نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره هشتم، شماره بیستم، سال ۱۳۹۲، صفحه ۷۳ تا ۸۹
Vol. 8, No. 20, 2013, pp. 73-89

انتخاب بهینه محدوده معدن و جانمایی کارگاه‌های استخراج در معادن زیرزمینی

مجید عطایی‌پور[۱]، سید محمد اسماعیل جلالی[۲]

۱- دانشیار دانشکده معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، map60@aut.ac.ir
۲- دانشیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود، jalalisme@shahroodut.ac.ir

چکیده

طراحی و پیشرفت الگوریتم‌های بهینه سازی محدوده نهایی استخراج برای معادن زیرزمینی در مقایسه با روباز بنا به دلایل متعدد اندک و کند بوده‌است. عمده ترین دلایل این امر، تعدد روشهای استخراج زیرزمینی، پیچیدگی محاسبه پارامترهای اقتصادی محدوده استخراج و عدم وجود فرهنگ استفاده از این الگوریتم‌ها بوده است. الگوریتم های موجود یا جزءگرا هستند که از بهینه‌سازی کل محدوده استخراج شامل چندین طبقه یا پهنه عاجزند ویا کل‌گرا هستند که پس از طبقه بندی محدوده استخراج، محدوده بهینه تغییر می کند. برای رفع این مشکل مدل بلوکی جدیدی به نام "مدل اقتصادی با ارزش متغیر" VVEM پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی بر این واقعیت استوار است که در روش های استخراج زیرزمینی، تغییرات هزینه‌های استخراج نسبت به عمق پیوسته نیست بنابراین ارزش اقتصادی هر بلوک تابعی از عمق پهنه یا طبقه‌ای است که در آن واقع می‌شود. با تلفیق الگوریتم جزءگرای OLIPS و مدل اقتصادی با ارزش متغیر الگوریتم فراگیری به نام GOUMA برای یافتن بهترین چیدمان کارگاه‌های استخراج بهینه شده ارائه شده است. در این مقاله تشریح گام به گام ساخت مدل جدید و الگوریتم فراگیر آورده شده است.

کلمات کلیدی

مدلسازی، الگوریتم، استخراج زیرزمینی، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

در دهه های گذشته طرح و گسترش الگوریتم‌های بهینه سازی محدوده نهایی استخراج در مورد استخراج روباز بسیار چشمگیر و قابل توجه بوده، در حالیکه طراحی و پیشرفت چنین الگوریتم‌هایی برای تعیین محدوده استخراج زیرزمینی بسیار اندک و کند بوده‌است. عمده ترین دلایل این امر تعدد روشهای استخراج زیرزمینی، پیچیدگی محاسبه پارامترهای اقتصادی محدوده استخراج و عدم وجود فرهنگ استفاده از این الگوریتم‌ها بر شمرده شده است.

بطور کلی الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده نهایی استخراج را از نظر منطق مورد استفاده در آنها می‌توان به دو گروه، "الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی[۱] " و "الگوریتم‌های جستجوگر[۲] " تقسیم نمود. در گروه الگوریتم‌های ریاضی محور می‌توان به الگوریتم "برنامه‌ریزی پویا[۳] " [۱]، "شاخه و حد[۴] " [۲] و نیز الگوریتم OLIPS [۳ و ۴]، اشاره کرد. در مقابل، الگوریتم‌های "کارگاه شناور[۵] " [۵]، "با ارزش‌ترین همسایگی[۶]" [۶ و ۷]، " دیمیتراکوپولوس[۷] "[۸] و " توپال[۸] " [۹] دارای منطق جستجوگر هستند. اگرچه الگوریتم‌های جستجوگر از جامعیت و عمومیت بیشتری برخوردار هستند و می‌توان آنها را بر روی مدل‌های اقتصادی سه بعدی بکار برد اما پاسخ ارایه شده از سوی آنها لزوماً بهینه واقعی نیست.

