



مقاله پژوهشی

مدل سازی زمین‌شناسی - اکتشافی کانسار مس نارباغی شمالی ساوه و تخمین ذخیره کانسار با استفاده از رویکردهای بلوک‌بندی، مدل شبکه دوبعدی و انباشتگی دوبعدی

رضا احمدی*

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷

چکیده

به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی زمین‌شناسی، محدودیت اطلاعات اکتشافی در دسترس، زمان‌بر و مشکل بودن محاسبات مربوطه، مدل سازی داده‌های اکتشافی کانسارهای فلزی کم‌عیار با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی قوی گریزناپذیر است. در این پژوهش، مدل سازی ریاضی سه‌بعدی زمین‌شناسی، عیار سنجی و ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی ساوه با استفاده از اطلاعات چاه‌نگار و عیار سنجی تعداد ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی با مجموع متر از حفاری ۲۴۲۵ متر با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار RockWorks صورت گرفت. برای این منظور، واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی کانسار با استفاده از نرم‌افزار SGeMS انجام شد که بر اساس آن کانسار ناهمسان‌گرد بوده و شعاع‌های بیضوی تجسس (شعاع تأثیر در جهت‌های مختلف) برابر با ۵۰، ۱۳۰ و ۴۳۳ متر به دست آمد. مدل سازی داده‌های عیار سنجی و تخمین ذخیره کانسار با استفاده از روش‌های مختلف موجود در نرم‌افزار همانند بلوک‌بندی از طریق منوی I-Data، تخمین ذخیره به روش مدل شبکه دوبعدی و انباشتگی دوبعدی برای شش رده عیار حد ۳۰۰، ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ و ۳۵۰ گرم در تن نشان می‌دهد که در برخی موارد، نتایج روش‌های مختلف با یکدیگر بسیار متفاوت است. به‌طور کلی، برای تخمین ذخیره منطقه مورد بررسی، دقت روش بلوک‌بندی از طریق منوی I-Data و روش انباشتگی دوبعدی از دیگر روش‌های موجود در نرم‌افزار بیشتر است. در مجموع، با متوسط‌گیری از میزان ذخیره و عیار متوسط محاسبه شده توسط روش‌های تخمین ذخیره مورد استفاده، ذخیره کلی کانسار به ازای عیار حد ۰/۱ در صد (۱۰۰۰ گرم در تن) حدود ۵۰۰۰۰ تن با عیار متوسط ۰/۸ درصد برآورد شد. نتایج این پژوهش به‌ویژه نحوه انتخاب مؤلفه‌های گوناگون در بخش‌های مختلف نرم‌افزار، برای مدل‌سازی دیگر کانسارهای فلزی مشابه با کانسار مورد بررسی در کمان ماگمایی ارومیه - دختر، قابل تعمیم است.

واژه‌های کلیدی: کانسار مس نارباغی شمالی ساوه، مدل سازی زمین‌شناسی - اکتشافی، واریوگرافی، تخمین ذخیره، بلوک‌بندی، مدل شبکه دوبعدی، انباشتگی دوبعدی، RockWorks

مقدمه

مهم‌ترین مراحل عملیات اکتشافی یک کانسار شامل ترسیم دقیق نقشه‌ها و مقاطع اکتشافی بر اساس فعالیت‌های اکتشافی انجام گرفته، مدل‌سازی هندسه کانسار و برآورد ذخیره نزدیک به واقعیت است (Hassanipak, 2000). هر کانسار دارای ویژگی‌هایی مانند عیار، ضخامت، عمق و مانند آنهاست که در حقیقت کانسار توسط آنها تعریف می‌شود. شناخت کامل یک کانسار، مستلزم انجام یک رشته عملیات پردازشی و مدل‌سازی داده‌ها و اطلاعات اکتشافی است. طبق تعریف، مدل‌سازی کانسار عبارت است از "برآورد متغیرهای کانسار برای نقاط بی‌شمار در محدوده‌ای تعیین شده، با مبنا قرار دادن مقادیر معلوم متغیرها برای نقاطی محدود به نام نقاط داده، به کمک الگوریتم‌ها یا روش‌های تخمین تعریف‌شده و نمایش آنها در قالب تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی مناسب" (Hassanipak, 2000). ماهیت داده‌های اکتشافی با یکدیگر متفاوت است؛ اما تمامی آنها در فرایند مدل‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

در مرحله اکتشاف کانسارها تمام مؤلفه‌های توصیفی مانند ساختار زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانه‌زایی و ساختارهای موجود در منطقه، مورد توجه هستند. بدیهی است که هرچه این شواهد بیشتر باشند، یعنی مجموعه اطلاعات اکتشافی، بیشتر و کامل‌تر باشند، فرایند مدل‌سازی کامل‌تر شده، مدل مفهومی حاصل، دقیق‌تر بوده و به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود و در نتیجه میزان احتمال دستیابی به ذخایر معدنی از نوع موردنظر بیشتر می‌شود. مدل زمین‌شناختی که شامل کلیه داده‌ها، مشاهده‌ها و بررسی‌های موجود برگردانده شده به زبان مناسب مدل است، می‌تواند تجربی (مشاهده‌ای) یا مفهومی باشد (Erickson, 1992). مدل تجربی بیانگر گردآوری، سازماندهی و یکپارچه‌سازی انواع زیادی از مشاهدات و بررسی‌های شیمیایی، کانی‌شناسی، زمین‌ساختی و مانند آن است؛ درحالی‌که مدل مفهومی تلاش می‌کند تا چگونگی توزیع و منشأ ویژگی‌های بالا را در قالب مناسبی تبیین و تشریح کند (Ataepour, 2019).

معمولاً وقتی سخن از اکتشاف یک کانسار به میان می‌آید، منظور شناسایی کلیه ویژگی‌های آن کانسار است و هنگامی که از مدل‌سازی آن کانسار بحث می‌شود در حقیقت ارائه مدل ویژگی‌های کانسار مدنظر است. مدل‌سازی کانسارها شامل انواع توصیفی-ژنتیکی، هندسی، مدل‌سازی-شبیه‌سازی زمین‌آماري، اقتصادی و ریاضی (کمی) است (Erickson, 1992). بدون شک مدل‌سازی به‌ویژه مدل‌سازی کمی شکل، اندازه و ابعاد، تعیین جهت‌یافتگی و نحوه گسترش فضایی یک ذخیره معدنی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مراحل عملیات اکتشافی است. مدل‌سازی کمی کانسارها به شناخت کامل‌تر توده‌های کانساری، ساختار آنها، نحوه جهت‌یافتگی و گسترش فضایی آنها و در نتیجه تخمین درست میزان ذخیره کمک زیادی می‌کند. این کار به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود، زمان‌بر بودن و مشکل بودن محاسبات مربوطه، با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، دقیق‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود. در این پژوهش، مدل‌سازی کمی سه‌بعدی زمین‌شناسی، اکتشافی (عیارسنجی) و معدنی (میزان ذخیره) کانسار مس نارباغی شمالی ساوه با استفاده از رویکردهای نرم‌افزار RockWorks 16 انجام شده است. به‌طور کلی مجموعه‌های نرم‌افزاری تجاری موجود در بازار به دو دسته نرم‌افزارهای دارای کاربرد در زمینه معدن‌کاری و نرم‌افزارهای ویژه معدن‌کاری تقسیم می‌شوند. RockWorks یکی از نرم‌افزارهای خاص کاربری‌های زمین‌شناسی و معدن است (Revuelta, 2017). این نرم‌افزار اولین بار در سال ۱۹۸۵ توسط شرکت RockWare توسعه یافت و نسخه فعلی (۲۰۲۰) محصول مشترک شرکت‌های مختلف تولید نرم‌افزارهای علوم‌زمین از قبیل شرکت‌های RockWare، ESRI، Microsoft، Fortner Research، Visualogic و Golden Software است. نرم‌افزار RockWorks نرم‌افزاری جامع و بسیار قوی برای تصویرسازی، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی است و انجام مدل‌سازی‌های مختلف بر اساس نوع و میزان داده‌ها و اطلاعات اکتشافی در دسترس و نیز تهیه برش‌های

مختلف از درون ماده معدنی را برای زمین شناسان، مهندسان معدن و کاربران علوم زمین امکان پذیر می سازد. این نرم افزار شامل مجموعه ای از نرم افزارهای مختلف است که هر یک، کاربرد و کارایی خاصی دارند و به صورت نرم افزاری جامع برای تجزیه و تحلیل داده های سطحی و اطلاعات به دست آمده از گمانه های اکتشافی برای فعالیت های زمین شناسی و معدنی، ایجاد شده است (Tutorial- RockWare, 2016). به طور خلاصه RockWorks شامل چهار بخش شبکه، نقشه، مدل های جامد و احجام است. البته به دلیل حجم بالای منوها و کاربری ها، اغلب کاربران غیر حرفه ای، با سردرگمی و مشکلاتی مواجه می شوند. یکی از مهم ترین قابلیت های نرم افزار RockWorks طیف وسیع الگوریتم ها و روش های هندسی (کلاسیک) و زمین آماری تخمین ذخیره است و از مزایای آن در مقایسه با دیگر نرم افزارهای تخصصی همانند Datamine، سادگی و سرعت عمل نسبی، کاربر پسند بودن (نمایش گزینه ها و مؤلفه های مختلف مربوطه در هر بخش به وسیله شکل و شمایل) و قدرت گرافیک بالای آن است. نرم افزار RockWorks در پروژه های کاربردی مختلف و نیز پژوهش های معدودی در زمینه زمین شناسی و معدن به کار گرفته شده است. به عنوان نمونه تصویر سازی سه بعدی مقطعی از تونل Tunberget و زون های شکستگی مهم با ترکیب سطح توپوگرافی، اندازه گیری هایی در سطح صفحات شکستگی همراه با سطوح دایک های دلریتی، نتایج حاصل از مدل سازی مغناطیسی دایک های دلریتی و داده های نقشه برداری تونل توسط شرر (Surur, 2008) انجام شد. وی از نرم افزارهای RockWorks و ArcGIS برای پردازش داده ها و تصویر سازی سه بعدی ارتباط هندسی میان ساختارهای زمین شناسی هدف، دایک های دلریتی و تونل استفاده کرد. احمدی و افزالی (Ahmadi and Afzali, 2017) برای به تصویر کشیدن مطلوب ماده معدنی سرب و روی در کانسار اره گیجه رباط خمین، از قابلیت های گرافیکی نرم افزار Rockworks استفاده کردند. آنها برای این منظور از تمام

اطلاعات اکتشافی موجود اعم از اکتشافات غیرمستقیم (برداشت های ژئوفیزیکی) و مستقیم (گمانه های عمیق) بهره بردند. احمدی و سادات کودهی (Ahmadi and Sadat, 2018) ذخیره توده کانسار سرب و روی اره گیجه رباط خمین در استان مرکزی را با استفاده از روش های زمین آماری به کمک نرم افزار SGeMS تعیین کرده و آنها را به سه رده ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن، رده بندی کردند. آنها برای شناخت بهتر کانسار و ماهیت ماده معدنی، چاهنگار سنگ شناسی تمام گمانه ها و مدل سه بعدی سنگ شناسی محدوده کانسار را با استفاده از نرم افزار Rockworks ترسیم کردند. احمدی و رضاپور (Ahmadi and Reazpour, 2019) برای تجسم تغییرات فضایی ویژگی های الکتریکی کانسار مس نارباغی شمالی ساوه و پیشنهاد مناسب ترین موقعیت عملیات حفاری، مدل شبه سه بعدی تغییرات داده های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه، بارپذیری و عامل فلزی محدوده کانسار را بعد از مدل سازی وارون، با استفاده از نرم افزار Rockworks تهیه کردند.

در محدوده مورد بررسی، فعالیت های اکتشافی نسبتاً گسترده ای نیز انجام شده است. اولین بررسی ها و گزارش های محدوده اکتشافی مس نارباغی شمالی، به سال ۱۹۶۹ مربوط می شود که آثار کانی زایی به صورت کالکوسیت و مالاکیت درون واحدهای آندزیت پورفیری گزارش شده است (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015). تهیه نقشه زمین شناسی - معدنی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ توسط اشرف پور (Ashrafpour, 2010) از شرکت مس سازان زاگرس، برداشت های ژئوفیزیکی با روش های مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی در محدوده کانسار (۱۳۸۸ و ۱۳۸۹) توسط شرکت مس سازان زاگرس، نمونه برداری از رخنمون های سطحی، حفاری ترانشه ها و گمانه های اکتشافی از دیگر فعالیت های اکتشافی در منطقه است.

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه

محدوده اکتشافی نارباغی شمالی در شمال خاوری استان مرکزی

و در فاصله ۲۶ کیلومتری شمال‌خاوری شهرستان ساوه در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ زاویه بین طول جغرافیایی $36^{\circ} 32'$ تا $38^{\circ} 34'$ و عرض جغرافیایی $50^{\circ} 17/94'$ تا $50^{\circ} 35'$ شمالی واقع است. بر اساس تقسیم‌بندی ساختاری ایران توسط علوی (Alavi, 1991) و اشتوکلین (Stoecklin, 1968)، محدوده اکتشافی مس نارباغی شمالی در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه- دختر واقع است. برخی از پژوهشگران، کانسار مس نارباغی را یک کانسار طلا، نقره و مس از نوع اپی‌ترمال حدواسط می‌دانند (Ghaderi et al., 2016; Fazli et al., 2019) و در برخی از منابع نیز کانسار مس نارباغی شمالی از نوع پورفیری معرفی شده است (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015).

رخمون‌های سنگی منطقه شامل توالی‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن با ترکیب آندزیت و توف بلورین- خرده سنگی است که توسط توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب دیوریت و مونزو دیوریت الیگو سن قطع شده‌اند. توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب دیوریت و مونزو دیوریت میزبان اصلی کانه‌زایی مس در این محدوده اکتشافی است. این کانسار دارای جهت‌یافتگی تقریبی شمال‌باختری- جنوب‌خاوری است. کانه‌زایی بیشتر به صورت رگه و رگچه‌های سیلیسی- سولفیدی حاوی پیریت و کالکوپیریت، رگه‌های برشی شامل سولفید و سولفوسالت‌ها به دو صورت افشان و پرکننده شکستگی‌ها (رگه و رگچه‌ای) و کانی‌های کربناتی مس شامل مالاکیت و آزوریت مشاهده می‌شود (Ghaderi et al., 2016). زون‌های دگرسانی وسیع شامل دگرسانی‌های فلیک (سریستی)، آرژیلیک و پروپلیتیک است (Fazli et al., 2019). دگرسانی فلیک به وسیله جایگزینی سریست و کوارتز به جای بیشتر کانی‌های سیلیکاتی سنگ ساز مشخص می‌شود. فرایندهای هوازدگی و اکسیداسیون در زون فروشت باعث تبدیل بخشی از کانی‌های سولفیدی به کانی‌های کربناتی و نیز اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به همراه جارو سیت شده است. دگرسانی پروپلیتیک آخرین فاز دگرسانی و گسترده‌ترین دگرسانی موجود در محدوده اکتشافی

است که به صورت جانبی دگرسانی‌های دیگر را دربر می‌گیرد و به وسیله کانی‌های کلریت و اپیدوت مشخص می‌شود (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015).

