



## مدل‌سازی زمین‌شناسی و بلوکی کانسار مرمر اونیکس قره قشلاق به‌منظور بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید معدن

جعفر عبدالهی شریف\*، علی امامعلی‌پور

گروه معدن، دانشگاه ارومیه، ایران

دریافت مقاله: 1392/1/25، پذیرش: 1392/5/22

### چکیده

معدن مرمر اونیکس قره قشلاق از جمله ذخایر بسیار با ارزش سنگ تزئینی در گستره استان آذربایجان غربی است که محصول چشمه‌های گرم آهک‌ساز بوده و ضخامت توده معدنی آن در مقایسه با گسترش سطحی محدود است. در این پژوهش، مدل‌سازی زمین‌شناسی و بلوکی کانسار مرمر به‌منظور تدوین برنامه‌ریزی تولید معدن، شناسایی موقعیت تک‌کوپ‌های استخراجی و افزایش جنبه‌های اقتصادی بهره‌برداری از آن طراحی و اجرا شده است. در خلال این پژوهش، ضمن تهیه مدل زمین‌شناسی و بلوکی معدن، در گام نخست ابعاد بهینه تک‌کوپ‌های قابل استخراج از آن تعیین و با بازنمایی معادله رویه‌های محصورکننده این طبقات مرمری در محیط رایانه، ابعاد بهینه، بیشینه تعداد و موقعیت دقیق مکانی تک‌کوپ‌های قابل استخراج از این معدن شناسایی و به واحد استخراج معرفی شده است. بر اساس یافته‌های حاصل از این مطالعات با توجه به داده‌های 83 گمانه اکتشافی موجود امکان استخراج 183 تک‌کوپ مرمر صورتی و 103 تک‌کوپ مرمر سبز با ابعاد خام  $1/5 \times 2/5 \times 2/5$  متر و فقط 2 تک‌کوپ با ابعاد  $1/3 \times 2/5 \times 2/5$  متر از لایه مرمر سفید امکان‌پذیر است. همچنین نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد با اعمال ملاحظات استخراجی و با توجه به ضریب بهره‌دهی لایه‌ها و حذف زون تغییر رنگ تدریجی بیشترین ضخامت تک‌کوپ‌ها برای طبقات مرمر صورتی، سبز و سفید به ترتیب  $1/65$  و  $1/65$  و  $1/4$  متر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مرمر اونیکس، قره قشلاق، مدل زمین‌شناسی، مدل بلوکی، برنامه‌ریزی تولید

### مقدمه

کاهش داده و سودآوری و بهره‌وری از معادن را افزایش می‌دهد.

در معدن‌کاری سنگهای تزئینی، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید معدن به‌منظور افزایش جنبه‌های اقتصادی بهره‌برداری از کانسار حایز اهمیت است. توجه به ویژگیهای زمین‌شناسی اقتصادی کانسار به‌منظور مدل‌سازی زمین‌شناسی و بلوکی کانسار از ضروریات بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید معدن می‌باشد.

مطالعات مبسوطی در خصوص بهینه‌کردن ابعاد اولیه کانسنگ استخراجی از معادن روباز توسط محققان مختلف به‌عمل آمده است [4]. ولی در مورد بهینه‌سازی ابعاد استخراجی سنگهای تزئینی کارهای محدودی در دنیا انجام شده است. از جمله نخستین پژوهشها در این زمینه می‌توان به

سنگهای تزئینی یا ابعادی بلوکهای منظمی از سنگهایی نظیر گرانیت، گنیس، گابرو، دیاباز، مرمر، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، سنگ صابونی و اسلیت هستند [1]. کشور ایران از لحاظ تولید سنگ تزئینی، جزو پنج کشور نخست در سطح جهان می‌باشد [2] و از لحاظ تنوع و گستردگی انواع سنگ شاید نخستین کشور در سطح جهان باشد. سنگهای تزئینی مرغوب در بازار به‌طور عام به‌خاطر ویژگیهای جذاب و زیبایی ظاهری خود که حاصل رنگ، بافت، صیقل‌پذیری، و ابعاد دانه‌ها هستند، از انواع دیگر متمایز می‌شوند [3]. در موارد متعددی شرکت‌های بزرگ معدنی به‌منظور کاهش ضایعات و استفاده بهینه از سنگ به ابعاد بزرگی از سنگهای تزئینی برای مقاصد خاصی نیاز دارند. استفاده از این ابعاد سطوح برشی برای قواره کردن سنگ را

معدنی بنا نهاده شده است. دامنه کاربرد مدل‌سازیهای سه بعدی در حال حاضر به زون‌بندی استخراجی و تعیین موقعیت مناسب سینه‌کارهای معادن سنگ تزئینی نیز رسیده است [12] حتی در کاربردهای جدید پیش‌بینی کیفیت کانسنگ استخراجی در سینه‌کارهای معادن سنگ تزئینی نیز با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازیهای رایانه‌ای امکان‌پذیر شده است [13].

در پژوهش حاضر با نگرش جدیدی به مدل‌سازی ذخایر سنگ تزئینی بهینه‌سازی تولید معدن مرمر قره قشلاق با تکیه بر ویژگیهای زمین‌شناختی و منشأ آن مورد پژوهش قرار گرفته است. معدن مرمر قره قشلاق در 87 کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ارومیه و محور ارتباطی ارومیه - مهاباد واقع شده است. این کانسار از سمت غرب و شرق به آهکهای الیگو میوسن (سازند قم) با رنگهای تیره و میان‌لایه‌هایی از چرت محدود می‌شود. بیشتر قسمت‌های گسترده منطقه کانسار از رسوبات آواری، آبرفتی و حوضه‌های نمکی و شورزار کواترنر پوشیده شده است. ذخایر مرمر این کانسار به شکل عدسیه‌های جداگانه‌ای در قسمت زیرین این رسوبات در میان نهشته‌های تراورتن با سن احتمالی کواترنر قرار گرفته‌اند. ماده معدنی از سه لایه مرمری با رنگهای صورتی، سبز و سفید با ضخامت متوسط 50 سانتی‌متر تشکیل شده است. زون تغییر رنگ تدریجی در بین لایه‌های مختلف نیز از 10 سانتی‌متر تا 20 سانتی‌متر متغیر است. موقعیت معدن قره قشلاق در شکل 1 ارائه شده است.