الگوریتم های مزبور را از نگاهی دیگر می توان به کل گرا و جزءگرا تقسیم بندی کرد. در الگوریتم‌های جزءگرا ابتدا کل محدوده معدنی، که در بر گیرنده کانسار و محدوده اطراف آن است، با در نظر گرفتن محدودیت‌های ابعادی کارگاه‌های استخراج به پهنه‌ها یا طبقات اصلی تقسیم می‌شود سپس جستجو برای یافتن محدوده بهینه کارگاه‌های استخراج بر روی هر طبقه یا پهنه بطور جداگانه آغاز می‌گردد. در الگوریتم‌های کل‌گرا، دقیقاً برعکس الگوریتم‌های جزءگرا، ابتدا جستجوی محدوده بهینه استخراج بر روی کل مدل اقتصادی (یا عیاری) محدوده معدنی انجام می‌پذیرد و پس از یافتن محدوده بهینه، این محدوده با توجه به مشخصات ابعادی کارگاه‌های استخراج به طبقات یا پهنه‌های مختلف تقسیم می‌گردد.

به هر حال، یکی از مهمترین عوامل عدم استقبال طراحان معادن زیرزمینی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده استخراج، پیچیدگی‌های فنی و اقتصادی در ساخت مدل اقتصادی است زیرا در تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها در یک مدل اقتصادی بلوکی، برخلاف استخراج روباز، تغییرات هزینه‌های استخراج نسبت به عمق استخراج پیوسته نیست و در واقع ارزش اقتصادی هر بلوک تابعی از عمق پهنه یا طبقه‌ای است که در آن واقع می‌شود. طبیعی است که در استخراج زیرزمینی با کاهش یا افزایش ابعاد کارگاه استخراج، ممکن است تعداد طبقات استخراجی تغییر یابد و یک بلوک از یک طبقه به طبقه دیگر منتقل شود. در این شرایط، هزینه‌های استخراج بلوک مورد نظر و به دنبال آن ارزش اقتصادی بلوک بطور غیر قابل اغماضی تغییر می‌نماید. این نکته ای است که در تمام الگوریتم های موجود اعم از کل گرا و جزءگرا از آن غفلت شده است. به تعبیر دیگر در این الگوریتم ها، ارزش اقتصادی بلوک‌ها یک مقدار ثابت در نظر گرفته می شود. برای پاسخ به این موضوع لازم است الگوریتمی تدوین شود تا بتواند مسأله جانمایی بهینه طبقات را همزمان با موضوع تعیین محدوده بهینه استخراج در هر طبقه حل نماید. در این مقاله به تشریح مبانی الگوریتم فراگیر بهینه سازی محدوده استخراج زیرزمینی (GOUMA) پرداخته می‌شود. الگوریتم GOUMA با تلفیق الگوریتم جزءگرای OLIPS و مدل جدیدی به نام "مدل اقتصادی با ارزش متغیر"[۹] (VVEM) روش نوینی را برای یافتن بهترین چیدمان کارگاه‌های استخراج بهینه شده ارایه می‌دهد. بر این اساس تعداد و جانمایی بهینه طبقات یا پهنه‌ها در هر محدوده معدن‌کاری همزمان با بهینه‌سازی محدوده‌ی کارگاه استخراج در هر طبقه یا پهنه انجام می‌پذیرد.

۲- پیشینه مطالعات

در سال ۱۹۷۷ الگوریتم برنامه‌ریاضی پویا با انجام اصلاحاتی بر روی الگوریتم لرچ و گراسمن، برای روش تخریب بلوکی توسط ریدل ارائه شده است. الگوریتم لرچ و گراسمن قدیمی‌ترین الگوریتمی است که برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری روباز بر روی یک مدل اقتصادی دوبعدی به کار رفته است. الگوریتم برنامه‌ریزی پویا دارای منطق ریاضی است و همواره قادر به یافتن محدوده معدن‌کاری بهینه واقعی برای مدل‌های دوبعدی می‌باشد. این الگوریتم تنها با شرایط فنی روش استخراج تخریب توده‌ای سازگار است و به همین دلیل از این الگوریتم برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری در سایر روش‌های استخراج زیرزمینی نمی‌توان استفاده کرد [۱].