مهم‌ترین و بزرگ‌ترین توده نفوذی در محدوده اکتشافی شمال نارباغی دارای ترکیب گرانیت تا گرانودیوریت پورفیری است که با رنگ خاکستری خود به‌خوبی از واحدهای دربرگیرنده به‌ویژه آندزیت متمایز است. این توده به صورت تپه‌های فرسایش یافته برون‌زد دارد و بلندترین ارتفاعات محدوده اکتشافی را نیز تشکیل می‌دهد. توده یادشده، بافت دانه‌ای تا پورفیری دارد و آنکلاوهای از آندزیت در داخل این سنگ‌ها دیده می‌شود (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015). در بخش شمالی و مرکزی محدوده، توده‌های نفوذی میکروگرانیته زرد تا قهوه‌ای روشن و صورتی‌رنگ دیده می‌شود. این توده‌های نفوذی در بخش‌هایی حاوی رگچه‌های سیلیسی، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت، مالاکیت و تنانیت است و بیشتر کارهای اکتشافی از جمله حفاری‌ها در این توده‌های نفوذی انجام شده است. از نظر ساختاری نیز به‌طور کلی تحولات چندانی در محدوده اکتشافی دیده نمی‌شود. گسل‌های ناحیه مورد بررسی دارای دو جهت عمومی شمال‌خاور- جنوب‌باختر و شمال‌باختر- جنوب‌خاور بوده، گسل‌های شمال‌باختر- جنوب‌خاور اغلب کهن‌تر بوده و گاه توسط گسل‌های شمال‌خاور- جنوب‌باختر جابه‌جا شده‌اند. بزرگ‌ترین گسلی که در منطقه دیده می‌شود، گسلی با روند تقریبی شمالی- جنوبی است که در غرب محدوده اکتشافی وجود دارد. گویا عوامل ساختاری تأثیر چندانی در کانه‌زایی ندارند و کانه‌زایی بیشتر تابع نوع سنگ‌شناسی است. با توجه به نوع کانه‌زایی که بیشتر به صورت افشان در متن سنگ رخ داده، تأثیر گسل‌ها بیشتر به صورت محلی بوده است. این گسل‌ها به صورت محلی باعث غنی‌شدن کانه‌زایی مس شده‌اند.

بررسی عملیات اکتشافی منطقه مورد بررسی

در این محدوده، تعداد ۱۱ رشته ترانشه اکتشافی به طول ۲۳۴ متر

کالکوسیت، کالکوپیریت، مالاکیت و تنانتیت حفاری شده اند.

روش شناسی پژوهش

هدف اصلی از انجام این پژوهش، مدل سازی ریاضی سه بعدی زمین شناسی (سنگ شناسی، دگرسانی، کانه زایی (عیارسنجی) و ذخیره معدنی کانسار مس نارباغی شمالی ساوه با استفاده از اطلاعات چاه نگار گمانه های اکتشافی و عیارسنجی مغزه های حفاری آنها و تهیه مقاطع عرضی گوناگون با استفاده از روش های درون یابی مناسب است. این کار با استفاده از اطلاعات اکتشافی تمام گمانه های اکتشافی منطقه به کمک قابلیت های نرم افزار RockWorks و از طریق الگوریتم های ریاضی موجود در این نرم افزار انجام شده است. ترسیم مسیر در ست و استفاده صحیح کاربران از قابلیت های مختلف نرم افزار Rockworks و روش های مختلف تخمین ذخیره موجود در نرم افزار، انتخاب در ست مؤلفه ها و روش های تخمین ذخیره به طور متناسب با نوع کانسار، نوع و میزان داده ها و اطلاعات اکتشافی موجود نیز از جمله اهداف این پژوهش است.

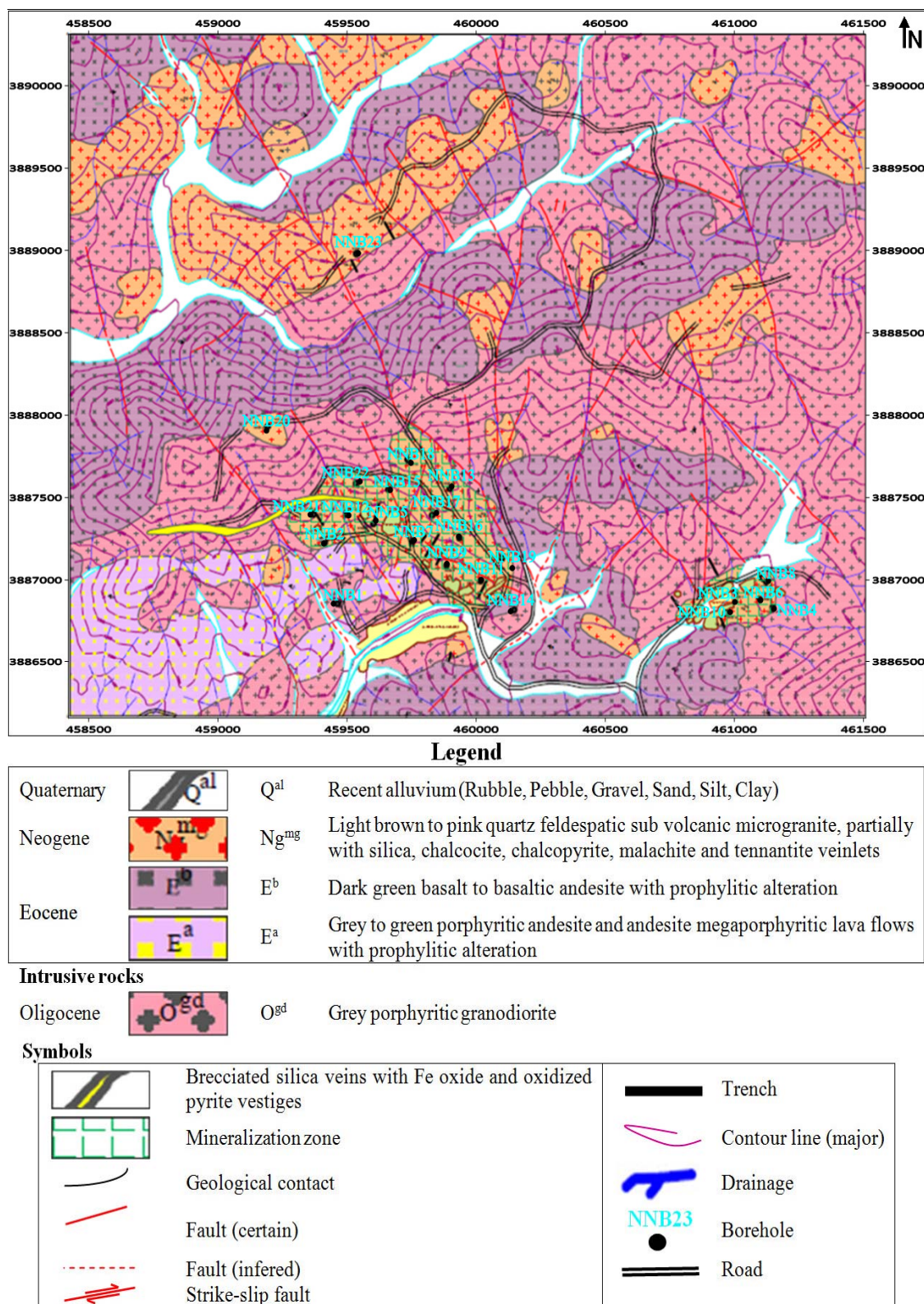
مدل سازی کانسار مس نارباغی شمالی با استفاده

از نرم افزار RockWorks

در این بخش ابتدا با استفاده از نرم افزار RockWorks و از طریق ترسیم چاه نگار^۱ گمانه ها، مقاطع عرضی سنگ شناسی، دگرسانی و عیارسنجی ماده معدنی و نیز ترسیم مدل سه بعدی سنگ شناسی، دگرسانی و مدل سه بعدی (صلب) عیارسنجی کانسار، شناخت کاملی از کانسار مس نارباغی شمالی ساوه انجام شد. برای ارائه تصویری از تغییرات سنگ شناسی، دگرسانی و عیارسنجی ماده معدنی درون کانسار، برش هایی در آن ایجاد شده است. در شکل ۲، موقعیت پنج پروفیل اکتشافی در راستاهای مختلف بر روی گمانه های اکتشافی در محدوده کانسار مس نارباغی شمالی، انتخاب و ترسیم شده است. در این شکل پروفیل ها بگونه ای انتخاب شده است که شاخص بوده و هر پروفیل تا حد ممکن، بیشترین تعداد گمانه را دربرداشته باشد.

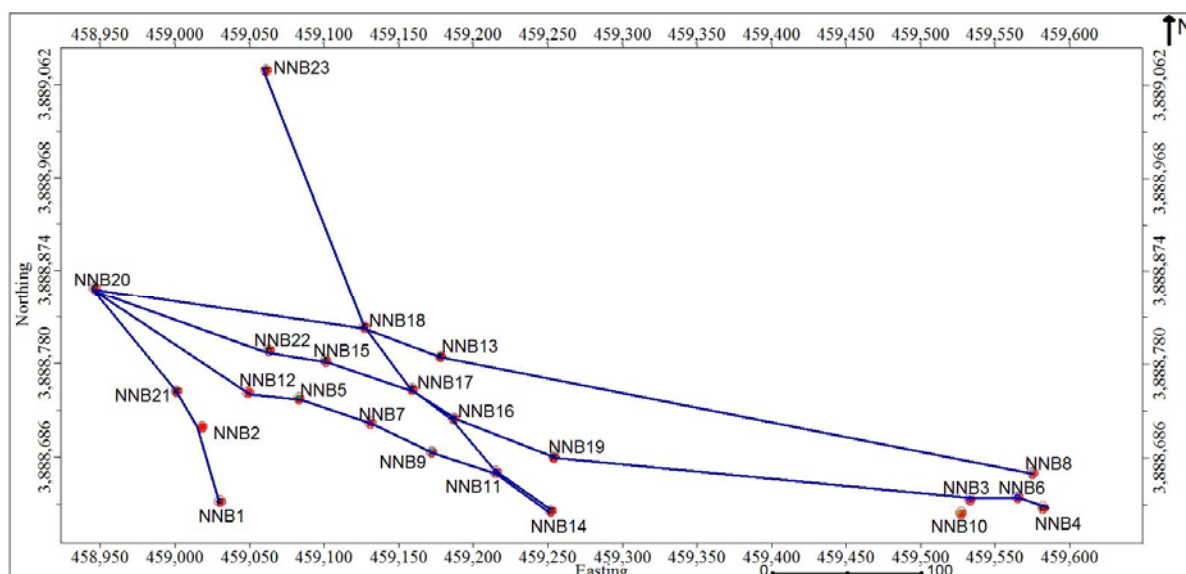
در واحدهای کوارتز مونزودیوریتی - مونزوگرانیتی حفر شده است. پس از انجام عملیات مرحله پی جویی و بررسی های زمین شناسی و ژئوفیزیکی در منطقه، دو محدوده امیدبخش کانی سازی مس به صورت دو استوک کوارتز مونزونیتی با دگرسانی فلیک و پتاسیک، شناسایی شده و تعداد ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی قائم به نام های NNB1 تا NNB23 در محدوده دو استوک شامل ۵ گمانه در استوک شرقی و ۱۸ گمانه در استوک غربی حفاری شده است. در مجموع حدود ۲۴۲۵ متر گمانه اکتشافی حفاری شده است که عمق حفاری ها از ۵۲ متر (گمانه NNB9) تا ۲۲۴ متر (گمانه NNB1) متغیر است (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015). از تمامی مغزه های به دست آمده از گمانه ها، برای بررسی های پتروگرافی، کانه نگاری و تجزیه شیمیایی، مغزه گیری و برداشت انجام شد. تعداد ۵۵۸ نمونه برای تعیین فراوانی عنصر مس، مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت که نتایج تجزیه شیمیایی نمونه ها عیار مس را بین ۲ گرم در تن تا ۱۲/۲ درصد متغیر نشان می دهد. کانی سازی در مغزه های حاصل از حفاری های این محدوده بیشتر به صورت مالاکیت، آزوریت، پیریت و کمتر کالکوپیریت و کالکوسیت است که با بافت های پراکنده و رگه و رگچه ای در سنگ میزبان دیده می شود (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015).

در شکل ۱، موقعیت پراکندگی گمانه های اکتشافی کانسار مس نارباغی شمالی بر روی نقشه توپوگرافی - زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ منطقه (محدوده با مساحت هشتاد هکتار) نشان داده شده است. طبق این شکل، بیشتر گمانه های اکتشافی در دو منطقه مجزا در بخش های کم ارتفاع و در دامنه جنوبی این رشته کوه متمرکز هستند. گمانه NNB20 درست در قله جنوب باختر این رشته کوه، حفاری شده و تنها گمانه NNB23 به دور از سایر گمانه ها در دامنه شمالی رشته کوه قرار دارد. همچنین تمامی گمانه ها (به جز گمانه NNB14) در توده نفوذی نیمه عمیق میکروگرانیت به طور بخشی همراه با رگچه های سیلیس،



شکل ۱. موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی کانسار مس نارباغی شمالی بر روی نقشه توپوگرافی - زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ منطقه

Fig. 1. Location map of exploration boreholes in the North-Narbaghi copper deposit on topographic-geological map with the scale of 1:1000



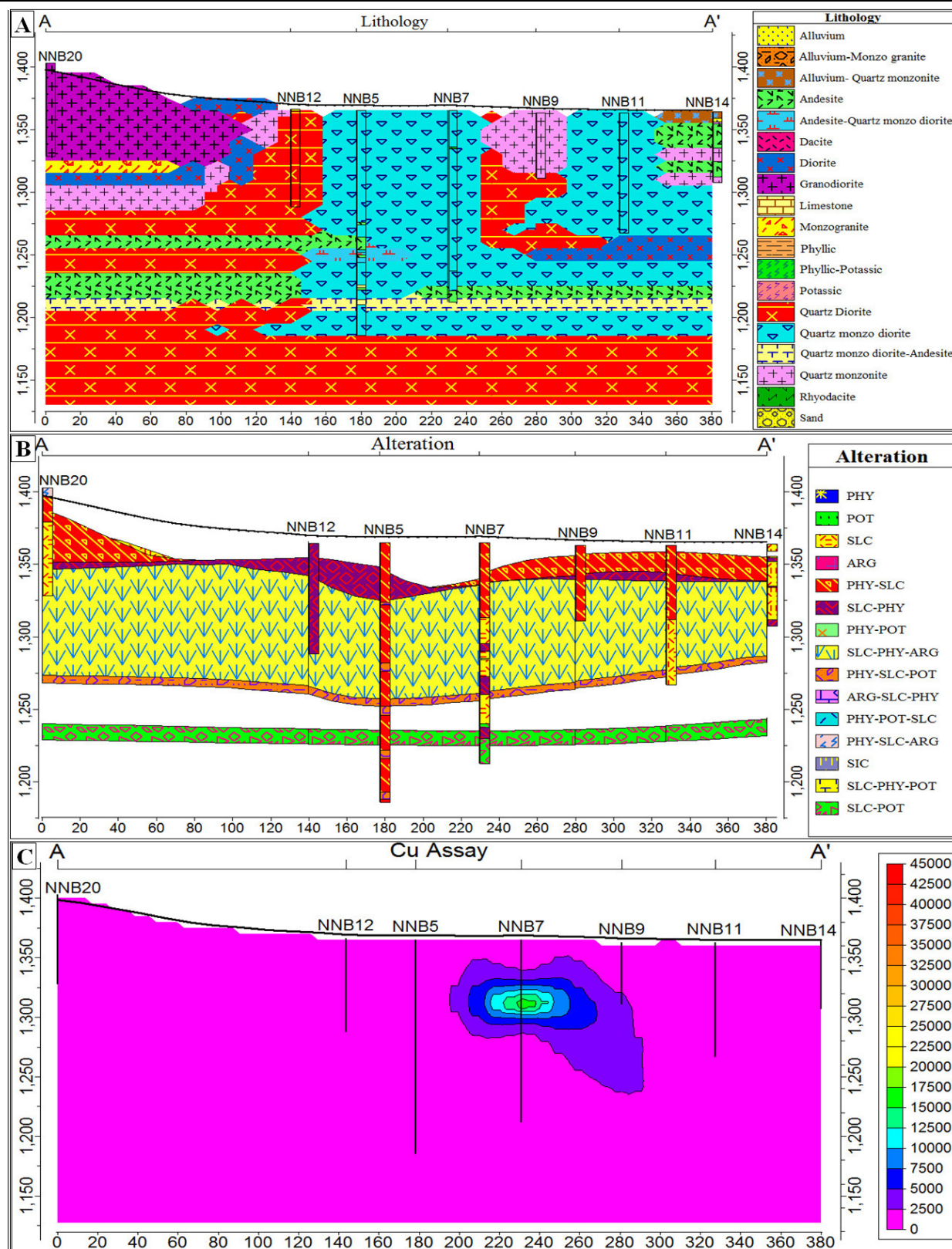
شکل ۲. نقشه موقعیت پروفیل های اکتشافی انتخاب شده در محدوده کانسار مس نارباغی شمالی

Fig. 2. Location map of selected exploration profiles in the North-Narbaghi copper deposit.

