آنالیز داده‌ها برای ۴ متغیر آهن (Fe)، اکسید آهن (FeO) و فسفر (P) و گوگرد (S) برای ارایه به نرم‌افزار انجام گرفت (محمدی، ۱۳۹۸) که در این مقاله فقط نتایج تحلیل آماری و زمین آماری متغیر آهن آورده شده است. هیستوگرام فراوانی نسبی متغیر عیار آهن برای کل داده‌ها در شکل ۴ مشاهده می‌شود. این هیستوگرام مبین تلفیق سه جامعه آماری پرعیار (بیش از ۴۵ درصد)، متوسط (۳۵ تا ۴۵ درصد) و کم‌عیار (۲۰ تا ۳۵ درصد) در مجموعه داده‌های این متغیر است و در جدول ۲



شکل ۴- هیستوگرام فراوانی نسبی متغیر Fe برای کلیه نمونه‌های منطقه مطالعاتی



شکل ۵- نمودار پراکندگی بین متغیرهای Fe و S.G کلیه نمونه‌ها

جدول ۲- آماره‌های توصیفی داده‌های خام متغیر Fe

واحد	مقدار	شاخص
عدد	۶۵۲	تعداد داده
درصد	۰٫۶۶	حداقل
درصد	۶۴٫۳۳	حداکثر
درصد	۶۳٫۶۷	دامنه تغییرات
درصد	۳۷٫۵۲	میانگین
درصد	۱۹٫۵۵	انحراف معیار
درصد	۳۸۲٫۵۰۱	واریانس
درصد	۵۲٫۱۲	ضریب تغییرات
-	-۰٫۷۳۵	چولگی
-	-۰٫۹۷۸	کشیدگی

۳-۱-۲- یکپارچه‌سازی (کامپوزیت‌بندی)

پس از حفر گمانه‌های اکتشافی، از مغزه‌های به‌دست آمده، نمونه‌گیری می‌شود. این نمونه‌ها اغلب به صورت هدف‌دار از نواحی تحت کانی‌زایی گرفته می‌شوند و تا حد ممکن سعی بر آن است که طول آن‌ها برابر باشد اما در عمل، به علل گوناگون مانند عدم بازیابی مغزه و خردشدگی نمونه، امکان نمونه‌گیری پیوسته از تمام نقاط وجود ندارد و بنابراین طول نمونه‌ها برابر نخواهد بود. از سوی دیگر، طول نمونه‌ها دستخوش عوامل دیگری از جمله شدت تغییرات کیفیت کانسار و عیار آن نیز می‌شود. در صورتی که توزیع عیار یکنواخت‌تر باشد، طبیعی است که می‌توان طول نمونه‌ها را افزایش داد. این نمونه‌ها که بنا به عوامل یاد شده دارای طول‌های متفاوتی‌اند، نمونه‌های خام نامیده می‌شوند. یکی از مشکلات به‌کارگیری داده‌های

خام، تاثیر متفاوت فضای مربوط به هر نمونه است. بنابراین دامنه تاثیر یک داده در تمام کانسار یکسان نیست. به کار بردن چنین داده‌هایی در تخمین موجب خطای سیستماتیک می‌شود. برای رهایی از این خطا باید فضای داده‌ها را هم‌احتمال کرد. در این کانسار، همان‌طور که از شکل ۶ و جدول ۳ نیز مشخص است، طول‌های نمونه‌گیری متفاوت بوده است؛ بنابراین ضروری است که با وزن‌دهی صحیح، ترکیب (کامپوزیت) شوند تا نمونه‌هایی با ارزش آماری برابر را ایجاد کنند. بدین‌منظور باید توزیع فراوانی طول داده‌ها را رسم کرد. اگر طول معینی، بیشترین فراوانی را نسبت به دیگر طول‌ها داشته باشد، می‌توان آن طول را به عنوان طول مبنا (کامپوزیت) در نظر گرفت و میانگین عیار این طول را برای نقطه وسط کامپوزیت منظور کرد. در بسیاری موارد ارتفاع پله‌های استخراجی در مورد معادن روباز و یا ارتفاع کارگاه‌استخراج در مورد معادن زیرزمینی به عنوان طول کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳- آماره‌های طول نمونه‌گیری داده‌های خام

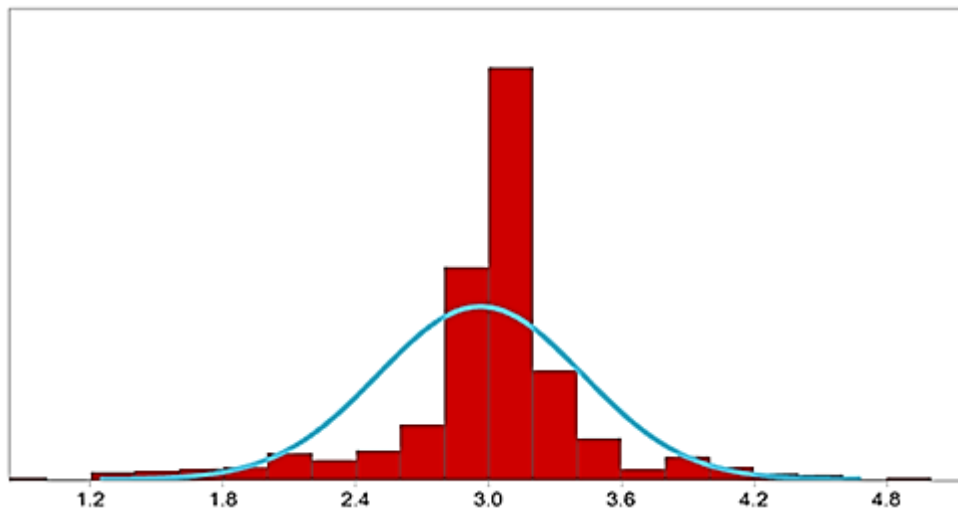
واحد	مقدار	شاخص
عدد	۶۵۳	تعداد داده
متر	۰٫۹۵	حداقل
متر	۴٫۹۵	حداکثر
متر	۴	دامنه تغییرات
متر	۲٫۹۶	میانگین
متر	۰٫۴۶	انحراف معیار
متر	۰٫۲۲	واریانس
درصد	۱۵٫۵۴	ضریب تغییرات

هر چند انتخاب فاصله مناسب برای کامپوزیت‌سازی، در صورت امکان مضرری از ارتفاع پله مورد نظر در طراحی در نظر گرفته می‌شود اما در اینجا با توجه به لایه‌ای بودن کانسار آهن مورد مطالعه در این آنومالی، تخمین‌های عیاری بسیاری با در نظر گرفتن لایه‌های باطله میانی به زیر عیار حد طراحی خواهند رسید. بنابراین به کمک ترسیم هیستوگرام طول نمونه‌ها (شکل ۶) در حین تغییرات عیاری در مغزه‌های اکتشافی، به قضاوت در مورد طول بهینه برای نمونه‌برداری پرداخته می‌شود. بر اساس هیستوگرام ترسیم شده می‌توان گفت که مناسب‌ترین طول برای تهیه کامپوزیت‌ها طولی است که داده‌ها بیشترین فراوانی دارند. طول بهینه یکپارچه‌سازی در مورد متغیر آهن برابر با ۳ متر در نظر گرفته شد.

با توجه به دامنه تغییرات طول نمونه گیری‌ها، کامپوزیت‌هایی با طول‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ متری برای تک‌تک متغیرها به روش درون‌چالی ایجاد و تحلیل شد. در تمامی موارد، حداقل طول نمونه برای شرکت در یک کامپوزیت کامل معادل ۷۵ درصد طول تعیین شده برای یکپارچه‌سازی است.

نکته مهم در کامپوزیت‌سازی انتخاب طول مناسبی برای آن است، به طوری که در آن طول باید:

- واریانس کامپوزیت‌های حاصل مطابق با واریانس داده‌های اولیه باشد.
- به ازای آن طول، کمترین مقدار داده حذف شود.
- داده‌های حذف شده متمایل به گروه عیاری خاصی نباشند که باعث انحراف در تخمین‌ها شوند.



شکل ۶- نمودار هیستوگرام طول نمونه‌های خام

گرفت. در ادامه، نتایج مطالعات آماری انجام گرفته بر روی کامپوزیت‌های بهینه متغیر آهن آورده شده است.