آلفورد در سال ۱۹۹۵ الگوریتمی به نام کارگاه شناور را برای بهینه‌سازی کارگاه استخراج ارائه داده است. الگوریتم

کارگاه شناور یک الگوریتم جستجوگر است و منطق مورد استفاده در آن با الگوریتم مخروط متحرک که برای تعیین محدوده بهینه معدن‌کاری روباز به‌کار می‌رود، مشابه است. مبانی این الگوریتم بسیار ساده و قابل فهم است و بصورت سه‌بعدی و به‌سادگی برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری قابل استفاده است. این الگوریتم برای تمام روش‌های استخراج زیرزمینی قابل استفاده بوده و محدود به روش خاصی نمی‌باشد. مساوی بودن ابعاد بلوک‌ها در مدل بلوکی این الگوریتم ضروری نیست. همچنین لازم نیست که ابعاد کارگاه مضربی از ابعاد بلوک‌ها باشد. به عبارت دیگر ممکن است فقط بخشی از یک بلوک جزء کارگاه در نظر گرفته شود. الگوریتم کارگاه شناور یک الگوریتم جستجوگر است و از پشتوانه ریاضی برخوردار نیست. یکی از مشکلات اساسی الگوریتم کارگاه شناور، هم‌پوشانی کارگاه‌ها است و این مسأله زمانی رخ می‌دهد که چند بلوک با عیار بالا در دو یا چند کارگاه مشترک باشند. در چنین وضعیتی ممکن است یک کارگاه به تنهایی اقتصادی باشد ولی زمانی که با کارگاه‌های دیگر درنظر گرفته شود آنگاه مجموع این کارگاه‌ها دارای ارزش اقتصادی منفی شود [۵].

الگوریتم شاخه و حد در سال ۱۹۹۵ برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی در یک پهنه یا طبقه، توسط اوانیک و یانگ پیشنهاد شده است. این الگوریتم برروی مدل اقتصادی دوبعدی محدوده معدنی تعریف می‌شود و دارای منطق ریاضی است. یکی از امتیازات برجسته این روش نسبت به سایر روش‌های دیگر، عدم نیاز آن به هندسه و مشخصات بلوک است. اما از آنجاییکه این الگوریتم فقط در یک ردیف از مدل بلوکی، عمل بهینه‌سازی را انجام می‌دهد لذا دارای ماهیت تک‌بعدی است و این یکی از معایب آن می‌باشد [۲].

الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی در سال ۱۹۹۹ توسط عطایی‌پور ارائه شده است. این الگوریتم در درون مدل اقتصادی کانسار، بلوک‌هایی که متناظر با بیشترین سود هستند را با اعمال شرایط هندسی کارگاه جستجو می‌کند. در این الگوریتم، قسمت یا بخشی از یک بلوک نمی‌تواند جزء یک کارگاه استخراج باشد بنابراین ابعاد کارگاه باید مضربی از ابعاد بلوک‌ها باشد.این الگوریتم از پایه نظری خوبی برخوردار است اما اگر در این الگوریتم، نقطه شروع تغییر یابد آنگاه ممکن است محدوده بدست‌آمده تفاوت پیدا کند، بنابراین این الگوریتم همیشه توانایی پیداکردن محدوده بهینه را ندارد و مانند الگوریتم کارگاه شناور دارای ماهیت جستجوگر است [۶ و ۷].

الگوریتم اُلیپس در سال ۲۰۰۵ توسط جلالی و همکاران برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری در کانسارهای رگه‌ای ارائه شده است. این الگوریتم دارای منطق برنامه‌ریزی پویا است و از آنجاییکه بر روی مدل بلوکی اقتصادی خاصی اجرا می‌شود لذا بعضی از محدودیت‌های ابعادی کارگاه استخراج را رفع می‌نماید. الگوریتم اُلیپس یک الگوریتم جزگرا و با منطق ریاضی است که به منظور شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر مشخصات فنی و هندسی کارگاه‌های استخراج در روش‌های مختلف معدن‌کاری زیرزمینی، ارائه شده است و بر روی نوع ویژه‌ای از مدل بلوکی اقتصادی دوبعدی محدوده استخراج تعریف می‌شود. .در این الگوریتم عواملی چون حداقل طول کارگاه استخراج، ارتفاع مجاز کارگاه استخراج و نیز محدودیت هم‌ترازی حدود بالایی و پایینی کارگاه استخراج مجاور در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین می‌توان از این الگوریتم برای بهینه‌سازی کانسارهای رگه‌ای یا لایه‌ای که معمولاً مدل‌های اقتصادی دوبعدی از آنها تهیه می‌شود، استفاده کرد [۳ و ۴].