زمین، انتخاب شد. درون یابی مقادیر خارج از ردیف نیز همانند عملیات برون یابی است که به درون یابی کامل و به نقشه درآمدن تمام محدوده درون حد و مرز نیم رخ عرضی منجر می شود. در غیر این صورت، بخش هایی از درون محدوده در نزدیکی مرزها به نقشه درنیامده و به صورت خالی خواهد ماند. در ترسیم نیم رخ عرضی دگرسانی برای درون یابی سطوح، از الگوریتم عکس مجذور فاصله برای شبکه بندی^۴ استفاده شده است. برای ترسیم نیم رخ عرضی عیارسنجی از الگوریتم عکس مجذور فاصله وزن دار پیشرفته^۵ در ساخت مدل جامد عیارسنجی و از قاعده بولین^۶ یعنی در نظر گرفتن ۱ برای کان و صفر برای باطله استفاده شده است. در الگوریتم عکس مجذور فاصله وزن دار پیشرفته، امکان وزندهی فاصله با توان متفاوت در جهت های مختلف، وجود دارد. در این پژوهش، توان فاصله در راستای عمقی به دلیل وجود توالی مغزه های حفاری دارای عیارسنجی و طول تقریباً یکسان، ۲ و در راستای افقی به دلیل فاصله های زیاد گمانه ها از یکدیگر، ۱ منظور شده است.

به عنوان نمونه شکل ۳-۱، نیم رخ عرضی اطلاعات سنگ شناسی، ۳-۲، دگرسانی و ۳-۳، عیارسنجی نظیر پروفیل (AA') گذرنده از هفت گمانه اکتشافی NNB11، NNB14، NNB9، NNB5، NNB7، NNB12 و NNB20 در شکل ۲ را نشان می دهد. در ترسیم نیم رخ عرضی سنگ شناسی برای طرح اختلاط سنگ شناسی^۱ از الگوریتم اختلاط تصادفی^۲ به همراه درون یابی مقادیر خارج از ردیف^۳ استفاده شده است. این الگوریتم مدل سازی سنگ شناسی خاص در RockWorks، به طور کلی برای پر کردن فضای خالی بین چاه نگارها استفاده می شود. این فرایند مدل سازی ابتدا برای برون یابی به کار می رود. به این صورت که برنامه بر اساس فاصله های سنگ شناسی مشاهده ای در چاه نگارها، در کل محدوده عملیات برون یابی را به طرف خارج از چاه نگارها انجام می دهد؛ سپس درون یابی بین داده ها صورت می گیرد. الگوریتم اختلاط تصادفی به دلیل پیچیدگی های زمین شناسی منطقه و امکان حضور هر نوع واحد سنگ شناسی در فاصله های بین گمانه های اکتشافی (که بدون اطلاعات اکتشافی هستند) ناشی از فعالیت های مختلف درون

- | | |
|-----------------------|---|
| 1. Lithoblending | 4. Gridding |
| 2. Randomize Blending | 5. Advanced inverse distance weighted (IDW) |
| 3. Outliers | 6. Boolean |

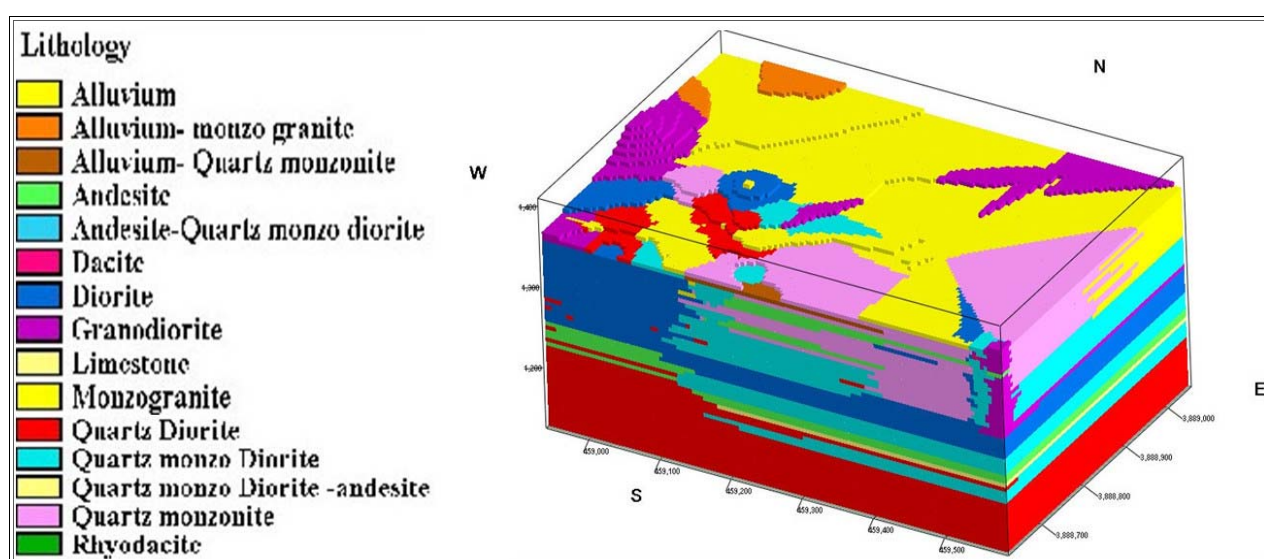


شکل ۳. نیم رخ عرضی A: سنگ شناسی، B: دگرسانی و C: عیارسنجی نظیر پروفیل AA' با ۷ گمانه در شکل ۲ در کانسار مس نارباغی شمالی

Fig. 3. Cross-section of A: lithology, B: alteration, and C: assay data for profile AA' with 7 boreholes from Figure 2 in the North-Narbaghi copper deposit

سنگی موجود در محدوده کانسار بیشتر شامل آندزیت پورفیری تا مگاپورفیری است. سطح محدوده نیز بیشتر توسط آبرفت، کوارتز مونزونیت، گرانودیوریت، دیوریت و کوارتز مونزودیوریت پوشیده شده است. به طور کلی، از لحاظ سنگ شناسی، گمانه ها اغلب از کوارتز دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، مونزوگرانیت، دیوریت، کوارتز مونزونیت و آندزیت تشکیل شده اند.

شکل ۴، مدل سه بعدی سنگ شناسی منطقه را نشان می دهد که جهت ساخت این مدل، برای طرح اختلاط لیتولوژی از الگوریتم اختلاط تصادفی به همراه درون یابی مقادیر خارج از ردیف استفاده شده است. طبق این شکل، از نظر لیتولوژی واحدهای سنگی کوارتز دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، مونزوگرانیت و دیوریت بیشترین سهم را در منطقه مورد بررسی دارند. واحدهای



شکل ۴. مدل سه بعدی سنگ شناسی کانسار مس نارباغی شمالی

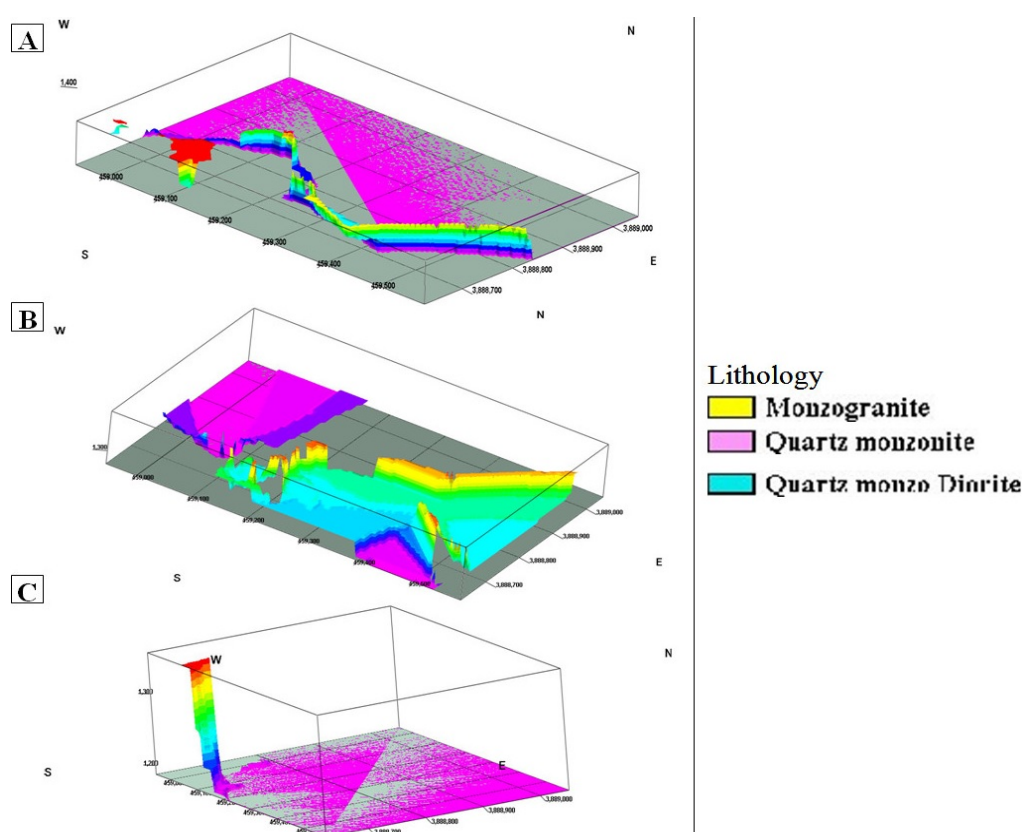
Fig. 4. 3D lithology model of the North-Narbaghi copper deposit

مورد بررسی، هیچ گونه دایکی مشاهده نمی شود و با توجه به نتایج مدل سازی های شکل ۵، به نظر می رسد که دایک های احتمالی نامبرده به سطح زمین نرسیده اند. واحدهای سنگی این شکل نیز مطابق راهنمای رنگی واحدهای سنگی شکل ۴ است. در شکل ۶، مدل سه بعدی دگرسانی کانسار مس نارباغی شمالی نشان داده شده است. برای تولید این مدل از اطلاعات دگرسانی چاه نگار گمانه های اکتشافی به کمک مغزه های حفاری استفاده شده و در فاصله های بین گمانه ها و نبود اطلاعات اکتشافی برای درون یابی سطوح، از الگوریتم عکس مجذور فاصله برای شبکه بندی استفاده شده است. طبق این شکل، تقریباً تمام انواع دگرسانی در سنگ های محدوده مورد بررسی رخ داده و در

از آنجایی که توده نفوذی مونزوگرانیت - کوارتز مونزودیوریت میزبان اصلی کانی زایی در محدوده اکتشافی شمال نارباغی است، در شکل ۵-A، B و C، مدل سه بعدی سه نوع واحد سنگی به ترتیب مونزوگرانیت، کوارتز مونزونیت و کوارتز مونزودیوریت نیز به طور جداگانه نشان داده شده اند. با توجه به این شکل مشاهده می شود که توده نفوذی مونزوگرانیت به صورت نواری موج دار دایک مانند در راستای شرقی - غربی در محدوده وجود دارد. توده نفوذی کوارتز مونزونیت اغلب در بخش شرقی و مرکزی محدوده تمرکز دارد و واحد کوارتز مونزودیوریت به طور خیلی محدود در قسمت جنوب غربی محدوده همانند یک دایک یافت می شود. البته در سطح محدوده

سطح محدوده اغلب دگرسانی سیلیسی-فلیک^۱ مشاهده می‌شود. دگرسانی سیلیسی را می‌توان در بسیاری از قسمت‌ها به‌ویژه همراه با دگرسانی فلیک و آرژیلیک مشاهده کرد؛ اما گستردگی تأثیر آن تنها در آندزیت بازالتی قابل نقشه‌برداری

است. در واقع آندزیت بازالتی تحت تأثیر دو دگرسانی قرار گرفته و دگرسانی سیلیسی احتمالاً هم‌زمان با دگرسانی فلیک رخ داده است (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015).



شکل ۵. مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی A: مونزوگرانیت، B: کوآرتز مونزونیت و C: کوآرتز مونزودیوریت به عنوان میزبان اصلی کانی‌زایی در محدوده اکتشافی مس نارباغی شمالی

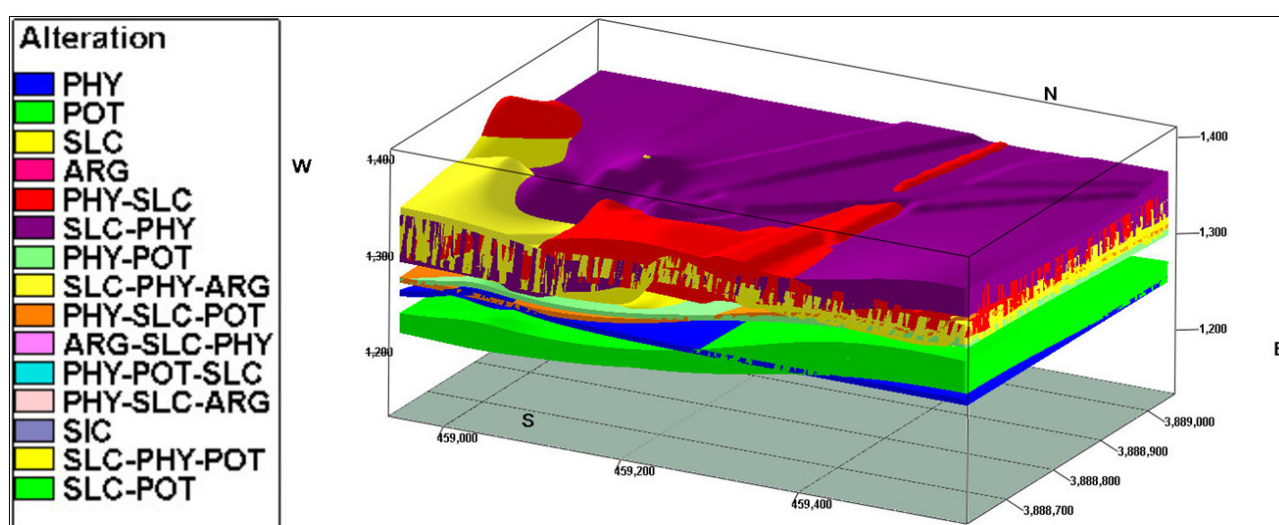
Fig. 5. 3-D lithology model of A: monzo granite, B: quartz-monzonite, and C: quartz-monzodiorite as the main host rock of mineralization in the exploration region of the North-Narbaghi copper

در شکل ۷، مدل سه‌بعدی (صلب) عیارسنجی کانسار مس نارباغی شمالی نشان داده شده که برای ساخت این مدل نیز از الگوریتم عکس مجذور فاصله وزن‌دار پیشرفته، استفاده شده است. راهنمای رنگی عیاری در این شکل، تغییرات میزان عیار ماده معدنی در گمانه‌های اکتشافی منطقه را بر حسب گرم در تن

نشان می‌دهد. طبق این شکل، تغییرات عیار منطقه مورد بررسی با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار ۴۵۰۰۰ گرم در تن به ۱۸ محدوده رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. بر اساس این شکل بخش اعظم محدوده دارای عیار بسیار پایین (کمتر از ۲۵۰۰ گرم در تن) است که با رنگ بنفش مشخص شده و

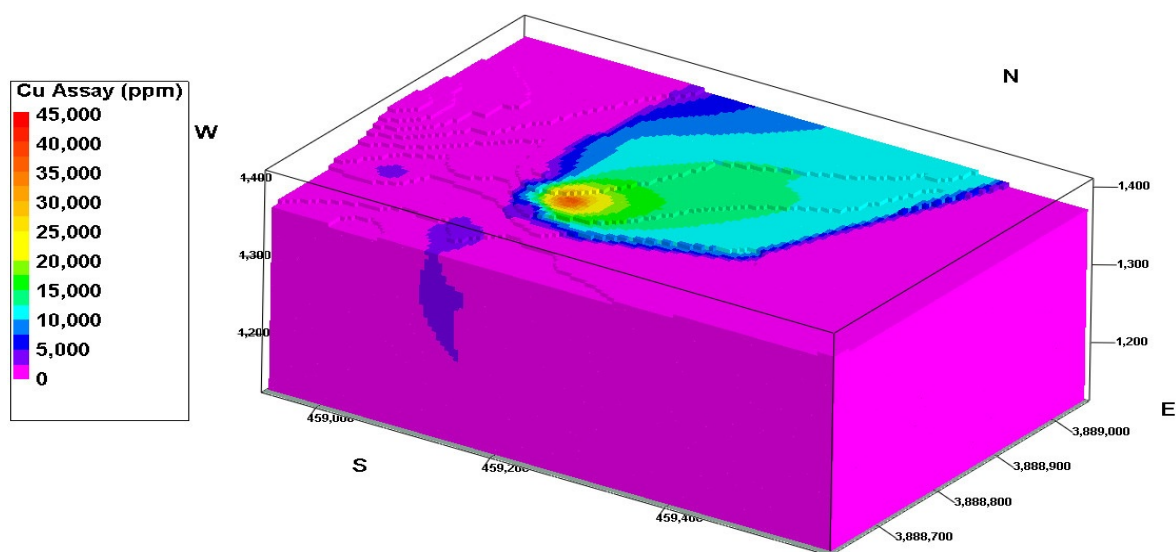
۱۰۰۰۰ گرم در تن) که با طیف رنگی از آبی روشن تا قرمز در شکل نمایش داده شده است، از وسعت زیادی برخوردار نیست. بدیهی است که دقت تمام مدل های ایجاد شده، به تعداد گمانه های اکتشافی و میزان و دقت اطلاعات اکتشافی موجود بستگی دارد.