### ۳-۱-۳- بررسی نرمال بودن داده‌ها

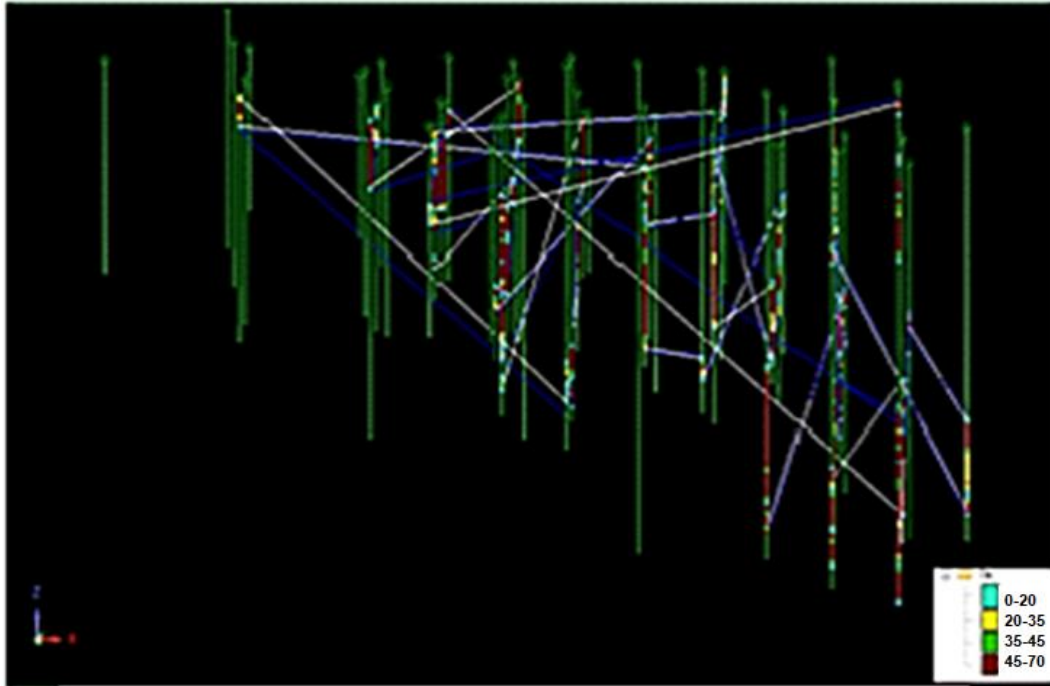
مرحله اول در تحلیل آماری بررسی نرمال بودن یا نبودن داده‌ها است اگر داده‌ها وضعیت نرمال نداشته باشند، استفاده از روش‌های کریجینگ، صحیح نیست و باعث ایجاد خطای سیستماتیک می‌شوند. بررسی نرمال یا غیرنرمال بودن را می‌توان با روش‌های مختلف انجام داد.

در این مطالعه با استفاده از روش‌های هیستوگرام فراوانی داده‌ها، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و تابع توزیع تجمعی، داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ داده‌های آماری متغیر آهن مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

با توجه به وجود سه جامعه آماری در داده‌ها، سه فایل کامپوزیت، یکی برای دامنه پرعیار (بالای ۴۵ درصد)، یکی برای دامنه متوسط عیار (۳۵ تا ۴۵ درصد) و دیگری برای دامنه کم‌عیار (۲۰ تا ۳۵ درصد) ایجاد شد تا در تحلیل‌های آماری و زمین‌آماری به صورت مجزا مورد بررسی قرار گیرند.

نحوه نمایش و شکل کامپوزیت‌بندی در صفحه نمایش نرم‌افزار در شکل ۷ نشان داده شده است.

پس از تشکیل یکپارچه‌سازی داده‌های خام، بر اساس طول بهینه‌ای که در بخش مطالعات طول کامپوزیت تعیین شد، تحلیل فایل کامپوزیت به لحاظ دو مساله اصلی اجرا شد. نخست امکان سه جامعه‌ای بودن آهن با توجه به فرضیاتی که در گام بررسی داده‌های خام مطرح شده بودند، بررسی شد؛ سپس نرمال بودن و امکان وجود نقاط پرت مورد ارزیابی قرار



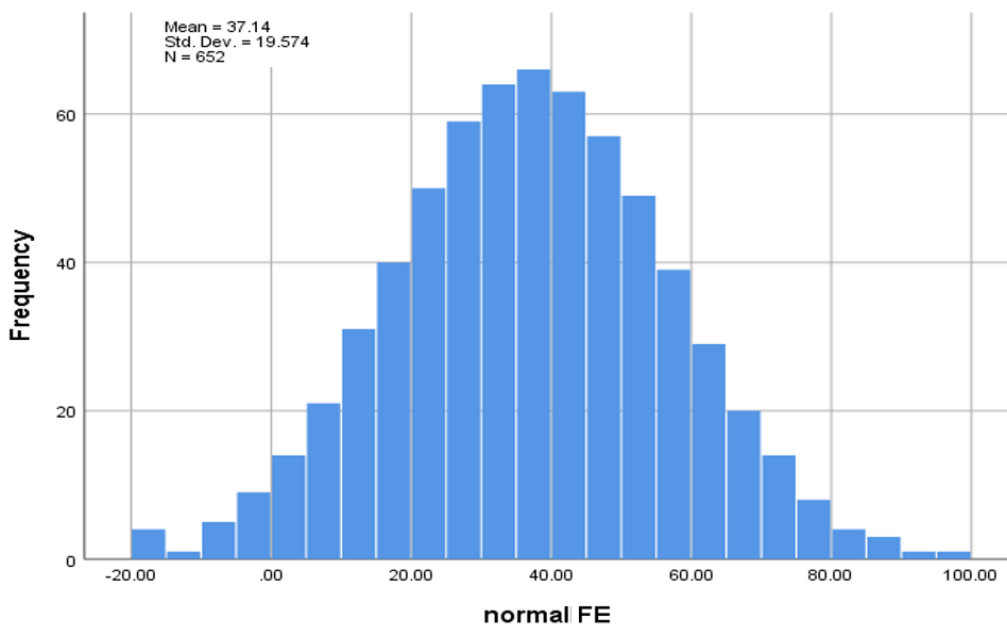
شکل ۷- نمایش کامپوزیت بندی متغیر Fe برای طول ۳ متری در نرم افزار

یا (Sig)  $0.0004$  از احتمال خطای نوع اول ( $\alpha = 0.05$ )، درست بودن فرض صفر که معتبر بودن توزیع نرمال برای داده‌ها را نشان می‌دهد، نتیجه گرفته شد که داده‌ها در این سطح نرمال شده‌اند.

جدول ۴- نتایج تست نرمال بودن متغیر Fe با آزمون کولموگروف - اسمیرنوف

متغیر	Statistic	df	Sig.
Fe	0.0004	652	0.000

با توجه به شماتیک هیستوگرام شکل ۴ و بالا بودن انحراف معیار جدول ۲ مشخص می‌شود که داده‌های خام نرمال نیست و در رسم واریوگرام نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد، بنابراین با استفاده از تبدیل لگاریتمی سه پارامتری در نرم‌افزار SPSS، داده‌ها نرمال شدند. جدول ۴ و شکل ۸ نرمال بودن داده‌های لگاریتمی را تایید می‌کند. در این روش فراوانی نسبی تجمعی داده‌ها با فراوانی نسبی تجمعی تابع توزیعی که به نظر می‌رسد داده‌ها متعلق به آن است (تابع مطلوب فرضی) مقایسه شدند. با توجه به بزرگتر بودن مقدار احتمال



شکل ۸- هیستوگرام فراوانی نسبی متغیر نرمال شده Fe



## ۳-۱-۴- بررسی داده‌های پرت

وجود مقادیر آنومال برای هر یک از متغیرها حتی پس از کامپوزیت‌سازی، می‌تواند موجب بروز بیش‌تخمینی و کم‌تخمینی عیار بلوک‌های اطراف داده آنومال شود. با بررسی داده‌های گمانه‌ای عیار آهن در شکل ۴، با توجه به این که آهن یکی از فراوان‌ترین عناصر فلزی موجود در زمین است و کانی‌های معدنی رایج آن هماتیت دارای عیار ۷۰ درصد و منیتیت دارای عیار ۷۲ درصد است، مشخص شد که در این نمونه‌ها داده پرت وجود ندارد.

## ۳-۲- مطالعات زمین آماری

در روش‌های زمین آماری ابتدا به بررسی وجود یا نبود ساختار فضایی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار فضایی، تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. به منظور ارزیابی پیوستگی فضایی کانی‌سازی و مهیا کردن پارامترها برای مدلسازی عیاری، مطالعات زمین‌آماری روی داده‌های کامپوزیتی کانسار یاد شده انجام می‌شود. در زمین آمار مقدار یک کمیت را در نقاط مجهول با استفاده از نقاط معلوم می‌توان بر اساس ساختار فضایی تخمین زد.

## ۳-۲-۱- واریوگرافی

هر واریوگرام از قسمت‌های مختلف تشکیل شده است. از نظر تئوری مقدار واریوگرام به ازای  $h=0$  باید به حداقل مقدار خود یعنی به صفر تنزل کند ولی در عمل واریوگرام‌های واقعی که محصول تجربه‌اند، معمولاً از چنین شرطی تبعیت نمی‌کنند. به مقدار واریوگرام به ازای  $h=0$  اثر قطعه‌ای گفته می‌شود. عواملی که در پیدایش اثر قطعه‌ای موثرند، عبارتند از:

- وجود مولفه‌های تصادفی در توزیع متغیر (مانند عیار) که در واقع به تصادفی بودن فرآیند برمی‌گردد.
- خطاهای نمونه‌برداری، آماده‌سازی و آنالیز

مولفه‌های تصادفی توزیع عیار درون کانسار می‌تواند موجب نوعی ناپیوستگی کوتاه دامنه شود که در اثر قطعه‌ای ظاهر می‌شود. هرچه توزیع عیار در کانسار تصادفی‌تر باشد و پیوستگی کمتری داشته باشد، اثر قطعه‌ای واریوگرام بزرگتر خواهد بود.