#### تعریف مسأله

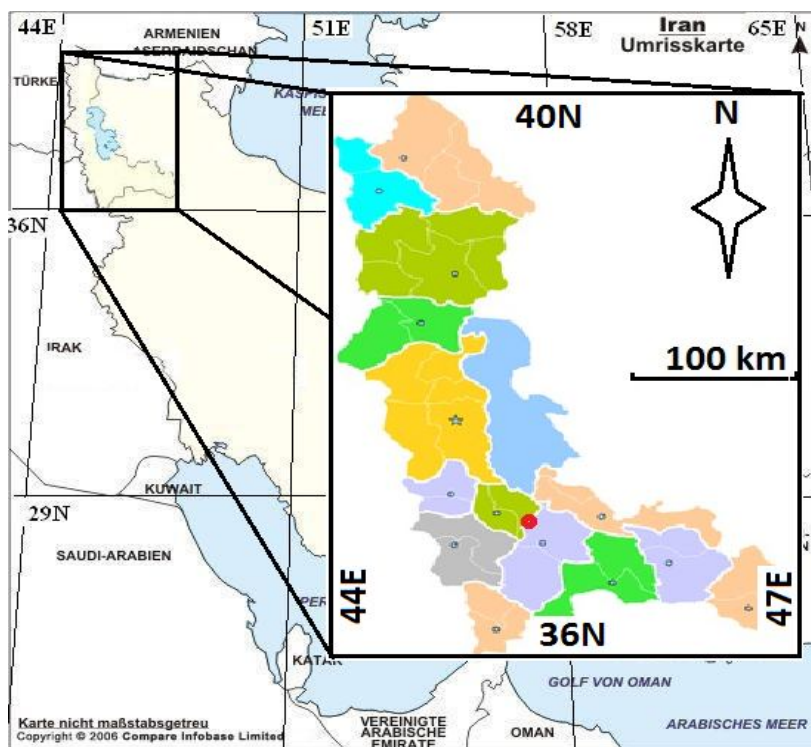
در این پژوهش، به‌منظور افزایش ارزش افزوده کانسار استخراجی و جلوگیری از اتلاف ماده معدنی، برنامه‌ریزی تولید به شرح مبانی زیر مورد توجه قرار گرفته است. در این برنامه تولید که هدف از آن بیشینه‌کردن سود و بهره‌وری از معدن است باید برای سؤالهای کلیدی زیر پاسخ لازم تهیه شود:

- با توجه به توزیع فضایی ذخیره تعداد و موقعیت تک‌کوپ‌هایی (کوپ‌های با وزن حدود 20 تا 25 تن) که از هر واحد مرمر می‌توان استخراج کرد چه مقدار است؟
- ترتیب استخراج از معدن باید به چه صورت برنامه‌ریزی شود تا زون تغییر رنگ تدریجی ماده معدنی تا حد امکان در مرز کوپ‌ها و سطوح برشی واقع گردد؟

بررسیها و داده‌کاویهای انجام‌شده برای تهیه مدل‌های سه بعدی توسط محققان کانادایی در سال 1995 اشاره نمود [5]. آنان در پژوهشهای خود تعیین ابعاد اقتصادی بلوک‌های سنگ تزئینی به‌منظور بیشینه‌کردن بهره‌وری و کمینه‌کردن ضایعات را موضوع تحقیق خود قرار دادند. در ادامه تحقیقات، پژوهشگران دیگری در سال 1999 با استفاده از مدل‌های چند متغیره و بر اساس بانک اطلاعاتی که از معادن سنگ تزئینی در حال بهره‌برداری تهیه نمودند یک شاخص ساده خطی را برای طبقه‌بندی کیفی ذخایر سنگ تزئینی ارائه و توسعه دادند [6]. روش آنها اجازه می‌داد هر بلوک سنگ تزئینی را بر اساس میزان کانسنگ قابل استحصال از آن در رسته‌های کیفی مختلفی طبقه‌بندی نمود. روش آنها به توسعه رهیافتی انجامید که در فرآیند اجرایی آن بهره‌برداران ذخایر سنگ تزئینی می‌توانند به بیشترین بازایی استخراجی دست یابند. در سال 2000 نیز یک فرآیند بازگشتی [7] برای مدل‌سازی زمین‌شناسی، تعیین ذخیره و طراحی استخراجی ذخایر سنگ تزئینی ارائه گردید. این روش ابداعی با موفقیت در 8 معدن سنگ تزئینی برزیل که ابعاد کوپ‌های استخراجی، وضعیت بازار فروش، هزینه‌های تولید و محدودیتهای استخراجی متفاوتی داشتند، به‌کار گرفته شد. یک روش مدل‌سازی رایانه‌ای و طراحی برنامه‌ریزی تولید برای سنگ تزئینی بر اساس کمینه‌کردن هزینه‌های تولید در سال 2001 توسط [8] ارائه شد. در سال 2004، با ارایه نخستین الگوریتم طراحی، برنامه‌ریزی تولید و استخراج ذخایر سنگ تزئینی تحول بزرگی در بهینه‌سازی فرآیند استخراجی از ذخایر سنگ تزئینی به‌وجود آمد [9]. بر اساس الگوریتم پیشنهادی در آن سال مدل‌سازی ذخایر سنگ تزئینی شامل دو مرحله تهیه مدل‌های بلوکی و مدل‌های اقتصادی بود. به‌منظور تعیین مقدار سنگ تزئینی قابل استحصال از توده معدنی و قبل از فرآیند استخراج متدولوژی جدیدی در سال 2007 معرفی شد [10]. در این متدولوژی ویژگیهای کیفی مهمترین متغیر و شاخصه تصمیم‌گیری قلمداد می‌شود. در سال 2009 نیز جایگاه مدل‌سازی سه بعدی ذخایر معدنی سنگهای تزئینی توسط [11] و [14] مورد توجه قرار گرفته و یک روش رایانه‌ای را برای کمینه‌کردن برش و ویژه و افزایش بهره‌وری استخراج ذخایر سنگ تزئینی ابداع و معرفی نمودند. روش ابداعی آنها بر اساس افزایش تعداد تک‌کوپ‌های استخراجی از ذخایر

- برنامه تولید را به چه صورت می‌توان تنظیم نمود که کوپ‌های استخراجی فقط حاوی ماده معدنی با رنگ یکنواخت و یکسان باشند و از استخراج کوپ‌هایی که توأمأ رنگ صورتی، سبز و سفید دارند اجتناب گردد؟

- بزرگترین کوپی که از معدن می‌توان استخراج کرد چه حجمی می‌تواند داشته باشد؟  
- آیا با توجه به تجارب موجود معدن که بزرگترین کوپ استخراجی از آن ابعاد  $1/2 \times 1/8 \times 1/5$  را داشته است می‌توان با برنامه‌ریزی مناسب به کوپ‌های بزرگتر که ارزش اقتصادی بسیار بالایی دارند دست یافت؟



شکل 1. کروکی راه دسترسی به گستره معدن مرمر قره قشلاق

### روش مطالعه

برای حل مسأله و دستیابی به اهداف تیم بهره‌برداری، فرآیند اجرایی کار به شرح زیر تدوین گردید. در این فرآیند در گام نخست داده‌های اکتشافی بیش از 117 حلقه چاهک اکتشافی بررسی، نشانه‌گذاری و مورد بازبینی قرار گرفت و از بین آنها اطلاعات 83 حلقه چاهک اکتشافی برای استفاده در تحلیلهای مهندسی انتخاب و مورد داده‌کاوی قرار گرفتند. در گام دوم پس از جمع‌بندی داده‌های صحرایی و پردازش رایانه‌ای آنها مدل سه‌بعدی ماده معدنی در سه دسته مرمر صورتی، سبز و سفید شامل مدل سطحی و مدل حجمی ذخیره تهیه شد. در گام سوم مدل بلوکی ماده معدنی با نگرش جدیدی به فرآیند مدل‌سازی و با تغییراتی که در فایل داده‌ها انجام شد، تهیه