محدوده با عیار نسبتاً بالا (بیش از ۲۵۰۰ گرم در تن) در بخش مرکزی محدوده قرار دارد. با وجود نبود اطلاعات (گمانه های) اکتشافی کافی در نیمه شمالی محدوده، گسترش ماده معدنی (البته با عیار کمتر نسبت به مرکز محدوده) به سمت شمال و شمال شرقی محدوده است. چنان که در این شکل مشاهده می شود؛ به طور کلی محدوده حاوی ماده معدنی (با عیار بیش از



شکل ۶. مدل سه بعدی دگرسانی کانسار مس نارباغی شمالی

Fig. 6. 3D alteration model of the North-Narbaghi copper deposit.



شکل ۷. مدل سه بعدی عیارسنجی کانسار مس نارباغی شمالی

Fig. 7. 3D assay data model of the North-Narbaghi copper deposit

تخمین ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با RockWorks

تخمین ذخایر معدنی به روش‌های گوناگونی انجام می‌شود که تفاوت این روش‌ها، بیشتر در دقت و سرعت الگوریتم محاسبه و داده‌های مورد نیاز آن روش است (Ahmadi, 2010). از آن جایی که ذخایر معدنی در سطح زمین یا در اعماق آن، به شکل‌های بسیار متفاوتی یافت می‌شوند، انتخاب روش محاسبه ذخیره، تابع وضعیت ماده معدنی و ویژگی‌های کارهای اکتشافی است (Madani, 1997; Ahmadi, 2019). ذخایر معدنی بر اساس محدودیت‌های کمی از جمله درجه اعتبار ذخیره محاسبه شده به سه گروه اصلی قطعی^۱، احتمالی^۲ و ممکن^۳ رده‌بندی می‌شوند (Goovaerts, 1997; Madani, 1997; Annels, 2012). در این سه گروه، رده قطعی، بیشترین سطح اعتماد را دارد و به دنبال آن رده احتمالی و در انتها رده ممکن با کمترین سطح اعتماد دیده می‌شود. برای تقسیم‌بندی ذخایر به رده‌های مشخص از معیارهای مختلفی همانند واریانس تخمین، تعداد نمونه‌های شرکت‌کننده در تخمین، فاصله نمونه‌ها تا بلوک و غیره استفاده می‌شود (Young, 2008; Annels, 2012; Ahmadi and Sadat Koodehi, 2018).

در نرم‌افزار RockWorks محاسبه حجم ماده معدنی از دو طریق امکان‌پذیر است. یکی از طریق پنجره Borehole Manager، منوی I-Data، زیرمنوی Volumetrics ... و چهار مسیر دیگر در پنجره Utilities با عناوین Ez-Volume...، 2D (Grid، Model)، Grade Block Model، Grade، Thickness (GT) Grid ... و Compute Grade-Thickness Volume & Mass قرار دارند که همگی زیرمجموعه منوی اصلی Volumetrics هستند. در این پژوهش، از روش‌های دقیق‌تر موجود در نرم‌افزار و متناسب با شرایط کانسار مورد بررسی، بهره‌گرفته شد. تخمین ذخیره با تمام روش‌های موجود در نرم‌افزار (برای مقایسه) صورت گرفت؛ اما از آوردن نتایج روش‌های کلاسیک ساده، معمول و با دقت کمتر

(همانند رویکرد مثلث‌بندی Delaunay در بخش Ez-Volume...)، خودداری شد.

در محاسبه ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با تمام روش‌های مورد استفاده، فقط از اطلاعات ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی عمیق استفاده شد؛ زیرا نمی‌توان ارتباط چندان منطقی و معناداری بین داده‌های کارهای اکتشافی سطحی (ترانشه‌های اکتشافی) و عمقی (گمانه‌های اکتشافی) در کانسار برقرار کرد. در تمام موارد وزن مخصوص متوسط ماده معدنی نیز ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015) منظور شد. همچنین برای دستیابی به مؤلفه‌های تخمین همانند شعاع‌های تجسس برای تخمین‌های هر چه در دست‌تر در ارزیابی عیار و تناژ کانسار، از نتایج تجزیه و تحلیل ساختار فضایی (واریوگرافی) کانسار توسط نرم‌افزار SGeMS (Remy et al., 2006; Bohling, 2007; Remy et al., 2009) استفاده شد.

واریوگرافی کانسار

برای شناسایی ساختار فضایی، تعیین وضعیت همسان‌گردی یا ناهمسان‌گردی کانسار و انجام تخمین‌های سه‌بعدی عیار در مراحل بعدی، واریوگرافی در منطقه مورد بررسی به این شکل انجام شد که از آزمون ۰ و ۱۲۰ تا ۱۶۰ و ۲۷۰ تا ۲۸۵ درجه هر پنج درجه یک واریوگرام و از شیب ۰ و ۵۰ تا ۹۰ درجه از هر پنج درجه با گام‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار SGeMS (در فضای سه‌بعدی) ترسیم‌شد و در نهایت تعداد ۳۰۰ واریوگرام به‌دست آمد که در شکل ۸، تعدادی از واریوگرام‌های امتدادی ترسیم‌شده در منطقه مورد بررسی نشان‌داده شده است. نمودارهای شکل ۸، نشان می‌دهند که مقادیر واریوگرام‌های تجربی محاسبه‌شده برای محدوده مورد بررسی تاحدودی پراکنده هستند و این موضوع در ارتباط با ماهیت ذاتی کانسار و پیچیدگی‌های زمین‌شناسی آن است. همچنین با توجه به

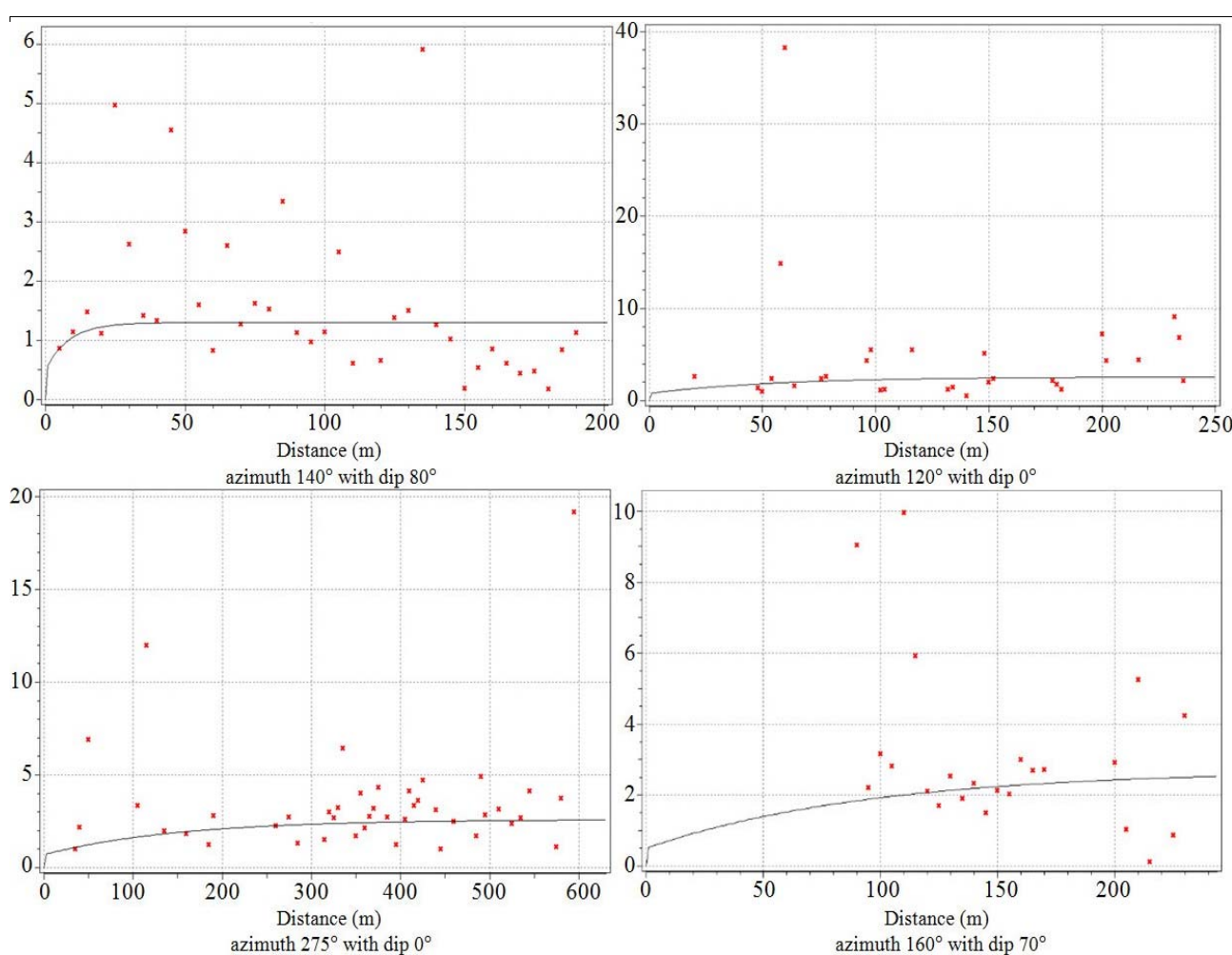
1. Measured

2. Indicated

3. Inferred

دارای شعاع ۱۸۰ متر و در راستای عمقی دارای شعاع ۶۰ متر است. بنابراین در این پژوهش، بر اساس نتایج واریوگرافی و اطلاعات و شناخت نویسنده مقاله از وضعیت کانسار مورد بررسی به دلیل باز دیدهای صحرایی، مقادیر شعاع های تجسس (تأثیر) متناظر با رده های ذخایر از نوع قطعی، احتمالی و ممکن به ترتیب برابر با ۵۰، ۱۳۰ و ۴۳۳ متر منظور شد.

واریوگرام های شکل ۸، مشاهده می شود که اغلب واریوگرام های تجربی محدوده مورد بررسی با واریوگرام های تئوری از نوع کروی انطباق یافته اند و کانسار ناهمسان گرد است. بر اساس واریوگرافی انجام شده در منطقه نارباغی شمالی، بیضوی تجسس در راستای آزیموت ۲۷۵ درجه دارای شعاع ۴۳۳ متر با زاویه شیب ۵ درجه نسبت به افق، در راستای آزیموت ۵ درجه



شکل ۸. واریوگرام های امتدادی ترسیم شده در راستاهای مختلف در منطقه نارباغی شمالی

Fig. 8. Directional variograms drawn in the variety of directions for the North-Narbaghi area

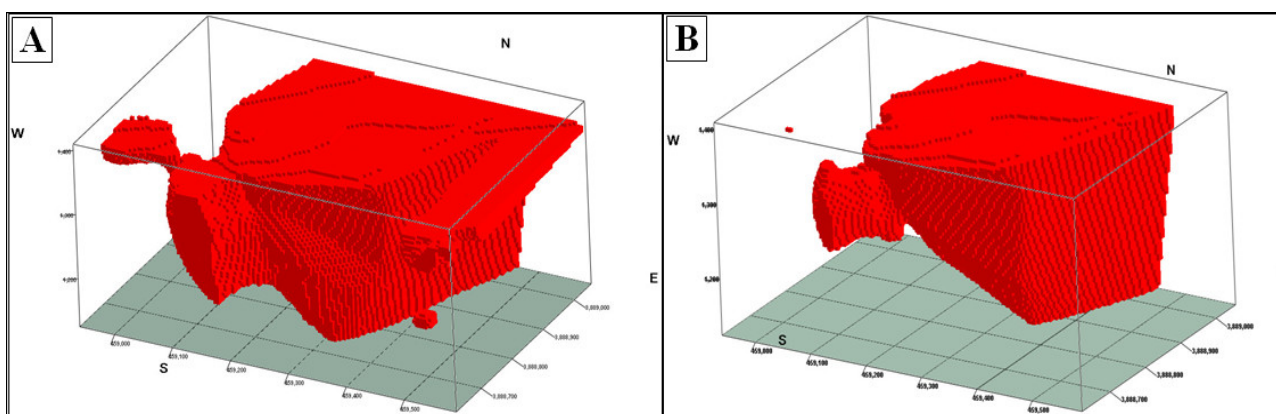
نامنظمی هستند. برای تخمین ذخیره در ست توده های کانساری به ویژه با شکل های هندسی نامنظم، در بسیاری از موارد لازم است که ابتدا مدل صلب (جامد) کانسار ایجاد شود و سپس

تخمین ذخیره از طریق منوی I-Data

در این روش، برای محاسبه ذخیره، مدل بلوکی کانسار ساخته می شود. معمولاً توده های کانساری دارای شکل های هندسی

به عنوان نمونه، مدل بلوکی کانسار به ازای عیار حدهای ۱۰۰۰ و ۳۵۰۰ گرم در تن، در شکل ۹ نشان داده شده است. این مدل بلوکی با استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه آماره‌های طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی محدوده و بر اساس قاعده بولین یعنی در نظر گرفتن ۱ برای کانه (مقادیر بزرگ‌تر یا مساوی عیار حد) و صفر برای باطله (مقادیر کوچک‌تر از عیار حد) ساخته شده است. در مدل بلوکی شکل ۹-B، اندازه و ابعاد محدوده غربی ماده معدنی نسبت به محدوده شرقی در مقایسه با مدل بلوکی شکل ۹-A، به مراتب کوچک‌تر شده و در حال محو شدن است. نتایج محاسبه میزان حجم و ذخیره ماده معدنی با استفاده از مدل بلوکی به ازای عیارهای حد مختلف در جدول ۱ خلاصه شده است. در این جدول عیار متوسط به‌روش میانگین‌گیری وزن‌دار داده‌های عیارسنجی گمانه‌ها بر اساس طول مغزه‌های حفاری، محاسبه شده است.

بلوک‌بندی کانسار صورت گیرد. به عبارت دیگر، شکل هندسی نامنظم باید به صورت شکل هندسی منظم تبدیل شود تا محاسبه دقیق حجم امکان پذیر شود. یک مدل بلوکی از یک گروه بلوک‌های منظم تشکیل می‌شود که به هریک ویژگی‌هایی از قبیل عیار و یا کدهای مشخصاتی دیگر نسبت داده می‌شود. سپس در مراحل بعد با استفاده از مدل بلوکی ایجاد شده، تخمین میزان عیار و ذخیره کانسار صورت می‌گیرد. تمامی مراحل این فرایند برای کانسار مس نارباغی شمالی برای شش عیار حد^۱ ۳۵۰۰، ۲۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۵۰۰ گرم در تن (با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقتصادی روز و آینده) انجام شد. برای ساخت مدل بلوکی کانسار نیز ابعاد بلوک‌ها برابر با ۵×۵×۵ متر (با حجم ۱۲۵ متر مکعب) در نظر گرفته شد. این ابعاد بر اساس نوع ماده معدنی (مس)، وضعیت و اطلاعات اکتشافی کانسار و در نظر گرفتن شرایط استخراج انتخاب شد.