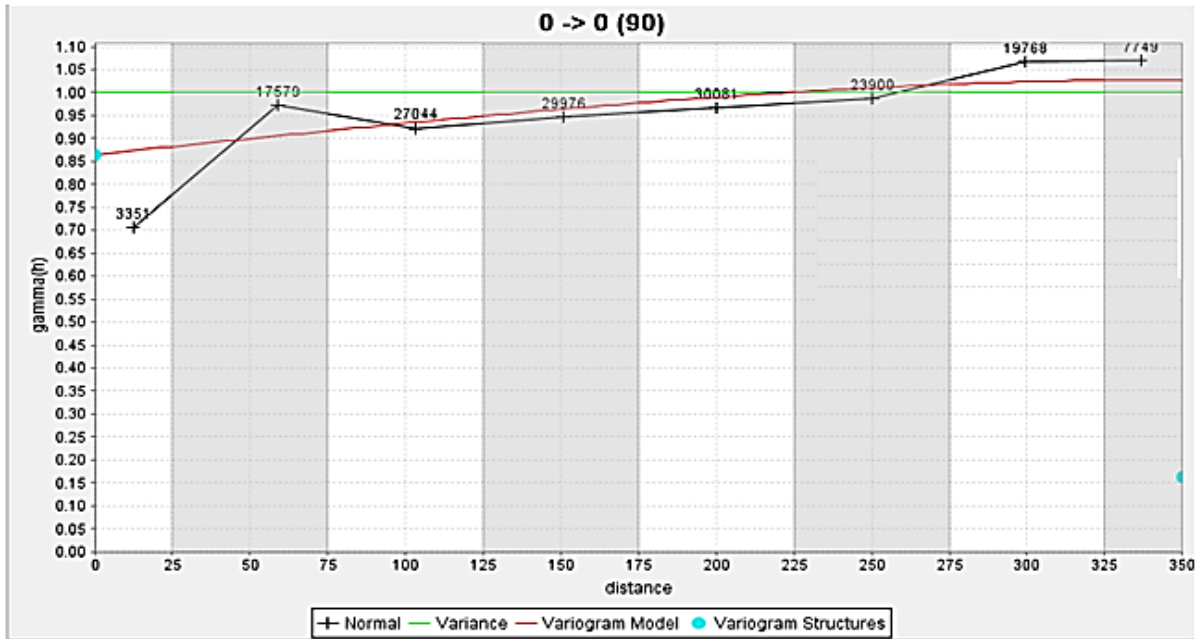
یک متغیر ناحیه‌ای با ساختار فضایی، توزیعش به گونه‌ای است که تشابه مقدار متغیر ناحیه‌ای برای نقاط نزدیک به هم نسبت به نقاط دورتر بیشتر است. بنابراین با افزایش فاصله‌زمانی یا مکانی بین نمونه‌ها، در نهایت این فاصله به حدی

می‌رسد که از آن به بعد مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقاط اطراف یکدیگر برهم تاثیر چندانی ندارند و با افزایش فاصله مقدار واریوگرام تغییر معنی‌داری نمی‌کند. به این فاصله دامنه یا شعاع تاثیر می‌گویند. شعاع جستجو در هر امتداد عبارت از حداکثر فاصله‌ای است که داده‌های واقع تا آن فاصله برای تخمین بلوک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. شعاع جستجو تابعی از شعاع تاثیر واریوگرام انتخابی است و معمولاً آن را تا دو سوم و در موارد کمتر، یک پنجم شعاع تاثیر در نظر می‌گیرند. در مورد کانسارهای ناهمسانگرد، شعاع جستجو در امتدادهای مختلف، متفاوت است. البته زمانی که ناهمسانگردی وجود دارد باید به جای شعاع جستجو، بیضوی جستجو در نظر گرفته شود. همچنان که  $h$  افزایش می‌یابد، مقدار هر واریوگرام از مقادیر کم شروع شده و پس از طی فراز و نشیب‌هایی ممکن است به سمت حد ثابتی میل کند. بنابراین بعضی از واریوگرام‌ها به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسند که بعد از آن هرچه فاصله بیشتر شود، مقدار واریوگرام تغییر معنی‌داری نمی‌کند. به این مقدار نسبتاً ثابت که تغییرات در آن فقط تصادفی است، سیل یا سقف گفته می‌شود. در زمین‌آمار، واریوگرام‌هایی که به سقف مشخص می‌رسند، اهمیت بیشتری دارند (مدنی، ۱۳۷۳: ۱۳۷۷: پاک، ۱۳۷۷)

برای درک وضعیت کلی تغییرات متغیرها و میانگین دامنه تاثیر در منطقه، واریوگرام‌های غیرجهتی و جهتی برای داده‌های کامپوزیت شده ترسیم و یک مدل کروی به واریوگرام برازش داده می‌شود تا مقدار اثر قطعه‌ای، دامنه تاثیر (شعاع تاثیر) و مقدار سقف (سیل) بدست آید.

در واقع واریوگرام غیرجهتی میانگین تغییرپذیری متغیر در فضای کانسار را می‌دهد. در شکل ۹ واریوگرام غیرجهتی ترسیم شده برای متغیر آهن در این کانسار آورده شده است که وضعیت تغییرات متغیر آهن در منطقه را نشان می‌دهد. نتایج پارامترهای این واریوگرام شامل موارد مدل کروی، آزیموت صفر، شیب صفر و تلورانس ۹۰ درجه، سقف ۱، اثر قطعه‌ای ۰/۸۶ و دامنه (شعاع) تاثیر ۳۵۰ متر است.

اثر قطعه‌ای بزرگ واریوگرام می‌تواند نشان‌دهنده توزیع تصادفی‌تر عیار و پیوستگی کمتر کانسار در همه جهات و یا به علت افزایش بیش از حد گام‌های واریوگرام باشد. به همین دلیل برای بررسی وجود ساختار فضایی کانسار در جهت‌های مختلف، واریوگرام جهتی و بیضوی ناهمسانگردی بررسی می‌شود.



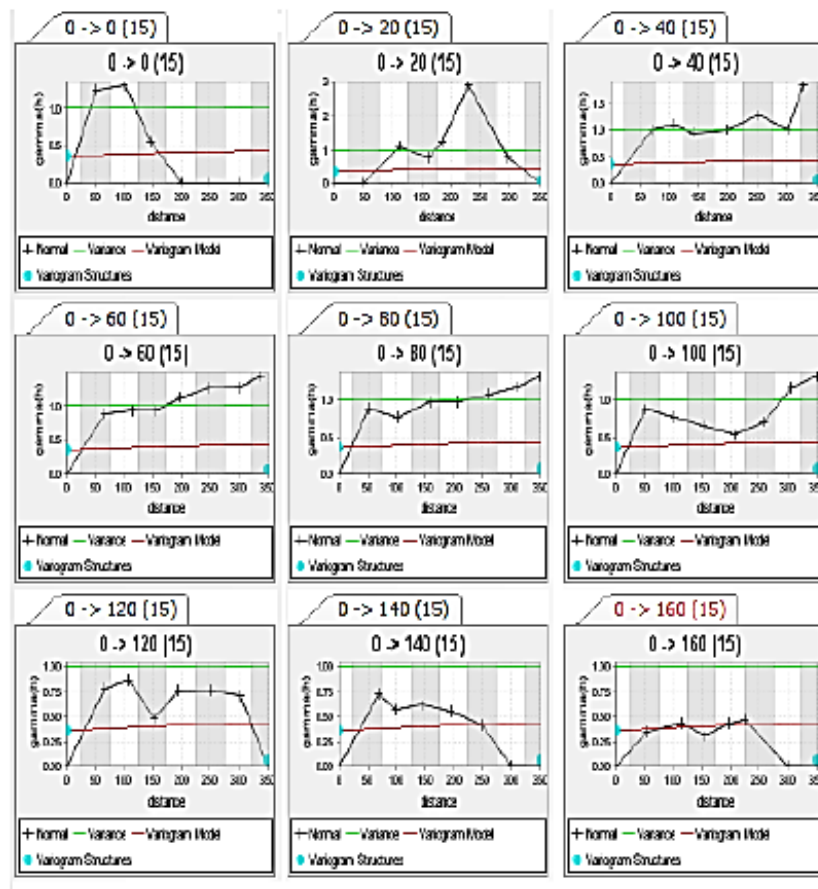
شکل ۹- واریوگرام غیرجهتی متغیر Fe

متوسط و محور کوچک بر این محور عمودند. با تغییر گام و تغییر واریوگرام‌ها، واریوگرامی که کمترین تغییرپذیری را در تغییر گام دارد، انتخاب می‌شود و به واریوگرام انتخابی مدل ریاضی برازش می‌شود، واریوگرامی که بیشترین دامنه تاثیر و کمترین سقف را داشته باشد، به عنوان محور متوسط بیضوی ذخیره می‌شود. امتداد دارای بیشترین پیوستگی در این نقشه، در راستای آزیموت ۲۵۰ درجه و با شیب ۴۰- درجه است و شکل ۱۳ نقشه واریوگرام آن را نشان می‌دهد. با این کار، محور کوچک بیضوی عملاً بدست آمد. در صفحه نرم‌افزار هر سه محور بزرگ، متوسط و کوچک نمایش داده می‌شود. برای محاسبه نسبت‌های ناهمسانگردی، مدل واریوگرافی اصلی را که قبلاً ذخیره شده، فراخوانی می‌شود و به واریوگرام‌های تجربی برازش می‌شود و در نهایت اطلاعات بیضوی ناهمسانگردی استخراج می‌شود. شکل ۱۴ بیضوی استخراج شده برای متغیر آهن را نشان می‌دهد. این بیضوی تجسس دارای زاویه شیب صفر درجه در راستای با آزیموت ۱۶۰ درجه و دارای زاویه شیب ۴۰- درجه در راستای آزیموت ۲۵۰ درجه است (جدول ۵) که این پارامترهای بیضوی ناهمسانگردی برای تخمین ذخیره در بخش ۴ مقاله استفاده خواهد شد.