دیمیتراکوپولوس در سال ۲۰۰۹ یک روش بهینه‌سازی احتمالاتی جدید، برای طراحی کارگاه در شرایط عدم قطعیت ارائه داده است. این الگوریتم از منطق جستجوگر برخوردار است و در آن محدودیت‌هایی مانند حداقل و حداکثر طول کارگاه‌ها و همچنین محدودیت حداقل عرض پایه‌های جانبی، در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این روش، اولین روشی است که عدم قطعیت را در طراحی کارگاه در نظر گرفته است ولی دارای اشکالاتی نیز می‌باشد. از جمله اشکالات آن، جستجوی کارگاه‌های با بیشترین سود در درون موقعیت‌های از پیش تعیین شده است لذا توانایی پیدا نمودن محل بهینه کارگاه‌ها را ندارد بعبارت دیگر در این روش تمام حالات ممکن در نظر گرفته نخواهد شد. همچنین یکی دیگر از اشکالات این روش، زمان طولانی آن در پیدا کردن جواب است [۸ و ۹].

توپال و سنز در سال ۲۰۱۰ یک الگوریتم جدید برای تعیین محدوده معدنکاری زیرزمینی ارائه داده‌اند. این الگوریتم بر روی مدل بلوکی اقتصادی اجرا می‌شود، و توانایی پیدا کردن، موقعیت، ارزش و NPV کارگاه‌های استخراج را در سه‌بعد داراست. از ویژگی‌های مثبت این روش، توانایی آن در طراحی کارگاه‌های استخراج با ابعاد متغیر است اما این الگوریتم نیز مانند الگوریتم‌های کارگاه شناور، با ارزش‌ترین همسایگی و دیمیتراکوپولوس نیز دارای منطق جستجوگر است و توانایی پیدا نمودن محل بهینه کارگاه‌های استخراج را ندارد[۱۰و ۱۱].

۳- مدلسازی محدوده استخراج

در این مقاله ابتدا نوع جدیدی از مدل بلوکی به نام "مدل اقتصادی با ارزش متغیر" تعریف و ارائه می شود که مبنای اجرای الگوریتم خواهد بود. در این مدل ارزش اقتصادی هر بلوک با توجه به مشخصات هندسی و جانمایی طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن قرار می گیرد، تغییر می‌نماید. برای ساخت مدل VVEM، سه مدل اقتصادی با مشخصات هندسی یکسان ولی با ماهیت متفاوت بنام‌های مدل درآمدی برجا[۱۰] (IIM)، مدل هزینه موقعیت[۱۱] (PCM) و مدل هزینه استخراج[۱۲] (MCM) ساخته می‌شود. مدل VVEM و هر یک از مدل‌های سه‌گانه مذکور را می‌توان به صورت یک ماتریس دو بعدی با R سطر و C ستون نمایش داد.

۳-۱- مدل درآمدی برجا (IIM)

IIM یک مدل بلوکی با ارزش ثابت است که ارزش هر یک از بلوک‌های تشکیل‌دهنده آن نشان‌دهنده درآمد بلوک برجا[۱۳] (BII) است. BII برای هر بلوک معرف درآمدی است که برای ماده معدنی موجود در آن بلوک به صورت برجا و قبل از استخراج پیش‌بینی می‌شود. طبیعی است که با توجه به تعریف مذکور مقدار BII همواره نامنفی است. در شکل ۱، یک محدوده مدلسازی شده دو بعدی فرضی از یک محدوده معدنی شامل ۱۳ سطر و ۱۵ ستون ملاحظه می‌شود. ارزش هر یک از بلوک‌های این مدل بلوکی (BII) نشان دهنده درآمد حاصل از آن بلوک بدون در نظرگرفتن موقعیت بلوک و هزینه‌های استخراج آن است. به طور ساده می‌توان گفت، مقدارBII متناسب با حاصلضرب مقدار ماده معدنی موجود در بلوک مورد نظر در قیمت فروش آن است.

۳-۲- مدل هزینه موقعیت (PCM)

PCM یک مدل بلوکی با ارزش ثابت است که ارزش هر یک از بلوک‌های آن هزینه نسبی مربوط به جانمایی بلوک مورد نظر در مدل بلوکی را نشان می‌دهد.