شکل ۹. مدل بلوکی کانسار مس نارباغی شمالی به ازای عیارهای حد A: ۱۰۰۰ و B: ۳۵۰۰ گرم در تن

Fig. 9. Block model of the North-Narbaghi copper deposit for cut-off grades of A: 1000, and B: 3500ppm

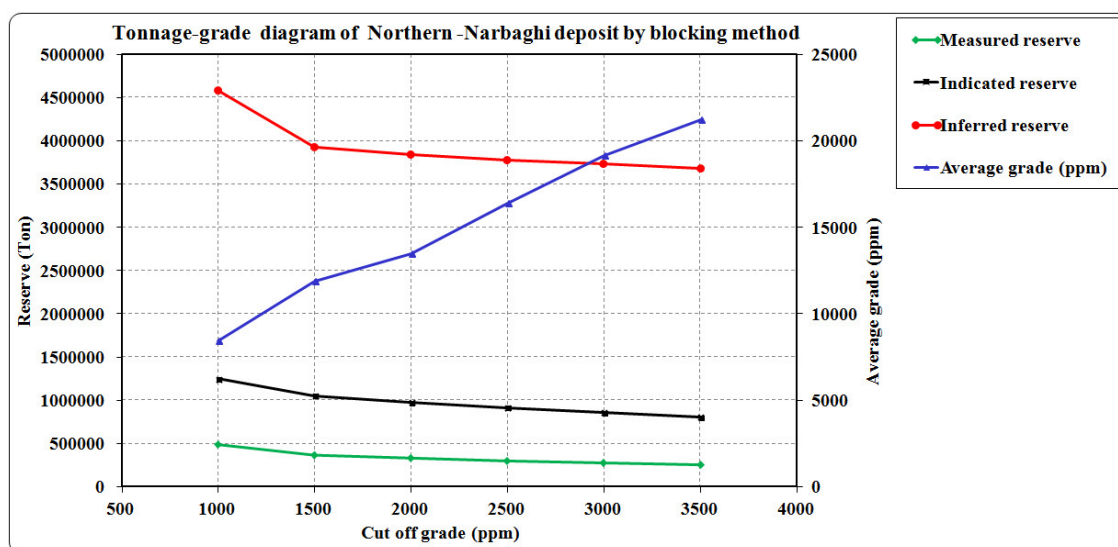
کانسار قدری بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. به‌ویژه این موضوع در مورد کانسارهای فلزی کم عیار همانند مس پورفیری بیشتر نمود پیدا می‌کند.

شکل ۱۰ نیز نمودار عیار-تناژ کانسار مس نارباغی شمالی به‌روش بلوک‌بندی با استفاده از نرم‌افزار RockWorks از طریق منوی I-Data را نشان می‌دهد. اشکال این روش آن است که به دلیل اختلاط ماده معدنی با باطله در بلوک‌ها، میزان ذخیره

جدول ۱. نتایج تخمین ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی به روش بلوک بندی با استفاده از نرم افزار RockWorks

Table 1. The results of reserve estimation for the North-Narbaghi copper deposit by blocking method using RockWorks software

Cut off grade (ppm)	Average grade (ppm)	Weight of categorized mineral deposit (ton)		
		Measured reserve	Indicated reserve	Inferred reserve
1000	8409.2	477496.8	1247586.8	4574264.8
1500	11874	370337.0	1054236.5	3936773.5
2000	13462	334098.5	975862.0	3843460.3
2500	16370	306836.8	916171.5	3784067.0
3000	19133.7	281926.8	859759.8	3735903.5
3500	21215.5	258143.3	806825.3	3691317.0



شکل ۱۰. نمودار عیار- تناژ کانسار مس نارباغی شمالی به روش بلوک بندی با RockWorks از طریق منوی I-Data

Fig. 10. Tonnage-grade diagram of the North-Narbaghi copper deposit by blocking method through I-Data menu in RockWorks

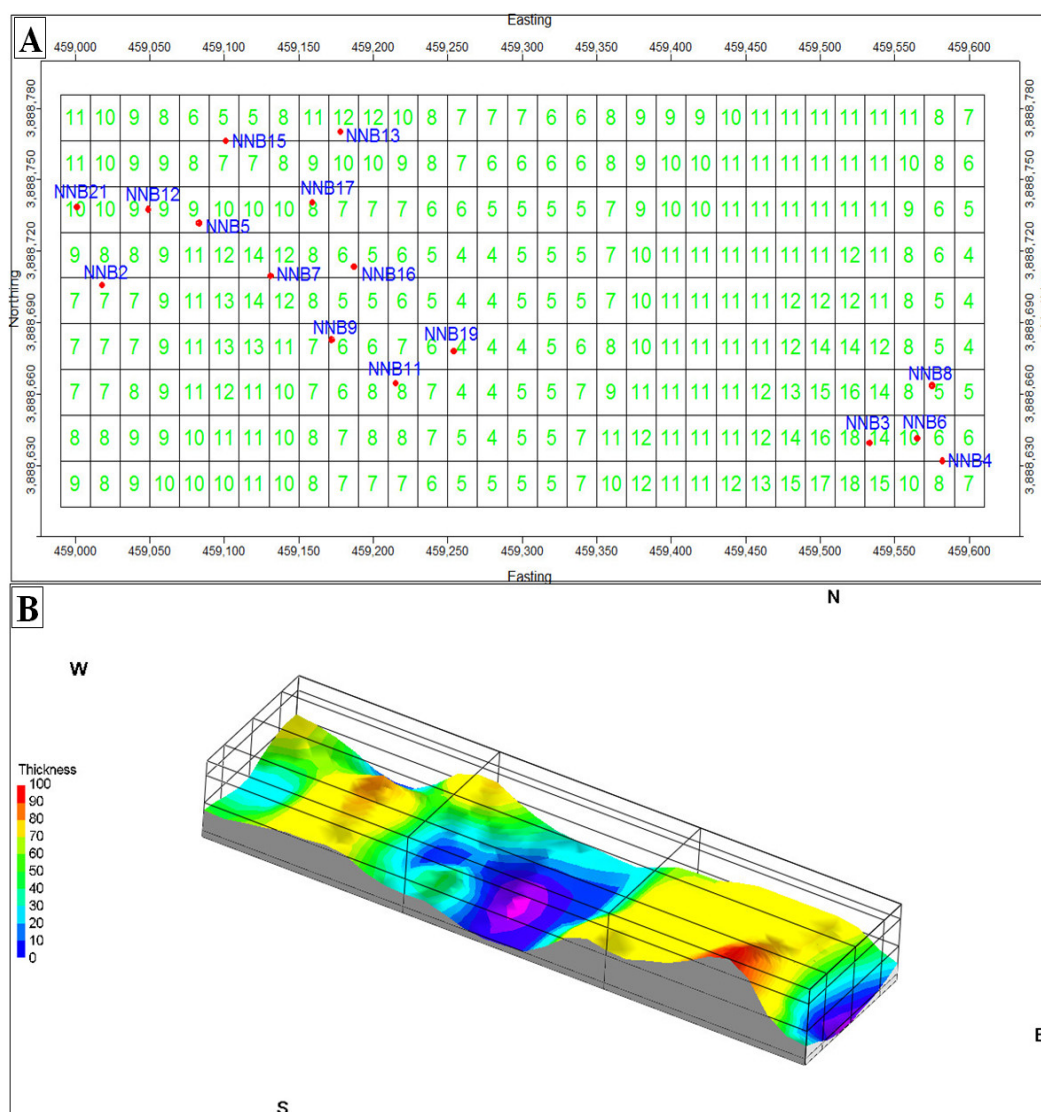
به کمک الگوریتم های مختلف شبکه بندی (همانند کریجینگ، عکس فاصله، مثلث بندی، نزدیک ترین نقطه و غیره که توسط کاربر انتخاب می شود)، یک شبکه دوبعدی از ضخامت ماده معدنی، ایجاد شده و با توجه به ضخامت ماده معدنی در شبکه، حجم محاسبه می شود. دقت حجم محاسبه شده به شدت به فاصله

تخمین ذخیره به روش مدل شبکه دوبعدی (Grid 2D(Model

در روش مدل شبکه دوبعدی حجم ماده معدنی از طریق شبکه بندی ضخامت ماده معدنی محاسبه می شود. به این صورت که با استفاده از اطلاعات ضخامت ماده معدنی در گمانه ها،

سلول نیز با روش سعی و خطا، عدد سه انتخاب شد. به عنوان نمونه در شکل ۱۱-A و B، به ترتیب شبکه‌بندی دوبعدی و سه‌بعدی ضخامت ماده معدنی به ازای عیارحد ۱۰۰۰ گرم در تن برای منطقه مورد بررسی نشان داده شده است. در شکل ۱۱-A اعداد سبز رنگ داخل هر سلول، مقدار عددی ضخامت ماده معدنی تخمینی برای آن سلول است.

آن مؤلفه حجم از گمانه وابسته است. برای تخمین ذخیره کانسار مورد بررسی از الگوریتم شبکه‌بندی (درون‌یابی) کریجینگ استفاده شد. در این روش بر اساس فاصله متوسط گمانه‌ها از یکدیگر و لحاظ کردن بیشینه یک چهارم فاصله بین گمانه‌ها برای ابعاد بلوک در راستای افق و طول غالب دو متری مغزه‌های حفاری در راستای عمقی، ابعاد سلول‌ها $20 \times 20 \times 2$ متر و تعداد داده‌های شرکت‌کننده در تخمین هر



شکل ۱۱. نمایش شبکه‌بندی A: دوبعدی و B: سه‌بعدی ضخامت ماده معدنی کانسار مس نارباغی شمالی به‌ازای عیارحد ۱۰۰۰ گرم در تن با روش تخمین ذخیره مدل شبکه دوبعدی

Fig. 11. Gridding depict of A: 2D, and B: 3D thickness of the North-Narbaghi copper deposit for cut-off grade of 1000ppm with the reserve estimation method of 2D (Grid Model)

نتایج تخمین ذخیره منطقه با این روش در جدول ۲ خلاصه شده است. مطابق شکل ۱۱ و داده های جدول ۲ مشاهده می شود که عیار متوسط و ذخیره ماده معدنی با این روش قدری بیشتر از مقدار واقعی، برآورد می شود. دلیل این امر آن است که در محدوده هایی که هیچ گونه گمانه ای حفر نشده و در نتیجه اطلاعات اکتشافی (ضخامت ماده معدنی) ندارند نیز سلول ها

تخمین زده شده و در نتیجه حضور ماده معدنی را نشان می دهند که غیر واقعی هستند. این روش تخمین برای کانسارهایی مناسب است که محدوده آنها به صورت شکل هندسی منظم مربعی یا مستطیلی بوده و با یک شبکه اکتشاف مربعی یا مستطیلی، اکتشاف شده باشند.

جدول ۲. نتایج تخمین ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با روش مدل شبکه دویعدی در نرم افزار RockWorks

Table 2. The results of reserve estimation for the North-Narbaghi copper deposit by 2D (Grid Model) method in RockWorks software

Cut off grade (ppm)	Average grade (ppm)	Total volume of mineral deposit (m ³)	Total weight of mineral deposit (ton)	Weight of categorized mineral deposit (ton)		
				Measured reserve	Indicated reserve	Inferred reserve
1000	8409.2	937282	2483799	520554.4	1143332.9	819913.6
1500	11874	813570	2155963	418656.2	1014841.2	722466.5
2000	13462	751565	1991648	338094.7	948258.1	705296.9
2500	16370	728489	1930497	305264.3	941516.4	683717.4
3000	19133.7	682672	1809083	276614.4	920596.7	611873.0
3500	21215.5	637323	1688908	254930.0	891174.3	542804.5

شکل ۱۲ نیز نمودار عیار- تناژ کانسار با روش مدل شبکه دویعدی در نرم افزار RockWorks را نشان می دهد. بر اساس داده های جدول ۲ و نمودار شکل ۱۲، میزان ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن با افزایش عیار حد، کاهش می یابد و البته مطابق انتظار، میزان ذخیره قطعی به ازای عیارهای حد مختلف، از ذخایر احتمالی و ممکن کمتر است.

که حاصل ضرب عیار در ضخامت ماده معدنی و به اختصار GT^۲ است (Madani, 1995)، استفاده می شود. برای این مؤلفه نیز یک مقدار حداقل قابل قبول که آستانه انباشتگی نامیده می شود، تعیین می شود. انتخاب مقدار این مؤلفه نه تنها به وضعیت کانسار بلکه به امکانات استخراج نیز بستگی دارد.

روش تخمین ذخیره با استفاده از مدل بلوکی عیار- شبکه انباشتگی

در این روش، مقادیر ورودی، داده های موقعیت مکانی (مختصات X و Y) تمام گمانه ها، مدل سه بعدی (جامد)

محاسبه ذخیره با استفاده از مؤلفه انباشتگی

برای ارزیابی ذخیره یک کانسار، گاهی اوقات مؤلفه عیار حد به تنهایی کافی نیست و از مؤلفه دیگری به نام تجمع یا انباشتگی^۱

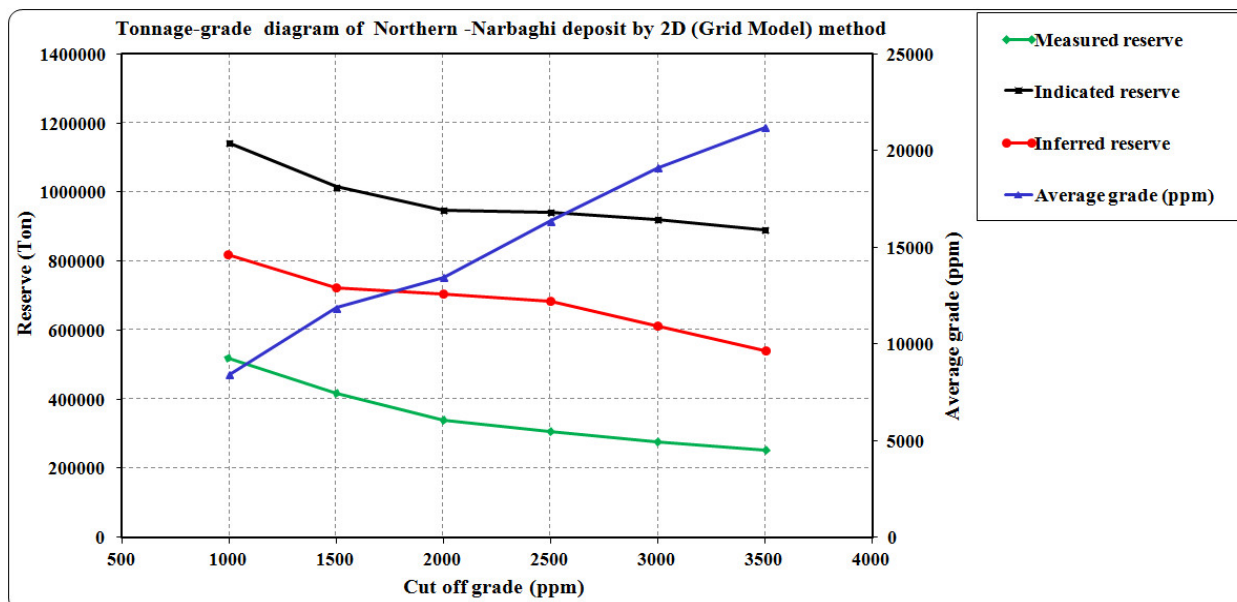
1. Accumulation
2 Grade×Thickness

قابل قبول) تعریف شده توسط کاربر پایین تر باشد، برنامه مقدار شبکه مربوطه را صفر قرار می‌دهد.

