دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

تخمین ذخیره کانسار مس جیان بوانات با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و فرکتالی

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن- اکتشاف

احمد گودرزی

اساتید راهنما

دکتر نادر فتحیان پور

دکتر سید حسن طباطبایی

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

پایان‌نامه کارشناسی ارشد اکتشاف معدن آقای احمد گودرزی

تحت عنوان

تخمین ذخیره کانسار مس جیان بوانات با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و فرکتالی

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۳۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱-	استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر نادر فتحیان پور.
۲-	استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید حسن طباطبایی.
۳-	استاد داور پایان‌نامه	دکتر احمدرضا مختاری.
۴-	استاد داور پایان‌نامه	دکتر حمید هاشم الحسنی.
سرپرست تحصیلات تکمیلی		دکتر مرتضی طبایی.

زلال‌ترین سپاس‌ها تقدیم به اساتید عالی‌قدرم جناب آقای دکتر نادر فتحیان پور که درس آموختن در مکتب ایشان را مایه‌ی مباهات خویش می‌دانم و جناب آقای دکتر سید حسن طباطبایی به پاس حمایت‌های بی‌دریغشان.

بی‌کران‌ترین سپاس‌ها نثار پدر و مادر مهربانم، به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه‌ی ایثار و ازخودگذشتگی. صمیمانه‌ترین سپاس‌ها تقدیم به برادران و خواهر عزیزم، به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان .

صادقانه ترین سپاس ها تقدیم به جناب آقای احمدرضا گودرزی به پاس حمایت‌های دلسوزانه و بی دریغشان، مشاوره‌های اندیشمندانه و محبت بی کرانشان.

همچنین از مدیر عامل محترم شرکت معدن جویان فارس (سهامی خاص)، جناب آقای مهندس رضا درزی به خاطر حمایت‌های ارزنده ، جناب آقایان مهندس قاسمعلی صاحبان ، مهندس اکبر علامه ومهندس محمد جواد مجلسی به خاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان بسیار سپاسگزارم.

احمد گودرزی

زمستان ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعـــات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگـــاه صنعتـــی اصفهان است.

تقدیم به

وجود پاک پدرم، که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه کنم؛ مادرم، دریای بی‌کران فداکاری ؛ برادران و خواهر مهربانم که شوق پیمودن این راه را در من زنده کردند و تمامی همراهان دیروز و امروزم.

فهرست مطالب

فهرست.....هشت

چکیده.....۱

فصل اول

مقدمه و اهداف تحقیق.....۲

۱-۱. مقدمه.....۲

۱-۲. اهداف تحقیق.....۴

۱-۳. محتویات پایان‌نامه.....۵

فصل دوم

سابقه علمی موضوع.....۶

۲-۱. کاربرد زمین‌آمار در تخمین ذخایر مواد معدنی.....۶

۲-۲. کاربرد هندسه فرکتال در شبیه سازی ذخایر مواد معدنی.....۸

فصل سوم

معرفی منطقه مورد مطالعه.....۱۰

۳-۱ مقدمه.....۱۰

۳-۲. فعالیتهای اکتشافی انجام‌شده.....۱۱

۳-۳. زمین شناسی ناحیه ای.....۱۱

۳-۴. مطالعات سنگ‌شناسی.....۱۷

۳-۴-۱. سنگ‌های دگرگونی.....۱۷

۳-۴-۲. سنگ‌های آذرین.....۱۸

۳-۴-۳. سنگ‌های رسوبی و آذرآواری.....۱۸

۳-۵. مطالعه کانی‌های فلزی (Mineralography).....۱۹

۳-۶. مطالعات تکتونیکی ۱۹
۳-۶-۱. گسل‌ها ۱۹
۳-۶-۲. چین‌خوردگی ۲۰

فصل چهارم

روش‌شناسی تحقیق ۲۲
۴-۱. زمین‌آمار ۲۲
۴-۱-۱. مقدمه ۲۲
۴-۱-۲. متغیر ناحیه‌ای ۲۲
۴-۱-۳. نرمال سازی داده‌ها به‌روش تبدیل ارزش‌های نرمال ۲۳
۴-۱-۴. فرضیات پایایی ۲۳
۴-۱-۵. واریوگرام ۲۴
۴-۱-۶. ناهمسان گردی ۲۴
۴-۲. تخمین‌گر زمین‌آماری کـــریجینگ ۲۵
۴-۳. معادلات کریجینگ ۲۶
۴-۳-۱. کریجینگ خطی ۲۶
۴-۳-۲. کریجینگ شاخص ۲۷
۴-۴. هندسه فرکتال ۲۹
۴-۴-۱. مقدمه ۲۹
۴-۴-۲. بعد فرکتالی ۳۰
۴-۵. اندازه گیری بعد فرکتالی ۳۲
۴-۵-۱. روش خود تشابهی ۳۲
۴-۵-۲. روش خط پیمایش ۳۲