Insitu Income Model

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4	5	4	6	5	6	5	3	6	6	5	5	4	5	4
2	5	6	4	7	8	7	6	4	6	7	4	6	6	6	5
3	7	6	5	6	8	7	6	3	6	5	5	8	9	8	6
4	6	7	4	7	6	7	7	4	5	6	4	6	8	6	8
5	7	7	6	6	7	8	6	4	5	7	5	7	9	7	7
6	8	9	9	8	7	6	8	7	9	9	9	8	9	9	7
7	6	6	7	8	7	6	6	6	7	8	7	9	7	7	6
8	5	7	8	9	6	6	7	7	9	8	9	9	8	9	7
9	4	8	9	8	6	5	7	7	7	9	8	7	9	7	7
10	5	8	7	6	6	4	5	7	6	7	8	8	9	9	8
11	8	9	8	7	6	5	7	5	6	7	6	9	8	9	7
12	8	7	6	6	7	4	7	9	7	5	6	7	9	7	8
13	4	5	5	6	5	4	7	7	6	5	6	5	6	5	4

شکل۱: یک نمونه از مدل درآمدی برجا

معمولاً استخراج بلوکی که در طبقه‌ای با عمق بیشتر واقع است به دلیل نیاز به احداث باز کننده عمیق تر، تهویه و خدمات فنی بیشتر و یا حتی نیاز به آبکشی به خاطر واقع شدن در زیر تراز آب‌های زیرزمینی بیشتر از بلوکی است که در طبقه‌ای با عمق کمتر واقع است و با کارگاهی با مشخصات یکسان استخراج می‌شود. علاوه بر این در امتداد یک طبقه نیز ممکن است بعضی از بلوک‌ها در موقعیت‌هایی با خصوصیات ژئومکانیکی متفاوتی قرار گیرند که در مقایسه با سایر بلوک‌ها، باید برای استخراج آنها هزینه‌های بیشتری صرف گردد.

در شکل۲، یک محدوده مدل‌سازی شده (که از نظر هندسی متناظر با محدوده مفروض در شکل ۱ است)، نشان داده شده است. ارزش هر یک از بلوک‌های این مدل بلوکی، مازاد هزینه نسبی استخراج آن بلوک در مقایسه با هزینه استخراج بلوک مبنایی است که کمترین هزینه استخراج را دربردارد.

Position Cost Model

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0
7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1
11	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1
12	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
13	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2

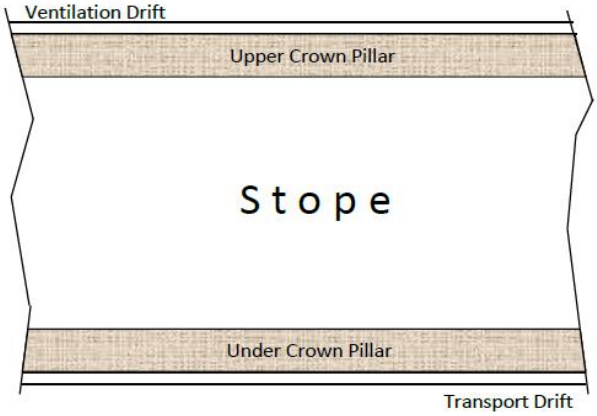
شکل ۲: یک نمونه از مدل هزینه موقعیت

۳-۳- مدل هزینه استخراج (MCM)

MCM یک مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر است که ارزش هر یک از بلوک‌های تشکیل دهنده آن هزینه استخراج بلوک[۱۴] (BMC) مورد نظر را نشان می‌دهد. در ساخت مدل

هزینه استخراج برای تعیین ارزش هر بلوک لازم است علاوه بر روش استخراج، جانمایی و ارتفاع طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن واقع می‌شود نیز مشخص گردد. بدیهی است که با تغییر جانمایی یا تغییر ارتفاع طبقه، ارزش بلوک‌های مدل مورد نظر تغییر می‌نماید.

هر طبقه به سه بخش مستقل شامل کارگاه استخراج، پایه تاج فوقانی[15] و پایه تاج تحتانی[16] قابل تفکیک است. با فرض اینکه هر یک از بخش‌های مذکور مضرب درستی از ابعاد بلوک‌ها باشند، هر یک از بلوک‌های واقع در یک طبقه فقط در یکی از سه بخش مذکور قرار خواهند گرفت. در شکل ۳، شمای کلی بخش‌های سه‌گانه نشان داده شده است.