برای انتخاب درست کمترین مقدار انباشتگی قابل قبول در برنامه، آگاهی از وضعیت آماری طول مغزه‌های حفاری گمانه‌های اکتشافی منطقه مورد بررسی ضروری است. شکل ۱۳، هیستوگرام طول مغزه‌های حفاری گمانه‌های کانسار مس نارباغی شمالی را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های آماری مربوط به طول مغزه‌ها نیز در جدول سمت راست شکل، آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کمترین و بیشترین مقادیر طول مغزه‌ها به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۶ متر هستند. بر این اساس مثلاً با در نظر گرفتن کمترین مقدار عیار حد مورد استفاده در این پژوهش یعنی ۰/۱ درصد (۱۰۰۰ گرم در تن) با فرض آنکه مغزه با طول ۰/۱ متر، ماده معدنی باشد، برای آنکه طول ۰/۱ متر هم جزو ذخیره محسوب شود، مقدار حد آستانه پایین برای تخمین انباشتگی سلول‌های شبکه، $0.01 \times (0.1 \times 1000)$ متر-درصد (m%) در نظر گرفته می‌شود.

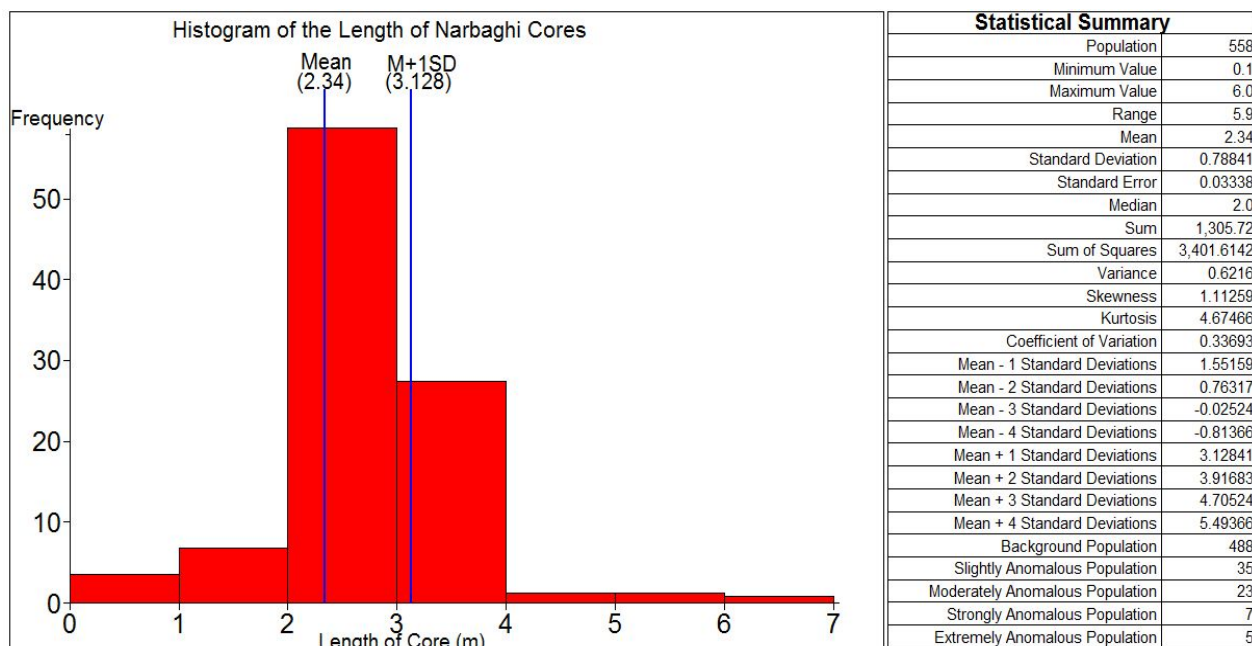
عیار سنجی ماده معدنی برحسب درصد، کمترین مقدار قابل قبول عیار و کمترین مقدار قابل قبول انباشتگی است. برنامه، یک شبکه و در نتیجه نقشه‌های دوبعدی و سه‌بعدی منحنی‌های میزان (خطوط کانتوری) انباشتگی ماده معدنی را تولید می‌کند. در نقشه‌های تولیدی، نواحی با مقادیر بالا نشان‌دهنده زون‌های کانه‌زایی ضخیم با عیار پایین یا زون‌های کانه‌زایی نازک با عیار بالا هستند.

فرایند انجام عملیات به این صورت است که برای هر ستون از سلول‌های درون مدل عیاری اولیه، مجموع مقادیر انباشتگی سلول‌ها، محاسبه شده است و به عنوان مقدار انباشتگی درون مدل شبکه، ذخیره می‌شود. این مقادیر انباشتگی سلولی، با ضرب کردن مقدار عیار در ضخامت (ارتفاع) سلول محاسبه می‌شوند. اگر مقدار عیار یک سلول از مقدار حد آستانه‌ای (مقدار حداقل عیار قابل قبول) تعریف شده توسط کاربر کمتر باشد، مقدار سلول در مجموع کل، منظور نخواهد شد. اگر مقدار مجموع نهایی، از حد آستانه‌ای (حداقل مقدار انباشتگی



شکل ۱۲. نمودار عیار-تناژ کانسار مس نارباغی شمالی با روش مدل شبکه دوبعدی در نرم‌افزار RockWorks

Fig. 12. Tonnage-grade diagram of the North-Narbaghi copper deposit with 2D (Grid Model) method in RockWorks software



شکل ۱۳. هیستوگرام طول مغزه های کانسار مس نارباغی شمالی (بر حسب متر) همراه با مؤلفه های آماری مربوطه

Fig. 13. Histogram of drill core length of the North-Narbaghi copper deposit (in meter) with the relevant statistical parameters

معدنی (بر حسب درصد) مغزه های گمانه های اکتشافی و نیز عیار پایین حد آستانه انباشتگی^۱ است. خروجی برنامه نیز یک شبکه و در نتیجه نقشه دوبعدی منحنی های میزان از ویژگی های ماده معدنی (همانند ضخامت، عیار ماده معدنی و انباشتگی) است. برای هر سلول درون مدل اولیه، میانگین حسابی و میانگین وزن دار ویژگی های ماده معدنی (ضخامت، عیار ماده معدنی و انباشتگی) محاسبه می شود. اگر برای هر سلول، مقدار عیار سلول از مقدار عیار پایین حد آستانه انباشتگی تعریف شده توسط کاربر کمتر باشد، مقدار سلول صفر منظور می شود.

در این پژوهش، ابعاد سلول های ایجاد شده برای این منظور ۱۰×۱۰ متر است و برای تخمین مقادیر ویژگی های هر سلول شبکه، از روش تخمین کریجینگ استفاده شد که تعداد داده های شرکت کننده در تخمین هر سلول نیز بر اساس روش سعی و خطا ۳۰ عدد است. مقدار ذخیره تخمینی و طبقه بندی شده در رده فاصله ای اندازه گیری شده، نشان داده شده و استنتاج (استنباط) شده، بر اساس فاصله های حدی به ترتیب ۵۰، ۱۳۰ و ۴۳۳ متر

کمترین مقادیر قابل قبول برای عیار کانسار مورد بررسی، به ازای شش مقدار عیار حدی تعریف شده ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۳۵ درصد و آستانه انباشتگی نیز به صورت متناظر با کمترین مقادیر قابل قبول عیار ضرب در حداقل مقدار طول مغزه (۰/۱ متر) به ترتیب برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۱۵، ۰/۰۲، ۰/۰۲۵، ۰/۰۳ و ۰/۰۳۵ متر-درصد تعریف شد. در تمام موارد ابعاد سلول های شبکه اولیه نیز، ۱۰×۱۰ متر انتخاب شد. به عنوان نمونه در شکل ۱۴-A و B، نقشه های به ترتیب دوبعدی و سه بعدی هم انباشتگی ماده معدنی کانسار مس نارباغی شمالی به ازای کمترین مقادیر قابل قبول عیار ۰/۱ درصد و انباشتگی نظیر آن یعنی ۰/۰۱ متر-درصد نشان داده شده است.

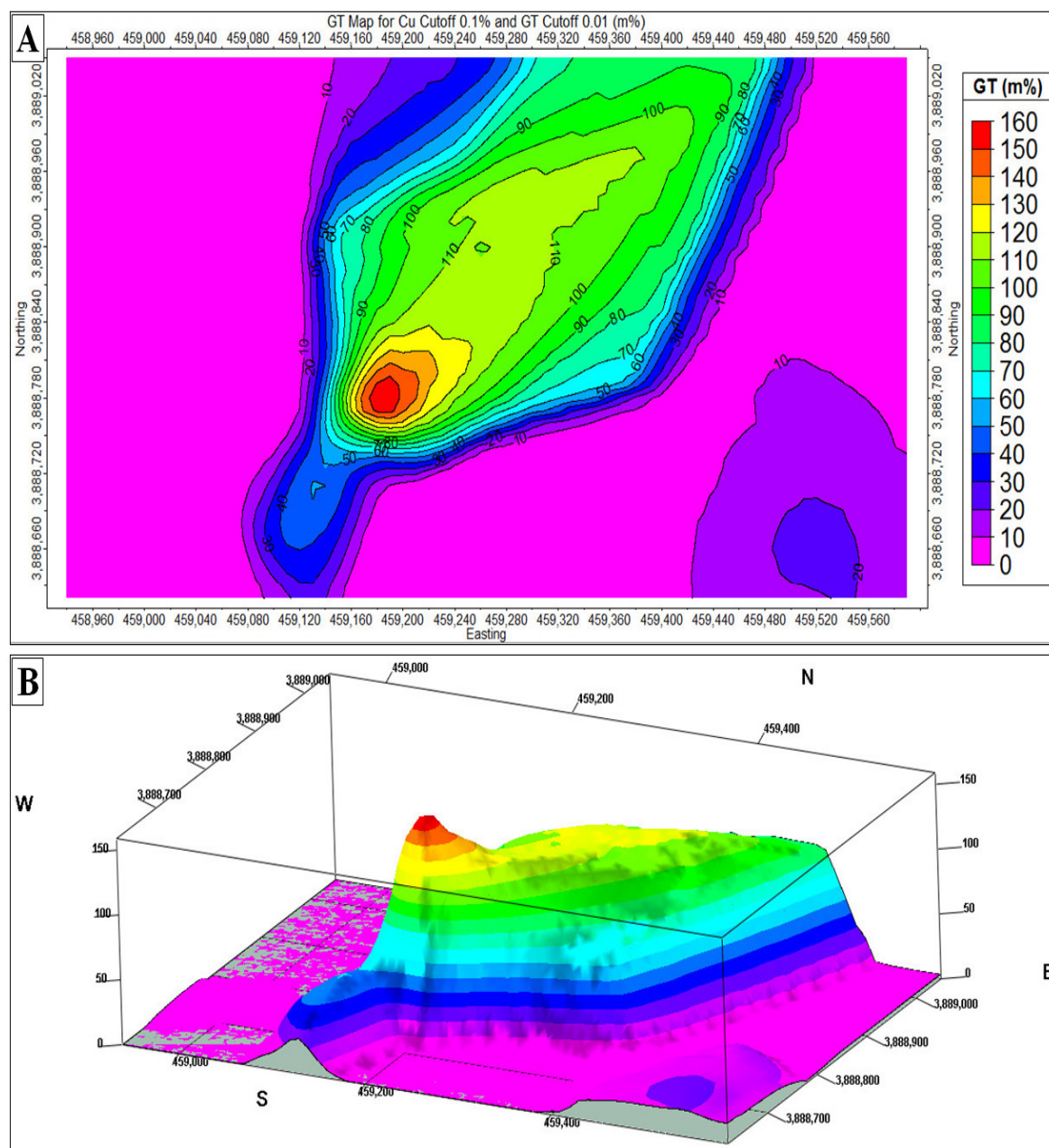
نتایج تخمین ذخیره منطقه با روش انباشتگی دوبعدی (2D GT)

در این روش مقادیر ورودی، داده های موقعیت مکانی (مختصات X و Y) تمام گمانه ها، ضخامت (بر حسب متر) و عیار ماده

1. "Low-Grade" GT Cutoff

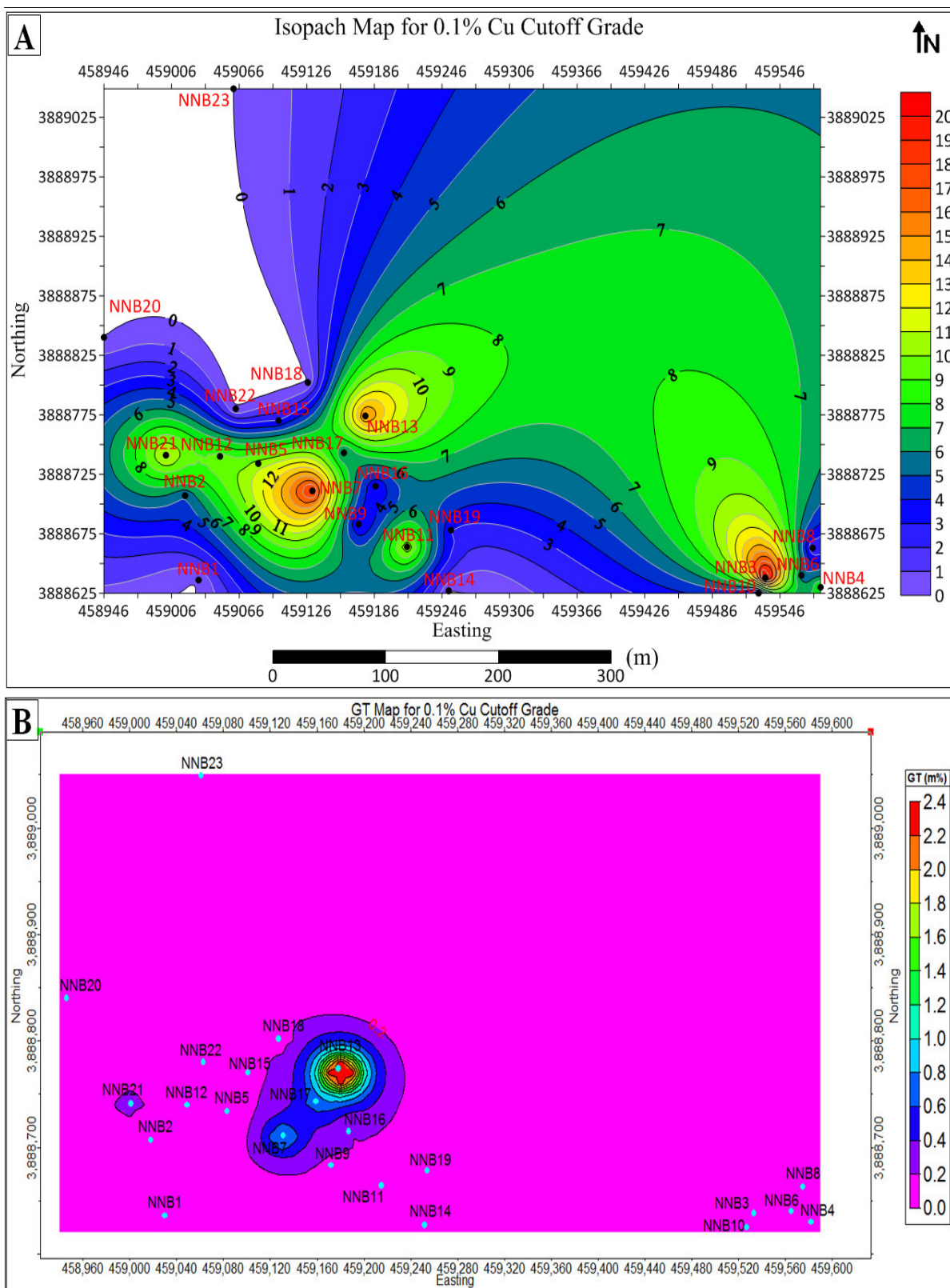
جدول ۳ نیز مؤلفه‌های ذخیره معدنی محاسبه شده به ازای عیارهای حد مختلف خلاصه شده است.