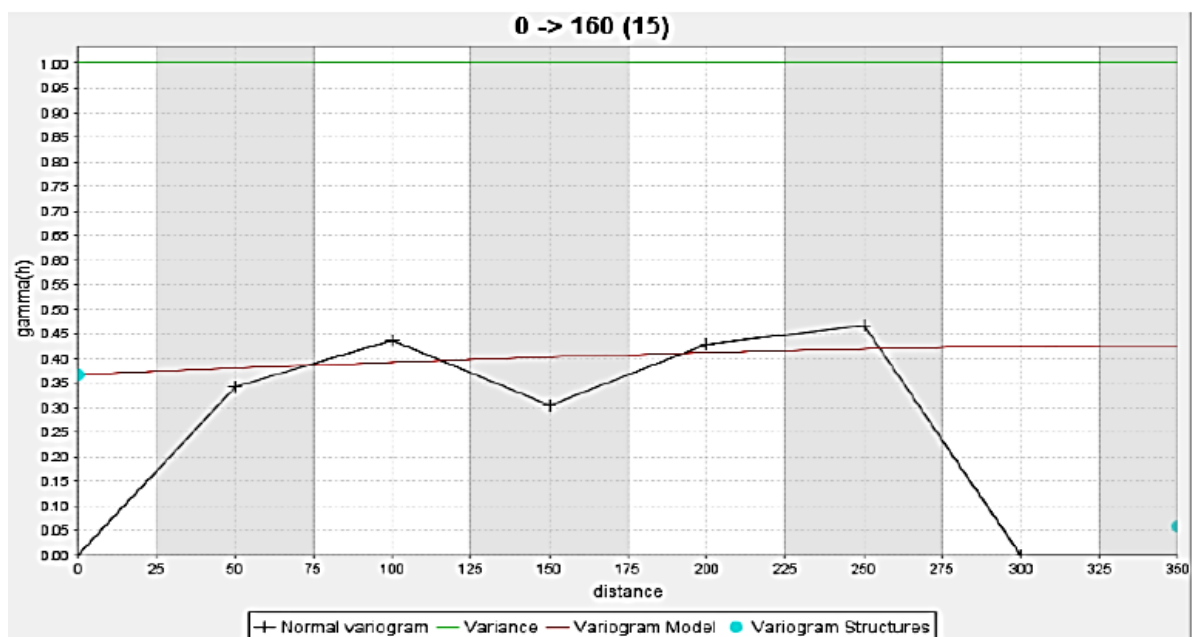
تمام مراحل اشاره شده برای آهن، برای متغیرهای اکسید آهن، فسفر و گوگرد نیز انجام گرفت که تصاویر این متغیرها در مقاله آورده نشده است.

برای بررسی واریوگرام جهتی، واریوگرام‌های مختلف در امتدادهای مختلف رسم شد. هدف بدست آوردن واریوگرامی است که بیشترین پیوستگی را دارد. این کار با آزیموت افزایشی ده درجه، شیب صفر درجه، مقدار گام افزایشی ۱۰ تا ۵۰ متر انجام شد. در شکل ۱۰، به عنوان نمونه، نقشه تعدادی از واریوگرام‌های متغیر Fe با آزیموت‌های افزایشی ۲۰ درجه آورده شده است. با تغییر گام کاهشی یا افزایشی، میزان تغییرات در نمودارها بررسی می‌شود و واریوگرامی انتخاب می‌شود که در گام‌های مختلف کمترین تغییرپذیری را داشته باشد یعنی ماهیت خودش را نسبت به مرکزیت نقشه کم و بیش حفظ کند. هرچه روند صعودی یک واریوگرام کندتر باشد آن واریوگرام در آن امتداد پیوستگی بیشتری را نشان می‌دهد. به واریوگرام انتخاب شده مدل برازش می‌شود تا فاکتورهای بیضوی ناهمسانگردی مشخص شوند و این امتداد، به عنوان بیشترین پیوستگی به نرم‌افزار داده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، امتداد دارای بیشترین پیوستگی در این نقشه، در راستای آزیموت ۱۶۰ درجه و با شیب صفر درجه است. واریوگرام مربوط به این امتداد در شکل ۱۱ آورده شده که مربوط به محور بزرگ بیضوی تجسس است.

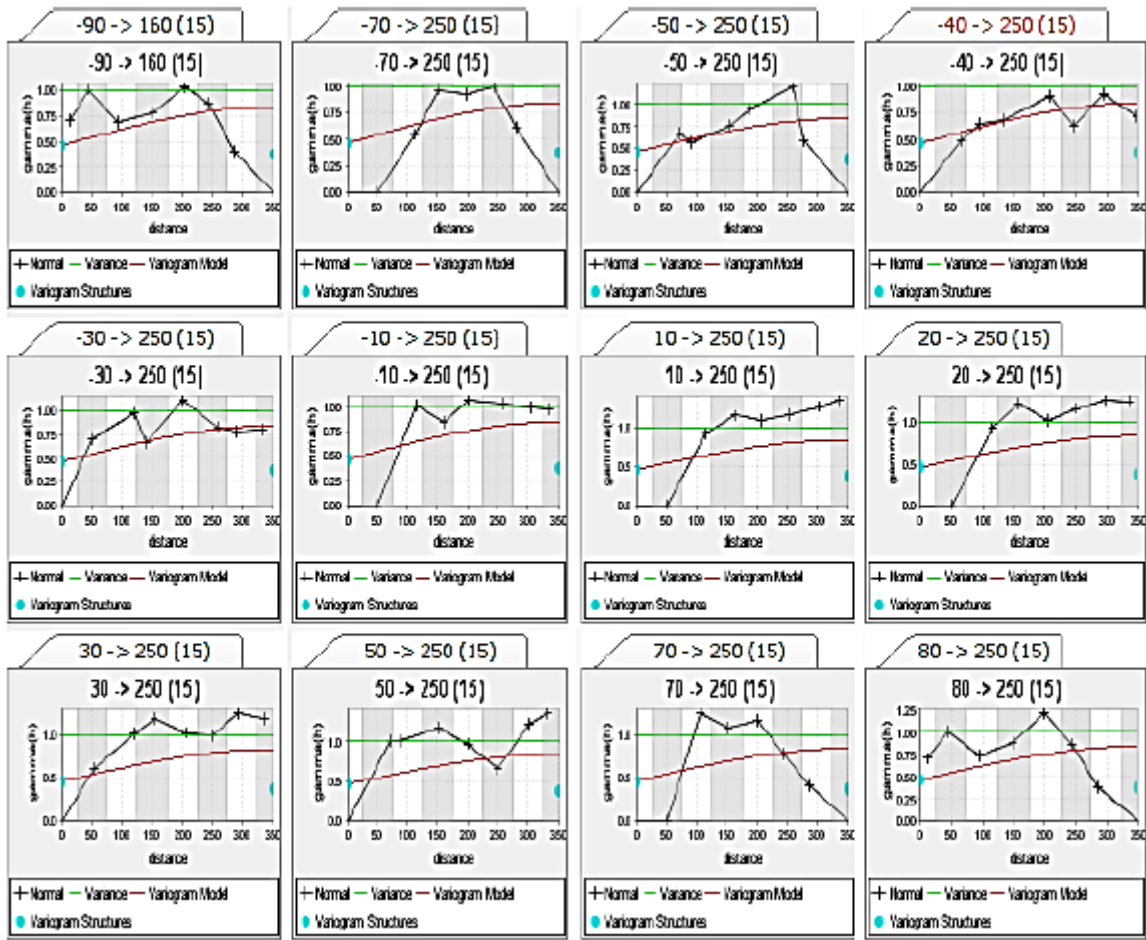
در مرحله بعد محور متوسط بیضوی بدست می‌آید و یک نقشه واریوگرام ثانویه در امتدادهای مجزا ترسیم می‌شود (شکل ۱۲). همان‌طور که از این واریوگرام‌ها مشخص است آزیموت از ۱۶۰ درجه در این بیضوی شروع شده است، چون محور



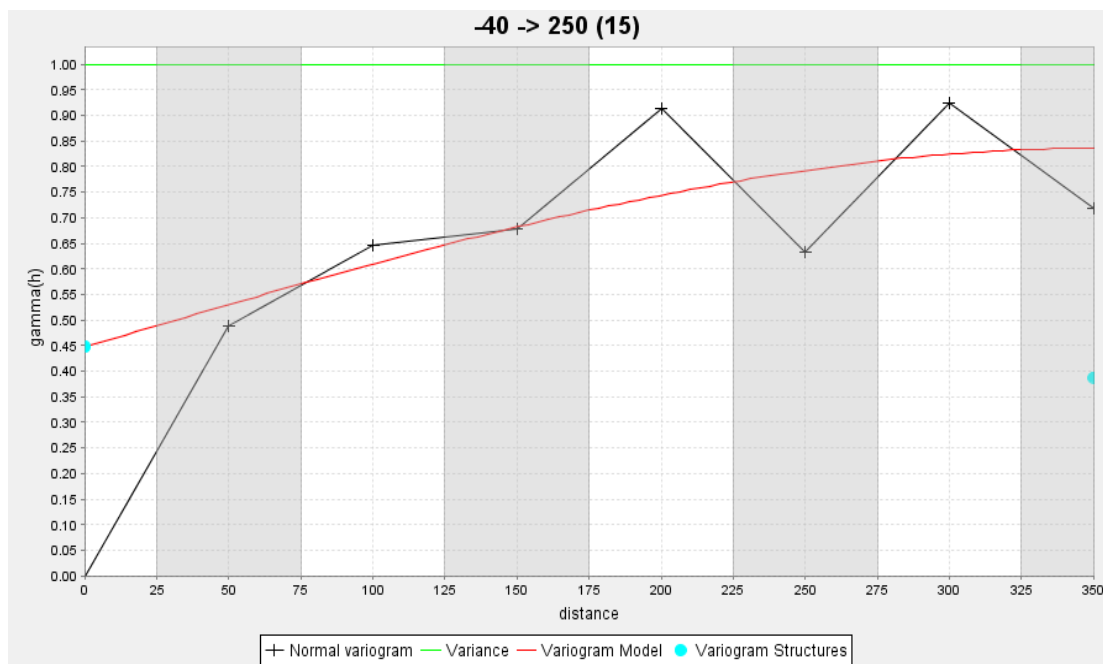
شکل ۱۰- نقشه واریوگرام جهتی با شیب صفر و آزمون افزایشی ۲۰ درجه در فرآیند یافتن پارامترهای ناهمسانگردی متغیر Fe