۴-۵-۳. روش شمارش جعبه‌ای ۳۳
۴-۵-۴. روش واریوگرام ۳۳
۴-۶. مبانی شبیه‌سازی فرکتالی ۳۳
۴-۶-۱. مقدمه ۳۳
۴-۶-۲. هم بعدی فرکتالی و حرکت براوانی کسری ۳۴
۴-۶-۳. محاسبه هم بعدی فرکتالی ۳۴
۴-۶-۴. مدل‌سازی فرکتالی ۳۵

فصل پنجم

تخمین ذخیره کانسار مس جیان بوانات ۳۶

۵-۱. مطالعات آماری پایه ۳۶
۵-۱-۱. مقدمه ۳۶
۵-۲. منظم سازی ۳۸
۵-۲-۱. نحوه محاسبات کامپوزیت سازی ۴۰
۵-۲-۲. انتخاب طول بهینه کامپوزیت‌ها ۴۱
۵-۲-۳. مقایسه میانگین و واریانس عیار مس کامپوزیت‌ها وداده‌های اصلی ۴۳
۵-۳. حذف مقادیر خارج از ردیف ۴۴
۵-۴. بررسی وجود یا عدم وجود روند برای متغیر مس ۴۷
۵-۵. مطالعات واریوگرافی ۴۹
۵-۵-۱. مقدمه ۴۹
۵-۵-۲. روش‌های تعیین ناهمسان گردی ۵۰
۵-۵-۳. رسم واریوگرام‌های جهتی متغیر مس ۵۰
۵-۵-۴. ترسیم نقشه‌ی واریوگرام سطحی به‌منظور بیان ناهمسان گردی ۵۳

۵-۶. تعیین ابعاد بهینه بلوک‌ها ۵۵
۵-۷. تعیین پارامترهای تخمین ۵۵
۵-۸. تخمین عیار مس به روش کریجینگ معمولی ۵۷
۵-۹. تخمین عیار مس به روش کریجینگ شاخص چندگانه ۶۳
۵-۱۰. نتایج کریجینگ شاخص میانه ۶۸
۵-۱۱. تخمین عیار مس با استفاده از شبیه‌سازی فرکتالی ۷۱
۵-۱۲. منحنی‌های عیار تناژ ۷۵
فصل ششم ۷۸
نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۸
۶-۱. نتیجه‌گیری ۷۸
۶-۲. پیشنهادات ۷۹
منابع و مراجع