شکل ۳: شمای کلی اجزای یک طبقه

در حالت کلی، بلوک‌هایی که در محدوده پایه‌های تاج فوقانی و تحتانی واقع می‌شوند باید به صورت برجا باقی مانده و استخراج نشوند. لذا هزینه استخراج آنها برابر با یک عدد منفی بسیار بزرگ (-u) منظور می‌شود. هزینه استخراج سایر بلوک‌ها در هر طبقه، یعنی بلوک‌هایی که در محدوده کارگاه استخراج قرار می‌گیرند، با توجه به روش استخراج و ارتفاع آن طبقه برآورد می‌شود. طبیعی است در صورتی که ماهیت روش استخراج به گونه‌ای باشد که در آن پایه‌های تاج نیز استخراج شوند، هزینه متناظر با استخراج آنها به بلوک‌های واقع در موقعیت پایه‌های تاج تخصیص می‌یابد. در شکل ۴، بخشی از یک محدوده استخراج نشان داده شده در شکل ۱ و ۲ با ۱۳ سطر و ۵ ستون و همچنین دو طبقه با جانمایی‌های مختلف نشان داده شده است. این شکل به خوبی نشان می دهد که تغییر در جانمایی طبقه می‌تواند موجب تغییر در هزینه استخراج بلوک‌ها شود.

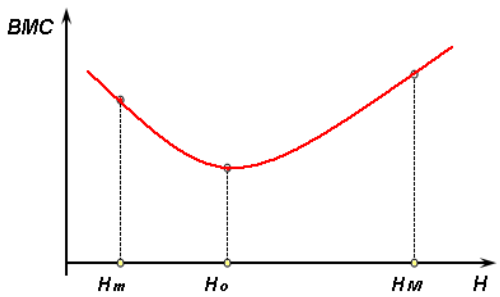
	1	2	3	4	5
1					
2					
3	-u	-u	-u	-u	-u
4	-5	-5	-5	-5	-5
5	-5	-5	-5	-5	-5
6	-5	-5	-5	-5	-5
7	-5	-5	-5	-5	-5
8	-5	-5	-5	-5	-5
9	-u	-u	-u	-u	-u
10					
11					
12					
13					

	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5	-u	-u	-u	-u	-u
6	-5	-5	-5	-5	-5
7	-5	-5	-5	-5	-5
8	-5	-5	-5	-5	-5
9	-5	-5	-5	-5	-5
10	-5	-5	-5	-5	-5
11	-u	-u	-u	-u	-u
12					
13					

شکل ۴: تأثیر جانمایی طبقات استخراجی بر هزینه استخراج هر بلوک

هنگامی که یک طبقه با یک روش استخراج مشخص در یک موقعیت خاص از محدوده استخراج جانمایی و به صورت مجرد و مجزا از سایر طبقات بررسی می‌شود، BMC برای بلوک‌هایی که در محدوده کارگاه استخراج آن طبقه قرار می‌گیرند، تنها به ارتفاع طبقه وابسته است. حداقل و حداکثر ارتفاع مجاز هر طبقه با توجه به محدودیت‌های فنی روش استخراج و پارامترهای ژئومکانیکی تعیین می‌شود اما ارتفاع بهینه آن با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی محاسبه می‌گردد.

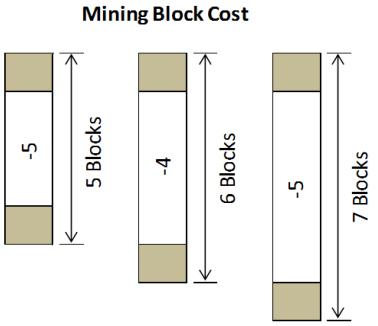
در شکل ۵ هزینه‌های استخراج هر بلوک ازطریق احداث طبقاتی با حداقل ارتفاع مجاز (H_m بلوک) و حداکثر ارتفاع مجاز (H_M بلوک) بطور نمادین نشان داده شده است، همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، حداقل هزینه‌های استخراج هر بلوک به ازای احداث طبقه‌ای با ارتفاع H_o بلوک (ارتفاع بهینه) بدست می‌آید. طبیعی است که با افزایش یا کاهش ارتفاع طبقه بهینه (H_o)، هزینه استخراج هر بلوک افزایش می‌یابد.