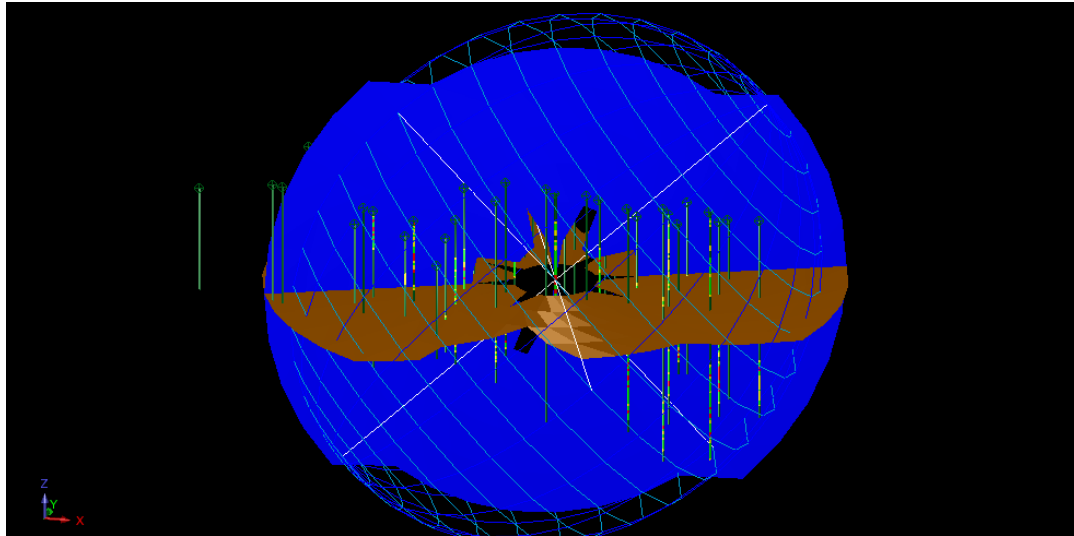
شکل ۱۱- امتداد محور بزرگ بیضوی با آزمون ۱۶۰ درجه و شیب صفر درجه متغیر Fe



شکل ۱۲- قسمتی از نقشه ثانویه واریوگرام برای بدست آوردن محور متوسط بیضوی متغیر Fe



شکل ۱۳- محور متوسط بیضوی با شیب ۴۰- و آزیموت ۲۵۰ متغیر Fe



شکل ۱۴- بیضوی ناهمسانگردی متغیر Fe

جدول ۵- پارامترهای بیضوی ناهمسانگردی متغیر Fe

متغیر	آزیموت(درجه)	پلانژ(درجه)	شیب (درجه)	نسبت محور بزرگ به محور میانی	نسبت محور بزرگ به محور کوچک
آهن	۱۶۰	۰	۰	۱,۰۳۹	۱,۱۷۷

### ۳-۳- مدلسازی ذخیره

پس از اتمام مطالعات آماری و زمین آماری و پیش از برآورد پارامترهای ذخیره، لازم است که پیکره سه بعدی ماده معدنی و در واقع فضای تخمین پارامترها مدلسازی شود. چنانچه همه داده های کانسنگ و باطله برای تخمین فضای کانسار به کار رود، داده های باطله، عیار بلوک های کانسنگ را کاهش می دهند و داده های کانسنگ، عیار بلوک های باطله را افزایش می دهند. پیامد این امر می تواند منجر به بیش برآورد تناژ و کم تخمینی عیار شود و در نهایت رابطه عیار- تناژ در کانسنگ مورد بررسی را از حالت حقیقی خود دور سازد. گام نخست در مدلسازی پیکره ماده معدنی، تعیین عیار حد حاشیه ای است. عیار حد حاشیه ای، مقداری است که برای تفکیک مرز ذخیره کانسار (ذخیره قابل استخراج) از باطله دربرگیرنده یا نفوذکننده اطراف آن در نظر گرفته می شود. در این مطالعه از مقدار آنومالی های غربی و مرکزی سنگان برای این عیار استفاده می شود. بنابراین کلیه موادی که عیار آن ها بالاتر از ۲۰ درصد باشد، پتانسیل استخراج دارند و در فرآیند مدلسازی مقاطع، ذخیره کانسار محسوب می شوند.

### ۳-۳-۱- مدلسازی بر مبنای مقاطع ترسیم شده در نیمرخ های عرضی

پس از وارد کردن بانک اطلاعات اکتشافی و مدلسازی وضعیت فضایی حفاریات اکتشافی (شکل ۱۵) مقاطع عرضی در امتداد نیمرخ های ۵۰ و ۱۰۰ متری اکتشافی ایجاد شدند، سپس در هر مقطع، بخش هایی از گمانه ها که دارای عیار آهن

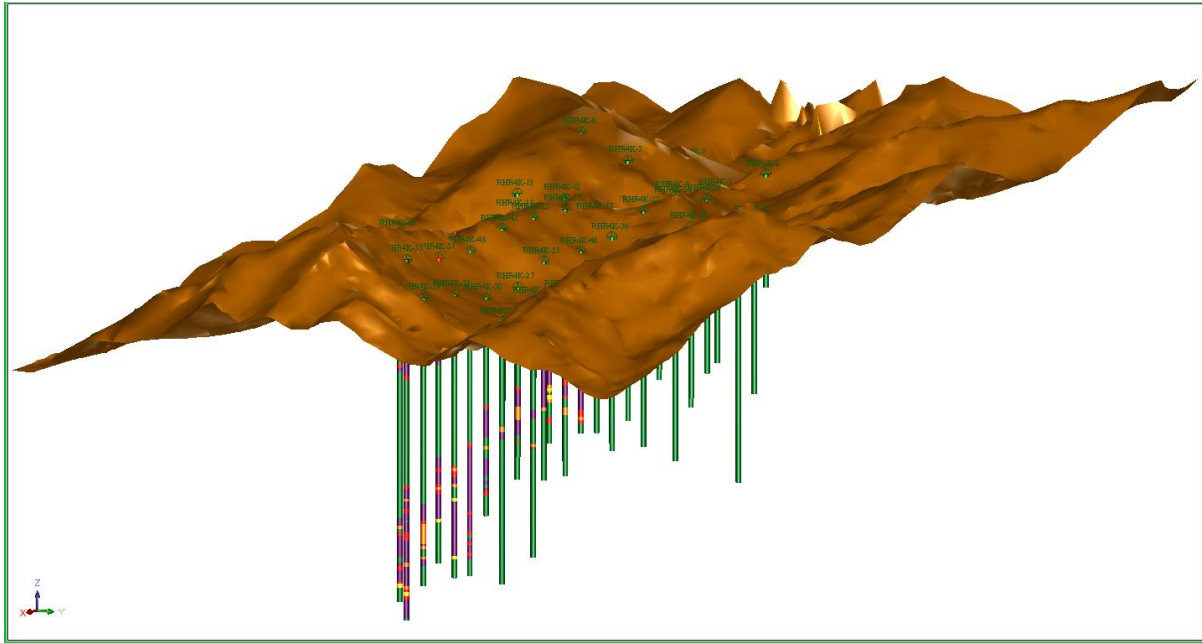
بالای ۲۰ درصد بودند، پررنگ شدند. بر این اساس، تعداد ۱۲ مقطع در محدوده کانسار ترسیم شد (شکل ۱۶). سپس با استفاده از روش بسط مقاطع از طرفین، هر مقطع تا میزان نصف فاصله میان خود با مقطع بعدی و قبلی، از دو طرف بسط داده شد. با استفاده از الگوریتم مثلث بندی نرم افزار SURPAC، رویه فضایی کشیده شد تا حجم فضایی ماده معدنی مدلسازی شود. در شکل ۱۷ مدل سه بعدی کانسار نشان داده شده است.

### ۳-۳-۲- تشکیل مدل بلوکی زمین شناسی

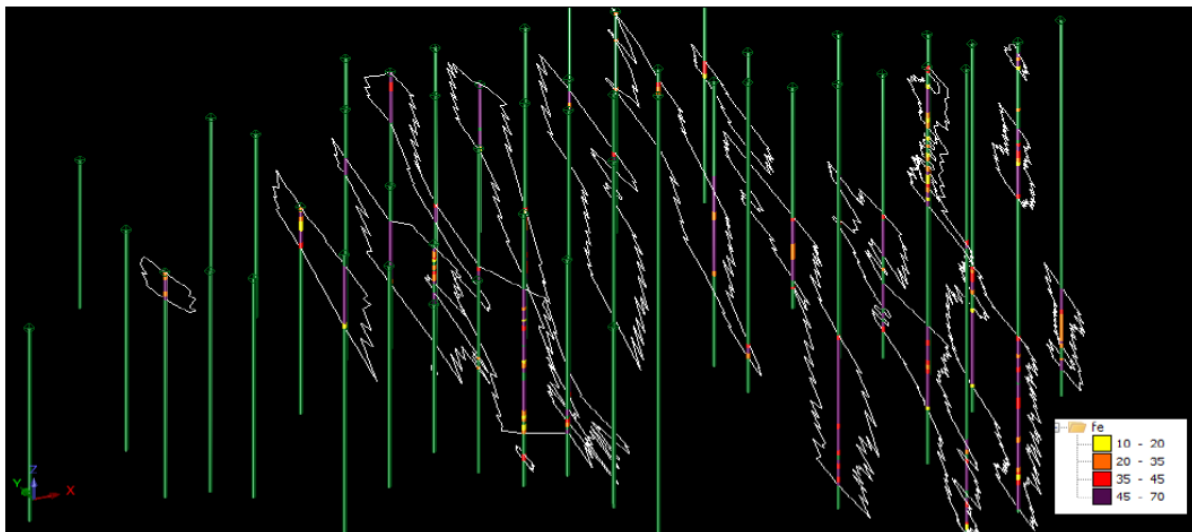
با اتمام فرآیند مدلسازی کانسار و تعیین پارامترهای ناهمسانگردی متغیرهای عیاری، مدل بلوکی ایجاد می شود. مدلسازی بلوکی، متداول ترین روش در برآورد پارامترهای منابع معدنی محسوب می شود.