چکیده

اولین و مهم‌ترین بخش ارزیابی فنی و اقتصادی هر کانسار پس از انجام مراحل مختلف اکتشافی آن، شبیه‌سازی و تخمین ذخیره کانسار و مشخص نمودن بخش قابل‌استخراج آن است. شبیه‌سازی زمین‌آماری با محاسبه ریسک و عدم قطعیت همراه با اندازه‌گیری‌ها، امکان ارزیابی‌ها و بررسی‌های دقیق اقتصادی و در نتیجه طراحی و برنامه‌ریزی‌های تولید دقیق‌تر را فراهم می‌کند. هدف از تحقیق حاضر مدل‌سازی سه‌بعدی منطبق با واقعیات، تخمین ذخیره و رسم منحنی عیار–تناژ کانسار مس جیان بوانات است. کانسار مس رگه‌ای جیان بوانات در ۱۸۵ کیلومتری شمال شرقی استان فارس در منطقه بوانات در روستای جیان واقع شده است، در این کانسار آثار فعالیت‌های استخراج فلزات به‌صورت شدادی و کنده‌کاری و تونل‌های دنبال رگه با سیستم‌های نگهداری سنتی وجود دارد و نشان می‌دهد این کانسار از گذشته‌های دور مورد توجه و استخراج گسترده توسط پیشینیان بوده است، به‌طوری که حجم قابل‌توجهی سرباره مس در کل منطقه پراکنده است. در این تحقیق ابتدا داده‌های اکتشافی موجود، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت، با رسم نمودار پراکندگی مقادیر عیار مس در مقابل محورهای مختصات مشخص شد که داده‌ها روند قابل‌توجهی ندارد و با رسم واریوگرام‌های جهتی لازم، ناهمسان گردی متغیر عیار مس در جهات مختلف بررسی شد و در نهایت با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل پارامترهای بهینه مورد نیاز برای تخمین به‌روش کریجینگ معمولی، شبیه‌سازی کریجینگ شاخص و شبیه‌سازی گوسی متوالی فرکتالی تعیین و تخمین ذخیره مس این کانسار در یک مدل بلوکی ۵*۴*۲ متری انجام شد. همچنین تلاش شد از روش کریجینگ شاخص چندگانه نیز برای تخمین ذخیره کانسار استفاده شود اما به دلیل کمبود اطلاعات اکتشافی موجود و عدم نمایش ساختار فضایی داده‌ها در واریوگرام‌های شاخص از این روش استفاده نشد و بجای آن از روش کریجینگ شاخص میانه استفاده شد. با توجه به رگه‌ای بودن کانسار مس جیان و توانایی روش‌های شبیه‌سازی فرکتالی در شبیه‌سازی این‌گونه کانسارها از شبیه‌سازی فرکتالی نیز به‌منظور تخمین ذخیره‌ی این کانسار استفاده شد. برای این منظور کد فرترن[1] این الگوریتم تحت نام SGFract جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی این کانسار، اصلاح و به‌کار گرفته شد. منحنی‌های عیار – تناژ نتایج رسم شد و نتایج سه روش مذکور با یکدیگر مقایسه شدند. بر اساس نتایج بدست آمده شبیه سازی فرکتالی بسیار بهتر از سایر روش‌های به‌کار گرفته شده توانست ضخامت کم و ناپیوستگی‌های رگه کانسار بوانات را مطابق با ویژگی‌های زمین‌شناسی شبیه سازی کند، همچنین این روش بر خلاف روش‌های کریجینگ معمولی و شبیه سازی کریجینگ شاخص میانه توانست ساختار رگه ای را در محدوده مطالعه گسترش دهد. مقایسه توزیع عیار مس در گستره سه بعدی کانسار نشان داد که روش هندسه فرکتال تطابق بهتری با واقعیت‌های شناخته‌شده کانسارهای رگه ای که توسط تکتونیک محلی کنترل شده است ارائه می‌دهد و توانسته رفتار رگه کم ضخامت و پر عیار را به‌خوبی شبیه سازی نماید.

کلمات کلیدی: تخمین ذخیره، زمین آمار، کریجینگ معمولی، کریجینگ شاخص، شبیه سازی گوسی متوالی فرکتالی،کانسار مس جیان بوانات

[1] Fortran

فصل اول

مقدمه و اهداف تحقیق

۱-۱. مقدمه

پس از اتمام اکتشافات ناحیه‌ای و نیمه تفصیلی، در مرحله بعد لازم است به مدل‌سازی خصوصیات ذاتی، توزیع فضایی و شکل و هندسه کان‌سنگ پرداخت. برای محاسبه ذخیره‌ی قابل‌استخراج و به دنبال آن طراحی بهینه استخراج لازم است اطلاعات تفصیلی از خصوصیات ذخیره در دسترس باشد. این خصوصیات شامل توزیع فضایی کان‌سنگ پر عیار و کم عیار و باطله و همچنین نحوه‌ی تغییرپذیری ضخامت کان‌سنگ و روباره و همبستگی بین عیار فلز اصلی و محصولات فرعی (فلزات باارزش)، در صورت وجود است [۱].

برای تعیین این خصوصیات لازم است داده‌های سه بعدی در اختیار داشت. بنابراین باید نمونه‌برداری در یک شبکه متراکم (حداقل در محدوده‌ی استخراجی) صورت گیرد، چگالی شبکه نمونه‌برداری برای تیپ‌های مختلف کانساری متفاوت است. بیش‌ترین چگالی نمونه‌برداری برای حصول به نتایج دقیق و قابل‌اطمینان در کانسارهای رگه‌ای و کمترین آن‌ها در کانسارهای پرفیری مورد نیاز است. با استفاده از داده‌های حاصل از چنین شبکه نمونه‌برداری می‌توان به تخمین بلوکی سه‌بعدی کانسار اقدام نمود. در انجام مطالعات زمین‌آماری باید به مطالب زیر توجه شود:

۱- استفاده از سازگارترین روش تخمین که درعین‌حال کمترین حدود اطمینان تخمین را نیز به همراه داشته باشد.

۲- تعیین مرز بین کان‌سنگ و باطله بر اساس رعایت عیار حد و محدودیت‌های استخراجی.

۳- تعیین حجم داده‌ی لازم (گمانه، ترانشه، تونل و ...) برای دستیابی به یک تخمین معتبر با خطایی در حد خطای مجاز از پیش تعیین‌شده [۱].

تخمین ذخایر معدنی و پیش‌بینی منابع از جنبه‌های مهم اکتشاف کانسارها و معدن کاری است. به طور کلی روش‌های تخمین ذخیره را به دو نوع سنتی و جدید تقسیم می‌کنند. روش‌های سنتی بیشتر بر مبنای اصول تجربی و هندسه اقلیدسی استوار می‌باشند، درحالی‌که روش‌های جدید عمدتاً بر مبنای زمین‌آمار بوده و از دقت بیشتری برخوردار می‌باشند [۱]. در روش‌های تخمین ذخیره سنتی فرض بر این است که هر نمونه از نظر آماری مستقل از نمونه‌های دیگر است و بنیان مطالعات بر متغیر تصادفی و آمار کلاسیک استوار است، اما در زمین‌آمار همبستگی فضایی داده‌ها در نظر گرفته می‌شود و از این‌رو متغیرهای ناحیه‌ای در روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این خصوص انتخاب بهترین تخمین گر یا بهترین روش تخمین و برآورد خطای تخمین اهمیت زیادی دارد. زیرا تخمین گرهای مختلف دارای توانایی و محدودیت‌هایی هستند، که سازگار بودن و یا نبودن هر روش با ویژگی‌های ژنتیکی کانسار تحت تخمین، در کیفیت و دقت تخمین‌ها مؤثر واقع می‌شود، به‌علاوه شناسایی توزیع خطا می‌تواند در طراحی بهینه عملیات اکتشافی لازم برای رفع آن‌ها، بسیار سودمند و مؤثر باشد. به سبب اثرات نامطلوب خطای تخمین در افزایش ریسک سرمایه‌گذاری، لازم است دقیق‌ترین روش تخمین ذخیره که بتواند حداقل خطای تخمین را تضمین کند، به‌کار گرفته شود. روش‌های تخمین ذخیره مبتنی بر زمین‌آمار مانند کریجینگ معمولی و ساده که در آن‌ها همبستگی فضایی مقادیر متغیر ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شود، روش‌های قدرتمندی هستند که علاوه‌بر آن‌که حداقل خطای تخمین را تضمین می‌کنند، توزیع آماری خطاهای تخمین را نیز بدست می‌دهند[2] و از این طریق ریسک طراحی، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری معدنی را کاهش می‌دهند، اما روش‌های تخمین زمین‌آماری نیز خود مبتنی بر تعداد محدودی حالت تحقق‌یافته از بی‌نهایت حالات ممکن هستند و بنابراین نمی‌توانند اطلاعات طیف مقادیر ممکن در جامعه مورد بررسی را به‌دست دهند. از منظری دیگر، روش‌های زمین‌آماری دارای ضعف‌هایی می‌باشند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها هموارسازی تخمین‌ها است چرا که این روش‌ها در مجموع برای تخمین نقاط نامعلوم، از میانگین‌گیری نقاط معلوم تحت قیود متفاوت استفاده می‌کنند و در نتیجه نمی‌توانند به خوبی نشان‌دهنده‌ی تغییرات در کانسار (به‌عنوان مثال توزیع عیار در کانسار) باشند [۱]. در واقع کل ذخیره باید به نوعی شبیه‌سازی شود که انجام برآوردهای اقتصادی به ازای شرایط گوناگون انتخاب‌شده امکان‌پذیر باشد. این نقیصه روش‌های تخمین زمین‌آماری را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی برطرف نمود، به همین دلیل روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری مانند شبیه‌سازی گوسی متوالی، شبیه‌سازی کریجینگ شاخص و غیره برای رفع این نقیصه استفاده می‌شود[3,4,5].

از سوی دیگر با معرفی هندسه فرکتال توسط مندلبرت [6] و گشوده شدن پهنه‌ی جدیدی از روش‌های محاسباتی

علاوه بر روش‌های مبنتی بر هندسه اقلیدسی در مطالعات علوم زمین، پژوهشگران بسیاری در این زمینه پـژوهش کـرده و الگـوریتم‌هـا و روش‌هـای بسـیاری، بـرای تخمـین ذخیـره کانسـارهـا و مطالعـات علـوم زمـین ارائـه کـرده‌انـد [7,8,9].روملین در سال 1992 الگوریتمی ارائه داد که علاوه بر حفظ هم بعدی فرکتالی داده‌ها، هم بعـدی فضـایی داده‌ها را نیز هم‌زمان حفظ می‌کند، این الگوریتم با حفظ هم بعـدی فرکتـالی داده‌هـا، از تخمـین گـر کریجینـگ کـه بهترین تخمین گر نااریب خطی است برای تخمین نقاط نا معلوم در فضا اسـتفاده مـی‌کنـد[10,11]. کنتـول در سـال ۱۹۹۹ با ارائه الگوریتم شبیه‌سازی گوسی‌فرکتالی SgFract بر پایه روش ارائه‌شـده توسـط روملـین الگـوریتمی ارائـه داد که علاوه بر حفظ هم بعدی فرکتالی و فضـایی داده‌هـا از مزایـای روش‌هـای شـبیه‌سـازی نیـز بهـره‌منـد مـی‌شـود [12,13].در مجموع فرکتال‌ها مباحث متأخر و نوپایی در ریاضیات و علوم زمین هستند و مطالعات تکمیلـی بسـیاری هم‌اکنون نیز در زمینه چندفرکتال‌ها و زمین‌آمار توسط محققین، از جمله چنگ و آگتربرگ در حـال بسـط و بررسـی است[14,15].

۱-۲. اهداف تحقیق

همان طور که اشاره شد پس از انجام اکتشافات نیمه تفصیلی، نوبت به تخمین ذخیـره‌ی کـان‌سـنگ قابـل‌اسـتخراج می‌رسد، عموماً داده‌های عیاری کانسارهای رگه‌ای مس به دلیل کمبود اطلاعات اکتشافی و یـا ویژگـی‌هـای ژنتیکـی این کانسارها، ساختار فضایی خوبی از خود نشان نمی‌دهند و در نتیجه تخمین ذخیره این کانسارها بر مبنای روش‌هـای زمین‌آماری متداول مانند کریجینگ معمولی و ساده و یا لاگ‌کریجینگ نتـایج رضـایت‌بخشـی، ارائـه نمـی‌دهنـد. در نتیجه در مناطقی که عیار و ضخامت کانسار رگه‌ای، ساختار فضایی خوبی از خود نشان نمی‌دهـد و یـا بـه دلیـل تـأثیر سین‌ژنتیک و یا اپی‌ژنتیک پدیده‌های تکتونیکی، ناپیوستگی‌های زیادی باعث گسلش و جابجایی رگه‌هـا شـده باشـد، از روش‌های دیگر در ترکیب با زمین‌آمار استفاده می‌شود، از جملـه روش‌هـایی کـه در ایـن مـوارد بـه‌کـار مـی‌رونـد روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال است [۱].

با توجه به رگه‌ای بودن کانسار مس جیان بوانات و ضخامت پایین این رگه و همچنین وجود ناپیوستگی‌های فراوان و تأثیر شدید تکتونیک، همزمان و پس از تشکیل این کانسار، هدف از انجام این پایان‌نامه تخمین ذخیره‌ی سـه بعـدی این کانسار با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی[1] وشبیه سازی کریجینگ شاخص[2] و شبیه‌سازی فرکتالی گوسی متوالی و در نهایت مقایسه‌ی نتایج حاصل از این روش‌ها است.

[1] Ordinary kriging
[2] Indicator kriging

۱-۳. محتویات پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر شامل ۶ فصل است که در فصل دوم به سابقه‌ی علمی موضوع مورد تحقیق و تاریخچه‌ی روش‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه و در فصل سوم به مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی در محدوده‌ی کانسار جیان پرداخته است. فصل چهارم شامل متدولوژی تحقیق و مروری بر اصول و نظریه روش‌های مورد استفاده جهت تخمین ذخیره مواد معدنی است. فصل پنجم به برآورد ذخیره کانسار می‌پردازد. فصل ششم شامل نتایج حاصله و پیشنهادها است و در نهایت منابع استفاده شده آورده شده است.

فصل دوم

سابقه علمی موضوع

۲-۱. کاربرد زمین‌آمار در تخمین ذخایر مواد معدنی

در بررسی‌های آمار کلاسیک، اجزا یا نمونه‌هایی که از کل جامعه به‌منظور شناخت آن برداشت می‌شوند، فاقد اطلاعات موقعیتی در فضا بوده و به‌عبارت‌دیگر نتایج به دست‌آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها، مستقل از موقعیت فضایی آن‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد، درحالی‌که در زمین‌آمار علاوه بر مقدار یک کمیت در یک نمونه، موقعیت فضایی آن نیز مورد توجه قرار می‌گیرد، بدین لحاظ می‌توان موقعیت فضایی نمونه‌ها را همراه با مقدار کمیت مورد نظر مورد تحلیل قرارداد [16]، در چند دهه اخیر نیز کتب و مقالات بسیاری از پژوهشگران برجسته این علم در زمینه‌های نظری و کاربردی آن منتشر گردیده است که از جمله باید به‌کارهای دیوید[۱]، رندو[۲]، آرمسترانگ[۳]، جورنل[۴]، داود[۵]، کلارک[۶] اشاره کرد [17].

جورنل در سال ۱۹۸۳ با معرفی و پایه گزاری روش کریجینگ شاخص به‌عنوان یک روش غیر پارامتریک برای تخمین توزیع‌های فضایی، نشان داد در مورد پدیده‌های مورد بررسی مانند توزیع متغیر عیار مس و طلای رگه‌ای که دارای توزیع‌های بسیار کشیده هستند و ضریب تغییرات آن‌ها بین ۲ تا ۵ قرار می‌گیرد، این روش می‌تواند بدون

[1] David
[2] Rendu
[3] Armstrong
[4] Journel
[5] Dowd
[6] Clark

حذف بخشی از اطلاعات که دارای ارزش بسیار بالای اقتصادی نیز هستند[2] و بدون نیاز به فرضیات نرمال بودن داده‌های اکتشافی موجود، تابع توزیع تجمعی احتمالی شرطی یک متغیر ناحیه‌ای را محاسبه کند[18]. در سال ۱۹۸۴ ایساکس[1] و جورنل در یک مطالعه موردی در کانسار اورانیوم ساسکچون[2] با استفاده از شبیه‌سازی شرطی شاخص نشان دادند با استفاده از این روش، به دلیل توانایی به‌کارگیری داده‌های نرم[3] در ساختار محاسباتی آن و برای مثال محدود کردن محاسبات در تیپ سنگ‌های مشخص مانند دایک‌های عقیم و یا بارور[19,20] ، علاوه بر باز تولید ساختار فضایی و هندسی تیپ سنگ‌های مختلف درون یک کانسار، می‌توان عیار هر تیپ سنگ را به‌صورت مرتبط با ویژگی‌های هم ناحیه‌ای آن‌ها شبیه‌سازی کرد[21]. یانگ[4] در سال ۱۹۸۷ از کریجینگ شاخص برای آنالیز سه بعدی بردارهای واحد تصادفی و اندازه‌گیری توزیع احتمالاتی محلی جهت‌داری درزه‌های سنگی در سازندهای زمین‌شناسی استفاده کرد و با استفاده از کریجینگ‌شاخص، پراکندگی محلی قطب‌ها در اطراف میانگین خانواده‌ی درزه‌ی انتخاب‌شده را تخمین زد و یک مدل احتمالاتی محلی از ساختار ژئوتکنیکی ایجاد نمود[22]. در سال ۱۹۹۱ جورنل و پرز[5] به‌عنوان جایگزینی برای کریجینگ شاخص چندگانه روشی ارائه دادند که سیستم کامل کریجینگ هم شاخص coindicator را با انجام کریجینگ مؤلفه‌های اصلی متغیر شاخص اصلی تقریب می‌زند و در نتیجه تعداد واریوگرافی‌های لازم برای این روش به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد[23]. در سال ۲۰۰۰ لیود[6] به بررسی عدم قطعیت در تخمین ارتفاع با استفاده از سه روش کریجینگ معمولی، کریجینگ همراه با روند و کریجینگ شاخص پرداخت و در نهایت نشان داد که روش کریجینگ شاخص به دلیل استفاده از آستانه‌های محلی نسبت به روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ همراه با روند، روش دقیق‌تری است[24]. لین[7] و همکاران در سال ۲۰۰۲ از کریجینگ شاخص و فاکتوری در یک سیستم اطلاعات جغرافیایی در شمال تایوان برای جدایش جوامع آلودگی خاک به فلزات سنگین استفاده کردند و نتایج این بررسی نشان داد، نقشه‌های احتمالاتی تخمین زده‌شده توسط کریجینگ شاخص تطابق بالاتری با کارخانه‌های صنعتی و کانال‌های انتقال آب نشان می‌دهد[25]. مارینونی[8] در سال ۲۰۰۳ نشان داد می‌توان با استفاده از کریجینگ شاخص مدل‌های دقیق‌تری از خواص سنگ به‌دست آورد و در یک مورد مطالعاتی در برلین آلمان نشان داد، نتایج به‌دست آمده توسط کریجینگ شاخص بسیار بهتر از نتایج روش کریجینگ معمولی هستند[26]. ژونگ[9] و همکاران در سال ۲۰۰۴ از شبیه‌سازی پی در پی شاخص برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در جدایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده کردند و نشان دادند نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تمامی الگوهای آلودگی مس را در منطقه‌ای در تایوان به خوبی نشان می‌دهد و اثری از هموارسازی ناشی از استفاده از روش‌های کریجینگ دیده نمی‌شود[27]. باستانت[10] در سال ۲۰۰۵ با به کار بردن تکنیک‌های آماری

[1] Isaaks
[2] Saskatchewan
[3] soft data
[4] Young
[5] Perez
[6] Lioyd
[7] Lin
[8] Marnioni
[9] Wang
[10] Bastante

(کریجینگ) یک برآورد از ذخایر اسلیت[1] یک کانسار انجام داد. او با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص مقدار تناژ قابل‌استخراج کانسار را محاسبه کرد[28]. وی همچنین در سال ۲۰۰۸ روش‌های کریجینگ شاخص، شبیه‌سازی شاخص شرطی[2] و آماره‌های چندنقطه‌ای[3] مورد استفاده در مدل کانسارهای صفحه‌ای را مورد مقایسه قرارداد. در پایان، این نتیجه حاصل شد که اگرچه مدل‌های تولیدشده توسط آماره‌های چندنقطه‌ای نسبت به مدل‌های تولیدشده با استفاده از روش‌های زمین‌آماری به واقعیت نزدیک‌تر هستند، اما شبیه‌سازی، متکی بر بخشی از اطلاعات به‌دست آمده از روش کریجینگ شاخص است[29]. در سال ۲۰۰۸ تولسانا و دلگادو[4] معادلات کریجینگ شاخص را برای حذف مشکل روابط مرتبه‌ای در فضای simplex حل و روشی ارائه دادند که در آن مشکل روابط مرتبه‌ای کریجینگ شاخص رفع شد[30]. در سال ۲۰۱۰ آلواس[5] و همکاران توانستند تغییرات فضایی بیماری آنتراک‌نوس[6] را در گیاهان با استفاده ازکریجینگ شاخص پیش‌بینی و نقشه‌های احتمالاتی این بیماری را در زمین‌های کشاورزی بررسی کنند[31]. سارا کسمایی در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش کریجینگ معمولی به برآورد ذخیره‌ی آهن و فسفر معدن چغارت پرداخت [32]. مهدی بادل در سال ۲۰۱۱ با استفاده از دو روش کریجینگ شاخص میانه و شبکه عصبی عیارهای آهن کانسار آهن جلال‌آباد زرند را تخمین زد [33]. در سال ۲۰۱۲ علی‌اکبر دایا به تخمین بخش مرکزی آنومالی شمالی با استفاده از روش کریجینگ معمولی پرداخت [34].

۲-۲. کاربرد هندسه فرکتال در شبیه‌سازی ذخایر مواد معدنی

هندسه فرکتال در ابتدا در قرن هفدهم توسط فیلسوف لیبنیز[7] درحالی‌که روی خود تشابهی می‌اندیشید، شروع شد. شخص بسیار مشهور دیگر در دنیای هندسه فرکتال هلگ ون کوخ[8] است، پاول پیر لیوی[9] منحنی‌های خود تشابه بیشتری را بررسی کرد و منحنی Levy C را ارائه داد. برجسته‌ترین شخص در هندسه فرکتال بنویت مندلبروت است، وی عهده‌دار نام "هندسه فرکتال" است[35].

مفهوم فرکتال‌ها توسط مندلبروت (۱۹۶۷)، ریاضیدان لهستانی، در محاسبه طول سواحل انگلستان معرفی شد. کلمه فرکتال[10] توسط مندلبروت (۱۹۸۲) از کلمه لاتین fractus به معنی شکسته شده گرفته شد. او این مفهوم را برای اهدافی که بسیار بی‌قاعده بودند و توسط هندسه اقلیدسی معمولی توصیف‌شده بودند، به کاربرد. این اصطلاح محدوده‌ی وسیعی از اهداف، از شکل‌های تکرار شده‌ی منظم که یک تعریف ریاضی دقیق دارند تا الگوهای تصادفی که می‌توانند با یک روش احتمالی توصیف‌شده باشند را شامل می‌شود [6,35].