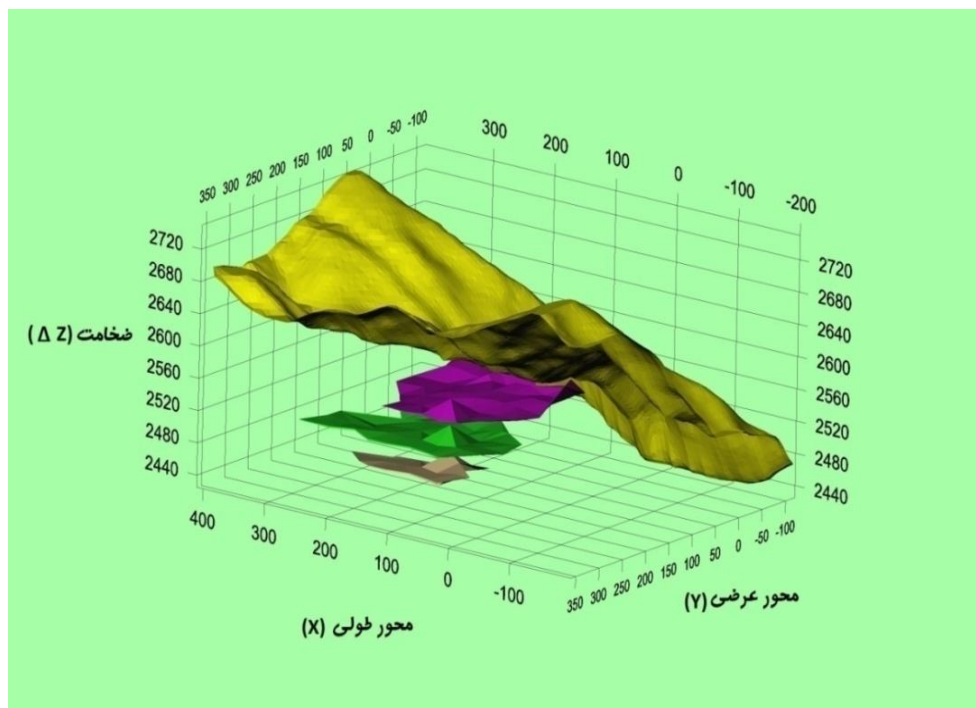
گردید و سپس با مبنا قرار دادن اطلاعات استخراجی قبلی معدن که بزرگترین کوپ استخراجی از آن ضخامتی در حدود 1/2 متر داشت، سلسله محاسباتی برای تعیین ابعاد مناسب تک‌کوپ استخراجی که ضخامت بیشتر از این مقدار را می‌تواند داشته باشد، به عمل آمد. پس از تعیین ابعاد کوپ‌های هدف، معادله رویه‌های محصورکننده لایه‌های مرمری پس از حذف زون تغییر رنگ تدریجی تهیه و با استفاده از تعریف برداری صفحه در فضای سه‌بعدی برنامه رایانه‌ای ویژه‌ای تدوین و بیشینه تعداد تک‌کوپ‌های قابل استخراج از هر واحد مرمر تعیین و در گام نهایی، با انجام محاسباتی ابعاد تک‌کوپ‌های قابل استخراج بهینه‌سازی و موقعیت مکانی آنها به‌طور دقیق تعیین و در انتها برنامه تولید معدن تدوین شد.

## بحث و بررسی

### تهیه مدل سطحی و حجمی معدن

برای تهیه مدل سطحی و حجمی معدن از داده‌های سطحی نقشه‌برداری و نیز داده‌های 83 حلقه چاهک اکتشافی حفرشده در گستره معدن استفاده شده است. پس از مرتب‌کردن داده‌ها، فایل‌های رایانه‌ای مورد نیاز متناسب با اهداف پژوهش و با تغییراتی که در آنها به واسطه ماهیت خاص کانسار داده شد، تهیه و مورد پردازش قرار گرفتند. برای مدل‌سازی ذخیره قشلاق از برنامه مایکروماین که یکی از نرم‌افزارهای تخصصی قوی و مطرح در این زمینه است استفاده شده است. نرم‌افزار مزبور در محیط مجازی و بدون نیاز به خرید نسخه کامل آن از طریق اینترنت قابل دسترسی بوده و با پرداخت حدود 20 دلار به ازای هر ساعت استفاده در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌گیرد. نرم‌افزار مزبور محصول مشترک سه

کشور آمریکا، استرالیا و انگلیس بوده و دفتر اصلی شرکت مایکروماین در سیدنی استرالیا واقع است. خرید کامل نرم‌افزار به‌علت قیمت بسیار بالای آن برای کاربردهای محدود فاقد توجیه اقتصادی بوده و بهتر است از نسخه اینترنتی و با پرداخت هزینه ساعتی از امکانات آن استفاده کرد. در شکل 2 مدل سطحی معدن مرمر قره‌قشلاق که در زیر آن احجام سه‌بعدی سه لایه مرمر صورتی، سبز و سفید نمایش داده شده‌اند، ارائه شده است. موقعیت گمانه‌های اکتشافی به‌همراه مدل سطحی نیز در شکل 3 ارائه شده است. پس از تهیه مدل سطحی و نیز پردازش و ساخت استرینگ فایل‌های مورد نیاز با تغییراتی که در ساختار فایل زمین‌شناسی معدن داده شد، این امکان فراهم گردید تا مدل حجمی سه لایه مرمر و نیز زون‌های تغییر رنگ تدریجی به‌صورت جداگانه ساخته شود.



شکل 2. مدل سطحی معدن مرمر قره‌قشلاق به‌انضمام لایه‌های مرمر (برای ارائه جزئیات بیشتر فاصله طبقات مرمر از هم 30 متر منظور شده و محور  $\Delta Z$  پنج برابر شده است).

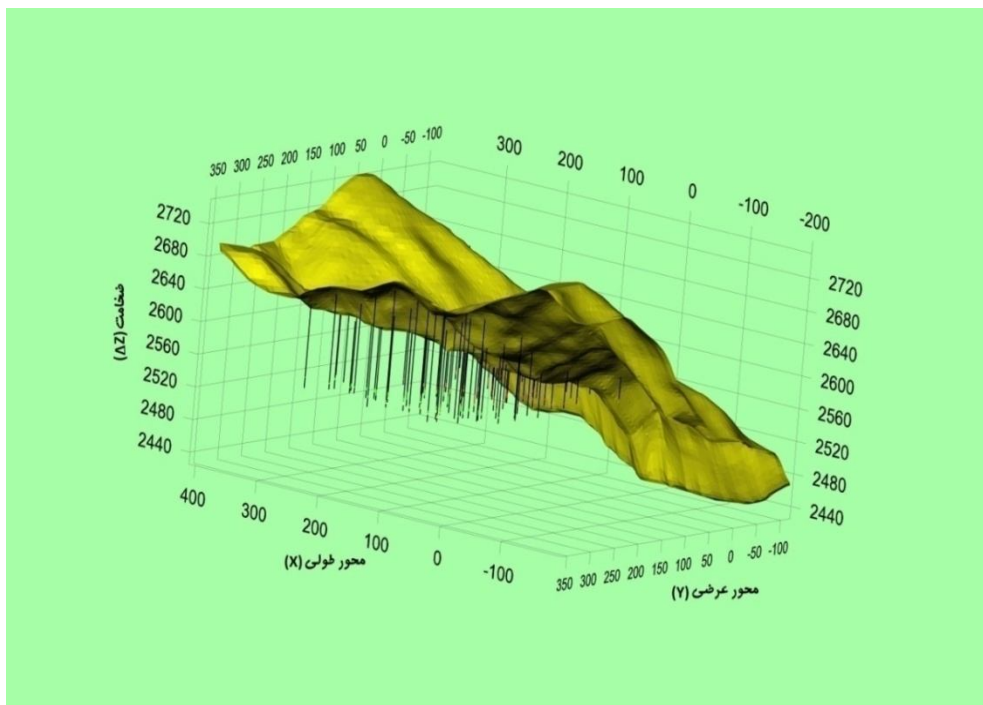
### تعیین ابعاد بهینه کوب‌های استخراجی

استفاده از ابعاد بهینه برای کوب‌های استخراجی جنبه‌های اقتصادی بهره‌برداری از معدن را افزایش داده و به افزایش ارزش اقتصادی آن منجر می‌شود. بر اساس نظر پژوهشگران مختلف شکل بهینه برای کوب‌های استخراجی در وهله اول

مکعب و در غیر این‌صورت مکعب مستطیل با مقطع مربع است [14]. ولی در هر معدن و متناسب با ویژگی‌های ژئومتری ذخیره ابعاد کوب‌های استخراجی برای بهره‌برداری بهینه از آن متفاوت خواهد بود. در معدن قره‌قشلاق که ضخامت اقتصادی کوب‌های استخراجی به‌علت قیمت بسیار زیاد کانسنگ به

معدن قشلاق قیمت آن به شدت افزایش می یابد، به گونه ای که قیمت واحد وزن کوپ 25 تنی این معدن چندین برابر قیمت کوپ هایی است که وزن آنها حدود 2 تا 3 تن می باشد. در ادامه با توجه به محدودیت کاری و با توجه به جنبه های بسیار جذاب اقتصادی کوپ های بزرگ، مناسب ترین ابعاد برای تولید تک کوپ از این معدن که وزنی حدود 20 تا 25 تن دارند به شرح زیر مورد جست و جو قرار گرفته است.

حدود 40 سانتی متر تقلیل یافته است، تعریف تک کوپ استخراجی که حاوی وزن بالا و ابعاد مناسب برای برش و قواره کردن باشد نسبت به ذخایر دیگر متفاوت است. در این معدن با توجه به تجارب اجرایی موجود و با توجه به ضخامت متوسط ماده معدنی، تک کوپ هایی که تاکنون استخراج شده اند ضخامتی حدود 100 تا 120 سانتی متر داشته اند. شایان ذکر است با افزایش ابعاد و تناژ کوپ استخراجی از



شکل 3. مدل سطحی معدن مرمر قره قشلاق به انضمام گمانه های اکتشافی حفر شده در گستره کانسار (برای ارائه جزئیات بیشتر محور  $\Delta Z$  پنج برابر شده است).

متناسب با امکانات معدن و محدودیتهای حمل و نقل جاده ای 20 تن منظور شده است،  $\gamma$  وزن مخصوص ماده معدنی بر حسب تن بر متر مکعب و  $a$  و  $b$  ابعاد قاعده تک کوپ استخراجی بر حسب متر هستند.

$$w = a \times b \times h \times \gamma = 0 \quad \text{رابطه (1)}$$

با توجه به پژوهش های انجام شده و برداشت 20 نمونه از معدن برای تعیین وزن مخصوص نتایجی به شرح جدول 1 به دست آمده است. از روی نتایج حاصل میانگین حسابی وزن مخصوص برابر  $2/618$  گرم بر سانتی متر مکعب به دست می آید، بنابراین می توان وزن مخصوص کانسنگ استخراجی را با اطمینان کافی  $2/62$  گرم بر سانتی متر مکعب منظور نمود.

معادله پارامتری برای تعیین وزن تک کوپ بهینه معدن قره قشلاق را می توان به شرح رابطه 1 بازنویسی نمود. در این رابطه  $h$  معرف ارتفاع بلوک است که با توجه به تجارب کاری موجود در معدن و طرح بهره برداری مصوب آن با ارتفاع طبقه یا پله استخراجی از معدن متناسب بوده و با توجه به داده های طرح بهره برداری و تجارب اجرایی در نخستین مرحله بهینه سازی با عدد ثابت  $1/2$  متر جایگزین خواهد شد. دوباره تأکید می شود که مقدار عددی  $h$  با توجه به محدودیت کاری معدن قشلاق، تجارب اجرایی و بر اساس طرح بهره برداری و نظارتی آن انتخاب شده است [15] و در ذخایر مختلف می تواند مقادیر متنوعی را متناسب با ارتفاع پله استخراجی انتخاب نماید، پارامتر  $w$  معرف وزن تک کوپ است که

جدول 1. نتایج حاصل از آزمایشهای تعیین وزن مخصوص کانسنگ معدن مرمر قره‌قشلاق.

ردیف	شماره نمونه	وزن مخصوص $gr/cm^3$	ردیف	شماره نمونه	وزن مخصوص $gr/cm^3$
1	SG-01	2/61	11	SG-11	2/62
2	SG-02	2/6	12	SG-12	2/64
3	SG-03	2/63	13	SG-13	2/63
4	SG-04	2/61	14	SG-14	2/64
5	SG-05	2/62	15	SG-15	2/6
6	SG-06	2/64	16	SG-16	2/6
7	SG-07	2/63	17	SG-17	2/61
8	SG-08	2/61	18	SG-18	2/62
9	SG-09	2/6	19	SG-19	2/61
10	SG-10	2/61	20	SG-20	2/63

مناسبتترین مقدار  $a$  زمانی حاصل می‌شود که  $S$  کمترین مقدار خود را داشته باشد، زیرا  $S$  معرف سطح برش در معدن بوده و کمینه کردن آن به افزایش جنبه‌های اقتصادی طرح استخراج از معدن منجر خواهد شد. برای کمینه کردن مقدار  $S$  رابطه 5 از روی مشتق رابطه 4 به شرح زیر حاصل می‌شود

$$\frac{\partial S}{\partial a} = (2.4 a^2 - 15.26)/a^2 \quad \text{رابطه (5)}$$

با مساوی قرار دادن مقدار مشتق تابع  $S$  با کمینه مقدار آن (صفر)، مناسبتترین بعد  $a$  برای کمینه کردن سطح برش به شرح رابطه 6 حاصل می‌شود.

$$2.4 a^2 - 15.26 = 0 \Rightarrow a = 2.52 \approx 2.5 \text{ m} \quad \text{رابطه (6)}$$

با جای‌گزینی مقدار  $a$  از رابطه 6 در رابطه 3 ابعاد مناسب تک‌کوپ استخراجی معدن به شرح جدول 2 خواهد بود.

با جانمایی مقادیر ثابت، رابطه 1 را می‌توان به شرح رابطه 2 بازنویسی نمود.

$$w = a \times b \times h \times \gamma \Rightarrow a \times b = \frac{6}{36} \text{ m}^2 \quad \text{رابطه (2)}$$

برای تعیین مقادیر بهینه  $b$  و  $a$  در این پژوهش سعی شده است مقدار عددی آنها با دیدگاه کمینه کردن سطح برش برای تک‌کوپ‌های استخراجی و به شرح روابط زیر تعیین گردد.

$$S = 2 \times (a+b) \times 1.2 + 2 a \times b \quad \text{رابطه (3)}$$

در رابطه 3 پارامتر  $S$  معرف سطح جانبی کل تک‌کوپ است. رابطه 3 را می‌توان با استفاده از رابطه 2 به شرح رابطه 4 بازنویسی نمود.

$$S = (12.72 a + 2.4 a^2 + 15.26)/a \quad \text{رابطه (4)}$$

جدول 2. ابعاد بهینه تک‌کوپ استخراجی معدن قره‌قشلاق (برحسب متر).

طول (X)	عرض (Y)	ارتفاع (Z)
2/5	2/5	1/2

#### تهیه مدل بلوکی ذخایر مرمر

پس از تعیین ابعاد بهینه تک‌کوپ برای معدن قره‌قشلاق سؤال مهمی که در پیش روی گروه پژوهشی قرار داشت، تعیین موقعیت و تعداد تک‌کوپ‌هایی بود که در هر واحد مرمر می‌توانست استخراج شود. شایان ذکر است که قیمت هر تن تک‌کوپ معدن چند برابر کوپ‌هایی است که ابعاد کوچکتری دارند. بر اساس این برنامه‌ریزی تولید معدن به‌گونه‌ای که بتوان بیشترین تک‌کوپ را از آن استخراج نمود از اهداف بسیار مهم این پژوهش قلمداد می‌گردد. برای رسیدن به این هدف،

مقادیر مندرج در جدول 2 بر اساس ضخامت تک‌کوپ‌هایی که تاکنون در معدن استخراج شده است، حاصل گردیده و لزوماً نمی‌تواند بهترین مقادیر برای ادامه عملیات استخراجی قلمداد گردد. بدیهی است چنان که بتوان با استفاده از فرآیند مدل‌سازی و بررسی‌های زمین‌شناسی و مهندسی به ابعاد بهتری دست‌یافت، این مقادیر باید مورد جست‌وجو و عمل قرار گیرند. به‌خصوص ارتفاع کوپ‌ها نیاز به بازنگری داشته و نیازمند بهینه‌سازی جدی هستند.

فایل های ساخته شده در راستای پروفیل های اکتشافی استخراج و با سازوکار زیر معادله خطوط و صفحات محصور کننده این رویه ها در محیط رایانه ای باز نمایی شد.

برای تعیین معادله این سطوح گام های اجرایی زیر به مرحله اجرا در آمده است که برای نشان دادن دقیق فرآیند اجرایی، سه نقطه موجود در روی دو استرینگ متوالی متعلق به مرمر صورتی به شرح شکل 4 که سازنده یکی از سطوح محصور کننده فوقانی مرمر صورتی رنگ است با مختصات ارائه شده در جدول 3 انتخاب و صفحه محصور کننده آن به شرح روابط 7 تا 14 تعیین گردید.

به منظور تعیین صفحه محصور کننده، دو بردار موجود بر روی صفحه مزبور که ابتدای آن در پروفیل شماره 4 و انتهای آن در پروفیل شماره 5 قرار دارد (شکل 4) انتخاب می گردد. با توجه به مختصات نقاط A, B, C دو بردار مزبور معادلاتی به شرح روابط 8 و 10 خواهند داشت.

$$\vec{AC} = (X_c - X_A)\vec{i} + (Y_c - Y_A)\vec{j} + (Z_c - Z_A)\vec{k} \quad \text{رابطه (7)}$$

$$\vec{AC} = 22\vec{i} + 40\vec{j} - 1.25\vec{k} \quad \text{رابطه (8)}$$

$$\vec{BC} = (X_c - X_B)\vec{i} + (Y_c - Y_B)\vec{j} + (Z_c - Z_B)\vec{k} \quad \text{رابطه (9)}$$

$$\vec{BC} = -4\vec{i} + 33\vec{j} - 1.04\vec{k} \quad \text{رابطه (10)}$$

از طریق معادلات 7 تا 10 می توان بردار نرمال بر صفحه ABC را از ضرب خارجی دو بردار  $\vec{AC}$  و  $\vec{BC}$  به شرح رابطه شماره 13 به دست آورد.

$$\vec{N} = \vec{AC} \times \vec{BC} \quad \text{رابطه (11)}$$

$$\vec{N} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 22 & 40 & -1.25 \\ -4 & 33 & -1.04 \end{vmatrix} \quad \text{رابطه (12)}$$

$$\vec{N} = -0.35\vec{i} + 27.88\vec{j} + 866\vec{k} \quad \text{رابطه (13)}$$

با توجه به مختصه های بردار نرمال بر سطح، معادله بخشی از صفحه محصور کننده مرمر صورتی در حد فاصل سه نقطه A, B و C به شرح رابطه 14 خواهد بود.

$$-0.35x + 27.88y + 866z = 1163398 \quad \text{رابطه (14)}$$

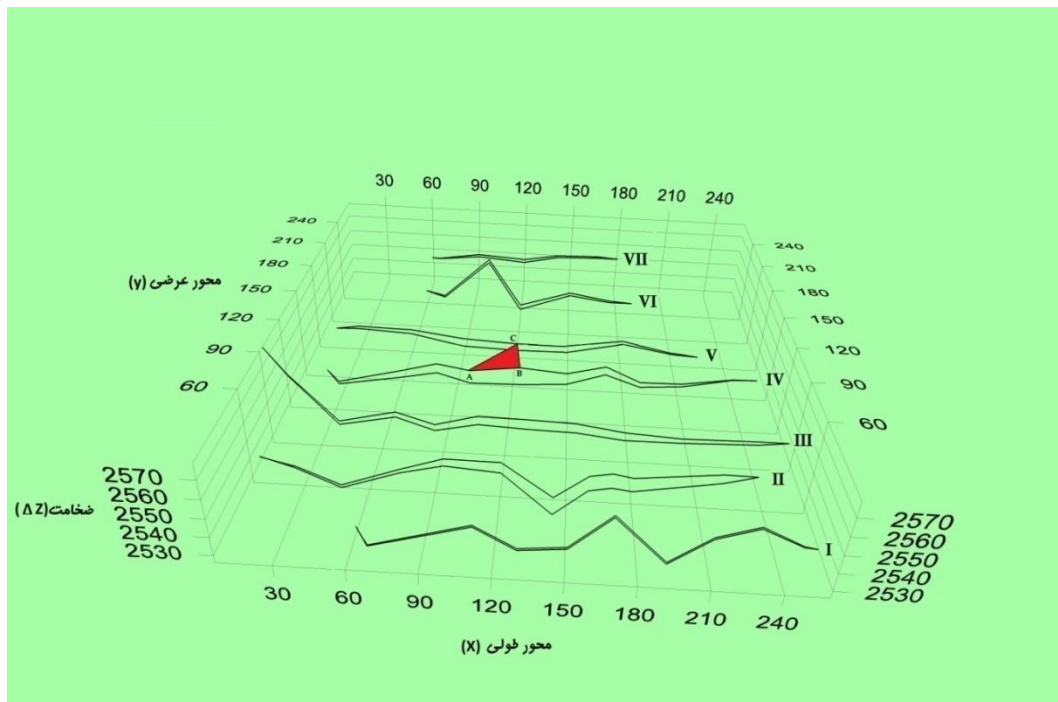
تعداد معادلات محصور کننده این تیپ مرمر در فرآیند مدل سازی این کانسار بیش از 220 صفحه است که همگی با سازوکار ارائه شده در محیط مجازی رایانه ساخته و در ادامه مطالعات مورد استفاده قرار گرفته اند.

مدل بلوکی اصلاح شده تک تک ذخایر با احتساب زون تغییر رنگ تدریجی که قرارگیری آن در ساختار کوپ های استخراجی موجب کاهش قیمت آن می گردد مد نظر قرار گرفت. برای تهیه این مدل در گام نخست ساختار فایل های اطلاعاتی معدن مورد بازنگری قرار گرفت و با اضافه نمودن واحدهای جدیدی در ساختار ستون چینه ای گمانه ها تحت عنوان زون های تغییر رنگ، مدل سه بعدی ذخایر مرمر دوباره تهیه و موقعیت زون تغییر رنگ تدریجی در آنها به طور دقیق مشخص گردید. به منظور افزایش جنبه های بهینه سازی و افزایش تعداد تک کوپ ها تهیه مدل بلوکی ذخایر مرمر با ابعاد بهینه تک کوپ مد نظر قرار گرفت. در تهیه مدل های بلوکی دو پارامتر مهم از ارزش و اهمیت بیشتری برخوردار بوده و انتخاب صحیح و مناسب این پارامترها کمک زیادی به بهینه سازی مدل و نیز تهیه مدل های تجمعی می کند. این دو پارامتر عبارتند از ابعاد بهینه بلوک های تشکیل دهنده مدل و تبع آن ابعاد ریز بلوک های مدل و پارامتر دوم موقعیت مکانی و مختصه جغرافیایی نخستین بلوک مدل است که بقیه بلوک ها متناسب با موقعیت آن در داخل حجم سه بعدی ذخیره قرار می گیرند. هر دو پارامتر در این معدن با توجه به نقش مهم آنها در کاهش و یا افزایش تعداد تک کوپ ها باید با دقت بالا تعیین گردند. با محاسبات انجام شده تاکنون ابعاد اولیه مدل بلوکی متناسب با اهداف بهینه سازی این پژوهش تعیین شده است و با اطمینان می توان مقادیر  $x=2/5$ ,  $y=2/5$  و  $z=1/2$  را برای بلوک های اولیه لحاظ نمود. ولی چنان که پیشتر نیز اشاره گردید ساخت مدل بلوکی بهینه فزون بر ابعاد بلوک های اولیه به موقعیت مکانی نخستین بلوک مدل نیز وابسته است. انتخاب موقعیت مکانی مناسب برای مرکز نخستین بلوک مدل به تولید بیشترین تعداد تک کوپ از مدل های سه بعدی ذخایر مرمر منجر خواهد شد. برای تعیین موقعیت مکانی این بلوک کلیدی معادله رویه هایی که محصور کننده هر کدام از لایه های مرمر هستند در محیط رایانه باز نمایی شد.

تهیه معادله رویه های محصور کننده ذخایر مرمر

برای تعیین معادله رویه های محصور کننده ماده معدنی که هر کدام از یک دسته صفحات مختلف ساخته شده اند. در نخستین گام مختصات سه نقطه که رؤس سطوح مثلث بندی تشکیل دهنده سطح و کف رویه ها هستند از استرینگ





شکل 4. استرینگ‌های تشکیل‌دهنده پیکره مرمر صورتی (برای آرایه جزئیات بیشتر و امکان مشاهده ضخامت ماده معدنی محور  $\Delta Z$  پنج برابر شده است).

جدول 3. مختصات نقاط انتخابی برای تعیین معادله‌بخشی از رویه محصورکننده مرمر صورتی (ابعاد بر حسب متر).

نقطه	طول (X)	عرض (Y)	ارتفاع (Z)
A	98	136	1308/85
B	124	143	1308/64
C	120	176	1307/60

از ایده ریزبلوک‌ها برای ساخت کوب‌های کوچکتر استفاده شده است. ابعاد ریزبلوک‌ها با توجه به محدودیت استخراجی معدن و نیز بازار مصرف در راستای Z معادل 0/4 متر و در راستای X و Y معادل 0/5 متر در نظر گرفته شد. استفاده از ابعاد پیش گفته این مفهوم را القا می‌کند که کوچکترین کوب قابل استخراج در معدن قره‌قشلاق که قابلیت فروش توسط معدن را دارد ابعادی معادل 0/4×0/5×0/5 متر است که از این کوب‌ها برای ساخت لوازم تزئینی، گلدان، پایه چراغ و غیره استفاده می‌شود و دقیقاً با واقعیت‌های استخراجی امروز معدن مطابقت دارد.

در گام دوم، بهینه‌سازی مدل بلوکی با دیدگاه افزایش ارتفاع تک‌کوب‌ها و بهینه‌سازی ابعاد آنها انجام می‌گیرد. هدف از اجرای این مرحله از بهینه‌سازی افزایش ارزش افزوده تک‌کوب‌های استخراجی با افزایش ارتفاع آنهاست. شایان ذکر

#### تدوین کد رایانه‌ای به منظور بهینه‌سازی مدل بلوکی

پس از تعیین بردار نرمال بر هر یک از سطوح مثلثی تشکیل‌دهنده رویه‌ها، معادله رویه تشکیل‌دهنده سطح و کف هر کدام از لایه‌های مرمر در محیط رایانه ساخته شد و سپس در محیط نرم‌افزار Excel برنامه‌ای برای تجزیه و تحلیل رویه‌ها و یافتن مختصات بلوک کلیدی اولیه مدل بلوکی نگاشته شد. برای نگاشت رایانه‌ای روابط بازگشتی به شرح گام‌های اجرایی زیر در نظر گرفته شده است.

در نخستین گام در این نرم‌افزار موقعیت مکانی بلوک کلیدی اولیه به ابعاد  $1/2 \times 2/5 \times 2/5$  متر در ابتدایی‌ترین نقطه مدل حجمی هر یک از واحدهای مرمر انتخاب و براساس موقعیت آن چیدمان بقیه بلوک‌ها که ابعادی معادل تک‌کوب استخراجی دارند انجام می‌گیرد. برای تعیین تکلیف بقیه قسمت‌های ذخیره نیز که در ساختار تک‌کوب‌ها قرار نمی‌گیرند



دیگری در 75 دسته استخراجی را ایجاد و با یکدیگر مقایسه می کند و در نهایت ترکیب چیدمانی از بلوک ها را که به واسطه آن بیشترین تعداد تک کوپ را در ساختار مدل بلوکی مشارکت می نماید تعیین و مختصه نظیر بلوک کلیدی را که به ازای آن چیدمان بهینه حاصل می شود، گزارش می کند.

