Archive of SID

نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره ۱۳، شماره۴۱ ، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۹۱ تا ۱۰۱
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 13, No 41, 2019., 91-101

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای معرفی شاخصی جدیدبه منظور تعیین کوبدهی معادن سنگ ساختمانی و یافتن جهت استخراج بهینه

آرمان حضرت حسینی[۱]، سعید مهدوی[۲*]

[۱]کارشناس ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالوژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،arman.hh@aut.ac.ir
[۲] استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، smahdevari@cc.iut.ac.ir

(دریافت: ۲۰-۱۲-۱۳۹۶ وپذیرش: ۲۴-۱۰-۱۳۹۷)

چکیده

به دلیل نبود معیاری مانند عیار، تصمیم‌گیری در مورد استخراج یک معدن سنگ با دشواری مواجه است. از طرفی دیگر، هدف از بهینه‌سازی در معادن سنگ تولید بلوک‌هایی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد استاندارد است. در این تحقیق، شاخصی به نام نسبت کوبدهی (CPR)تعریف شده است که معادن سنگ را از نظر عیار هندسی بلوک‌ها به سه رده خوب، متوسط و ضعیف طبقه‌بندی می‌کند. علاوه بر این، با اعمال صفحات استخراجی و مقایسه CPR در جهت‌های مختلف می‌توان جهت استخراج بهینه را نیز تعیین کرد. این شاخص در معدن تراورتن اسک استان مازندران مورد استفاده قرار گرفت و مقدار آن برابر با ۲۲ درصد محاسبه شد که کیفیت هندسی بلوک‌های معدن را در رده ضعیف قرار می‌دهد. امتداد جهت استخراجی بهینه N60W ارزیابی شد که نشان می‌دهد برای کسب بیشترین کوبدهی، جهت استخراجی فعلی باید ۳۵ درجه به طرف شمال تغییر کند که در اثر اعمال آن، میانگین حجم بلوک‌های برجا ۲۴۱٫۶۳ مترمکعب، میانگین ابعاد کوب‌ها برابر ۲٫۹۳×۲٫۴×۲٫۲۵ و میزان کوب‌های قابل فروش برابر ۵۳۳۶۹٫۱۴ مترمکعب حاصل می‌شود که بر اساس نرخ موجود، منجر به درآمد حدود ۱۳۰ میلیارد ریالی برای این معدن خواهد شد.

کلمات کلیدی

معدن سنگ ساختمانی، مکعب مستطیل، الگوریتم ژنتیک، نسبت کوبدهی، جهت استخراج بهینه.

*نویسنده مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

برای برنامه‌ریزی استخراجی ذخایر طبیعی، کیفیت کانسار و مواد مورد نظر قبل از استخراج باید ارزیابی شود که این امر معمولا بر اساس تخمین یک شاخص یک متغیره مانند عیار انجام می‌شود اما شناسایی این شاخص و تقسیم‌بندی بلوک‌ها دو چالش بزرگ در برنامه‌ریزی معادن سنگ محسوب می‌شوند[۱].در معادن فلزی، مقدار فلز محتوی اهمیت دارد که با عیار بیان می‌شود اما در معادن سنگ ساختمانی عوامل دیگری مانند شکل و اندازه محصول بر درآمد تاثیر دارند زیرا تولید اقتصادی سنگ‌های ساختمانی بستگی به ظاهر سنگ‌ها و امکان تولید بلوک‌های قواره دارد [۲]. بنابراین، شاخصی که قرار است به عنوان جایگزین عیار در معادن سنگ معرفی شود باید نماینده مناسبی از کیفیت هندسی بلوک‌ها باشد.

تابودا و همکاران، با استفاده از تکنیک آنالیز چند متغیره، یک شاخص برای طبقه‌بندی کیفیت بلوک‌های گرانیتی ارایه کردند[۳]. همچنین آن‌ها، یک سیستم فازی پیشنهاد کردند که با ورود متغیرهای زمین‌شناسی و زیباشناختی قادر است کیفیت ذخایر اسلیتی را به سه گروه خوب، متوسط و باطله تقسیم کند[۴]. سوسا معیاری برای مطلوبیت رخنمون توده‌های گرانیتی بر پایه میانگین تراکم درزه‌ها در واحد حجم، میانگین دسته درزه‌ها و میانگین فاصله‌داری درزه‌ها تعریف کرد [۵]. آلاده و همکاران نیز برای مطلوبیت رخنمون‌های گرانیتی یک شاخص شمارش حجمی درزه‌های اصلاح شده معرفی کردند که برای تولید اقتصادی نباید بالاتر از ۱/۷ بر متر باشد[۶].با این‌حال، تراکم حجمی درزه‌ها یک معیار کلی است که بیشتر برای ساخت فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌ها مناسب است.

برای ارزیابی کیفیت هندسی بلوک‌ها برای استخراج به‌عنوان سنگ ساختمانی نیاز به شاخص دقیق‌تری است. موتلوترک از یک روش گرافیکی برای شناسایی بلوک‌های قابل‌فروش سنگ‌های ساختمانی بدون بهینه‌سازی جهت استخراج استفاده کرد که منجر به یک نتیجه محافظه‌کارانه می‌شود[۷].در این تحقیق جهت استخراج نیز بهینه می‌شود که راندمان معدن را بهبود می‌بخشد. روش‌های زمین آماری نیز توسط برخی محققان به کار رفته است[۱, ۸, ۹] اما چنین شاخص‌هایی به راحتی نمی‌توانند به مقدار بلوک‌های قابل فروش تبدیل شوند. بعضی محققان سعی کرده‌اند که با تخمین بلوک‌های برجا کیفیت معادن سنگ را تعیین کنند[۷, ۱۰-۱۳] اما حجم برجای بلوک‌ها به تنهایی نمی‌تواند معیاری برای تصمیم‌گیری راجع به کیفیت هندسی بلوک‌های برجا باشد زیرا ممکن است مقدار بالایی برای حجم یک بلوک محاسبه شود اما بلوک به شکل صفحه‌ای و یا ستونی باشد که ویژگی‌های یک بلوک استاندارد را برای استخراج ندارد.