---

[1] Slate
[2] Conditional indicator simulation
[3] Multiple-point statistics
[4] Tolosano &Delgado
[5] Alves
[6] Anthracnose
[7] Libniz
[8] Helge Von Koch
[9] Paul piere levy
[10] Fractal

در سال ۱۹۸۶ تورکات[1] یک رابطه فرکتال بین تناژ و عیار میانگین کانسارهای جیوه، مس و وانادیوم پیشنهاد کرد [36]. ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ ازمدل‌های فرکتال برای تخمین ذخیره کان‌سنگ طلایی در چین و در سال ۲۰۱۱ برای تخمین ذخیره و توصیف توزیع فضایی یک کانسار طلا و یک کانسار بوکسیت در چین استفاده کردند [7,8,9] . در سال ۱۹۹۸ جاوفلیپ کوستا[2] از روش شبیه‌سازی فرکتالی شرطی برای مدل‌سازی کانسار و مشخص کردن مرزهای ماده معدنی و باطله استفاده کرد[37].

در سال ۱۹۹۹ کنتول[3] از حرکت براوانی کسری برای خلق شبیه‌سازی شرطی روی یک مجموعه داده فضایی بی‌قاعده و پراکنده استفاده کرد [12,13]. در سال ۲۰۰۰ یک ذخیره کربنات مواد نفتی در جنوب شرق ترکیه با استفاده از کریجینگ و هندسه فرکتال توصیف شد [38]. در سال ۲۰۰۲ وی[4] و پنگدا[5] مدل‌های آماری فرکتال را برای چند مدل زمین‌شناسی مورد بررسی قراردادند و با استفاده از رگرسیون غیرخطی یک روش جدید برای تخمین ابعاد فرکتال در نظر گرفتند و نشان دادند که این روش نسبت به روش‌های سنتی بر اساس رگرسیون خطی مزایایی دارد [39]. در سال ۲۰۱۲ بهنام صادقی از روش‌های فرکتال برای شناسایی زون‌های کانی سازی یک کانسار آهن استفاده کرد [40].

[1] Turcotte
[2] Joao Felipe Costa
[3] Kentwell
[4] Wei
[5] Pengda

فصل سوم

معرفی منطقه مورد مطالعه

۳-۱. مقدمه

محدوده‌ی مس جیان بوانات در مرز دو واحد تکتونیکی رسوبی سنندج سیرجان و زاگرس در ۱۸۵ کیلومتری شمال شرقی شیراز قرار دارد. این محدوده تحت تأثیر پدیده‌های مختلف که در هر دو واحد مؤثر بوده است قرارگرفته به‌طوری که دارای روند ساختاری واحد زاگرس همراه با گسل‌های معکوس و تراستی بوده و همانند واحد سنندج سیرجان از دگرگونی و فعالیت ماگمایی همراه با کانسارزائی متأثر شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌هائی که طبق نقشه چهارگوش اقلید به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ از انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور در منطقه رخنمون دارد متعلق به پالئوزوئیک است که تحت عنوان مجموعه متامورفیک سوریان متشکل از کوارتزیت، میکاشیست و کالکوشیست از آن‌ها نام‌برده می‌شود. سنگ‌شناسی این مجموعه دگرگونی که کانی‌زایی مس نیز در آن صورت گرفته مشابهت آن را با مجموعه‌های غیر دگرگونه تریاس و ژوراسیک در منطقه نشان می‌دهد و به نظر می‌رسد که بایستی در سن آن بازنگری صورت گیرد.

سنگ‌های دیگر منطقه از نهشته‌های متعلق به دوره ژوراسیک است که شامل سازندهای شمشک، بغمشاه و قلعه‌دختر با سنگ‌شناسی متفاوتی نظیر شیل و ماسه‌سنگ، شیل ومارن، سنگ آهک و ماسه‌سنگ است و بیشتر در شمال منطقه و محدوده مورد نظر گسترش دارند. سنگ‌آهک‌های متعلق به ژوراسیک- کرتاسه و نهایتاً آهک‌های اوربیتولین دار کرتاسه زیرین عمده‌ترین بخش‌های کوهستانی جنوب محدوده مورد نظر و منطقه را تشکیل می‌دهند. کانی‌های فلزی موجود در منطقه معدنی بوانات اکثراً در امتداد تورق سنگ‌های دگرگونی و نیز در سنگ‌های آذرین دگرشکل یافته[1] متمرکز شده است ولی ارتباط کمتری با انواع مختلف سنگ‌های رسوبی نشان می‌دهند.

[1] Deformed