**نتایج حاصل از فرآیند بهینه سازی بر روی لایه های مرمر**  
بر اساس نتایج حاصل از پردازش رایانه ای و نیز تحلیل های مهندسی گروه پژوهشی موفق شد به نتایج بسیار با ارزش و خیره کننده ای دست یابد که در طول عمر بهره برداری از معدن سابقه نداشت. بر اساس نتایج حاصل تعداد تک کوپ های قابل استخراج به نحو چشم گیری افزایش یافت که این امر به نوبه خود جنبه های اقتصادی بهره برداری از معدن را افزایش می دهد. نتایج حاصل از این مرحله از بهینه سازی در جدول 5 ارائه شده است.

است با نزدیک شدن ابعاد بلوکها به یکدیگر ارزش اقتصادی آنها افزایش می یابد و با استفاده از روابط 1 تا 6 می توان اثبات کرد با همگرایی ابعاد بلوکها به همدیگر برش ویژه و متعاقب آن هزینه های تولید نیز کاهش می یابد. در این مرحله از بهینه سازی ارتفاع بلوکهای مرمر صورتی و سبز به 1/65 متر و مرمر سفید به 1/4 متر افزایش یافت که این امر به نوبه خود انقلابی در تاریخچه بهره برداری از این معدن به شمار می رود و موجب شد برخلاف گذشته امکان استخراج تک کوپ های مرغوبتری از این معدن فراهم گردد. پس از اجرای این گام، برنامه رایانه ای تعداد کوپ های قابل استخراج در 75 دسته را که ابعاد برخی از آنها در جدول 4 ارائه شده است، گزارش می نماید. در گام بعدی که در خلال آن فرآیند بهینه سازی موقعیت بلوک کلیدی اولیه انجام می گیرد، برنامه رایانه ای با تغییر مختصات بلوک اولیه به ترتیب در راستاهای Z و Y و X و در هر راستا به میزان یک سانتی متر در هر مرحله ترکیبهای

جدول 4. برخی از ابعاد محتمل کوپ های استخراجی معدن قره قشلاق (ابعاد بر حسب متر).

ردیف	شرح	طول (X)	عرض (Y)	ارتفاع (Z)
1	کاتاگوری I	2/5	2/5	1/2
2	کاتاگوری II	2	2/5	1/2
3	کاتاگوری III	1/5	2/5	1/2
4	کاتاگوری IV	1	2/5	1/2
5	کاتاگوری V	0/5	2/5	1/2
6	کاتاگوری VI	2	2/5	0/8
7	کاتاگوری VII	1/5	2/5	0/8
8	کاتاگوری VIII	1	2/5	0/8
9	کاتاگوری IX	0/5	2/5	0/8
10	کاتاگوری X	2	2/5	0/4

جدول 5. نتایج حاصل از بهینه سازی تعداد و ابعاد بلوکها (ابعاد بلوکها بر حسب متر).

ردیف	نوع مرمر	تعداد تک کوپ	طول تک کوپ	عرض تک کوپ	ارتفاع تک کوپ
1	صورتی	268	2/5	2/5	1/5
2	سبز	226	2/5	2/5	1/5
3	سفید	11	2/5	2/5	1/3

فرآیند مدل سازی، افت ناشی از استخراج و برش در حین بهره برداری از معدن برای تصحیح نتایج حاصله، در مدل اعمال و ابعاد خام بلوکها با احتساب افت ناشی از برش در سه جهت

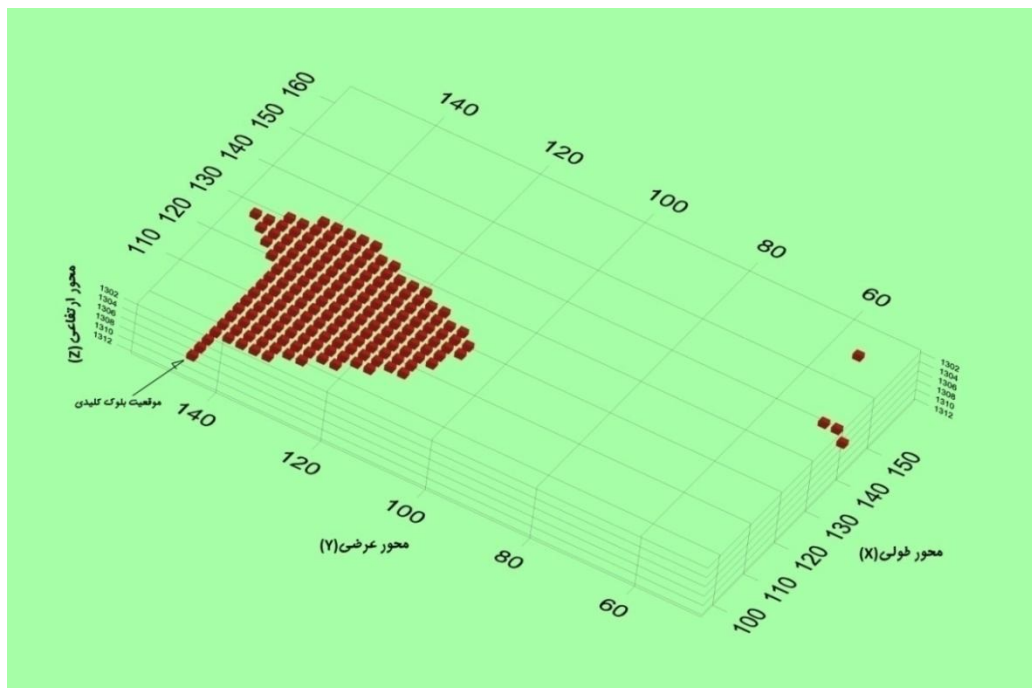
در ادامه مطالعات و به منظور اعمال جنبه های استخراجی در مدل و ملحوظ نمودن دیدگاههای بهره برداری و حذف تأثیر نامطلوب خطاهای محاسباتی و نیز برداشتهای زمین شناسی در

حاصل از بهینه‌سازی نهایی مدل استخراجی از معدن برای واحدهای مرمر صورتی و سبز در شکل‌های 5 و 6 نیز ارائه شده است.

حدود 10 سانتی‌متر افزایش و مجدداً تمامی مراحل مدل‌سازی به منظور دستیابی به نتایج عملی اجرا شد که یافته‌های حاصل از این مرحله از فرآیند بهینه‌سازی در جدول 6 ارائه شده است. برای ارائه تصویر روشنی از مراحل اجرایی، نتایج

جدول 6. نتایج نهایی مدل‌سازی به‌انضمام مختصات بلوک کلیدی هر یک از طبقات مرمری (ابعاد بر حسب متر).

ردیف	نوع مرمر	تعداد نهایی تک کوپها	طول بلوک کلیدی (X)	عرض بلوک کلیدی (Y)	ارتفاع بلوک کلیدی (Z)
1	صورتی	183	97	145/5	1307/85
2	سبز	103	125/1	177/7	1306/1
3	سفید	2	122	260/4	1308



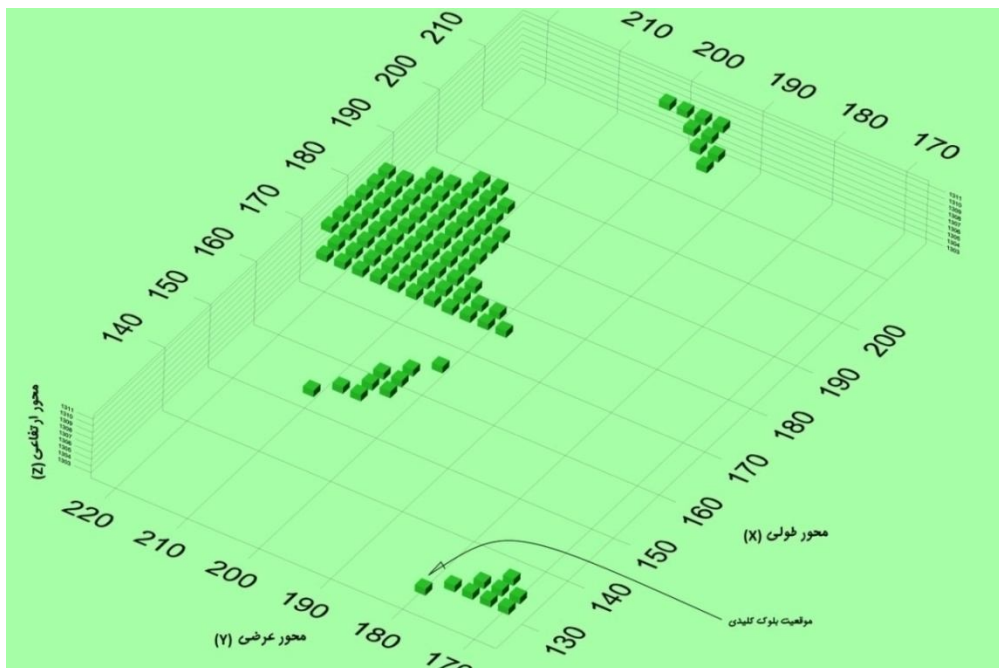
شکل 5. موقعیت نهایی تک کوپ‌های قابل استخراج از مرمر صورتی.

به‌شمار رفته و بدون تهیه مدل‌های رایانه‌ای امکان برنامه‌ریزی بلندمدت تولید در این قبیل ذخایر وجود ندارد. با توجه به نتایج حاصل می‌توان بیان نمود که تدوین برنامه‌ریزی تولید ذخایر سنگ تزئینی به افزایش ارزش افزوده کانسنگ استخراجی منجر شده و با استفاده از این مدل‌ها می‌توان انجام سفارش‌های بازار و تأمین نیازمندیهای آن را با تکیه بر مدل‌های سه بعدی به‌راحتی انجام داد.

#### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از اجرای پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

انجام مدل‌سازی رایانه‌ای قبل از طراحی استخراج ذخایر سنگ تزئینی کمک شایانی به افزایش جنبه‌های اقتصادی و بهره‌وری از این ذخایر می‌کند. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که توجه به ویژگیهای زمین‌شناسی ذخایر سنگ تزئینی و تعیین گسترش فضایی ذخیره رمز یک برنامه‌ریزی خوب و بهینه



شکل 6. موقعیت نهایی تک‌کوپ‌های قابل استخراج از مرمر سبز.

Canada. A. A. Balkema, Rotterdam, (1995) 1136 p.

[6] Taboada J., Vaamonde A., Saavedra A., "Evaluation of the quality of a granite quarry", Engineering Geology 53 (1999) 1-11.

[7] Caranassios A., Tomi G. D., Senhorinho N., "Geological modeling and mine planning for dimension stone quarries", Proceedings of Mine Planning and Equipment Selection, Panagiotou & Michalakopoulos (eds), Balkema, Rotterdam (2000) 971.

[8] Xu H., Wu Q., "A framework modeling of geological related spatial data in 3D scene", Proceedings of the 6th International Symposium on Future Software Technology, Zhengzhou, China (2001) 782 p.

[9] Bastante F. G., Taboada J., Ordonez C., "Design and planning for slate mining using optimisation algorithms", Engineering Geology 73 (2004) 93-103.

[10] Mutlutürk M., "Determining the amount of marketable blocks of dimensional stone before actual extraction", Journal of Mining Science 43 (2007) 67-72.

[11] Abdollaheisharif J., Bakhtavar E., "An intelligent algorithm of minimum cutting plane to find optimal size of extractable-blocks in dimension stone quarries", Archives of Mining Sciences 54 (2009) 641-656.

#### قدردانی

از زحمات آقای مهندس پاشاپور، مدیریت محترم معدن قره‌قشلاق که اطلاعات مفیدی را برای انجام این پژوهش در اختیار گروه پژوهشی قرار داده اند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود.

#### منابع

[1] Luodes H., Selonen O., Paakkonen K., "Evaluation of dimension stone in gneissic rocks D a case history from southern Finland", Engineering Geology 52 (2000) 209-223.

[2] Montani C., "Stone World Marketing Handbook", Gruppo Editoriale Faenza, Italy (2007) 200 p.

[3] Rathore S. S., Bhandari S., "Study on controlled blasting techniques in dimensional stone quarrying", International Journal of Mining Engineering 86 (2006) 46-49.

[4] Caccetta L., "Application of Optimisation Techniques in Open Pit Mining. Handbook of perations Research in Natural Resources", Springer-US 99 (2007) 547-559.

[5] Koppe J. C., Zingano A. C., Costa J. F. C. L., "Three dimensional modeling in planning ornamental stone quarries", Proceeding of the Fourth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary,

بررسیهای زمین شناسی اقتصادی، تعیین ذخیره و ژنز آنها (با بررسی موردی بر روی گروهی از ذخایر سنگ تزئینی استان آذربایجان غربی)"، مجله زمین شناسی اقتصادی، شماره 1 (1389) ص 51-59.

[15] پاشاپور خ، "گزارش فنی طرح بهره برداری معدن مرمر قره قشلاق"، گزارش داخلی سازمان صنعت معدن تجارت استان آذربایجان غربی، (1389).

[12] Ozcelik.Y ., "Determination of the regions used as facing and building stone according to the material characteristics in an andesite quarry", Engineering Geology 118 (2011) 104-109

[13] Sohrabian B., Ozcelik Y., "Joint simulation of a building stone deposit using minimum /maximum autocorrelation factors", Construction and Building Materials 37 (2012) 257-268

[14] عبدالهی شریف ج، امامعلی پور ع، علی پور ع، مختاریان اصل م، "جایگاه مدل سازی سه بعدی ذخایر معدنی در