محاسبه شده است. به عنوان نمونه در شکل ۱۵-A و B به ترتیب نقشه‌های هم‌ضخامت و هم‌انباشتگی ماده معدنی کانسار مس نارباغی شمالی به ازای عیار حد ۰/۱ درصد ترسیم شده است. در



شکل ۱۴. نقشه A: دوبعدی و B: سه‌بعدی هم‌انباشتگی ماده معدنی کانسار مس نارباغی شمالی به ازای کمترین مقدار قابل قبول عیار و انباشتگی به ترتیب برابر با ۰/۱ درصد و ۰/۰۱ متر-درصد

Fig. 14. A: 2D and B: 3D mineral deposit accumulation map of the North-Narbaghi copper deposit for the minimum acceptable value of grade and accumulation equal to 0.1% and 0.01m% respectively



شکل ۱۵. نقشه A: هم ضخامت و B: هم انباشتگی ماده معدنی کانسار مس نارباغی شمالی به ازای عیار حد ۰/۱ درصد (۱۰۰۰ گرم در تن)

Fig. 15. A: isopach and B: accumulation maps of the North-Narbaghi copper deposit (up to down respectively) for cut-off grade of 0.1% (1000ppm)

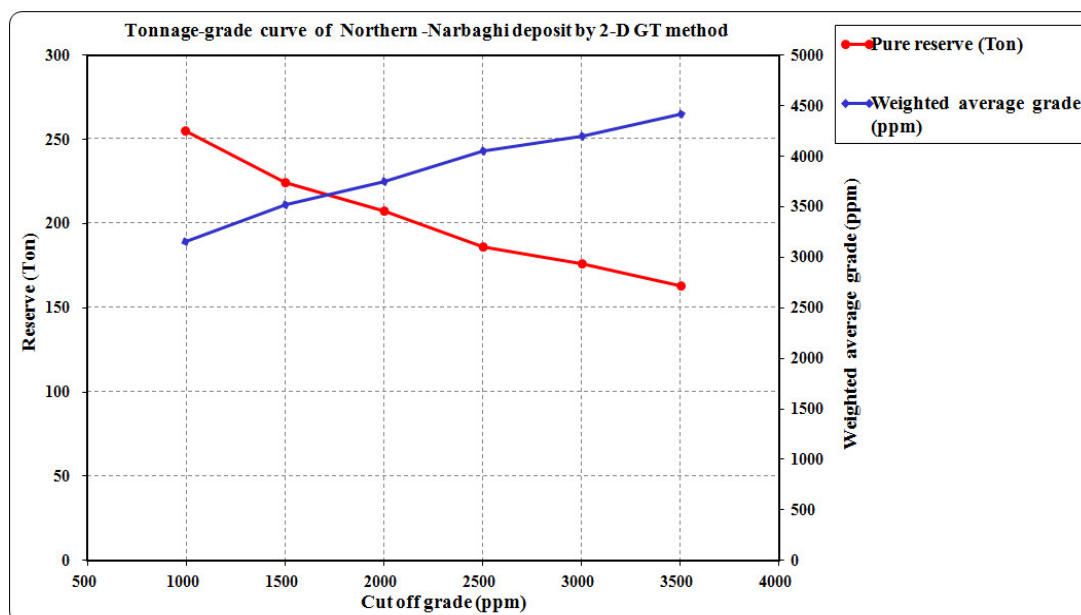
جدول ۳. مؤلفه‌های ذخیره معدنی کانسار مس نارباغی شمالی، محاسبه‌شده به ازای عیارهای حد مختلف با روش انباشتگی دوبعدی در نرم‌افزار RockWorks

Table 3. The ore reserve parameters of the North-Narbaghi copper deposit calculated for the various cut-off grades through 2D GT method in RockWorks

Parameter	Cut off grade (%)	Weighted mean thickness (m)	Weighted mean grade (%)	Weighted mean accumulation (m%)	Volume of mineral deposit (m ³)	Net weight of mineral deposit (ton)
Estimation category						
Measured (0-50m)	0.1	2.37	0.316	0.75	63437.8	255.081
Indicated (50-130m)		1.27	0.121	0.154	4894.3	14.876
Measured (0-50m)	0.15	2.39	0.352	0.842	41442.3	223.636
Indicated (50-130m)		1.3	0.142	0.185	2056.9	7.651
Measured (0-50m)	0.2	2.4	0.375	0.901	33269.3	206.803
Indicated (50-130m)		1.42	0.16	0.227	568.9	2.402
Measured (0-50m)	0.25	0.978	0.405	2.42	25156.9	185.880
Measured (0-50m)	0.3	2.42	0.42	1.017	22186.5	176.243
Measured (0-50m)	0.35	2.45	0.442	1.081	18764.8	162.533

هیچ ذخیره‌ای در رده استنتاج شده و به‌ازای مقادیر عیار حد بالا، هیچ ذخیره‌ای حتی در رده نشان داده شده، وجود ندارد که بیانگر حساسیت این روش به درجه اعتبار ذخیره است. شکل ۱۶ نیز نمودار عیار-تناژ ذخیره خالص ماده معدنی اندازه‌گیری شده مس نارباغی شمالی ساوه با روش انباشتگی دوبعدی در نرم‌افزار RockWorks را نشان می‌دهد. در این نمودار میزان عیار حد و عیار متوسط وزن‌دار برحسب گرم در تن هستند.

در محاسبه ذخیره ماده معدنی با روش انباشتگی دوبعدی، خروجی نرم‌افزار، قدری با روش‌های دیگر متفاوت است. در این روش میزان ذخیره خالص ماده معدنی برای سه رده اندازه‌گیری شده، نشان داده شده و استنتاج شده محاسبه می‌شود. در محاسبه ذخیره با این روش برای منطقه مورد بررسی، هیچ مقداری برای ذخیره رده استنتاج شده، محاسبه نشده و با افزایش مقدار عیار حد، برای ذخیره رده نشان داده شده نیز مقداری محاسبه نشده است. به عبارت دیگر، با این روش به ازای مقادیر عیارهای حد مختلف،



شکل ۱۶. نمودار عیار-تناژ کانسار مس نارباغی شمالی با روش انباشتگی دوبعدی در نرم افزار RockWorks

Fig. 16. Tonnage-grade diagram of the North-Narbaghi copper deposit by 2D GT method in RockWorks software

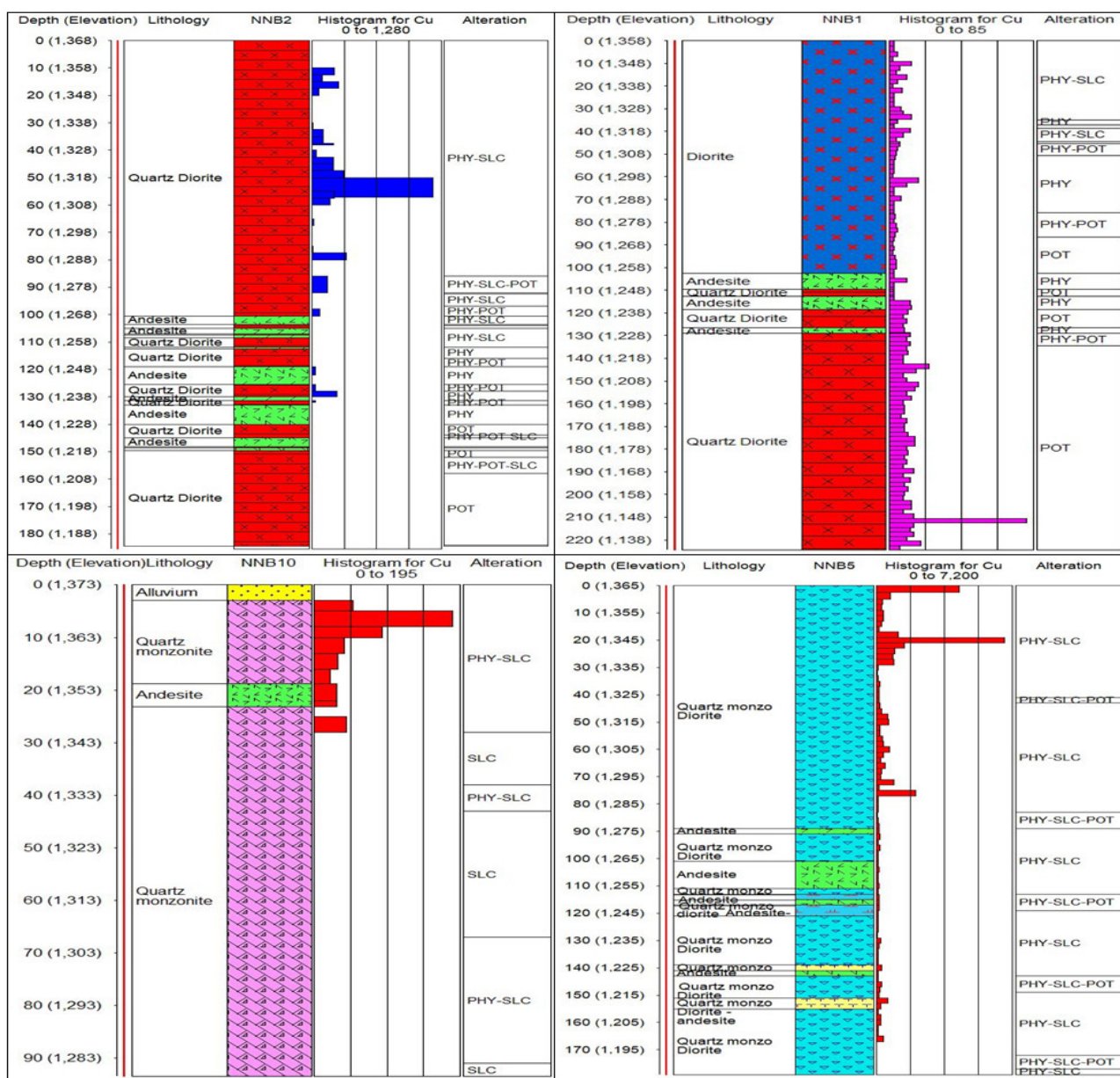
بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل سازی کمی سه بعدی زمین شناسی (سنگ شناسی، دگرسانی)، کانی زایی (عیارسنجی) و ذخیره معدنی کانسار مس نارباغی شمالی ساوه، با استفاده از اطلاعات چاهنگار گمانه های اکتشافی و عیارسنجی مغزه های حفاری آنها با استفاده از قابلیت های مختلف نرم افزار RockWorks انجام شد. برای بررسی میزان تطابق کیفی سنگ میزبان کانه زایی مس با داده های عیارسنجی عملیات حفاری به ویژه در اعماق، چاهنگار تمام گمانه های اکتشافی منطقه مورد بررسی، ترسیم شد که به عنوان نمونه در شکل ۱۷، تعدادی از آنها آورده شده است. در این چاهنگارها علاوه بر ستون سنگ شناسی، ستون دگرسانی و هیستوگرام تغییرات عمقی عیارسنجی مس (برحسب گرم در تن) نیز نشان داده شده است. طبق این شکل از لحاظ سنگ شناسی گمانه ها اغلب از آبرفت، کوارتز دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، دیوریت، کوارتز مونزونیت، آندزیت و برخی سنگ های دیگر تشکیل شده اند. دگرسانی های سطحی در اغلب گمانه ها نیز از نوع فلیک-سیلیسی است.

در گمانه NNB1 از سطح زمین تا اعماق، در جنس های سنگ شناسی مختلف، ماده معدنی وجود دارد. عیار ماده معدنی در این گمانه بسیار پایین است؛ ولی با افزایش عمق، در فاصله عمقی مربوط به جنس سنگ شناسی کوارتز دیوریت همراه با دگرسانی پتاسیک، میزان عیار نیز افزایش می یابد و به بیشینه مقدار ۸۰/۷ گرم در تن می رسد. در گمانه NNB2 در فاصله عمقی صفر تا ۱۰۰ متری با جنس سنگ شناسی کوارتز دیوریت، تغییرات عیار مس از سطح تا عمق با یک توزیع نرمال تغییر می کند؛ ولی در اعماق بیش از ۱۵۰ متر، اندازه گیری عیار مس برای بسیاری از مغزه ها انجام نشده است. به هر جهت انتظار می رود که عیار ماده معدنی در اعماق بیش از ۱۵۸ متر در جنس سنگ کوارتز دیوریت همراه با دگرسانی پتاسیک، نسبتاً بالا باشد. بیشترین مقدار عیار مس در این گمانه، ۱۲۰۰ گرم در تن در عمق حدود ۵۲ متری است. در گمانه NNB5 در فاصله عمقی صفر تا ۷۷ متری با جنس سنگ شناسی کوارتز مونزودیوریت، ماده معدنی وجود دارد که بیشینه عیار آن به ۶۷۷۰ گرم در تن می رسد. به عبارت دیگر، در این گمانه

سیلیسی) با مغزه‌های اعماق کمتر، عیار ماده معدنی در اعماق زیاد در جنس سنگ کوارتز مونزونیت هم اندازه‌گیری نشده است. با توجه به چاه‌نگار گمانه‌های شکل ۱۷ و سایر گمانه‌های منطقه (که در اینجا آورده نشده‌اند) مشاهده می‌شود که به‌طور کلی تطابق کیفی نسبتاً خوبی بین داده‌های عیارسنجی و نوع سنگ‌شناسی مورد انتظار در اعماق وجود دارد و از این نظر اطلاعات و داده‌های اکتشافی دارای درستی لازم هستند.

محیط میزبان بالاترین عیار مس، جنس سنگ از نوع کوارتز مونزونودوریت است و عیار ماده معدنی در سایر انواع سنگ در این گمانه پایین است. در گمانه NNB10 ماده معدنی فقط در اعماق کم (از عمق ۳ تا ۲۵ متر) در جنس سنگ کوارتز مونزونیت و آندزیت وجود دارد که البته میزان عیار آن نیز پایین است. در این گمانه به دلیل پایین بودن عیار در اعماق کم و تشابه ویژگی‌های مغزه‌های عمیق (همراه با دگرسانی

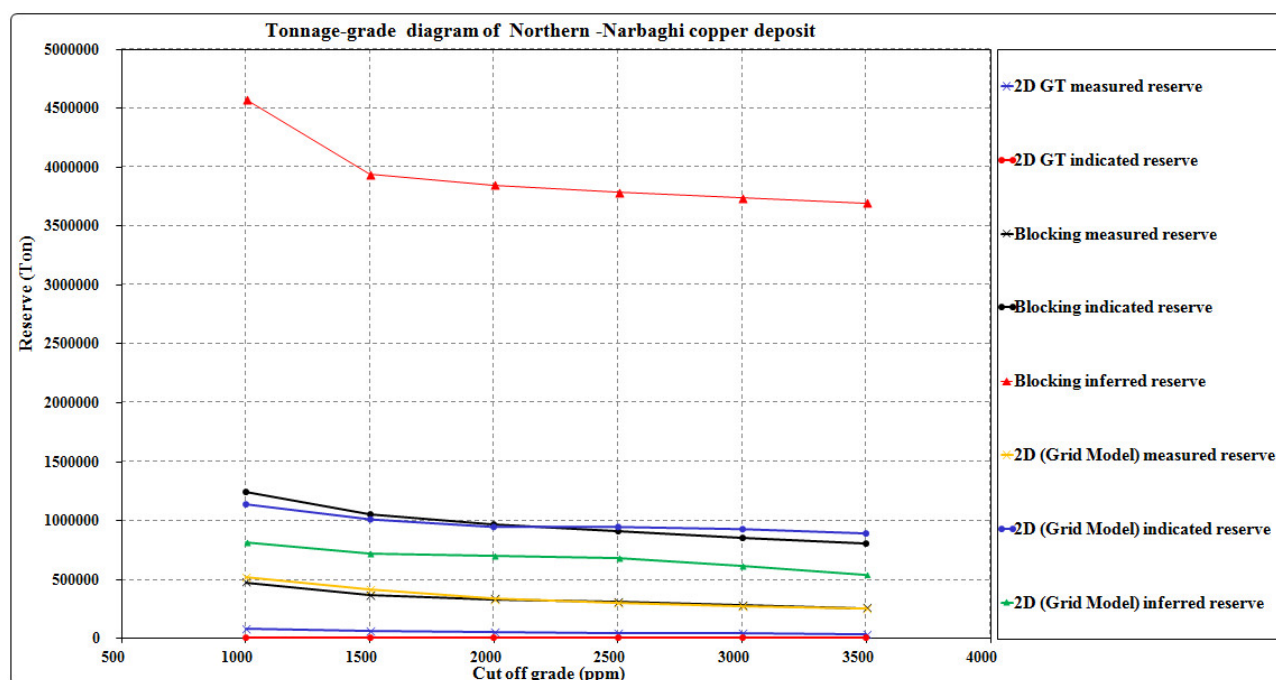


شکل ۱۷. چاه‌نگار تعدادی از گمانه‌های اکتشافی کانسار مس نارباغی شمالی

Fig. 17. Striplog of a number of exploration boreholes in the North-Narbaghi copper deposit

نمودارها و کمترین مقدار ذخیره محاسبه شده مربوط به نوع نشان داده شده با روش انباشتگی دوبعدی است که نزدیک به محور افقی نمایان شده است. برای محاسبه ذخیره از طریق منوی I-Data، مدل بلوکی کانسار ساخته شد. در کنار مزایای زیاد بلوک بندی، ایراد این روش آن است که در مورد کانسارهای کم عیار همانند مس نارباغی شمالی، میزان اختلاط کانسنگ و باطله در بلوک ها زیاد است و در نتیجه میزان ذخیره کانسارها قدری بیشتر از مقدار واقعی برآورد می شود.

نتایج این پژوهش در زمینه مدل سازی داده های عیارسنجی و تخمین ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با استفاده از روش های مناسب موجود در نرم افزار RockWorks برای شش عیار حد ۳۵۰۰، ۲۰۰۰، ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ نشان می دهد که میزان ذخیره محاسبه شده با روش های مختلف در این نرم افزار یکسان نبوده و در پاره ای از موارد با یکدیگر اختلاف زیادی دارند. در این شکل، بیشترین میزان ذخیره محاسبه شده، مربوط به نوع استنتاج شده با روش بلوک بندی از طریق منوی I-Data، با فاصله بسیار زیاد از سایر



شکل ۱۸. نمودار عیار- تناژ کانسار مس نارباغی شمالی با روش های مختلف در نرم افزار RockWorks

Fig. 18. Tonnage-grade diagram of the North-Narbaghi copper deposit by the various methods in RockWorks software

انباشتگی دوبعدی، کم بودن ضخامت ماده معدنی در گمانه های اکتشافی با توجه به نوع کانسار است. در روش مدل شبکه دوبعدی نیز عیار متوسط و ذخیره ماده معدنی قدری بیشتر از مقدار واقعی، تخمین زده می شود. نتایج تخمین ذخیره با دو روش بلوک بندی و مدل شبکه دوبعدی به یکدیگر نزدیک تر است؛ به گونه ای که در شکل ۱۸ نیز نمودارهای ذخیره نوع اندازه گیری شده با دو روش بلوک بندی و مدل شبکه دوبعدی به ازای

در محاسبه ذخیره به روش انباشتگی دوبعدی، میزان ذخیره خالص ماده معدنی برای سه رده اندازه گیری شده، نشان داده شده و استنتاج شده بر اساس فاصله های حدی به ترتیب ۵۰، ۱۳۰ و ۴۳۳ متر محاسبه شد. با این روش محاسبه ذخیره برای منطقه مورد بررسی، هیچ مقداری برای ذخیره رده استنتاج شده، محاسبه نشده که بیانگر حساسیت این روش به درجه اعتبار ذخیره است. علت کم بودن ذخیره محاسبه شده کانسار مورد بررسی با روش

عیارهای حد بیش از ۲۰۰۰ گرم در تن بر یکدیگر منطبق شده است.

به‌طور کلی روش‌های تخمین ذخیره منطقه مورد بررسی در این پژوهش از نظر میزان دقت از زیاد به کم به ترتیب عبارتند از روش انباشتگی دوبعدی، روش بلوک‌بندی از طریق منوی I-Data و روش مدل شبکه دوبعدی. از آنجایی که در روش انباشتگی دوبعدی، حاصل ضرب دو ویژگی اساسی کانسار یعنی عیار و ضخامت ماده معدنی به عنوان یک متغیر ترکیبی ارزیابی می‌شود؛ بنابراین دقت این روش از تمام روش‌های موجود در نرم‌افزار RockWorks بیشتر است. بالا بودن دقت روش مورد استفاده از طریق منوی I-Data نیز به دلیل بلوک‌بندی کانسار است.

در مجموع با متوسط‌گیری از میزان ذخیره و عیار متوسط محاسبه شده کانسار توسط روش‌های مورد استفاده، میزان ذخیره کلی کانسار به ازای عیار حد ۰/۱ درصد (۱۰۰۰ گرم در تن) حدود ۵۰۰۰۰۰ تن با عیار متوسط ۰/۸ درصد برآورد شد. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که امکان دستیابی به نتایج

معقول، درست و معتبر با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، به شدت به دانش و تجربه کاربر وابسته بوده و نتایج با درجه اعتبار بالا با انتخاب روش یا روش‌های مدل‌سازی مناسب و انتخاب مؤلفه‌های درست به دست می‌آید. نتایج این پژوهش به‌ویژه نحوه انتخاب مؤلفه‌های گوناگون در بخش‌های مختلف نرم‌افزار، برای مدل‌سازی دیگر کانسارهای مشابه در کمان ماگمایی ارومیه- دختر قابل تعمیم است. به هر حال، همواره درجه اعتبار عملیات مدل‌سازی و مدل‌های ایجادشده، به شدت تابع نوع و میزان اطلاعات اکتشافی موجود است.

قدردانی

نویسنده مقاله بر خود لازم می‌داند از مدیر عامل محترم شرکت زاگرس مس‌سازان و کلیه پرسنل مجتمع معدنی مس نارباغی، به‌خاطر همکاری‌های ارزنده در خصوص زمینه‌سازی امکان بازدید از محدوده، نمونه‌برداری و در اختیار قرار دادن کلیه اطلاعات و داده‌های اکتشافی مورد نیاز، کمال تقدیر و تشکر را به عمل آورد.

References

- Ahmadi, R., 2010. Application of statistical patterns for ore reserve estimation emphasis to Ali-abad, Yazd copper mine. Arak University of Technology, Arak, Report 1, 102 pp. (in Persian with English abstract)
- Ahmadi, R., 2019. Ore reserve evaluation: digital textbook. Arak University of Technology, Arak, 250 pp. (in Persian)
- Ahmadi, R. and Afzali, N., 2017. 3-D modeling of Khomein-Robat Pb-Zn deposit using Rockworks software. 10th National Geology Conference of PNU, Payame Noor University, Tabriz, Iran. (in Persian with English abstract)
- Ahmadi, R. and Rezapour, M.R., 2019. Proposing the optimum locations for drilling in Saveh

- North-Narbaghi porphyry copper deposit on the basis of geophysical data modeling. Scientific Quarterly of Iranian Association of Engineering Geology, 12(4): 95–121. (in Persian with English abstract)
- Ahmadi, R. and Sadat Koodehi, S.M., 2018. Classification and reserve estimation of Robat Arregije Pb-Zn deposit, Khomein Township, Markazi Province, using geostatistical methods. New Findings in Applied Geology, 12(24): 39–53. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22084/NFAG.2018.15657.1296>
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the paleo-Tethys remnants in Northeastern Iran. Geological Society of

- America Bulletin, 103(8): 983-992.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2)
- Annels, A.E., 2012. Mineral deposit evaluation: A practical approach. Springer Science & Business Media, Springer Netherlands, 436 pp.
- Ashrafpour, E., 2010. Geological-mineral deposit map of Northern-Narabaghi, Saveh, Markazi province, scale 1:1000. Zagros Mes Sazan Company.
- Ataepour, M., 2019. Principles of 2D ore-body modelling. Amirkabir University of Technology (Tehran Poly technique), Tehran, 326 pp. (in Persian)
- Bohling, G., 2007. SGeMS tutorial notes in hydrogeophysics: theory, methods, and modeling. Boise State University, Boise, Idaho, 26 pp.
- Erickson, Jr.A.J., 1992. Geological interpretation, modeling and representation. In: H. Hartman (Editor), SME Mining Engineering Handbook. SME-AIME, New York, pp. 333-343.
- Fazli, N., Ghaderi, M., Lentz, D. and Li, J., 2019. Geology, alteration, mineralization and geochemistry of the North Narbaghi epithermal Ag-Cu deposit, northeast Saveh. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 28(112): 13-22. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2018.97142.1246>
- Ghaderi, M., Fazli, N., Yan, S. and Lentz, G.R., 2016. Fluid inclusion studies on North Narbaghi intermediate sulphidation epithermal Ag-Cu deposit, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2016), Duo hotel, Prague, Czech Republic.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, Oxford, 483 pp.
- Hassanipak, A.A., 2000. Modeling of metallic and nonmetallic deposits and their exploration application. Tehran University Press, Tehran, 512 pp. (in Persian)
- Madani, H., 1995. Basics of Geostatistics. Amirkabir University of Technology- Tafresh branch, Tafresh, 659 pp. (in Persian)
- Madani, H., 1997. Principles of prospecting, exploration and evaluation of ore reserves. Khane Farhang, Tehran, 816 pp. (in Persian)
- Pichab Kansar consultant engineers Co., 2015. Final report of exploration operation in the region of North-Narbaghi copper deposit. Zagros Mes Sazan Company, Tehran, Report 2, 356 pp. (in Persian)
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2006. SGeMS User's Guide. Stanford University, Stanford, 129 pp.
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2009. Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide. Cambridge University Press, New York, 284 pp.
- Revuelta, M.B., 2017. Mineral Resources: From exploration to sustainability assessment. Springer International Publishing, Switzerland, 653 pp.
- Stoecklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A Review. American Association of Petroleum Geologists, 25(7): 1229-1258.
<https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Surur, A.N., 2008. Surveying, modelling and visualisation of geological structures in the Tunberget tunnel. M.Sc. Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 75 pp.
- Tutorial – RockWare, 2016. 197 pp., Retrieved November 25, 2019 from https://www.rockware.com/downloads/documentation/rockworks/rw16_tutorial_from_chm.pdf
- Young, D.R., 2008. The effect of ignoring the sample support on the global and local mean grade estimates, mineral resource classification and project valuation of variable width Merensky and UG2 Reef ore bodies. Third International Platinum Conference 'Platinum in Transformation, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Sun City, South Africa. Retrieved November 25, 2019 from https://www.saimm.co.za/Conferences/Pt2008/063-76_Young.pdf

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**How to cite this article**

Ahmadi, R., 2021. Geological-exploration modeling of the North-Narbaghi copper deposit, Saveh and reserve estimation using blocking, 2D grid model and 2D accumulation approaches. Journal of Economic Geology, 13(2): 435–462. (in Persian with English abstract)
<https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i2.85341>



Geological-exploration modeling of the North-Narbaghi copper deposit, Saveh and reserve estimation using blocking, 2D grid model and 2D accumulation approaches

Reza Ahmadi*

Mining Engineering Department, College of Geosciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Submitted: Jan. 01, 2020

Accepted: Sept. 07, 2020

Keywords: *North-Narbaghi copper deposit Saveh, Geological-exploration modeling, Varigraphy, Ore reserve estimation, Blocking, 2D grid model, 2D accumulation, RockWorks*

Introduction

Deposit modeling includes various types of descriptive-genetic, geometric, geostatistical modeling-simulation, economic, and mathematical analyses (Erickson, 1992). In the present study, 3-D geological, mineralization and ore deposit mathematical modeling of the North-Narbaghi copper deposit, Saveh were carried out using various capabilities of the Rockworks software package. The North-Narbaghi exploration area is located in the northeast of the Markazi province, ~26 km northeast of Saveh city, at 1:100,000 Zavieh sheet. The monzogranite-quartzmonzodiorite intrusive bodies are the main host rocks for mineralization in the area. Two main porphyry copper mineralization zones consisting of phyllic and potassic alterations have been recognized in the area by applying systematic explorations including 23 boreholes (i.e., NNB1 to NNB23) with the total depth of 2425 meters. Five boreholes have been drilled in the eastern stock whereas 18 boreholes are located in the western part. The drillholes range in depth from 52 (e.g., NNB9 borehole) to 224 meters (e.g., NNB1 borehole). A total of 558 drill cores collected from different boreholes were analyzed for their copper and associated elements. The ore grades typically range from 2ppm to 12.2%.

Materials and methods

The RockWorks software package calculates the volume of minerals in two ways; one through the

borehole manager window, the I-data menu, the volumetrics submenu, and four other paths in the utilities window called Ez-volume, 2D (grid model), grade block model grade thickness (GT) grid, and compute grade-thickness volume & mass which comprise subsets of volumetrics main menu. In all cases, the average density of the mineral was considered to be 2.65 g/cm³. Also, the SGeMS software (Remy et al., 2009) outputs were used in order to obtain more accurate estimation of grade and tonnage of the deposit, if required, for estimation of parameters such as search radius. In this research, the values of the search radius corresponding to the measured, indicated and inferred reserve categories were assumed to be 50, 130 and 433 m, respectively. For the North-Narbaghi copper deposit, six cutoff grades of 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 and 3500ppm were defined. In the 2D (grid model) method, the volume of the mineral deposit was calculated by gridding the thickness of the deposit. The cell size of 20*20*2m was selected and the number of data involved to estimate each cell was chosen to be 3 based on the borehole distances and depth of drill cores by trial and error.

To evaluate ore deposits, sometimes accumulation parameter grade-thickness (GT) was used instead of cutoff grade. In this operation, for each column of cells within the primary grade model, the sum of the GT values of the cells were calculated and stored as GT values within the grid model. These values of cellular GT are calculated by multiplying

*Corresponding author Email: rezahmadi@gmail.com

grade by thickness (height) of the cell. If the grade value of a cell is less than the threshold value defined by the user, the value for this cell will not be taken into account in the total summation. If the value of the final sum is lower than the threshold defined by the user, the program will set the value of the relevant grid to zero. The minimum acceptable values for the studied ore grade for the six defined cutoff grades of 0.1%, 0.15%, 0.2%, 0.25%, 0.3% and 0.35% and also, accumulation threshold corresponding to the minimum acceptable values of grade multiplied by the minimum core length (0.1 m) was defined to be 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03 and 0.035(m%), respectively.

Results

The ore reserve calculated by 2D GT method shows that the software output is slightly different from that of other techniques. This method calculates the net ore reserve for three categories of "measured", "indicated" and "inferred" categories. In this algorithm, reserve calculations for the study area has not assigned any values for the "inferred" reserve category. Moreover, no reserve has been calculated for the "indicated" category by increasing the cutoff grade value. In other words, there is no reserve in the "inferred" category for the various cutoff grades. There is no reserve even in the "indicated" category for the upper limits cutoff grade. This indicates the sensitivity of the applied algorithm to the degree of reliability of the reserve. Assay data modeling and ore reserve estimation using the variety of methods that exist in Rockworks for 6 cutoff grades of 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 and 3500ppm show that in some cases the results of various methods are very different. In general, blocking through I-Data menu

and 2-D accumulation (2D GT) methods are more accurate than the others available in Rockworks to estimate the ore reserve of the study area. Overall, reserve value was calculated about 500000 tonnes with an average grade of 0.8% for cutoff grade of 0.1% (1000ppm) by averaging the ore reserve and average grade of the deposit and using conventional ore reserve estimation methods.

Discussion

The findings of the current investigation confirm that the feasibility of achieving reasonable, valid, and reliable results using a specialized software is highly dependent on the knowledge and experience of the user and the high degree of validity of results is only obtained by the choice of appropriate modeling methods as well as selecting suitable parameters.

The results of this research study especially how to select parameters in different parts of the software can be generalized for modeling other metallic deposits similar to the study area. However, validation of modeling operation and the produced models are highly dependent on the type and amount of available exploration information.

References

- Erickson, Jr.A.J., 1992. Geological interpretation, modeling and representation. In: H. Hartman (Editor), SME Mining Engineering Handbook. SME-AIME, New York, pp. 333–343.
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2009. Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide. Cambridge University Press, New York, 284 pp.