شکل ۵- تأثیر ارتفاع طبقه بر هزینه‌های استخراج

در شکل ۶ سه طبقه نمادین با گسترش یک بلوک به عنوان یک مثال ساده و توجیهی، مشاهده می‌شود. اگر در این مثال ارتفاع مجاز طبقات بین ۵ تا ۷ بلوک و عرض هر یک از پایه‌های تاج تحتانی و فوقانی برابر با یک بلوک منظور شود، آنگاه ارتفاع کارگاه استخراج در طبقاتی که دارای ارتفاع ۵ بلوک هستند، ۳ بلوک، در طبقاتی که دارای ارتفاع ۶ بلوک هستند، ۴ بلوک و بالاخره در طبقاتی که دارای ارتفاع ۷ بلوک هستند، ۵ بلوک خواهد بود. بدیهی است که در این شرایط هزینه استخراج هر بلوک، تابعی از ارتفاع طبقه است. در این مثال، هزینه استخراج هر یک از بلوک‌هایی که در کارگاه‌هایی به ارتفاع ۳ بلوک واقع هستند، برابر با ۵- واحد و به همین ترتیب هزینه استخراج بلوک‌هایی که در کارگاه‌هایی به ارتفاع ۴ و ۵ بلوک واقع هستند، به ترتیب برابر با ۴- و ۵- واحد منظور شده است.

در شکل ۷ یک محدوده مدل‌سازی شده متناظر با محدوده‌های مفروض در اشکال ۱ و ۲ نشان داده شده است. ارزش هر یک از بلوک‌های این مدل با توجه به مقادیر مفروض در شکل ۶ و در شرایطی که محدوده مورد نظر با احداث دو طبقه، اولی به ارتفاع ۶ بلوک و دومی به ارتفاع ۷ بلوک استخراج شوند، ملاحظه می‌شود.



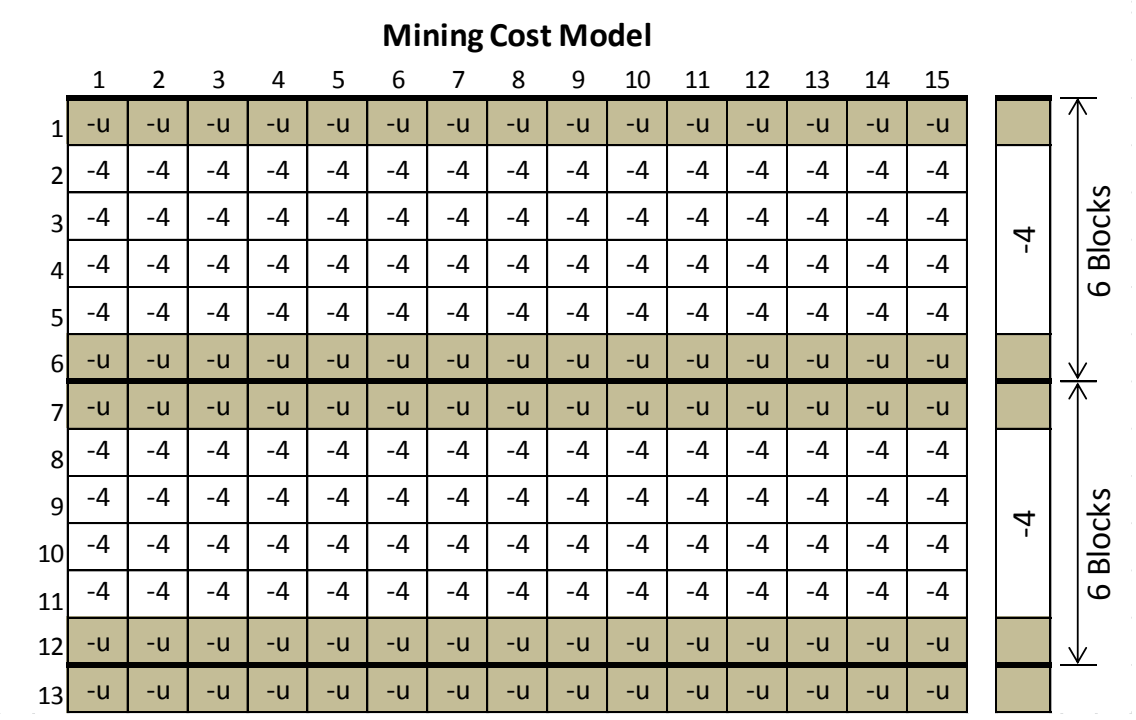
شکل ۶: هزینه استخراج بلوک در سه طبقه با ارتفاع متفاوت

در شکل ۸ نیز MCM برای حالتی که محدوده مدلسازی شده در شکل ۷ با احداث ۲ طبقه متوالی هر یک با ارتفاع ۶ بلوک استخراج شود، دیده می‌شود. بدیهی است در این حالت BMC برای بلوک‌هایی که در پائین‌ترین سطر (سطر سیزدهم) محدوده مدلسازی شده و خارج از طبقات مذکور واقع هستند و استخراج نمی‌شوند، برابر با u– در نظر گرفته می‌شود.