در تحقیقات فوق، شاخص جامعی برای تعیین کیفیت هندسی بلوک‌ها ارایه نشده است، در حالی که تولید بلوک‌های قواره از نظر تسهیل در فرآوری سنگ و کاهش ضایعات اهمیت زیادی دارد، بنابراین در این تحقیق، شاخصی به نام نسبت کوبدهی (CPR) تعریف شده که با استفاده از برنامه‌ای که با الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است (برنامه کوبدهی)، میزان مکعب مستطیل‌های موجود در بلوک‌های برجا را محاسبه کرده است و در نتیجه، میزان بلوک‌های قابل فروش معدن تعیین می‌شود. علاوه بر این، با اعمال صفحات استخراجی و مقایسه CPR در جهت‌های مختلف، جهت استخراج بهینه نیز مشخص می‌شود که بهره‌وری را افزایش می‌دهد. در پایان، عملکرد این شاخص در یک معدن تراورتن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-روش تحقیق

در اینجا نیاز است که یک پارامتر حجمی به نام حجم بزرگ‌ترین مکعب مستطیل محاط شده[1] (V_{lsc}) تعریف شود که عبارت است از حجم بزرگ‌ترین مکعب مستطیلی که می‌تواند درون یک بلوک قرار گیرد. الگوهای مختلف ناپیوستگی، بلوک‌هایی با اضلاع و اشکال مختلف می‌سازند. محاسبه V_{lsc} در شکل‌های پیچیده کار مشکلی است. اولکر و تورانبوی از ساختار درختی برای شناسایی رفتار بلوک‌های منفرد و از الگوریتم ژنتیک برای تعیین بیشترین حجم این مکعب مستطیل استفاده کردند [۱۴]. با این حال، شاخصی برای کوبدهی معدن و تعیین جهت استخراج بهینه ارایه نکردند. مدلسازی توده سنگ و شناسایی بلوک‌ها و مشخصات هندسی آن‌ها، مهم‌ترین مرحله در آنالیز پایداری و رفتاری توده سنگ است. ابتدا ناپیوستگی‌ها به روش‌های مختلفی مانند خط برداشت، مغزه‌گیری و نظایر آن برداشت می‌شوند تا بتوان شبکه ناپیوستگی‌ها را مدلسازی کرد. در این تحقیق برای شناسایی بلوک‌های حاصل از برخورد دسته درزه‌ها، از نرم‌افزار 3DEC استفاده شده است. سپس، مختصات رئوس بلوک‌های ایجاد شده وارد برنامه کوبدهی می‌شود که بر اساس الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است تا بازیابی معدن و جهت استخراج بهینه محاسبه شود.

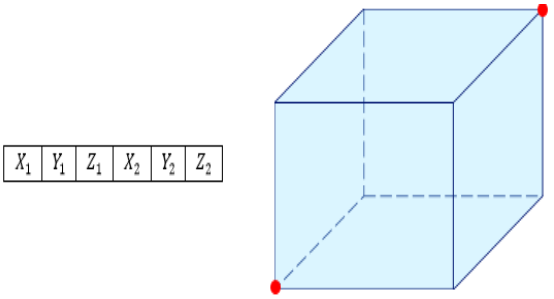
[1]Volume of the largest surrounded cuboid

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌های تکاملی برای جست و جوی نقاط بهینه در محیط‌های بسیار پیچیده است و از روند تکامل طبیعی در موجودات زنده تقلید می‌کند. به‌طورکلی، الگوریتم‌های ژنتیکی از اجزا مانند کروموزوم، جمعیت و تابع برازندگی تشکیل می‌شوند. هر کروموزوم نشان‌دهنده یک راه‌حل ممکن برای مساله موردنظر است. خود کروموزوم‌ها (راه‌حل‌ها) از تعداد ثابتی ژن (متغیر) تشکیل می‌شوند. در الگوریتم‌های ژنتیکی، در طی مرحله تولید مثل از عملگرهای ژنتیکی استفاده می‌شود. با تاثیر این عملگرها بر روی یک جمعیت، نسل بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عملگرهای انتخاب[1]، آمیزش[2] و جهش[3] معمولا بیشترین کاربرد را دارند. برنامه به کمک الگوریتم ژنتیک و در نرم‌افزار متلب برای شناسایی بزرگ‌ترین مکعب مستطیل در فضای سه‌بعدی کدنویسی شد. شش ژن برای هر کروموزوم در نظر گرفته شد که بیانگر مختصات دو گوشه قطری مکعب مستطیل است (شکل ۱). ژن‌ها می‌توانند به صورت باینری و یا اعداد حقیقی تعریف شوند که بستگی به ماهیت مساله دارد. در این تحقیق هر راس دارای سه مختصات است و هر کروموزوم باید دارای مختصات دو راس قطری باشد. اگر اعداد به صورت باینری تعریف شوند، رشته‌های کروموزوم بسیار طولانی می‌شوند که این عمل پردازش الگوریتم را طولانی می‌کند. به همین دلیل سیستم کدگذاری کروموزوم‌ها بر اساس اعداد حقیقی انجام شده است.



شکل ۱- کروموزوم حاوی مختصات فضایی دو گوشه قطری مکعب مستطیل.

بعد از ساخت جمعیت اولیه، فرآیند تکاملی آغاز می‌شود. برنامه تلاش می‌کند که مطلوبیت کروموزوم‌ها را با یافتن میزان شایستگی آن‌ها تعیین کند. ازآنجایی که هدف، بیشینه کردن حجم مکعب مستطیل است، بنابراین تابع شایستگی به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$F((x_1,y_1,z_1),(x_2,y_2,z_2))=(x_2-x_1)\times(y_2-y_1)\times(z_2-z_1) \quad (۱)$$

که در آن x و y مختصات فضایی گوشه‌های قطری مکعب مستطیل‌اند.

نکته شایان توجه این است که نقاط تولید شده باید درون چند وجهی مورد نظر (بلوک) واقع باشند. از طرفی دیگر، ممکن است این نقاط، داخل چندوجهی قرار گیرند اما بخشی از مکعب مستطیلی که می‌سازند، خارج از چندوجهی قرار گیرد. برای جلوگیری از این مشکل، آزمایش نقطه در چندوجهی[4] باید بر روی هر نقطه‌ای که تولید می‌شود، انجام شود. تعیین موقعیت نقطه نسبت به یک چندوجهی، یکی از ابتدایی‌ترین مسایل در هندسه محاسباتی است که روش‌های مختلفی با کارآیی‌های گوناگون برای این مساله پیشنهاد شده است. گروه اول شامل روش‌هایی است که با محاسبه و ارزیابی یک پارامتر خاص، وضعیت نقطه را مشخص می‌کند و شامل روش‌های تقاطع پرتو، روش‌های بر اساس مثلث و روش‌های بر اساس جمع زاویه است. گروه دوم روش‌هایی را در برمی‌گیرد که سعی در حل مساله با تجزیه کردن چندوجهی به وسیله توری‌ها، مثلث، ذوزنقه و دیگر اشکال دارند. در این تحقیق روش مثلث‌بندی به دلیل داشتن مرتبه زمانی کمتر به‌کاررفته است.یعنی، چندوجهی به منشورهای قاعده مثلثی تجزیه می‌شود. بدین منظور باید از روش مثلث‌بندی دلونی[5] استفاده شود. در ریاضیات و هندسه محاسباتی، یک مثلث‌بندی دلونی برای یک مجموعه از نقاط به نام P در یک صفحه، یک مثلث‌بندی به نام DT(P) است به‌نحوی که هیچ یک از نقاط P درون هیچ یک از دایره‌های محیطی مثلث‌های DT(P) نباشد. این مثلث‌بندی کمینه زاویه‌های مثلث‌ها را به بیشترین مقدار ممکن می‌رساند و به این ترتیب از به وجود آمدن مثلث‌های باریک جلوگیری می‌کند. پس از مثلث‌بندی بلوک، باید بررسی شود که آیا نقطه مورد نظر درون منشورهای مثلثی قرار می‌گیرد یا خیر. بدین منظور، دترمینان بین رئوس منشور و نقطه مورد نظر محاسبه شده و برحسب اینکه این مقدار مثبت یا منفی باشد، داخل یا بیرون بودن نقطه تعیین می‌شود.

روند کلی برنامه همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به این صورت است که ابتدا یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها (راه‌حل‌ها) ایجاد می‌شوند که همه تحت آزمون

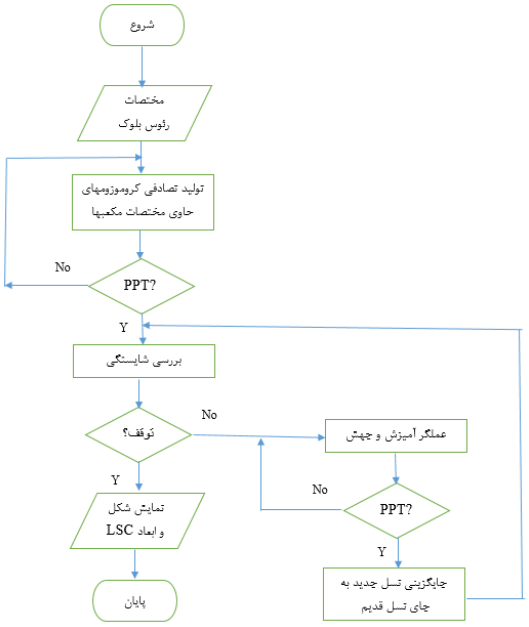
[1]Selection
[2]Crossover
[3]Mutation

[4]Point in polyhedron test (PPT)
[5]Delaunay triangulation

www.SID.ir

Archive of SID

نقطه در چندوجهی قرارگرفته‌اند و میزان شایستگی آن‌ها نیز محاسبه می‌شود. سپس قسمت اصلی برنامه آغاز می‌شود. برای اعمال عملگرهای آمیزش و جهش باید کروموزوم‌هایی از جمعیت اولیه انتخاب شوند. عمل انتخاب به روش‌های گوناگونی مانند چرخه‌رولت[1]، تورنومنت[2] و تصادفی[3] انجام می‌شود. در روش چرخه‌رولت، آن کروموزومی که شایسته‌تر است، شانس بیشتری برای انتخاب‌شدن دارد اما در دو روش دیگر، انتخاب کروموزوم به صورت تصادفی است. از آنجایی که هدف الگوریتم مورد نظر یافتن بزرگترین (شایسته‌ترین) مکعب‌مستطیل است بنابراین در اینجا روش چرخه‌رولت به عنوان عملگر انتخاب به کار رفته است. عملگر آمیزش با استفاده از دو رشته والد، دو رشته فرزند به وجود می‌آورد. انتخاب ژن‌هایی که باید از هر یک از والدین اخذ شود، به روش‌های گوناگونی مانند آمیزش تک نقطه‌ای[4]، دو نقطه‌ای[5] و یکنواخت[6] انجام می‌شود. دو نوع اول برای کروموزوم‌هایی که با اعداد باینری ساخته می‌شوند، به کار می‌روند. در این تحقیق، کروموزوم‌ها از اعداد حقیقی که بیانگر مختصات رئوس بلوک‌ها هستند، ساخته شده‌اند. به همین دلیل، در اینجا از آمیزش یکنواخت استفاده شده است.در این روش، ابتدا به تعداد ژن‌ها که در اینجا ۶ عدد است، عدد تصادفی بین صفر و یک ایجاد می‌شود. بردار دیگری از تفاضل بردار تصادفی اول از عدد ۱ تولید می‌شود. فرزندان، از حاصلضرب ژن‌های والدین در این بردارهای تصادفی به وجود می‌آیند. فرزندان تولید شده تحت آزمایش نقطه در چندوجهی قرار می‌گیرند. در مرحله بعدی نوبت به عملگر جهش می‌رسد. این عملگر برای به وجود آوردن فرزند فقط از یک والد استفاده می‌کند. این کار با انجام تغییرات کوچکی در رشته اولیه به وجود می‌آید. جهش به روش‌های مختلفی مانند جابه‌جایی[7]، وارونه‌سازی[8] و در هم آمیختن[9] می‌تواند انجام شود که در اینجا از روش جابه‌جایی استفاده شده است. بدین معنی که مکان دو ژن که به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند با یکدیگر تعویض می‌شوند. نقاط جدید نیز از نظر داخل یا بیرون بودن از بلوک مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مرحله بعدی، جمعیت اولیه با جمعیت حاصل از آمیزش و جهش ادغام شده و بر اساس میزان شایستگی از بیشترین به کمترین مرتب می‌شوند.



شکل ۲-روندنمای برنامه کوبدهی.

۲-۲- تحلیل حساسیت

هرچه تعداد جمعیت اولیه و تعداد نسل‌ها افزایش یابد، مسلم است که جواب‌های نهایی بهتری به دست می‌آید اما زمان حل افزایش می‌یابد.از دیگر پارامترهای اولیه مهم در الگوریتم ژنتیک احتمال آمیزش و احتمال جهش است که برحسب درصد نشان داده می‌شوند و مکمل یکدیگرند. بنابراین، پارامترهای الگوریتم ژنتیک مانند جمعیت اولیه، تعداد نسل و احتمال آمیزش باید به گونه‌ای تعیین شوند که بیشترین مقدار تابع شایستگی به دست آید. مقادیر تصادفی برای پارامترهای جمعیت، تعداد نسل و احتمال آمیزش به برنامه کوبدهی وارد شدند و میزان تابع شایستگی در هر سناریو محاسبه شد که برای نمونه، ۵ سناریو در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نمونه سناریوها برای تحلیل حساسیت.

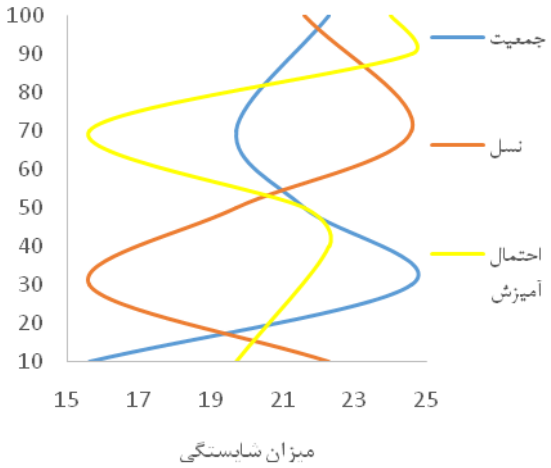
سناریو	جمعیت	نسل	احتمال آمیزش	میزان شایستگی
۱	۱۰	۳۰	۷۰	۱۵٫۶
۲	۳۰	۷۰	۹۰	۲۴٫۶
۳	۵۰	۱۰۰	۵۰	۲۱٫۶
۴	۷۰	۵۰	۳۰	۱۹٫۷
۵	۱۰۰	۱۰	۴۰	۲۲٫۳

[1] Roulette
[2] Tournament
[3] Random
[4] Single-point crossover
[5] Single-point crossover
[6] Uniform
[7] Swap
[8] Inversion
[9] Scramble

www.SID.ir

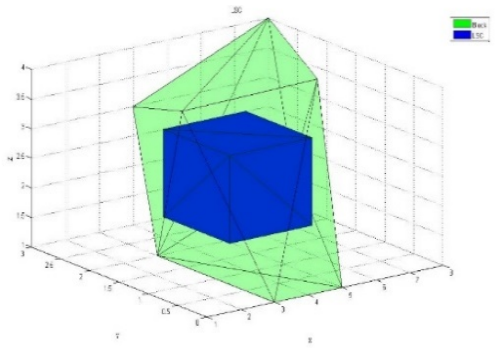
Archive of SID

حداقل تعداد کروموزوم‌ها برای انجام عمل آمیزش باید ۲ عدد باشد. از طرفی دیگر، حداکثر تعداد جمعیت برابر ۱۰۰ منظور شد، زیرا در مقادیر بالاتر از آن، زمان حل طولانی می‌شود. حداقل تعداد نسل برابر ۱ و حداکثر ۱۰۰ لحاظ شد. احتمال آمیزش نیز عددی بین صفر تا ۱۰۰ درصد است. تاثیر این پارامترها بر میزان تابع شایستگی در شکل ۳ در قالب یک نمودار نشان داده شده است. با افزایش جمعیت، میزان تابع شایستگی تا جمعیت به حدود ۳۰ افزایش می‌یابد ولی پس از آن کاهش می‌یابد. میزان تابع شایستگی در تعداد نسل ۷۰ به حداکثر مقدار می‌رسد. همچنین، در احتمال ۹۰ درصد، بیشترین میزان تابع شایستگی حاصل می‌شود.



شکل ۳- تحلیل حساسیت پارامترهای تعداد جمعیت، تعداد نسل و احتمال آمیزش بر میزان تابع شایستگی.

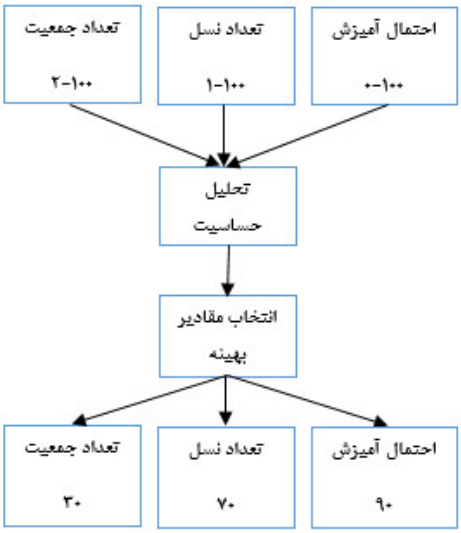
با توجه به این تحلیل حساسیت، تعداد جمعیت اولیه ۳۰ در نظر گرفته شد. بنابراین ۳۰ راه‌حل برتر از میزان کروموزوم‌های مرتب‌شده، انتخاب می‌شود و این چرخه به تعداد نسل‌ها که ۷۰ نسل است، تکرار می‌شود. در هر نسل بهترین جواب به کاربر نشان داده می‌شود. احتمال آمیزش برابر ۹۰ درصد و احتمال جهش برابر ۱۰ درصد لحاظ شد. با توجه به اینکه تعداد فرزندان حاصل از عملیات آمیزش همیشه عددی زوج است و حاصل‌ضرب احتمال آمیزش۰/۹در تعداد جمعیت ۳۰ برابر با عدد ۲۷ می‌شود که عددی فرد است، بنابراین در ابتدای برنامه دستوری وارد شد تا این عدد را به عدد زوج ۲۸ تبدیل کند. همچنین، یک شرط محدود کننده در آغاز برنامه تعریف شد تا طبق آن از تولید مکعب‌های کوچک جلوگیری شود و برنامه زودتر به جواب بهینه برسد.نتایج تحلیل حساسیت و انتخاب مقادیر بهینه به صورت گرافیکی در شکل ۴ نشان داده شده است.در پایان، ابعاد و حجم بزرگ‌ترین مکعب مستطیل (LSC) که درون بلوک قرار می‌گیرد، در خروجی چاپ شده و به همراه بلوک به کاربر نمایش داده می‌شود (شکل ۵).



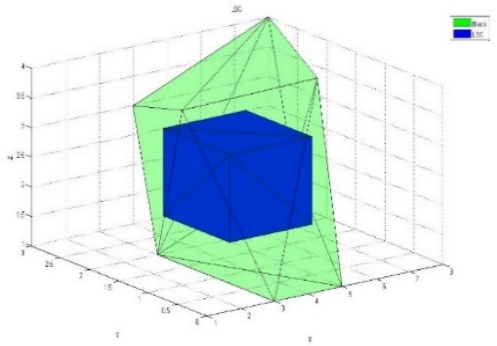
شکل ۵- بزرگترین مکعب‌مستطیل یافت شده (LSC) درون یک بلوک برجا (Block)

۲-۳- تعریف نسبت کوبدهی

نسبت کوبدهی مطابق رابطه ۲ به صورت نسبت بین حجم مکعب مستطیل‌ها به حجم بلوک‌های برجا تعریف می‌شود.



شکل ۴- نتایج تحلیل حساسیت و انتخاب مقادیر بهینه



شکل ۵- بزرگترین مکعب‌مستطیل یافت شده (LSC) درون یک بلوک برجا (Block)

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۳- تعریف نسبت کوبدهی

نسبت کوبدهی مطابق رابطه ۲ به صورت نسبت بین حجم مکعب مستطیل‌ها به حجم بلوک‌های برجا تعریف می‌شود.

$$CPR= \sum V_{LSC}/\sum V_b \times 100 \quad (۲)$$

که در آن:

CPR نسبت کوبدهی

V_{lsc} حجم مکعب مستطیل درون بلوک برجا

V_b حجم بلوک برجا

در معادن سنگ، درصد مواد ازدست‌رفته حین عملیات استخراج بین ۳۵ تا ۷۰ درصد است که اگر عملیات حمل و نقل و فرآوری نیز در نظر گرفته شود، میزان مواد ازدست‌رفته بین ۵۰ تا ۸۰ درصد توده سنگ است [۱۵]، بنابراین بازیابی بلوک‌ها حین استخراج تقریبا بین ۳۰ تا ۶۵ درصد خواهد بود. عیار فلز در سنگ، به صورت تجمعی از عیار فلز موردنظر در کانسار تعریف می‌شود. برای تعریف، معیاری مشابه عیار در معادن سنگ نیاز است که مفهوم عیار مشخص شود. در واقع، عیار بیانی از میزان وجود یک ویژگی خاص در میان مجموعه‌ای از ویژگی‌ها است. هدف در معادن سنگ، تولید بلوک‌هایی هر چه بیشتر به شکل مکعب مستطیل است تا عملیات حمل و نقل و فرآوری راحت‌تر انجام شود. نسبت کوبدهی (CPR) عبارت است از نسبت بین حجم کل مکعب مستطیل‌هایی که می‌تواند درون یک بلوک قرار گیرد به حجم کل بلوک‌های برجا که همان مفهوم عیار است و نماینده خوبی برای کیفیت هندسی بلوک‌های برجا محسوب می‌شود، بدین معنی که هرچه درصد نسبت کوبدهی به عدد ۱۰۰ نزدیکتر باشد، بلوک‌ها قوارگی بیشتری دارند که ضایعات کمتری نیز تولید می‌کنند. در نهایت، می‌توان به کمک جدول ۲ درباره مطلوبیت عیار هندسی بلوک‌های یک معدن سنگ که از نسبت CPR حاصل شده است، قضاوت کرد.

جدول ۲- ارزیابی عیار هندسی بلوک‌های معادن سنگ‌ساختمانی بر اساس نسبتکوبدهی (درصد)

خوب	متوسط	ضعیف
۴۵>	۳۰ تا ۴۵	۳۰<

روش استخراج و جهت استخراج از عوامل موثر بر ذخیره قابل استخراج است. با توجه به اینکه امروزه استفاده از سیم برش الماسه بسیار رایج شده است، بنابراین انتخاب جهت استخراج بهینه، وجه تمایز معادن سنگ است. داشتن اطلاعات کافی در خصوص صفحات ناپیوستگی و تشخیص بلوک‌های محصور بین آن‌ها باعث می‌شود تا بلوک‌های بیشتری را به عنوان بلوک قابل‌قبول (به لحاظ ابعادی) استخراج کرد و میزان ضایعات را تا حد زیادی کاهش داد. نکته مهم در استخراج سنگ، تعیین جهت پیشروی جبهه‌کار و فاصله بین سطوح استخراجی است که خود به عنوان یک سطح ناپیوستگی عمل می‌کند. به کمک نرم‌افزار کوبدهی، می‌توان جهت‌ها و فواصل استخراج مختلف را بررسی کرد تا مقادیر بهینه آن‌ها با توجه به بیشترین آهنگ کوبدهی تعیین شود و می‌توان میزان ذخیره قابل استخراج ER[1] را تخمین زد که عبارت است از مجموع حجم مکعب مستطیل‌های درون بلوک‌های برجا پس از اعمال جهت و سطوح استخراجیاما تمام آنچه استخراج می‌شود، به فروش نمی‌رسد. همان‌طور که قبلا گفته شد، بلوک‌های کمتر از ۱ مترمکعب به عنوان ضایعات تلقی می‌شوند. بنابراین، میزان کوب‌های قابل‌فروش[2] را می‌توان از رابطه ۳ محاسبه کرد. با توجه به عدم قطعیت‌هایی که هنگام استخراج ممکن است پیش آید، یک ضریب اطمینان نیز باید لحاظ شود که مقدار پیشنهادی آن ۰٫۸ است.

$$AMC= (ER- \sum(V_c<1))\times SF \quad (۳)$$

که در آن:

AMC مقدار کوب‌های قابل‌فروش

ER ذخیره قابل استخراج

V_c حجم مکعب مستطیل درون بلوک برجا

SF ضریب اطمینان

با محاسبه AMC می‌توان درآمد و توجیه‌پذیری اقتصادی معدن را در مرحله امکان‌سنجی تخمین زد که این موضوع عامل مهمی برای تصمیم‌گیری راجع به استخراج معدن و یا جذب سرمایه‌گذار است. از طرفی دیگر، معیار مناسبی برای برنامه‌ریزی معدن و تعیین سکانس‌های استخراج از توده سنگ به دست می‌دهد. محاسبه درآمد بر اساس رابطه ۴ انجام می‌شود.

$$I=AMC\times\rho\times P \quad (۴)$$

که در آن:

AMC میزان کوب‌های قابل‌فروش

ρ چگالی سنگ (تن بر مترمکعب)

Pقیمت فروش هر تن کوب خام در معدن

Iدرآمد حاصل از فروش کوب‌های معدن

[1] Exploitable Reserve
[2] Amount of marketable cuboid (AMC)

www.SID.ir

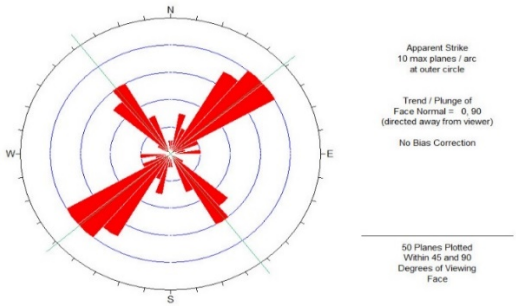
Archive of SID

۳- اجرای مدل در معدن تراورتن اسک

این معدن با ذخیره قطعی ۵۰۰ هزار تن و ذخیره احتمالی ۱ میلیون تن در سال ۱۳۸۱ کشف شد و در قسمت یال جنوبی کوه دماوند و در رشته‌کوه البرز مرکزی و نزدیکی روستای آب اسک در استان مازندران قرار دارد (شکل ۶). این سنگ‌ها نتیجه فعالیت‌های گرمایی کوه دماوند در مراحل پایانی فعالیت و خاموشی آن است و دارای رنگ‌های پرتقالی، لیمویی، قهوه‌ای روشن و طلایی است ولی اکثر سنگ‌های استخراج‌شده از این معدن به رنگ لیمویی دیده می‌شود. سه چشمه آب گرم به نام‌های آب اسک، رینه و لاریجان در این ناحیه وجود دارد و همین عامل منجر به شکل‌گیری لایه‌های وسیعی از تراورتن در این منطقه شده است. این معدن دارای سه دستگاه سیم برش الماسه، یک میل سیم‌بر، یک عدد راسول، دو عدد ژنراتور و یک لودر کاترپیلار ۹۸۸ است. در حال حاضر جبهه‌کار شرقی دارای یک پله به ارتفاع ۱۱ متر و جبهه‌کار غربی دارای دو پله به ارتفاع ۷ و ۱۰ متر است. امتداد جهت استخراج فعلی برابر S85W درجه است و سالانه ۱۱ هزار تن سنگ استخراج می‌شود. از طرف شمال، این معدن با شیب تندی به جاده هراز ختم می‌شود و از سمت جنوب با کوه بزرگی محصور شده است. بنابراین فقط از دو طرف امکان دسترسی وجود دارد که به دلیل سهولت بیشتر، این معدن از جهت غرب با رمپی که از جاده هراز شروع می‌شود، باز شده است.

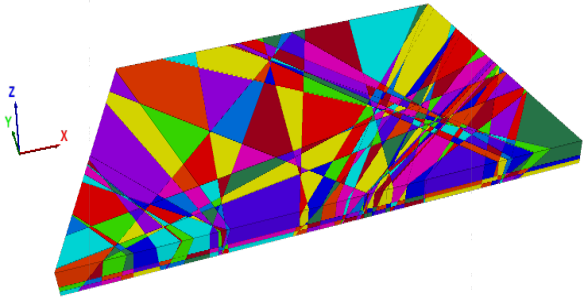
شکل ۶- موقعیت معدن تراورتن اسک

عملیات درزه‌برداری در این معدن به‌وسیله کمپاس و در شهریور ۱۳۹۶ انجام شد. به کمک روش خط برداشت، ۵۵ درزه از سمت شرق معدن به سمت غرب معدن برداشت و مختصات یک نقطه بر روی هر درزه با کمک دستگاه GPS ثبت شد. این اطلاعات در فرم برداشت درزه‌ها که شامل مشخصات خط برداشت، جبهه‌کار و درزه بود، وارد شد.در معدن سنگ تزیینیبیاد شده عمده‌ترین ناپیوستگی مربوط به درزه‌ها است. نمودارگل سرخی شکل ۷ نشان می‌دهد که بیشتر درزه‌ها دارای امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی‌اند. به‌طورکلی می‌توان دو دسته‌درزه اصلی در این معدن با مشخصات S49W/60W و S37E/78W شناسایی کرد که به ترتیب دسته‌درزه شماره ۱ و ۲ نام‌گذاری می‌شود. زاویه حاده بین این دو دسته‌درزه برابر ۸۱٫۴۷ درجه به دست آمد.فرض شده است که کلیه برداشت‌های انجام‌شده در طول یک خط برداشت انجام می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، کلیه خطوط برداشت را به یکدیگر وصل می‌کند و در نهایت تنها یک خط برداشت در نظر گرفته می‌شود که طول آن برابر با مجموع طول همه خطوط برداشت‌شده است. با این فرض، تنها یک خط برداشت وجود خواهد داشت که با استفاده از آن می‌توان فاصله‌داری درزه‌ها را محاسبه کرد. دسته‌درزه شماره یک، شامل ۱۸ درزه و میانگین فاصله‌داری این دسته‌درزه برابر ۳٫۵۲ متر است. تعداد درزه‌ها در دسته‌درزه شماره دو، برابر ۳۷ عدد است و میانگین فاصله‌داری برابر۲٫۹ متر است.



شکل ۷- نمودار گل‌سرخی برای یافتن دسته‌درزه‌های اصلی در معدن اسک

برای تعیین میزان کوبدهی ابتدا کدهای مربوط به مشخصات درزه‌های برداشت شده در یک فایل تمام متن ثبت شد، سپس درزه‌ها برای توده سنگی با ابعاد ۳۰۰×۲۰۰ متر و با ضخامت ۱۱ متر در نرم‌افزار 3DEC مدلسازی شدند که منجر به تولید ۱۴۹۸ بلوک شد (شکل ۸). مختصات رئوس بلوک‌های ایجاد شده از تقاطع درزه‌ها وارد برنامه کوبدهی شده که قبلا بر پایه الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب کد نویسی شده است. نتایج محاسبات در سه حالت کمترین، بیشترین و میانگین در جدول ۳ آورده شده است که V_{LSC} و V_b به ترتیب حجم بزرگ‌ترین مکعب مستطیل‌ها و حجم بلوک‌ها برحسب مترمکعب و ابعاد مکعب مستطیل‌ها برحسب متر است. در نهایت، مقدار CPR برابر ۲۲ درصد به دست آمد.



شکل ۸- مدل بلوکی توده سنگ موردمطالعه معدن اسک در نرم‌افزار 3DEC

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- نتایج حاصل از برنامه کوبدهی برای معدن اسک

	ابعاد(متر)	V_b (مترمکعب)	V_{LSC} (مترمکعب)
کمترین	۰/۱×۰/۰۷×۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۱
بیشترین	۳۶/۰۱×۶۰/۱۴×۳۷/۹۸	۳۳۳۷۶/۶۲	۹۰۰۶/۲۷
میانگین	۲/۵۶×۲/۸۶×۳/۲۶	۵۴۰/۴۳	۱۱۶/۷۸

برای استخراج، بسته به تنوع دستگاه‌ها، چال‌هایی با فاصله افقی ۱۵ تا ۲۰ متر حفر شده، سپس این فاصله به چال‌های به فواصل مساوی ۱/۸ متری تقسیم می‌شود که همان عرض بلوک‌های اولیه است. این فاصله ۱/۸ متری بر اساس عرض کامیون برای حمل بلوک تعیین شده است.بنابراین حداکثر عرض برش را نمی‌توان تغییر داداما عمق برش را می‌توان بهینه کرد. بدین صورت که پس از انتخاب جهت بهینه استخراج، عمق برش بر اساس فاصله‌داری ناپیوستگی غالب تعیین شود. سطوح استخراجی با فاصله‌داری ۱/۸ متر با آزیموت‌های بین صفر تا ۱۷۰ درجه بر مدل بلوکی اولیه اعمال شدند. دلیل انتخاب این محدوده از آزیموت‌ها این بود که به‌طور مثال، نتایج حاصل از انتخاب جهت استخراج با آزیموت ۳۰ درجه با جهت استخراج با آزیموت ۲۱۰ درجه برابر است و این امکان دسترسی به کانسار است که تعیین می‌کند که کدام یک به عنوان جهت استخراج بهینه برگزیده شود. بنابراین لزومی ندارد که جهت استخراج برای ۳۶۰ درجه بررسی شود. جهت استخراج با گام ۱۰ درجه تغییر داده شد تا بهترین آزیموت شناسایی شود (جدول ۴). همان‌طور که دیده می‌شود، بیشترین مقدار پارامتر CPR در آزیموت ۳۰ درجه و برابر ۲۰/۲۱ درصد حاصل می‌شود. بدین معنی که با استخراج این معدن در آزیموت ۳۰ درجه بیشترین میزان کوبدهی حاصل می‌شود.

جدول۴- یافتن جهت استخراج بهینه معدن اسک با نسبت کوبدهی

آزیموت جهت استخراج	CPR	آزیموت جهت استخراج	CPR
۰	۱۷/۷۴	۹۰	۱۷/۴۶
۱۰	۱۸/۹۳	۱۰۰	۱۶/۴۳
۲۰	۱۹/۳۷	۱۱۰	۱۷/۵۷
۳۰	۲۰/۲۱	۱۲۰	۱۸/۳۱
۴۰	۱۷/۸۱	۱۳۰	۱۸/۹۳
۵۰	۱۷/۳۳	۱۴۰	۱۹/۰۲
۶۰	۱۵/۸۵	۱۵۰	۱۸/۲۶
۷۰	۱۶/۰۴	۱۶۰	۱۷/۸۹
۸۰	۱۷/۳۸	۱۷۰	۱۷/۳۸

اگر این معدن در آزیموت ۳۰ درجه استخراج شود، نتایج جدول ۵ حاصل می‌شود. ذخیره قابل استخراج این معدن پس از اعمال جهت استخراج با آزیموت ۳۰ درجه برابر ۶۶۸۵۴/۳۸ مترمکعب خواهد شد. با توجه به اینکه کوب‌های با حجم کمتر از یک مترمکعب اقتصادی نیستند، باید کوب‌های با حجم کمتر از یک مترمکعب از ذخیره قابل استخراج کم شوند. با توجه به رابطه ۳ حجم کوب‌های قابل‌فروش برابر ۵۳۳۶۹/۱۴ مترمکعب به دست می‌آید.

$$AMC= (66854.38- 142.96)\times0.8=53369.14\ M^3$$

چگالی سنگ‌های این معدن برابر ۲/۵۳ تن بر مترمکعب است. قیمت فروش کوب‌های خام این معدن بین ۷۰۰ هزار ریال و یک میلیون و هفتصد هزار ریال متغیر است که به ترتیب مربوط به کوب‌های بهاصطلاح سه‌کوب و تک‌کوب است. اگر قیمت کوب‌های این معدن به طور متوسط یک میلیون ریال در هر تن فرض شود، درآمد حاصل از فروش سنگ‌های این معدن طبق رابطه ۴ برحسب ریال برابر است با:

$$I=53369.14\times2.53\times1000000=136620000000\ IRR$$

جدول ۵- نتایج حاصل از اعمال جهت استخراج با آزیموت ۳۰ درجه

میانگین حجم بلوک‌ها (مترمکعب)	میانگین ابعاد کوب‌ها (متر)	مجموع حجم کوب‌ها (مترمکعب)	مجموع حجم کوب‌های کمتر از یک مترمکعب
۲۴۱/۶۳	۲/۹۳×۲/۴×۲/۲۵	۶۶۸۵۴/۳۸	۱۴۲/۹۶

۴- بحث

نسبت کوبدهی برای معدن اسک برابر ۲۰/۲۱ درصد محاسبه شد که با توجه به جدول ۱، عیار هندسی بلوک‌ها ضعیف ارزیابی می‌شود، بنابراین تعیین جهت استخراج بهینه برای این معدن اهمیت زیادی دارد. با محاسباتی که صورت گرفت، جهت استخراج بهینه در آزیموت ۳۰ درجه به دست آمد. به دلیل اینکه آزیموت یک صفحه، به میزان ۹۰ درجه با امتداد صفحه تفاوت دارد، بنابراین، امتداد جهت استخراج برابر S60Eیا N60W خواهد بود. در جهت S60E، این معدن با شیب تندی به جاده هراز می‌رسد، بنابراین جهت استخراج بهینه، جهت متناظر آن یعنیN60W خواهد بود. در حال حاضر، استخراج از این معدن در جهت S85W درجه انجام می‌شود. بنابراین، جهت استخراج فعلی باید به میزان ۳۵ درجه تغییر کند تا بیشترین کوبدهی حاصل شود. با توجه به شکل ۷، جهت دسته‌درزه‌های غالب این معدن در جهت S49W است.

www.SID.ir

Archive of SID

نکته جالب که در اینجا وجود دارد این است که جهت استخراج بهینه به‌دست‌آمده تقریبا بر جهت دسته درزه‌های غالب معدن عمود است. پس به‌طورکلی در معادن سنگ ساختمانی نتیجه گرفته می‌شود که جهت استخراج بهینه، تقریبا عمود بر جهت دسته‌درزه‌های غالب منطقه است. اگر این جهت استخراج بر معدن اسک اعمال شود، بیشترین کوب قابل‌فروش یعنی ۵۳۳۶۹٫۱۴ مترمکعب حاصل می‌شود که باعث درآمدی حدود ۱۳ میلیارد تومان خواهد شد.

از لحاظ تئوری حداقل سه دسته‌درزه لازم است تا بلوک‌ها در توده سنگ ایجاد شوند. گاهی اوقات سیستم درزه‌ها شامل یک یا دو دسته‌درزه‌می‌شود که بلوک مشخصی نمی‌سازد. در چنین مواقعی حجم بلوک معادل وارد محاسبات می‌شود. پالمستروم رابطه ۵ را برای تخمین حجم بلوک برجا V_b در حالتی که دو دسته درزه S_1 و S_2 و به طور قائم و با شرط $S_1<S_2$ با یکدیگر تقاطع می‌کنند، پیشنهاد می‌کند[۱۶].

$$V_b = S_1 \times S_2 \times 5S_1 \qquad (۵)$$

زاویه بین دو دسته‌درزه معدن اسک تقریبا ۸۱ درجه به دست آمد که می‌توان آن را ۹۰ درجه فرض کرد. همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد، فاصله‌داری درزه‌های این معدن برابر ۲٫۹ و ۳٫۵۲ متر است. با توجه به رابطه ۵، حجم بلوک‌های برجا برابر ۱۴۸ مترمکعب است، درحالی که مقدار واقعی آن پس از اعمال جهت استخراج بهینه و با توجه به جدول ۴ حدود ۲۴۱٫۶۳ مترمکعب است که این موضوع بار دیگر تاکید می‌کند برای ارزیابی معادن سنگ به یک رویکرد دقیق نیاز است. با استفاده از شاخص CPR که در این تحقیق پیشنهاد شده است، علاوه بر تعیین دقیق‌تر کوبدهی معادن سنگ، می‌توان جهت استخراج بهینه را نیز تعیین کرد.

$V_b = 2.9 \times 3.52 \times (5 \times 2.9) = 148 m^3$

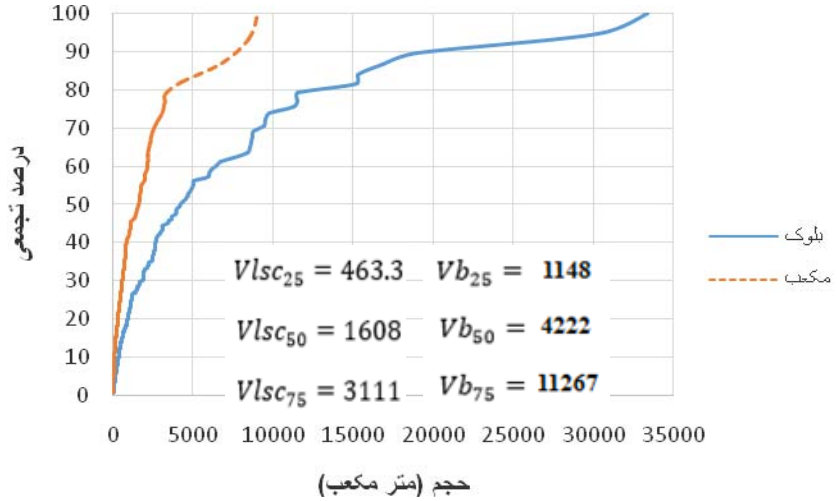
برای تعیین توزیع ابعادی ذرات از آنالیز سرندی استفاده می‌شود که معمولا با یک تابع توزیع تجمعی بیان می‌شود. با استفاده از مفهوم آنالیز سرندی، نمودار تجمعی حجم بلوک‌ها و مکعب مستطیل‌های معدن اسک در شکل ۹ رسم شده است. اختلاف زیادی بین درصد تجمعی‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ وجود دارد که حاکی از ناقوارگی بلوک‌های این معدن است.

۵- نتیجه‌گیری

با شناخت و رفع عیوب استخراج معادن سنگ ساختمانی به روش سنتی، می‌توان مشکلات حین استخراج را به حداقل رساند و درآمدزایی معدن را بیش‌ازپیش کرد که این امر تنها با استخراج اصولی و صحیح از معدن امکان‌پذیر خواهد بود. تا به حال پارامتر مناسبی برای ارزیابی کوبدهی یک معدن سنگ پیشنهاد نشده است. میزان کوبدهی و تعیین جهت استخراج بهینه، تاثیر بسیاری بر اقتصادی بودن یک معدن سنگ دارد که این موارد به طور تخصصی طی محاسبات کوبدهی بررسی شدند. بدین منظور شاخصی به نام نسبت کوبدهی معرفی شد که اگر مقدار آن برای یک معدن سنگ کمتر از ۳۰ درصد محاسبه شود، آن معدن از نظر تولید بلوک‌هایی به شکل مکعب مستطیل ضعیف ارزیابی می‌شود. از این شاخص می‌توان برای برنامه‌ریزی تولید در معادن سنگ استفاده کرد. با اعمال جهت‌های استخراجی متفاوت بر مدل بلوکی توده سنگ و مقایسه مقادیر به دست آمده، جهت استخراج بهینه نیز تعیین خواهد شد. مقدار نسبت کوبدهی برای معدن تراورتن اسک برابر ۲۰٫۲۱ درصد به دست آمد که این معدن را از لحاظ کوبدهی در رده ضعیف قرار می‌دهد. جهت استخراج بهینه در امتداد N60W حاصل شد. عملکرد موفقیت‌آمیز CPR در معدن تراورتن اسک نشان داد که این شاخص قابلیت بالایی برای کاربرد در حوزه سنگ‌های ساختمانی دارد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹- نمودار تجمعی بلوک‌ها و مکعب مستطیل‌های معدن اسک.

منابع و مراجع

1. Tercan, A. and Y. Özçelik, (2000). *Geostatistical evaluation of dimension-stone quarries.* Engineering Geology. 58(1): p. 25-33.
2. Ashmole, I. and M. Motloung, (2008). *Dimension stone: the latest trends in exploration and production technology.* Proceedings of the International Conference on Surface Mining in Johannesburg. p. 35-70.
3. Taboada, J., A. Vaamonde, and A. Saavedra, (1999). *Evaluation of the quality of a granite quarry.* Engineering Geology. 53(1): p. 1-11.
4. Taboada, J., et al., (2006). *Fuzzy expert system for economic zonation of an ornamental slate deposit.* Engineering Geology. 84(3-4): p. 220-228.
5. Sousa, L.M., (2007). *Granite fracture index to check suitability of granite outcrops for quarrying.* Engineering Geology. 92(3-4): p. 146-159.
6. Alade, S., O. Muriana, and H. Olayinka, (2012). *Modified Volumetric Joint Count to check for suitability of granite outcrops for dimension stone production.* Journal of Engineering Science and Technology. 7(5): p. 646-660.
7. Mutlutürk, M., (2007). *Determining the amount of marketable blocks of dimensional stone before actual extraction.* Journal of mining science. 43(1): p. 67-72.
8. Sohrabian, B. and Y. Ozcelik, (2012). *Determination of exploitable blocks in an andesite quarry using independent component kriging.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 55: p. 71-79.
9. Taboada, J., et al., (1997). *Application of geostatistical techniques to exploitation planning in slate quarries.*Engineering Geology. 47(3): p. 269-277.
10. Elci, H. and N. Turk, (2014). *Rock mass block quality designation for marble production.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 69: p. 26-30.
11. Elmouttie, M., G. Poropat, and G. Krähenbühl, (2010). *Polyhedral modelling of rock mass structure.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 47(4): p. 544-552.
12. Stavropoulou, M., (2014). *Discontinuity frequency and block volume distribution in rock masses.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 65: p. 62-74.
13. Turanboy, A. and E. Ülker, (2012). *A new approach For assessing dimension quarries using rock block size distributions*. in *ISRM International Symposium-EUROCK 2012*.
14. Ülker, E. and A. Turanboy, (2009). *Maximum volume cuboids for arbitrarilyshaped in-situ rock blocks as determined by discontinuity analysis—A genetic algorithm approach.* Computers & Geosciences. 35(7): p. 1470-1480.

www.SID.ir

Archive of SID

15. Mamasaidov, M., R. Mendekeev, and M. Ismanov, (2004). *Generalized model of technology for article productionfrom stone massif*. Journal of Mining Science. 40(5): p. 521-527.

16. Palmstrom, A., (2005). *Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD).* Tunnelling and Underground Space Technology. 20(4): p. 362-377.

www.SID.ir