برای اجرای این فرآیند ابتدا باید محدوده مناسبی تعریف شود. گستره این محدوده به عوامل مختلفی مانند عمق گمانه ها، گستره ماده معدنی، توان پردازشی نرم افزار چه در مرحله مدلسازی و چه در مرحله زمان بندی و حتی شیب مجاز کاواک استخراجی بستگی دارد. در مدل حاضر، محدوده زیر برای تعریف مدل بلوکی در نظر گرفته شد:

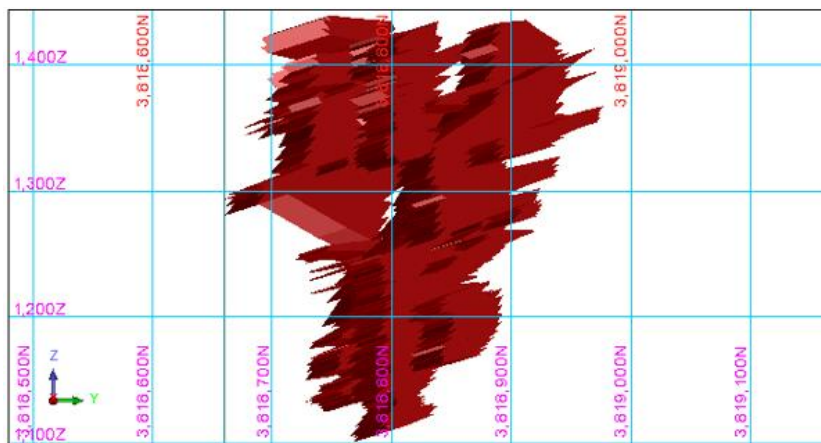
$X_{min}=274452$	$X_{max}=275400$
$Y_{min}=3818500$	$Y_{max}=3819150$
$Z_{min}=950$	$Z_{max}=1600$



شکل ۱۵- مدل فضایی حفريات اکتشافی و توپوگرافی منطقه کانسار



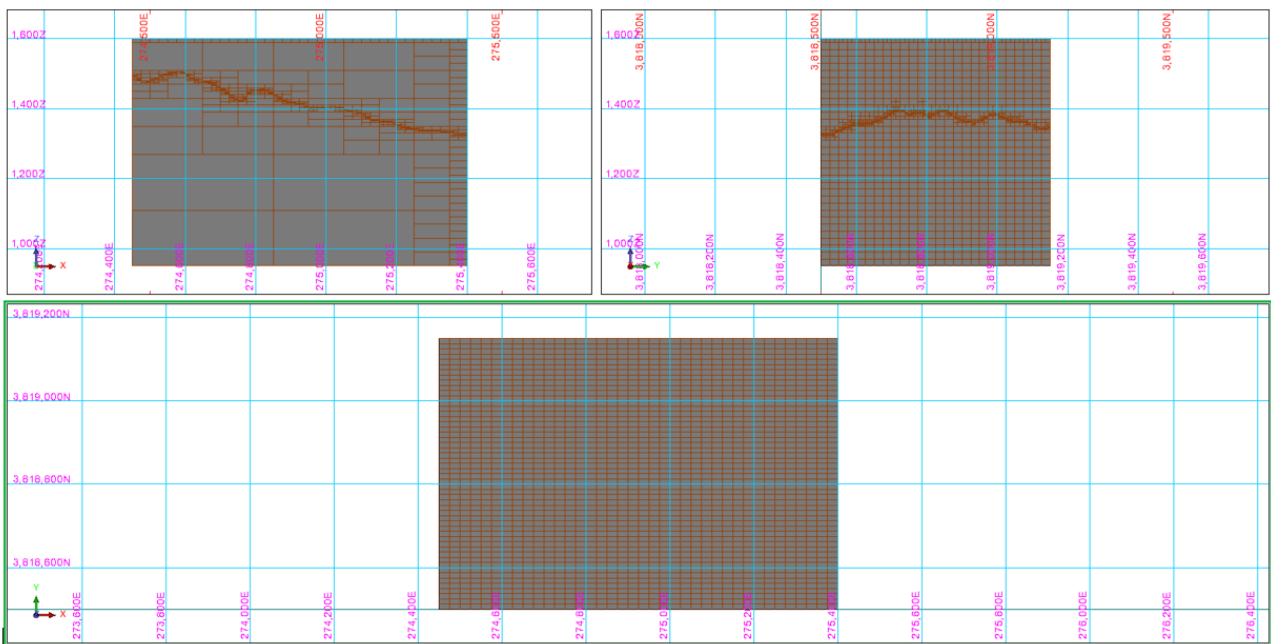
شکل ۱۶- مقاطع رسم شده در محدوده کانسار



شکل ۱۷- مدل سه بعدی جامد کانسار با رویکرد ترسیم مقاطع

ابعاد بلوک‌ها با توجه به فواصل کارهای اکتشافی، در راستای X و Y (به ترتیب، امتدادهای شرقی- غربی و شمالی- جنوبی معادل ۲۵ متر و در امتداد محور Z با توجه به ارتفاع پله‌های استخراجی در آنومالی‌های غربی و مرکزی معدن سنگان برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شد. برای رزولوشن زون زمین‌شناسی نیز، زیربلوک‌هایی با ابعاد  $1,25 \times 3,125 \times 3,125$  در امتداد مرزهای ماده معدنی در مدل اضافه شده و تعداد ۲۱۰۰ بلوک ساخته شد. شکل ۱۸ گستره فضایی مدل بلوکی را در سه نما نشان می‌دهد. با تشکیل مدل بلوکی، ابتدا محدوده توپوگرافی در مدل تعریف شد. بلوک‌های بالای این محدوده به عنوان بلوک‌های هوا در مدل در نظر گرفته می‌شوند

و باید دارای وزن مخصوص صفر باشند. با اتکا به مدل پیکره ماده معدنی، مرزهای کانسار در مدل بلوکی تعریف شدند. با مشخص شدن فضای تخمین در مدل بلوکی، پارامترهای ذخیره به ترتیب مورد تخمین قرار گرفتند. پارامترهای ذخیره در این مدل شامل، عیار آهن، درصد‌های اکسید آهن، فسفر و گوگرد و وزن مخصوص کانسنگ است. به ازای هر یک از این پارامترها، یک مشخصه در مدل بلوکی تعریف شد. چهار پارامتر نخست با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله تخمین زده شدند. تخمین وزن مخصوص نیز با رگرسیون استخراج شده از داده‌ها، انجام گرفت.



شکل ۱۸- گستره مدل بلوکی طراحی شده برای ارزیابی ذخیره در آنومالی شماره IV

انجام شد. در بخش اول در زون باطله رقم تخصیصی ۲/۷ درج شد و در بخش دوم با استفاده از فرمول به دست آمده از رگرسیون بین عیار آهن و وزن مخصوص که در شکل ۵ آمده است، برآورد شد. در شکل ۲۱ نتایج برآورد وزن مخصوص در کل مجموعه محاط شده با مدل توپوگرافی آورده شده است. پس از اجرای مطالعات واریوگرافی و ایجاد تخمین بر اساس توزیع ناهمسانگرد متغیر عیار آهن و نیز بعد از برآورد وزن مخصوص توده سنگ در زون کانی‌زایی به صورت تابعی از متغیر Fe با استفاده از رگرسیون‌گیری، برآورد تناژ ذخیره انجام شد. عیار آهن در دو روش در بازه ۴۲ درصد برآورد شد. مقدار واریانس تخمین برای متغیر آهن  $0,058$ ، برای متغیر اکسید آهن  $0,311767$ ، برای متغیر گوگرد  $0,465731$  و برای متغیر فسفر  $0,469131$  بدست آمد. به این ترتیب، بلوک‌های موجود

#### ۴- تخمین میزان ذخیره کانسار شماره IV

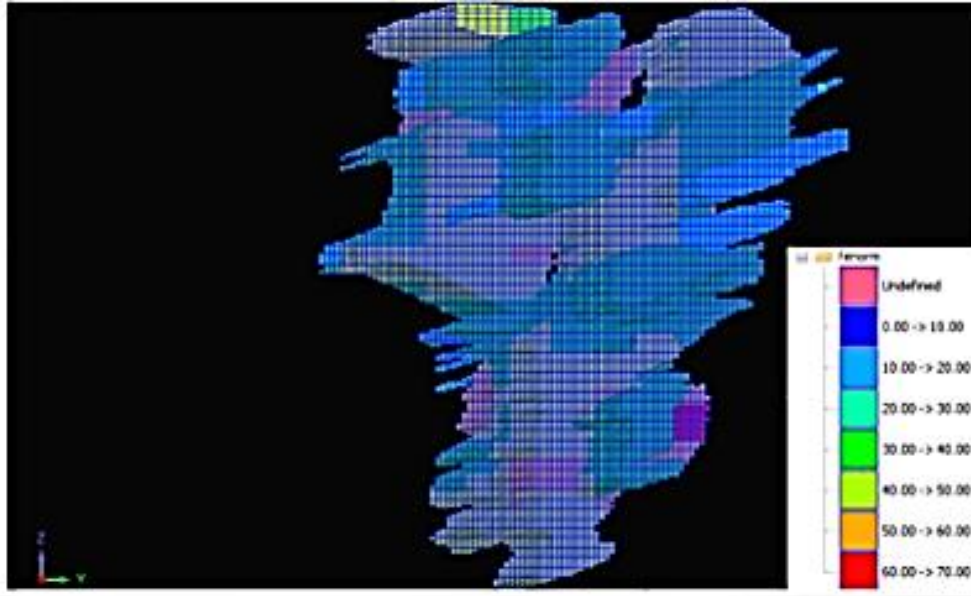
با توجه به پارامترهای ناهمسانگردی محاسبه شده در بخش مطالعات زمین‌آماری و با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله (مدنی، ۱۳۷۳: حسنی پاک، ۱۳۷۷)، پارامترهای درصد FeO، Fe، P و S در مدل مورد بحث، مورد تخمین واقع شدند. در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نتیجه گرافیکی تخمین در مورد متغیر آهن به روش‌های کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله آورده شده است. با توجه به روند غربی-شرقی ماده معدنی و گسترش آن به سمت شرق پیشنهاد می‌شود که حفاری در این ناحیه به سمت شرق گسترش پیدا کند.

برای پارامتر وزن مخصوص (S.G)، برآورد در دو بخش

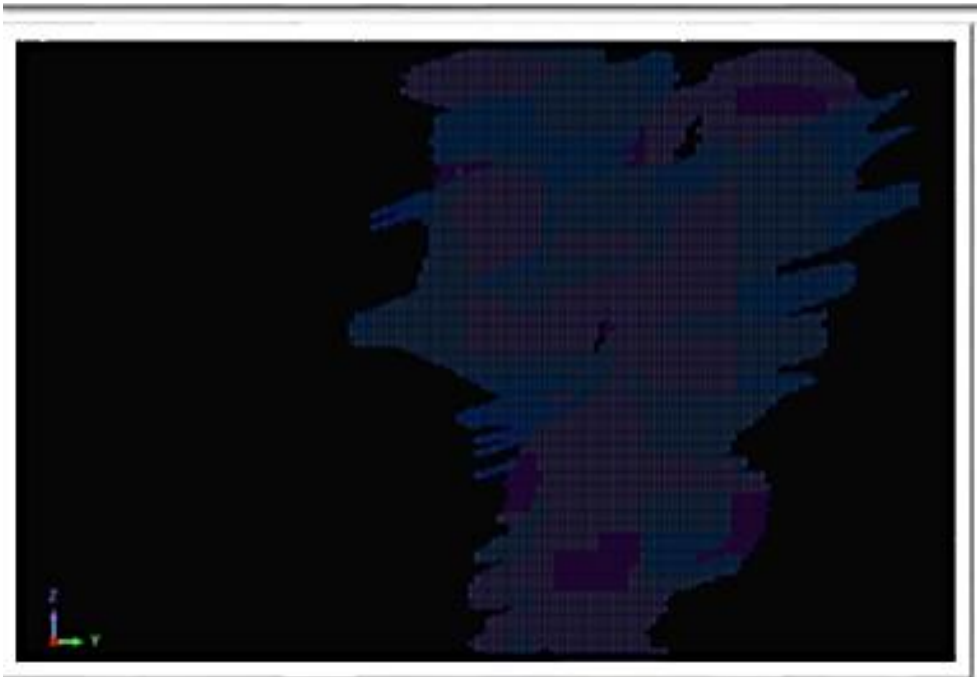
(حفاری گمانه‌های اکتشافی و زمین آمار)، میزان ذخیره بر اساس اطلاعات اکتشاف مقدماتی در جدول ۱ برابر با ۴/۹ میلیون تن و میزان ذخیره بر اساس اطلاعات اکتشاف تفصیلی در جدول‌های ۷ و ۸ بر مبنای عیار حد ۲۰ درصد برابر با ۱۲/۹ میلیون تن است. این مقایسه نشان می‌دهد که بیشتر ذخیره در اعماق قرار گرفته است.

در مدل به لحاظ برآورده‌سازی معیارهای مندرج در جدول‌های ۶ و ۷ بر اساس نسبت‌ها و عیار حدهای مختلف آورده شده است. همانطور که در مقایسه نتایج برآورد تناژ مشخص است، هر چه عیار حد بالاتر در نظر گرفته شود، کارایی روش کریجینگ از لحاظ تفکیک بهتر تناژ، مشخص‌تر می‌شود.

با مقایسه نتایج تخمین میزان ذخیره مربوط به دو مرحله اکتشاف مقدماتی (مغناطیس‌سنجی) و اکتشاف تفصیلی

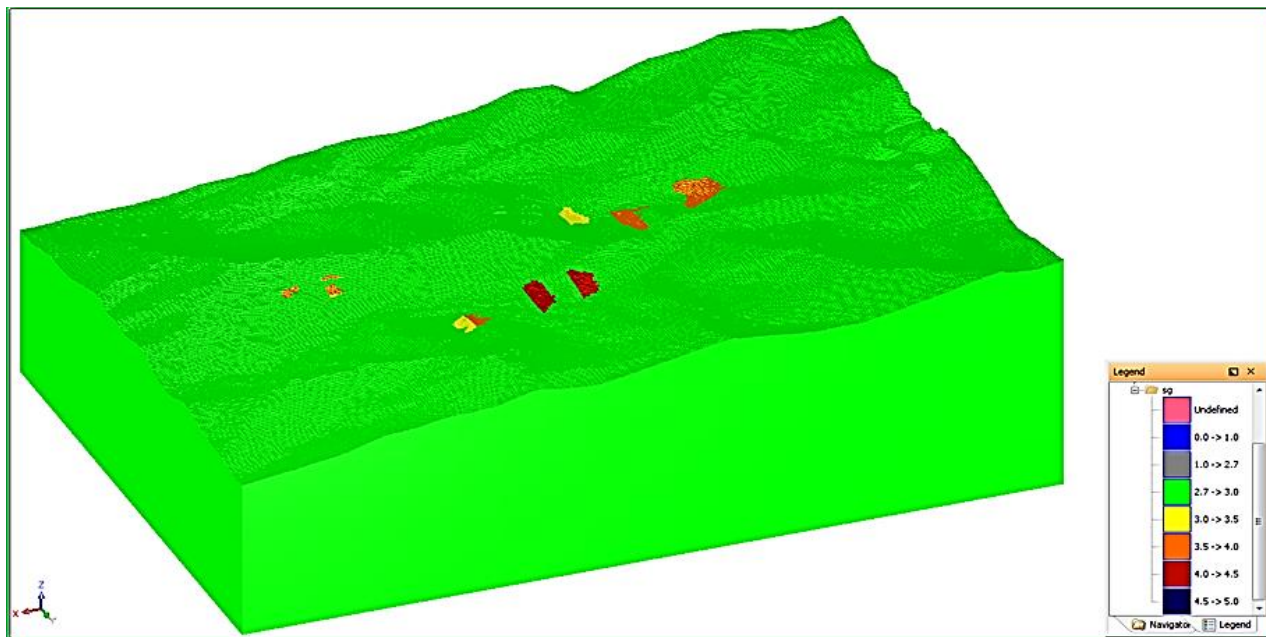


شکل ۱۹- تخمین توزیع عیار آهن در مدل بلوکی با روش کریجینگ معمولی



شکل ۲۰- تخمین توزیع عیار آهن در مدل‌های بلوکی با روش عکس مجذور فاصله





شکل ۲۱- نتایج برآورد وزن مخصوص در محدوده زیر سطح توپوگرافی در مدل بلوکی آنومالی شماره IV

جدول ۶- تخمین پارامترهای عیاری و مقدار ذخیره کانسار IV معدن سنگ آهن سنگان براساس مقادیر مختلف عیارحد با روش کریجینگ معمولی

عیارحد (درصد)	Fe (درصد)	Feo (درصد)	P (درصد)	S (درصد)	s.g (تن / مترمکعب)	Fe/Feo	مقدار ذخیره (تن)
>۲۰	۴۲٫۲۸	۲۰٫۴۱	۰٫۰۳	۱٫۲۸	۳٫۸۹	۲٫۰۷	۱۲۹۸۵۹۷۹
>۲۵	۴۲٫۳۳	۲۰٫۴۱	۰٫۰۳	۱٫۲۸	۳٫۸۹	۲٫۰۷	۱۲۹۵۳۹۱۶
>۳۰	۴۳٫۲۵	۲۰٫۵۹	۰٫۰۳	۱٫۲۹	۳٫۹۳	۲٫۱۰	۱۲۲۰۷۲۷۵
>۳۵	۴۴٫۶۵	۲۰٫۹۴	۰٫۰۲	۱٫۳۴	۳٫۸۹	۲٫۱۳	۱۰۷۶۴۶۷۳
>۴۰	۴۷٫۰۵	۲۱٫۲۹	۰٫۰۳	۱٫۳۲	۴٫۰۶	۲٫۲۱	۸۱۴۶۵۳۱
>۴۵	۵۰٫۳۱	۲۲٫۰۱	۰٫۰۳	۱٫۴۳	۴٫۱۸	۲٫۲۹	۴۸۷۵۸۴۳
>۵۰	۵۳٫۶۶	۲۳٫۱۶	۰٫۰۳	۱٫۴۷	۴٫۳۰	۲٫۳۲	۲۲۵۴۷۲۳
>۵۵	۵۸٫۵۷	۲۴٫۱۲	۰٫۰۳	۱٫۴۶	۴٫۴۷	۲٫۴۳	۵۶۶۹۰۷/۵