Mining Cost Model

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	
2	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
3	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
5	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
6	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	6 Blocks
7	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	
8	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
9	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
10	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
11	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
12	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
13	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	7 Blocks

شکل ۷: یک نمونه از مدل هزینه استخراج با احداث طبقاتی به ارتفاع ۶ و۷ بلوک



شکل ۸: یک نمونه از مدل هزینه استخراج با احداث دو طبقه متوالی به ارتفاع ۶ بلوک

این مثال‌ها نشان می‌دهد، هزینه استخراج هر بلوک در یک محدوده مدلسازی شده منحصر به فرد و ثابت نبوده و با تغییر ارتفاع و جانمایی طبقات دربر گیرنده بلوک تغییر می‌کند.

۴- مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر (VVEM)

این مدل با تلفیق مدل‌های IIM، PCM و MCM که هر سه دارای ابعاد و مشخصات هندسی یکسان هستند، ساخته می‌شود. برای ساخت VVEM از روش مدل‌سازی برهم‌نهی لایه‌های چندگانه[۱۷] (MSM) استفاده شده است. در این روش مدل‌سازی هر یک از مدل‌های سه گانه IIM، PCM و MCM به صورت یک لایه که در برگیرنده یک گروه از اطلاعات اقتصادی مجزا است، منظور می‌شود و از برهم‌نهی آنها، مدل VVEM که مشتمل بر ارزش‌های اقتصادی محدوده مدل‌سازی شده است، حاصل می‌گردد. در مدل VVEM ارزش اقتصادی هر بلوک[۱۸] (BEV) از جمع مقادیر بلوک‌های نظیر در سه مدل مذکور بدست می‌آید. به عبارت دیگر:

$$BEV = BII + BPC + BMC \qquad (۱)$$

منظور از BPC در این رابطه، ارزش هر یک از بلوک‌های واقع در مدل هزینه موقعیت (PCM) است.

در شکل ۹ یک نمونه مفروض از VVEM حاصل از برهم‌نهی مدلهای IIM، PCM و MCM که به ترتیب در اشکال ۱، ۲ و ۷ ارائه شده، نشان داده شده است.

مدل IIM و PCM دارای بلوک‌هایی با ارزش ثابت هستند اما مدل MCM در برگیرنده بلوک‌هایی با ارزش متغیر است که ارزش هر یک از بلوک‌های آن پس از مشخص شدن ارتفاع طبقات و جانمایی آنها در محدوده مدلسازی شده، تعیین می‌شود. بنابراین ارزش هر یک از بلوک‌های مدل VVEM نیز متغیر بوده و به ارتفاع طبقه و جانمایی طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن واقع است، بستگی دارد.

برای تعیین مقدار BEV به عنوان تابعی از جانمایی و ارتفاع طبقه، می‌توان مجموعه‌ای از حالات متفاوت جانمایی طبقات با ارتفاع‌های مختلف که معرف تمام حالات محتمل برای جانمایی طبقات باشد را در هر محدوده مدلسازی شده، تعریف نمود و با توجه به هر یک از حالات محتمل، ابتدا مقدار

BMC را برای بلوک‌های واقع در هر یک از حالات محتمل محاسبه و سپس BEV متناظر با آنها را محاسبه نمود.

VVEM

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
2	1	2	0	3	4	3	2	0	2	3	0	2	2	2	1
3	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
4	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
5	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
6	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
7	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
8	-1	1	2	3	0	0	1	1	3	2	3	3	2	3	1
9	-2	2	3	2	0	-1	1	0	1	3	2	1	3	1	1
10	-1	2	1	0	0	-2	-1	0	-1	0	2	2	3	3	2
11	2	2	1	0	-1	-2	0	-2	-1	0	-1	2	1	3	1
12	1	0	-1	-1	0	-3	0	2	0	-2	-1	0	2	0	1
13	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u

شکل ