ارزیابی ذخیره بخش مرکزی کانسار سولفات سدیم میقان اراک با استفاده از روش‌های هندسی و زمین‌آماری

رضا احمدی *

استادیار، مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اراک

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۸/۱۲
تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۷/۲۱

چکیده

در پژوهش حاضر از روش‌های تخمین هندسی با استفاده از نرم‌افزار سرفر و زمین آماری کریجینگ، به منظور ارزیابی ذخیره بخش مرکزی کانسار سولفات سدیم حوضه رسوبی میقان اراک استفاده شده است. با استفاده از روش هندسی متوسط عیار کانسار، ۲۵/۱ درصد و متوسط ذخیره خالص ماده معدنی ۳۲۲۳۵۸۱/۷ تن محاسبه شد. برای استفاده از روش زمین‌آماری، ابتدا داده‌های عیارسنجی و ضخامت ماده معدنی چاهک‌های اکتشافی، مورد پردازش‌های آماری اولیه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مرحله، توزیع لاگ نرمال را برای داده‌های عیارسنجی و توزیع نرمال را برای داده‌های ضخامت ماده معدنی نشان داد. براساس نتایج عملیات واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی، روش تخمین لاگ کریجینگ معمولی بلوکی برای داده‌های عیارسنجی مورد استفاده قرار گرفت و برای تخمین ضخامت نیز از روش عکس مجذور فاصله استفاده شد. با این روش ابعاد بلوک‌های تخمینی ۵۸×۶۰ متر، متوسط عیار سولفات سدیم کانسار، ۲۴/۹۸ درصد با میانگین انحراف استاندارد ۱/۰۹ درصد، ضخامت متوسط بلوک‌ها در حدود ۲/۵۷ متر با انحراف معیار ۰/۲۳ متر و حدود بالا و پایین ذخیره خالص ماده معدنی تخمینی در سطح اعتماد ۹۵٪ به ترتیب برابر با ۵۲۷۵۲۲۱/۴ و ۶۲۸۶۶۸۳/۸ تن به دست آمد. براساس نتایج پژوهش صورت گرفته اختلاف میزان ذخیره محاسبه شده به روش هندسی با استفاده از نرم‌افزار سرفر و روش کریجینگ برابر با ۲۵۵۷۳۷۰/۹ تن یعنی در حدود ۴۴/۲ درصد می‌باشد که نتایج روش تخمین کریجینگ به علت نااریب بودن و حداقل بودن خطای تخمین، دقیق‌تر بوده و از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تخمین ذخیره، حوضه رسوبی میقان اراک، روش زمین آماری، روش هندسی، سولفات سدیم.

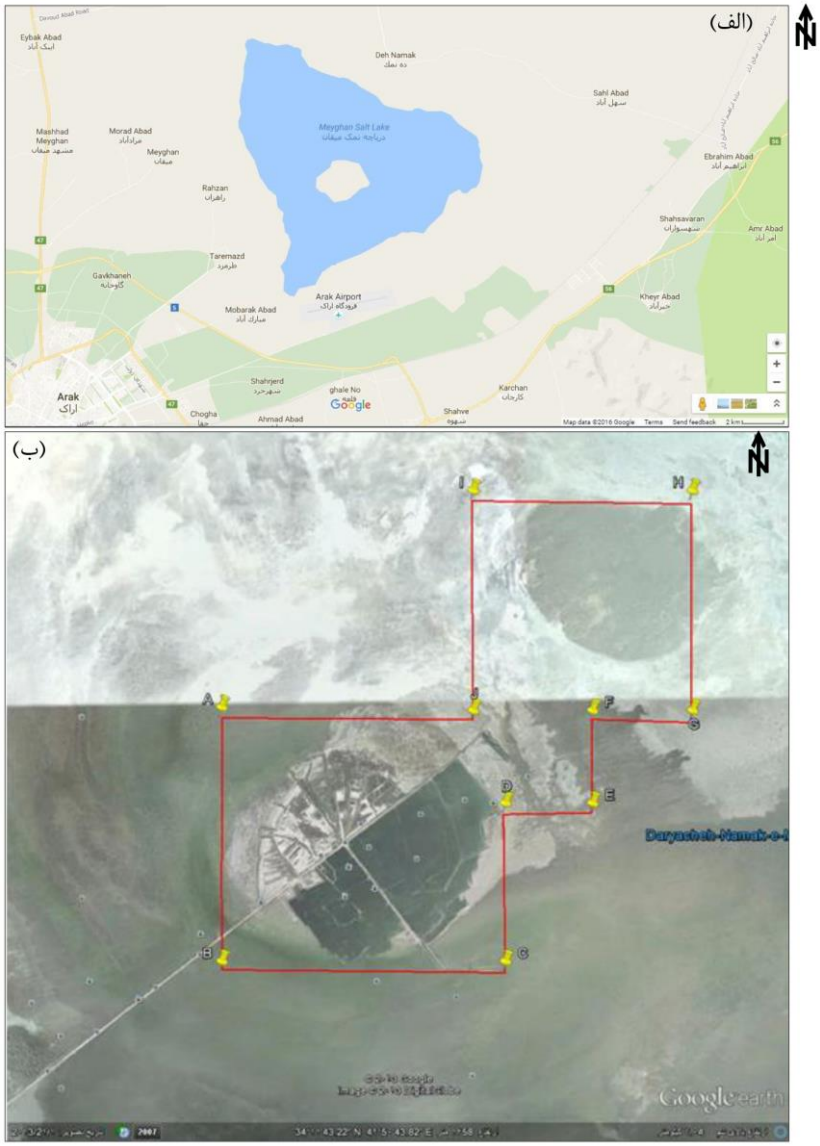
*- نویسنده مسئول: ۰۹۱۸۸۶۲۲۵۵۷ Email: Rezahmadi@gmail.com

مقدمه

سولفات سدیم یکی از مواد شیمیایی معدنی– صنعتی مهم و باارزش است که با دو روش طبیعی و مصنوعی تهیه شده و در طبیعت به دو صورت آب‌دار و بی آب یافت می‌شود. نوع آب‌دار آن میرابیلیت[1] ($Na_2SO_4,10H_2O$) یا نمک گلوبر با وزن مخصوص ۱/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نوع بی آب آن تناردیت[2] (Na_2SO_4) با وزن مخصوص ۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. به‌طورکلی سولفات سدیم در ترکیب شیمیایی بیش از چهل کانی از قبیل گلوبریت[3] (سولفات مضاعف بدون آب سدیم و کلسیم) و بلودیت[4] (سولفات مضاعف سدیم و منیزیم) با نسبت‌های مختلف یافت می‌شود (هاشمی، ۱۳۸۴)، اما از میان همه آنها تنها میرابیلیت و تناردیت دارای کاربردهای صنعتی بوده و از نظر تجاری اهمیت دارند. در پژوهش حاضر بخش مرکزی کانسار سولفات سدیم حوضه رسوبی میقان اراک که در اختیار شرکت املاح قرار دارد، مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان ذخیره این کانسار به کمک روش هندسی با استفاده از نرم‌افزار سرفر و روش زمین آماری کریجینگ تخمین زده شده است. این محدوده توسط شرکت املاح به طور کامل اکتشاف شده و اطلاعات اکتشافی کامل آن از جمله نتایج عیارسنجی چاهک‌های اکتشافی، در دسترس می‌باشد.

محدوده مورد مطالعه

حوضه رسوبی میقان با وسعتی در حدود ۵۵۲۰ کیلومتر مربع به صورت حوضه بسته‌ای در باختر زون ایران مرکزی، در بخش مرکز و جنوب باختری استان مرکزی و در شمال خاوری شهرستان اراک قرار دارد. حدود ۱۹۷۰ کیلومتر مربع از وسعت این حوضه را دشت آبرفتی اراک، ۱۰۸ کیلومتر مربع (به صورت یک مثلث متساوی الساقین) را پلایای میقان و بقیه را ارتفاعات حاشیه حوضه تشکیل می‌دهند (مهاجرانی، ۱۳۷۸؛ هاشمی، ۱۳۸۴). پلایای میقان که نام آن از روستای میقان واقع در ۸ کیلومتری اراک گرفته شده و به نام‌های کویر میقان، دریاچه توزلوگل و دریاچه میقان نیز معروف می‌باشد، دریاچه فصلی است که بین طول جغرافیایی ´۴۶،°۴۹ تا ´۵۵،°۴۹ خاوری و عرض جغرافیایی ´۹،°۳۴ تا ´۱۶،°۳۴ شمالی در مرکز پست‌ترین ناحیه حوضه رسوبی میقان قرار دارد. ارتفاع متوسط کویر میقان از سطح دریا در حدود ۱۶۷۵ متر می‌باشد (ساداتی، ۱۳۷۱). در شکل ۱ الف نقشه موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به دریاچه نمک میقان اراک در تصویر ماهواره‌ای و در شکل ب بخش مرکزی این حوضه یعنی محدوده کانسار سولفات سدیم (منطقه مورد مطالعه) نشان داده شده است. راه اصلی آسفالته تهران- اراک و خط راه آهن سراسری نیز در جنوب کویر میقان قرار دارد. فاصله کانسار تا شهرستان اراک حدود ۸ کیلومتر بوده که تمام آن آسفالته می‌باشد. با توجه به نزدیکی محل کانسار به شهرستان اراک، محدوده مورد نظر از امکانات زیربنایی مناسبی برخوردار است.



شکل ۱: الف) نقشه هوایی موقعیت جغرافیایی دریاچه میقان اراک با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و ب) محدوده کانسار سولفات سدیم بر روی آن با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰.

زمین‌شناسی منطقه‌ای محدوده

منطقه مورد مطالعه در مرز زون ایران مرکزی با زون سنندج- سیرجان، در راستای شمال-باختری- جنوب‌خاوری در امتداد گسل سراسری زاگرس تشکیل شده و در بخش جنوب‌باختری نقشه زمین‌شناسی چهارگوش قم با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ واقع است (مهاجرانی، ۱۳۷۸). این منطقه به عنوان یک فروافتادگی در میان مجموعه‌های متنوعی از سنگ‌های رسوبی و دگرگونی متعلق به زون سنندج- سیرجان در باختر و جنوب باختری و مجموعه سنگ‌های رسوبی متعلق به زیر زون جنوب باختری ایران مرکزی در شمال و خاور، از موقعیت خاصی برخوردار است. قدیمی‌ترین سنگ‌هایی که در منطقه بیرون زدگی دارند، مجموعه رسوبات مربوط به زمان

تریاس بالایی‌اند، به همین دلیل تاریخ تکتونیک منطقه به فازهای تکتونیکی بعد از ترشیری نسبت داده می‌شود. گسل تبرته که مرز کاملاً مشخصی بین رشته کوه‌های سنندج- سیرجان و ایران مرکزی است و گسل تلخاب که به صورت خمیده با راستای شمال باختر– جنوب خاور در زمان‌های مزوزوئیک تا کواترنر فعال بوده و زیر زون هفتاد قله را از زیر زون مرکزی جدا می‌سازد، از مهم‌ترین گسل‌های این منطقه محسوب می‌شوند (مهاجرانی، ۱۳۷۸؛ ساداتی، ۱۳۷۱). سطح کویر با پوسته‌های شوره زده سطحی با فرم ورقه‌ای شکل گسترده، پوشانده شده است. کانی‌های تشکیل دهنده این پوسته‌ها تحت شرایط بیشترین تغلیظ شوراب در طی عمل تبخیر، ایجاد گردیده و در مجاورت با اتمسفر، کاملاً خشک هستند. این پوسته‌ها در بعضی نقاط، ضخامتی حدود ۱ متر دارند و از کانی‌های هالیت، انیدریت، تناردیت و گلوبریت تشکیل شده‌اند (مهاجرانی، ۱۳۷۸؛ ساداتی، ۱۳۷۱). زمانی که میزان بارندگی بالا باشد و این پوسته‌ها در معرض سیلاب قرار گیرند، کانی های تبخیری حل شده و شوراب غلیظی تولید می‌گردد. این شوراب در مرکز پلایا و در پهنه شور که جایگاه نهایی روان آب های سیلابی با بار محلول زیاد می‌باشند، تجمع یافته و کانی های بسیار محلول هالیت و میرابیلیت را تولید می‌نماید. پلایای میقان از نظر ماده معدنی سولفات سدیم دارای پتانسیل خوبی است و کانی‌سازی سولفات سدیم در این کانسار، از نوع میرابیلیت و گلوبریت است که آب دار هستند (هاشمی، ۱۳۸۴). کانی‌های تبخیری سولفات سدیم در منطقه به صورت لایه بلورین عدسی شکل با ضخامت متوسط حدود ۳ متر در عمق ۲ تا ۸ متری شناسایی و اکتشاف شده اند (مهاجرانی، ۱۳۷۸؛ ساداتی، ۱۳۷۱).

فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در منطقه

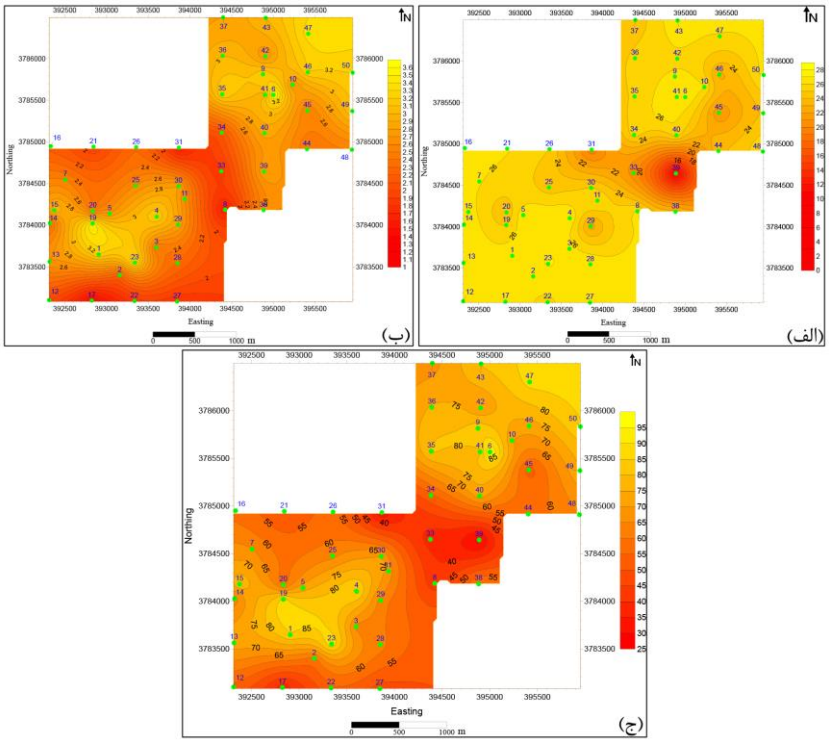
به منظور شناسایی و دسترسی به ماده معدنی در کل دریاچه میقان، در زمان‌های مختلف با استفاده از دستگاه‌های مته اوگر و مغزه‌گیر ضربه‌ای اقدام به حفر چاهک‌ها و چال‌های اکتشافی شده است. براساس حفاری‌های انجام شده قدیمی (قبل از سال ۱۳۷۸) با عمق کم‌تر از ۱۰ متر، تعداد ۲۰۱ حلقه چال اکتشافی در سطح دریاچه میقان حفر شده که حدود ۷۲ درصد از این چال‌ها با شبکه منظمی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر حفر گردیده‌اند. در سال ۱۳۷۸ در منطقه، حدود ۷۴ متر به طور پراکنده حفاری شده و تعداد ۱۹۶ نمونه رسوب برداشت شده که بر روی ۴۰ نمونه رسوب، آنالیز شیمیایی و اشعه X انجام گرفته است (مهاجرانی، ۱۳۷۸). در سال ۱۳۷۹ در محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۱۴ کیلومتر مربع در قسمت خاور و شمال خاوری دریاچه میقان، ۲۸۰ متر حفاری با شبکه‌بندی منظم ۵۰۰×۵۰۰ متری صورت گرفته و تعداد ۸۴۰ نمونه رسوب و شورابه برداشت شده است. در سال ۱۳۸۰ در سطح تقریبی ۳۵ کیلومتر مربع در قسمت خاور، جنوب خاوری و جنوب دریاچه میقان، حدود ۳۲۲ متر حفاری با شبکه‌بندی منظم ۵۰۰×۵۰۰ متر انجام شده که تعداد ۲۵۲ نمونه رسوب و شورابه برداشت شده است. در سال ۱۳۸۲ نیز تعداد ۸۴۰ نمونه رسوب و شورابه برداشت شده که بر روی ۱۳۰ نمونه، آنالیز شیمیایی و اشعه X انجام شده است. جدیدترین حفاری‌های انجام شده مربوط به

حفر تعداد ۱۴۴ حلقه چاهک اکتشافی در کل سطح دریاچه میقان در خارج از محدوده شرکت املاح است (هاشمی، ۱۳۸۴) که تمامی اطلاعات آنها دردسترس می باشد. در حین عملیات حفاری تقریباً از هر نیم متر لایه حاوی ماده معدنی در هر چاهک، یک نمونه رسوب برداشت شده و نمونه‌ها تحت شرایط موجود در منطقه، خشک گردیده‌اند. سپس مقدار سولفات سدیم، سولفات منیزیم، کلرور سدیم، سولفات کلسیم و مواد نامحلول نمونه‌ها، عیارسنجی شده‌اند. به منظور تحلیل اکتشافی منطقه مورد مطالعه، با استفاده از اطلاعات ۴۸ حلقه چاهک اکتشافی در بخش مرکزی دریاچه، نقشه‌های هم عیار، هم ضخامت و هم‌انباشتگی سولفات‌سدیم در شکل ۲ ترسیم شده است. هم پارامتر عیار و هم پارامتر ضخامت ماده معدنی، از ویژگی-های شاخص یک توده کانسار می‌باشند. پارامتر انباشتگی نیز به صورت حاصل‌ضرب عیار در ضخامت ماده معدنی تعریف می‌شود. بنابراین با بررسی تغییرات این پارامتر، در واقع تغییرات پارامترهای عیار و ضخامت ماده معدنی، به طور همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. ترسیم نقشه هم انباشتگی به شناسایی موقعیت‌های با پتانسیل بیشتر ماده معدنی با هدف بهره‌برداری در آینده، کمک می‌کند و در ارزیابی‌های فنی و اقتصادی کانسار مدنظر قرار می‌گیرد. مطابق نقشه شکل ۲ الف بیشترین میزان عیار ماده معدنی در این منطقه، حدود ۲۹ درصد بوده و کمترین میزان عیار ماده معدنی در مرکز محدوده است. مطابق شکل ب بیشترین ضخامت ماده معدنی، در نواحی شمال خاوری و جنوب باختری منطقه می‌باشد. مطابق شکل ج نیز بیشترین انباشتگی ماده معدنی در شمال خاوری و جنوب باختری منطقه است. بنابراین به منظور بهره‌برداری ماده معدنی، این نواحی از سایر مناطق محدوده، با اهمیت تر بوده و در اولویت نخست قرار دارند.

مواد و روش‌ها

ارزیابی ذخیره کانسار سولفات سدیم میقان

به طورکلی روش‌های تخمین ذخایر معدنی را می‌توان به دو دسته روش‌های کلاسیک (هندسی) و زمین آماری (وزن دهی آماری) طبقه‌بندی کرد (احمدی، ۱۳۹۵؛ مدنی، ۱۳۷۶؛ حسنی‌پاک، ۱۳۸۰). از آنجایی که ذخایر معدنی به شکل‌های بسیار متفاوتی یافت می‌شوند (پیترز، ۱۹۷۸)، انتخاب روش محاسبه ذخیره، تابع وضعیت ماده‌ی معدنی و مشخصات کارهای اکتشافی است. براساس وضعیت ماده معدنی، میزان و نحوه کارهای اکتشافی انجام شده و اطلاعات اکتشافی موجود، برای محاسبه ذخیره منطقه مورد مطالعه، از میان روش‌های مختلف محاسبه ذخیره، روش هندسی با استفاده از نرم‌افزار سرفر و روش زمین آماری کریجینگ، مورد استفاده قرار گرفته است. در محاسبه ذخیره کانسار با این روش‌ها، حد و مرز محدوده، موقعیت چاهک‌های اکتشافی مرزی بوده و وزن مخصوص متوسط ماده معدنی gr/cm^3 ۱/۵ در نظر گرفته شده زیرا وزن مخصوص کانسار تقریباً ثابت است. برای برآورد ضخامت ماده معدنی نیز از روش تخمین عکس مجذور فاصله استفاده شد.



شکل ۲: نقشه الف) هم‌عیار، ب) هم‌ضخامت و ج) هم‌انباشتگی ماده معدنی سولفات سدیم محدوده شرکت املاح و موقعیت پراکندگی چاهک‌های اکتشافی.

محاسبه ذخیره منطقه به روش هندسی: برای محاسبه ذخیره منطقه مورد مطالعه به روش هندسی، از نرم‌افزار سرفر استفاده شده است. در این روش گام نخست، تعیین حجم ماده معدنی محصور بین دو سطح (افقی یا غیرمستوی) می‌باشد. برای این‌منظور ابتدا بایستی داده‌های ورودی را پردازش و دو فایل جداگانه ایجاد کرد. در فایل اول مختصات (X,Y) و ارتفاع سطح بالایی ماده‌معدنی (Z_1) چاهک‌ها و در فایل دوم مختصات (X,Y) و ارتفاع سطح پایینی ماده‌معدنی (Z_2) چاهک‌ها وارد می‌شود. بدین ترتیب عملاً براساس ارتفاعات بالایی (Z_1) و پایینی (Z_2) ماده معدنی در چاهک‌ها، برای ماده‌معدنی حد و مرز بالا و پایین تعریف می‌گردد (احمدی، ۱۳۸۸). به طورکلی در نرم‌افزار سرفر چهار روش برای محاسبه حجم وجود دارد. روش استفاده از قانون ذوزنقه[۵]، قانون سیمسون[۶]، قانون ۳/۸ سیمسون و روش کندن و پرکردن[۷]. این روش‌ها تحت عناوین تابع اولیه عددی و یا انتگرال گیری عددی شناخته می‌شوند. فرمول‌های انتگرال گیری ذوزنقه‌ای، سیمسون و ۳/۸ سیمسون حالت‌های خاصی از فرمول انتگرال گیری نیوتن می‌باشند. در تمام این روش‌ها هدف، محاسبه یک انتگرال معین مطابق رابطه ۱ است.

رابطه ۱)

$$I = \int_a^b f(x)dx$$

هر یک از این روش‌ها جواب رابطه ۱ را به صورت رابطه ۲ تعریف می‌کند.

رابطه ۲)

$$I=\int_{a}^{b} f(x)dx = F(x)+R(x)$$

که در این رابطه، R(X) میزان خطای ناشی از تقریب خواهد بود.

در تمام این روش‌ها برای انتگرال گیری عددی بین دو بازه مشخص، از فواصل عددی معین استفاده می‌شود. در روش ذوزنقه، سطح زیر یک منحنی محصور به دو فاصله مشخص با سطح یک ذوزنقه، تقریب زده می‌شود، حال آنکه در روش سیمسون، چنین سطحی با سطح زیر یک منحنی تقریب زده می‌شود و خطای آن به مراتب کمتر از روش ذوزنقه است. بنابراین دقت روش سیمسون از روش ذوزنقه بیشتر خواهد بود. تفاوت روش سیمسون با روش ۳/۸ سیمسون در چگونگی انتخاب فواصل انتگرال گیری می‌باشد (احمدی، ۱۳۸۸).

فرض کنید $x_o=a$، $x_n=b$ و $h=\frac{b-a}{n}$، به ازای هر $o\le i\le n$ ، $x_i=a+ih$، و $\sum_{i=o}^{n} a(i)f(i)$ فرمول انتگرال گیری n+1 نقطه بسته نیوتن باشد، در این صورت فرمول انتگرال گیری بسته نیوتن به ازای n=1، رابطه ۳ فرمول ذوزنقه‌ای را ایجاد می‌کند.

رابطه ۳)

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x)dx=\frac{h}{2}[f(x_0)+f(x_1)]-\frac{h^3}{12}f''(\zeta),\zeta\in[x_0,x_1]$$

فرمول انتگرال گیری نیوتن به ازای n=2، رابطه ۴ فرمول سیمسون را تشکیل می‌دهد.

رابطه ۴)

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x)dx=\frac{h}{3}[f(x_0)+4f(x_1)+f(x_2)]-\frac{h^5}{90}f^{(5)}(\zeta),\zeta\in[x_0,x_2]$$

و فرمول انتگرال گیری بسته نیوتن به ازای n=3، رابطه ۵ فرمول ۳/۸ سیمسون را به وجود می‌آورد.

رابطه (۵)

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx=\frac{3h}{8}[f(x_0)+3f(x_1)+3f(x_2)+f(x_3)]-\frac{3h^5}{80}f^{(5)}(\zeta),\zeta\in[x_0,x_3]$$

روش‌های انتگرال گیری عددی که منحصراً به آنها اشاره شد، به عنوان یک انتگرال سطح در نظر گرفته می‌شوند و یک بعدی می‌باشند. حال آنکه برای محاسبه حجم به انتگرال گیری عددی در دو بعد نیاز است. روش‌های محاسبه حجم به کار رفته در نرم‌افزار سرفر به عنوان یک انتگرال مکرر در نظر گرفته می‌شوند که محاسبات، ابتدا در مسیر X و سپس در مسیر Y انجام می‌گیرد. برای تخمین میزان خطا می‌توان نتایج حاصل از سه روش را با یکدیگر مقایسه نمود. اگر سطح فوقانی همواره بالای سطح زیرین باشد، نتایج بایستی معمولاً دست‌کم تا پنج یا شش رقم اعشار قابل قبول باشند. همواره باید به نتایج حجم‌های کندن و پرکردن نیز توجه کرد تا یک ایده برای خطای نسبی، حاصل شود. تفاوت بین حجم‌های کندن و پرکردن معمولاً خیلی نزدیک به روش ذوزنقه است (احمدی، ۱۳۸۸). پس از محاسبه حجم، وزن کل کانسنگ و وزن خالص ماده معدنی به ترتیب با استفاده از روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود:

رابطه ۶)

$$W=V\times\rho$$

رابطه ۷)

$$P=W\times C=V\times\rho\times C$$

که در این روابط، ρ وزن مخصوص متوسط ماده معدنی، W وزن کل کانسنگ، C عیار متوسط کانسار و P وزن خالص ماده معدنی می‌باشد (احمدی، ۱۳۹۵). نتایج محاسبه ذخیره محدوده مورد مطالعه به روش هندسی با استفاده از نرم-افزار سرفر در جدول ۱ خلاصه شده است. عیار متوسط کانسار از طریق میانگین‌گیری وزن‌دار (براساس طول) نمونه‌های چاهک‌ها برابر با ۲۵/۱

درصد و متوسط میزان ذخیره به‌دست آمده توسط چهار روش، برابر با ۳۲۲۳۵۸۱/۷ تن می‌باشد.

جدول ۱: خلاصه نتایج محاسبه ذخیره به روش هندسی با استفاده از نرم افزار سرفر.

روش اندازه گیری حجم	حجم ماده معدنی (متر مکعب)	وزن کل کانسنگ (تن)	وزن خالص ماده معدنی (تن)
قانون ذوزنقه	۸۵۶۱۸۸۷/۲	۱۲۸۴۲۸۳۰/۸	۳۲۲۳۵۵۰/۵
قانون سیمسون	۸۵۴۴۰۲۷/۴	۱۲۸۱۶۰۴۱/۱	۳۲۱۶۸۲۶/۳
۳/۸ سیمسون	۸۵۸۰۴۱۵/۸	۱۲۸۷۰۶۲۳/۷	۳۲۳۰۵۲۶/۵
کندن و پرکردن	۸۵۶۱۵۴۹/۹	۱۲۸۴۲۳۲۴/۸	۳۲۲۳۴۲۳/۵

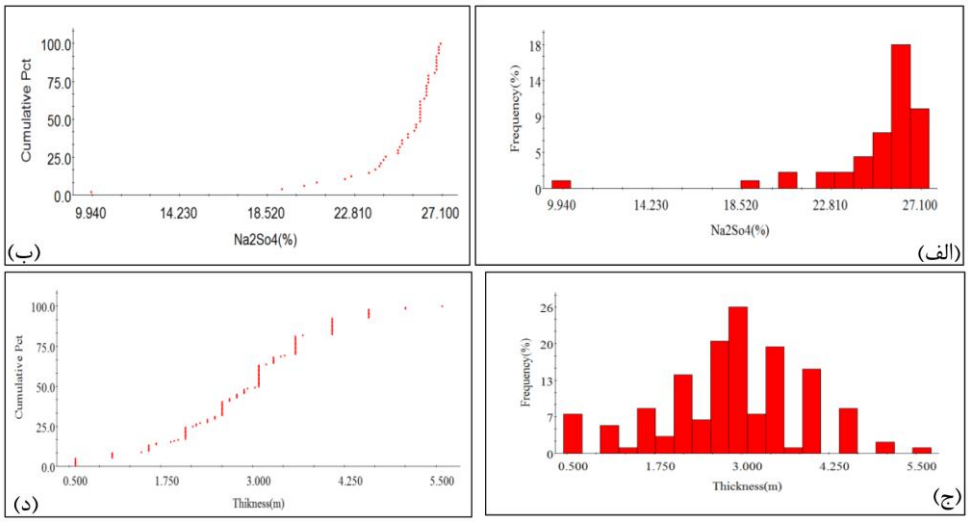
ارزیابی زمین آماری کانسار سولفات سدیم: علوم زمین به تخمین‌های هرچه دقیق‌تر کمیت‌های وابسته به ماده معدنی به‌خصوص عیار و ضخامت آن، جهت تخمین ذخیره نیاز دارند (احمدی، ۱۳۹۴). چنین تخمین‌هایی خطای تخمین را در اختیار قرار داده و ریسک طراحی برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری معدنی را تا حد مجاز کاهش می‌دهند (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷). در زمین‌آمار آن دسته از متغیرها مورد بررسی قرار می‌گیرند که ساختار فضایی از خود بروز می‌دهند. یعنی ابتدا وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین داده‌ها بررسی شده و در صورت وجود ساختار فضایی (همبستگی فاصله‌ای و جهتی) تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. در ادامه تمام مراحل ارزیابی زمین آماری برای داده‌های عیارسنجی ماده معدنی سولفات سدیم بخش مرکزی کویر میقان اراک انجام شده است.

نتایج

پردازش آماری اولیه داده‌ها: برای آگاهی از نحوه توزیع داده‌ها در محدوده، قبل از هرگونه عملیات واریوگرافی و تخمین، ابتدا بایستی مطالعات آماری بر روی داده‌ها صورت گیرد (احمدی، ۱۳۹۵). آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های طبیعی عیار و ضخامت سولفات سدیم برای محدوده مورد مطالعه، در جدول ۲ خلاصه شده است. هیستوگرام و نمودار احتمال تجمعی داده‌های عیارسنجی و ضخامت سولفات‌سدیم محدوده مورد مطالعه نیز با استفاده از نرم‌افزار +GS در شکل ۳ ترسیم شده است. بررسی داده‌های جدول ۲ و شکل ۳ نشان می‌دهد که توزیع داده‌های عیارسنجی سولفات سدیم در منطقه، از نوع نرمال نبوده و مقدار چولگی بالایی دارد ولی توزیع داده‌های ضخامت از نوع نرمال است. از آنجایی‌که توزیع داده‌های عیار سولفات‌سدیم نرمال نبوده و از نوع لاگ نرمال می‌باشد، بنابراین یک تبدیل لگاریتمی سه متغیره (مدنی، ۱۳۷۳) بر روی داده‌ها صورت گرفت.

جدول ۲: آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های طبیعی عیار و ضخامت ماده معدنی در محدوده مورد مطالعه.

آماره / پارامتر	میانگین	میانه	مد	واریانس	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
عیار	۲۵/۰۹	۲۶/۱	۲۶/۱	۸/۱۳	۲/۸۵	۰/۳۵	-۳/۶۳	۶/۸۸
ضخامت	۲/۶۱	۲/۶	۲/۳	۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۲۰	-۰/۳۳	۰/۴۶



شکل ۳: نمودار الف) هیستوگرام و ب) فراوانی تجمعی داده‌های عیارسنجی، ج) هیستوگرام و د) فراوانی تجمعی داده-های ضخامت ماده معدنی سولفات سدیم محدوده کویر میقان اراک.

واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی منطقه

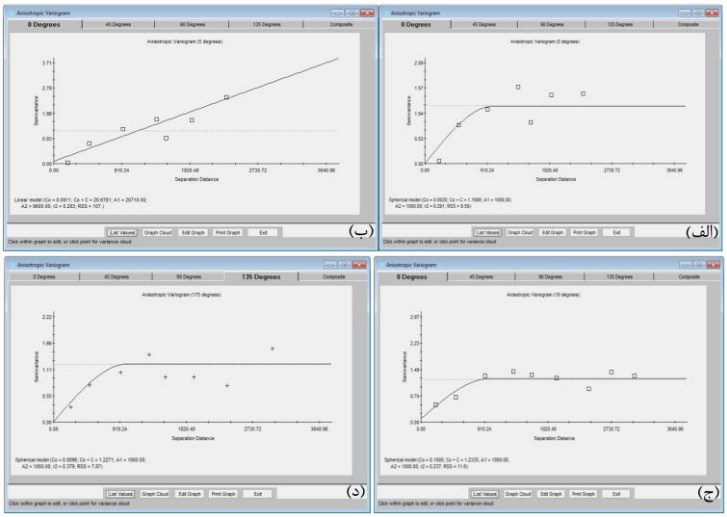
برای تخمین زمین آماری ذخایر معدنی در مرحله اول باید شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی عیار ماده‌معدنی مورد تخمین، انجام شود. در این مرحله مفهوم پیوستگی و میزان تداوم کانی‌سازی، همسانگردی[8] و ناهمسانگردی[9] منطقه و بالاخره ساختار فضایی ذخایر معدنی به‌وسیله ترسیم واریوگرام، بررسی می‌شود. به منظور تجزیه و تحلیل ساختار فضایی منطقه مورد مطالعه، واریوگرافی داده‌های پردازش شده با استفاده از نرم‌افزار GS+ صورت گرفت که ویژگی‌های واریوگرام‌های امتدادی ترسیم شده در جهات مختلف برای داده‌های عیارسنجی محدوده شرکت املاح در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳: مشخصات واریوگرام‌های امتدادی داده‌های عیارسنجی محدوده شرکت املاح.

ردیف	جهت	تلرانس	مدل	اثر قطعه‌ای	سقف	شعاع تاثیر	r^2	RSS
۱	۰	۱۰	کروی	۰/۰۰۲	۱/۱۹	۶۶۶/۶	۰/۲۹۱	۹/۵۹
۲	۰	۱۵	کروی	۰/۰۶۲	۱/۱۴	۶۶۶/۶	۰/۱۷۷	۱۰/۸
۳	۰	۲۰	کروی	۰/۰۰۱۲	۱/۲۷	۶۶۶/۶	۰/۲۰۱	۶/۶۷
۴	۵	۵	خطی	۰/۰۹	۲۰/۶۷	۹۶۰۰	۰/۲۸۳	۱۰۷
۵	۵	۱۰	کروی	۰/۰۰۱۹	۱/۲۵	۶۶۶/۶	۰/۲۳۶	۱۱/۸
۶	۱۰	۱۵	کروی	۰/۱	۱/۲۳	۶۶۶/۶	۰/۲۳۷	۱۱/۶
۷	۱۵	۲۰	کروی	۰/۰۳	۱/۳	۶۶۶/۶	۰/۲۳۲	۹/۴۹
۸	۱۷۵	۲۰	کروی	۰/۰۰۹	۱/۲۷	۶۶۶/۶	۰/۳۷۹	۷/۸۷

شکل ۴ نیز واریوگرام‌های امتدادی داده‌های عیارسنجی را نشان می‌دهد. بیشتر واریوگرام های امتدادی داده‌های ضخامت ماده معدنی با مدل تئوری از نوع خطی برازش یافتند. به

لحاظ زمین آماری این داده‌ها در محدوده مورد مطالعه دارای روند بوده، بنابراین چون تخمین‌های زمین آماری در مورد چنین داده‌هایی، چندان مفید نمی‌باشد (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷)، از آوردن واریوگرام‌های مربوطه خودداری شده است. مطالعه واریوگرام‌های امتدادی جدول ۳ و شکل ۴ نشان می‌دهد که بیشتر واریوگرام‌های تئوری انطباق یافته بر داده‌های عیارسنجی، از نوع مدل‌های کروی و خطی می‌باشند.



شکل ۴: واریوگرام‌های امتدادی داده‌های عیارسنجی سولفات سدیم محدوده شرکت املاح: الف) راستای صفر درجه و تلرانس ۱۰، ب) راستای ۵ درجه و تلرانس ۵، ج) راستای ۱۰ درجه و تلرانس ۱۵، د) راستای ۱۷۵ درجه و تلرانس ۲۰.

- کنترل اعتبار (صحت سنجی) واریوگرام‌ها

در مطالعات زمین‌آماری، بایستی صحت تمام فرضیات از جمله مدل‌های واریوگرام، به گونه‌ای کنترل گردد. در تخمین‌های کریجینگ به‌دلیل وابستگی شدید دقت نتایج به مدل مفروض، این کنترل‌ها به‌طور خاص، اهمیت دوچندان می‌یابد. علاوه بر این، انتخاب مدل واریوگرام، عملی بحرانی است و به‌خاطر اینکه شکل دقیق واریوگرام هرگز معلوم نیست، مدل، فقط به عنوان تقریبی از تابع آن واریوگرام کمک می‌کند؛ بنابراین بایستی اعتبار آن حتماً کنترل شود. پارامتر عددی که معمولاً در کنترل اعتبار واریوگرام مورد استفاده قرار می‌گیرد، مجموع مربعات کاهش یافته[10] (RSS) می‌باشد (ییتز و وریک، ۱۹۸۷). مزیت پارامتر RSS این است که در RSS مقدار عددی و ساختار همبستگی در محاسبه دخالت دارند. مقدار RSS توسط رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

رابطه ۸)

$$RSS = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[Z(x_i) - Z^*(x_i)\right]^2$$

واریوگرام‌های امتدادی منطقه مورد مطالعه، با استفاده از این روش توسط نرم‌افزار GS+، در جدول ۳ کنترل اعتبار گردیده‌اند که در این جدول r^2 نیز ضریب تعیین[11] می‌باشد.

تخمین ذخیره منطقه به روش کریجینگ

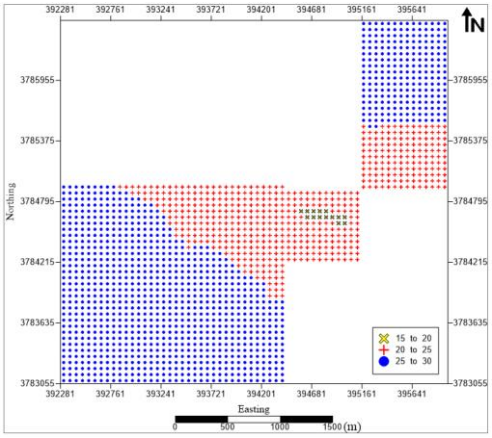
مرحله دوم تخمین زمین آماری ذخایر معدنی، استفاده از روش کریجینگ است که به مشخصات مدل واریوگرام برازش شده در مرحله اول، وابسته است. ازآنجایی‌که توزیع داده‌های عیارسنجی سولفات‌سدیم منطقه

مورد مطالعه از نوع لاگ نرمال می‌باشد، برای تخمین عیار از روش لاگ کریجینگ معمولی بلوکی، استفاده شد که در تخمین هر نقطه، تعداد ۱۶ نزدیک‌ترین نمونه همسایه، مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد بلوک‌های تخمین برای داده‌های موجود در هر محدوده، با توجه به گستره طول و عرض محدوده، فاصله چاهک‌ها از یکدیگر و شرایط استخراج، ۵۸×۶۰ متر محاسبه شد. شکل ۵ توزیع عیار تخمینی کانسار در مرکز هر بلوک را بعد از تخمین کریجینگ معمولی بلوکی نشان می‌دهد. با این روش متوسط عیار کانسار سولفات سدیم بخش مرکزی کویر میقان ۲۴/۹۸ درصد و براساس مقدار واریانس تخمین ^{2}(٪) ۱/۱۹ محاسبه شده برای تخمین عیار، حدود بالا و پایین متوسط عیار کانسار در سطح اعتماد ۹۵ درصد نیز به ترتیب برابر با ۲۵/۰۳ درصد و ۲۴/۹۳ درصد به‌دست آمد. با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های مختلف نمایشی، همانند ترسیم نمودار پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر تخمینی در یک دستگاه محورهای مختصات و بررسی میزان پراکندگی نقاط، حول خط نیمساز ربع اول، می‌توان تصویری کیفی از حدود اعتبار تخمین به دست آورد (احمدی، ۱۳۸۸). شکل ۶ میزان خطای داده‌های عیارسنجی سولفات سدیم را با استفاده از یک تکنیک ترسیمی، نشان می‌دهد. در این شکل نمودار پراکندگی مقادیر واقعی، در مقابل مقادیر تخمینی نشان داده شده است. هرچه پراکندگی نقاط، حول خط نیمساز ربع اول، کمتر باشد و یا تعداد نقاط بیشتری روی این خط قرار گیرند، دقت تخمین، بالاتر خواهد بود. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که تخمین‌ها، تا حدود زیادی رضایت‌بخش می‌باشند. برای محاسبه ذخیره ماده‌معدنی، ابتدا بایستی مساحت سطح ماده‌معدنی (S_b) در هر بلوک بعد از تخمین بلوکی تعیین گردد. بعد از محاسبه سطح ماده معدنی، بایستی حجم ماده معدنی در هر بلوک محاسبه شود که حجم هر بلوک (V_b) از حاصل‌ضرب سطح بلوک در ضخامت ماده معدنی آن بلوک، به‌دست می‌آید (رندو، ۱۹۸۱). برای محاسبه ضخامت ماده معدنی بلوک‌ها از روش تخمین عکس مجذور فاصله (احمدی، ۱۳۹۴؛ مدنی، ۱۳۷۳)، با شعاع تجسس ۲۰۰۰ متر استفاده شد. بدین ترتیب ضخامت متوسط بلوک‌ها در حدود ۲/۵۷ متر با انحراف معیار ۰/۲۳ متر به دست آمد. وزن کانسنگ هر بلوک (W_b) نیز با ضرب‌کردن حجم بلوک در وزن مخصوص ماده معدنی به‌دست می‌آید و در نهایت وزن خالص ماده معدنی هر بلوک، از طریق رابطه ۹ قابل محاسبه است.

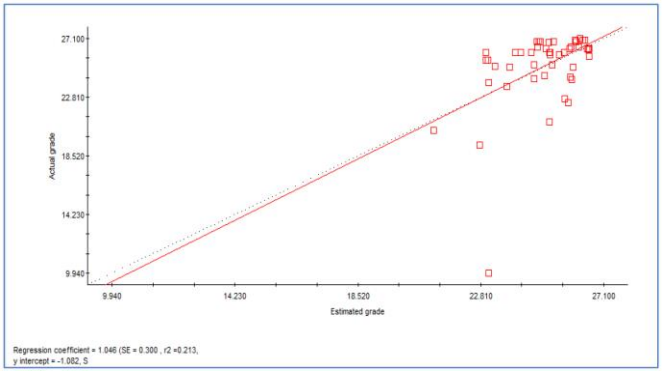
رابطه ۹)

$$P_b=W_b \times C_b$$

که در این رابطه C_b عیار محاسبه شده برای هر بلوک می‌باشد. میزان ذخیره قطعی خالص ماده معدنی در کل منطقه نیز از جمع وزن خالص ماده معدنی تمام بلوک‌ها برابر با ۵۷۸۰۹۵۲/۶ تن به دست آمد. براساس مقدار متوسط واریانس تخمین ^{2}(٪) ۱/۱۹ محاسبه شده برای عیار، حدود بالا و پایین ذخیره تخمینی در سطح اعتماد ۹۵٪ نیز به ترتیب برابر با ۵۲۷۵۲۲۱/۴ تن و ۶۲۸۶۶۸۳/۸ تن می‌باشد.



شکل ۵: نمایش توزیع عیار تخمینی بلوک‌های کانسار سولفات سدیم با روش تخمین کریجینگ معمولی بلوکی.



شکل ۶: نمودار پراکندگی مقادیر واقعی در مقابل مقادیر تخمینی داده‌های عیارسنجی سولفات سدیم.

مقایسه

برای ارزیابی نتایج حاصل از تخمین و دست-یابی به نوعی دقت تخمینی، نتایج تخمین ذخیره به دو روش هندسی با استفاده از نرم-افزار سرفر (میانگین ۴ روش) و روش زمین آماری کریجینگ با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج کلی محاسبه ذخیره به روش‌های مذکور در جدول ۴ خلاصه شده است. داده-های این جدول نشان می‌دهند که اختلاف میزان ذخیره محاسبه شده با استفاده از این دو روش بسیار زیاد و در حدود ۲۵۵۷۳۷/۹ تن می‌باشد. به هرجهت روش زمین‌آماری کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار فضایی منطقه، از دقت بالاتری برخوردار بوده و نتایج آن قابل اعتمادتر است.

جدول ۴: خلاصه نتایج تخمین ذخیره به روش هندسی با استفاده از نرم‌افزار سرفر و روش زمین آماری کریجینگ.

روش محاسبه ذخیره	متوسط عیار (درصد)	میزان ذخیره خالص ماده معدنی (تن)	اختلاف وزن خالص ماده معدنی (تن)	اختلاف وزن خالص ماده معدنی (درصد)
نرم افزار Surfer	۲۵/۱	۳۲۲۳۵۸۱/۷	۲۵۵۷۳۷۰/۹	۴۴/۲
کریجینگ	۲۴/۹۸	۵۷۸۰۹۵۲/۶		

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی ذخیره بخش مرکزی کانسار سولفات سدیم حوضه رسوبی میقان اراک از روش هندسی با استفاده از نرم‌افزار سرفر و روش زمین آماری کریجینگ استفاده شد که نتایج حاصل از آن را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود. با استفاده از روش هندسی، متوسط عیار کانسار از طریق میانگین‌گیری وزن‌دار نمونه-های چاهک‌ها، برابر با ۲۵/۱ درصد و متوسط میزان ذخیره برابر با ۳۲۲۳۵۸۱/۷ تن به دست آمد. با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ براساس پردازش اولیه آماری داده‌های عیارسنجی و ضخامت سولفات سدیم چاهک‌های اکتشافی منطقه مورد مطالعه، داده‌های عیارسنجی، توزیع لاگ نرمال و داده‌های ضخامت، توزیع نرمال نشان دادند. واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی برای داده‌های منطقه، مشخص نمود که داده‌های عیارسنجی دارای ساختار فضایی بوده و اغلب آنها با مدل‌های واریوگرام تئوری از نوع کروی و خطی انطباق یافتند اما داده‌های ضخامت ماده معدنی، قالب فاصله‌ای نداشته و از خود روند نشان دادند. به منظور تخمین داده‌های عیارسنجی از روش تخمین لاگ کریجینگ معمولی بلوکی با اندازه بلوک‌های ۵۸×۶۰ متر و برای داده‌های ضخامت از روش عکس مجذور فاصله با شعاع تجسس ۲۰۰۰ متر استفاده شد. متوسط عیار سولفات سدیم کل کانسار مورد مطالعه، ۲۴/۹۸ درصد با میانگین انحراف استاندارد ۱/۰۹ درصد، ضخامت متوسط بلوک‌ها در حدود ۲/۵۷ متر با انحراف معیار ۰/۲۳ متر و میزان ذخیره قطعی ماده معدنی برابر با ۵۷۸۰۹۵۲/۶ تن به دست آمد. مقایسه نتایج تخمین ذخیره به روش هندسی با استفاده از نرم-افزار سرفر و روش زمین آماری کریجینگ، نشان می‌دهد که بین نتایج حاصل از این دو روش، اختلاف زیادی وجود دارد ولی یقیناً نتایج روش کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار فضایی منطقه، به علت ناریب بودن و پایین بودن میزان خطای محاسبات، دقیق‌تر بوده و از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است.

پانوشت

1-Mirabilite
2-Tenardite
3-Glauberite
4-Bloedite
5-Trapezoidal
6-Simpson
7-Cut & Fill
8-Isotropic
9-Anisotropic
10-Reduced Sums of Squares
11-Coefficient of determination

منابع

-احمدی، ر.، ۱۳۸۸. کاربرد الگوهای آماری در ارزیابی ذخایر معدنی با نگرشی بر معدن مس علی آباد یزد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۰۲ ص.

-احمدی، ر.، ۱۳۹۴. کلیات زمین آمار، جزوه درسی زمین آمار برای دانشجویان کارشناسی-ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۰۳ ص.

-احمدی، ر.، ۱۳۹۵. درسنامه دیجیتال (الکترونیکی) ارزیابی ذخایر معدنی، دانشگاه صنعتی اراک، ۲۵۰ ص.
-حسنی‌پاک، ع.ا.، ۱۳۷۷. زمین‌آمار (ژئواستاتیستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ ص.
-حسنی‌پاک، ع.ا. و شرف الدین، م.، ۱۳۸۰. تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷ ص.
-ساداتی، ع.ا.، ۱۳۷۱. گزارش طرح اکتشافات نیمه تفصیلی کانسار سولفات سدیم کویر میقان اراک، وزارت معادن و فلزات.
-مدنی، ح.، ۱۳۷۳. مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر- واحد تفرش، ۶۵۹ ص.
-مدنی، ح.، ۱۳۷۶. اصول پی جویی، اکتشاف و ارزیابی ذخایر معدنی، انتشارات خانه فرهنگ، ۸۱۶ ص.
-مهاجرانی، ش.، ۱۳۷۸. رسوب شناسی کویر میقان با نگرشی ویژه بر منشأ و نحوه گشترش نهشته‌های تبخیری، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران.
-هاشمی، م.، ۱۳۸۴. مدل‌سازی کانسار سولفات سدیم دریاچه میقان در استان مرکزی، کتابخانه سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

-Yates, S.R. and Warrick, A.W., 1987. Estimating soil water content using Co-Kriging, Soil Science Society of America Journal, v. 51, p. 23-30.
-Peters, W.C., 1978. Exploration and mining geology, 696 p.
-Rendu, J.M., 1981. An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation, 84 p.