جدول ۷- تخمین پارامترهای عیاری و مقدار ذخیره کانسار IV معدن سنگ آهن سنگان بر اساس مقادیر مختلف عیارحد با روش عکس مجذور فاصله

عیار حد (درصد)	Fe (درصد)	Feo (درصد)	P (درصد)	S (درصد)	s.g (تن / مترمکعب)	Fe/Feo	مقدار ذخیره (تن)
>۲۰	۴۱٫۹۹	۱۷٫۵۱	۰٫۰۳	۱٫۲۸	۳٫۸۸	۲٫۴۰	۱۲۹۰۷۷۴۸
>۲۵	۴۲٫۴۱	۱۷٫۷۳	۰٫۰۳	۱٫۳۰	۳٫۹۰	۲٫۳۹	۱۲۶۳۷۲۶۲
>۳۰	۴۳٫۷۰	۱۸٫۳۲	۰٫۰۳	۱٫۳۳	۳٫۹۴	۲٫۳۹	۱۱۵۸۳۴۳۷
>۳۵	۴۵٫۰۶	۱۸٫۹۰	۰٫۰۳	۱٫۳۶	۳٫۹۹	۲٫۳۸	۱۰۳۱۳۶۹۷
>۴۰	۴۶٫۶۴	۱۹٫۵۹	۰٫۰۳	۱٫۳۹	۴٫۰۵	۲٫۳۸	۸۳۶۰۷۴۵
>۴۵	۴۹٫۳۷	۲۰٫۸۳	۰٫۰۳	۱٫۴۸	۴٫۱۴	۲٫۳۷	۵۰۳۰۹۲۷
>۵۰	۵۲٫۲۷	۲۲٫۰۷	۰٫۰۳	۱٫۶۴	۴٫۲۵	۲٫۳۷	۱۹۷۱۷۱۷
>۵۵	۵۵٫۶۶	۲۳٫۱۹	۰٫۰۴	۱٫۳۲	۴٫۳۷	۲٫۴۰	۹۰۱۶۱/۸۴

## ۵- نتیجه‌گیری

تخمین عیار برای تعیین ذخیره یکی از کاربردهای عمده زمین‌آمار در مطالعات معدنی و اکتشافی است و انتخاب صحیح بهترین روش زمین‌آماري نیز از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین موضوعات استفاده از آن است.

در این مطالعه تخمین ذخیره کانسار شماره IV معدن سنگ آهن سنگان پس از بررسی‌های آماری اولیه بر اساس روش زمین‌آمار و با استفاده از نرم‌افزار SURPAC، با دو روش کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله انجام شد.

ابعاد بلوک‌ها با توجه به فواصل کارهای اکتشافی، در راستای X و Y (به ترتیب، امتدادهای شرقی- غربی و شمالی- جنوبی) معادل ۲۵ متر و در امتداد محور Z با توجه به ارتفاع پله‌های استخراجی در آنومالی‌های غربی و مرکزی برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شد. برای رزلوشن زون زمین‌شناسی نیز، زیربلوک‌هایی با ابعاد  $۱/۲۵ \times ۳/۱۲۵ \times ۳/۱۲۵$  در امتداد مرزهای ماده معدنی در مدل اضافه و تعداد ۲۱۰۰ بلوک ساخته شد.

تناژ این کانسار بر اساس عیار حدهای مختلف و با استفاده از روش‌های کریجینگ و عکس مجذور فاصله در بازه ۴۲ درصد برآورد شد. تناژ کانسار بر اساس عیار حد ۲۰ درصد با روش کریجینگ معادل ۱۲۹۸۵۹۷۹ تن و در روش عکس مجذور فاصله ۱۲۹۰۷۷۴۸ تن برآورد شد.

## منابع

احمدی، ر، سادات کوهی، م، ۱۳۹۷، تخمین و رده‌بندی ذخیره کانسار سرب و روی اره گیجه رباط خمین استان مرکزی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی ۱۲(۲۴): ۳۹-۵۳.

بومری، م، ۱۳۷۱، بررسی ژنز کانسار آهن سنگان خراسان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران.

حسنی‌پاک، ع، ۱۳۷۷، زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران.

حسینی، م، ع، ۱۳۸۷، تعیین محدوده بهینه نهایی و برنامه‌ریزی تولید آنومالی A سنگ آهن سنگان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

حکمت نژاد، ا، حسنی‌پاک، ع (۱۳۹۰) تخمین توزیع عیار مس با استفاده از تخمینگر غیرخطی کریجینگ انفصالی

مطالعه موردی- معدن مس سونگون، نشریه مهندسی معدن ۱۱(۱۲): ۱۹-۱۱.

دهقانی جوزم، م، ۱۳۹۰؛ محاسبه ذخیره و مدلسازی زمین‌شناسی معدن مس میدوک بر اساس اطلاعات حفاری اکتشافی و چال‌های استخراجی به روش زمین‌آمار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.

شرکت مهندسی معدنکاو، ۱۳۸۸، گزارش مدلسازی، تیپ‌بندی و محاسبه ذخیره کانسار آهن دردوی سنگان.

شرکت مهندسی معدنکاو، ۱۳۸۹، گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰ کانسارهای آهن محدوده شرقی سنگان.

شرکت مهندسی کاوشگران، ۱۳۹۴، گزارش ارزیابی ذخیره آهن آنومالی A معدن سنگان.

شریف‌زاده، ه، ۱۳۹۵، برنامه‌ریزی تولید در آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان به وسیله نرم‌افزار NPV Scheduler، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند.

شریف‌زاده، ه، ۱۳۹۵، برنامه‌ریزی تولید در آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان به وسیله نرم‌افزار NPV Scheduler، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند.

صفری، و، منجزی، م، خادمی حمیدی، ج (۱۳۹۴) تخمین عیار در ذخایر دو متغیره با استفاده از روش ترکیبی کریجینگ و فاکتورهای خود همبستگی مینیمم-ماکزیمم. نشریه مهندسی معدن ۱۲(۳۷): ۱۱-۲۰.

طرح جامع بهره‌برداری بهینه از منابع معدنی سنگ آهن سنگان، ۱۳۹۲، گزارش مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی، شرکت مهندسی کانی‌کاوان شرق

عباداللهی، م، ۱۳۹۶، طراحی اکتشاف و استخراج معدن به وسیله نرم‌افزار GEMCOM SURPAC.

غلامی حاجی محمدی، ح، ۱۳۹۰، ارزیابی ذخیره آنومالی مرکزی سنگ آهن سنگان (باغک) با استفاده از نرم‌افزار دیتامین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند.

کشمیری، ب، خدایاری، ع، ا و جعفری، ا، ۱۳۸۳، کاربرد نرم‌افزار Datamine در برآورد ذخیره کانسار انگوران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

لیاقت، س، حسینی، م، حاجی‌آقا محسنی، ج، رونقی، س، ۱۳۸۵، استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ معمولی در تخمین ذخیره آنومالی شماره ۳ معدن آهن گل‌گهر،

- Choghart north anomaly iron ore deposit through ordinary kriging method, *International Journal of Mining Science and Technology* 22(4), 573-577.
- Dayani M, Mohammadi J (2010) Geostatistical assessment of Pb, Zn and Cd contamination in near-surface soils of the urban-mining transitional region of Isfahan. *Iran Pedosphere* 20(5):568-577.
- Kasmaeei, S., gholamnejad, J., yarahmadi, A (2010), Reserve estimation of the high phosphorous stockpile at the Choghart iron mine of Iran using geostatistical modeling", *Mining Science and Technology* 20(6), 855-860.
- Kis IM (2016) Comparison of Ordinary and Universal Kriging interpolation techniques on a depth variable (a case of linear spatial trend), case study of the Sandrovac Field. *Rudarsko Geolosko NaftniZbornik* 31(2):41-58.
- Tutmez B (2009) Use of hybrid intelligent computing in mineral resources evaluation. *Applied Soft Computing* 9(3):1023-1028.
- Zerzour O , Gadri L , Hadji R , Mebrouk F & Hamed Y (2021), Geostatistics-Based Method for Irregular Mineral Resource Estimation, in Ouenza Iron Mine, Northeastern Algeria, *Geotechnical and Geological Engineering* 39, 3337-3346.
- جنوب غربی سیرجان، دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- مجدی فر، س، کمالی، غ، ۱۳۹۲، تخمین عیار آهن در آنومالی های تپه قرمز معدن سنگ آهن سنگان با استفاده از سه الگوریتم فازی، عصبی و تطبیقی، مقاله روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن.
- محمدی، م ن، ۱۳۹۸، تخمین ذخیره آنومالی های شرقی (کانسار IV) معدن سنگان با استفاده از نرم افزار SURPAC، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی بیرجند.
- مدنی، ح (۱۳۷۳) مبانی زمین آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- Annels, A.E (2012) *Mineral deposit evaluation: a practical approach*, Springer Science & Business Media.
- Daya AA (2015) Ordinary kriging for the estimation of vein type copper deposit: a case study of the Chelkureh. *Iran J Min Metall A Min* 51(1):1-14.
- Daya, AA (2012), Reserve estimation of central part of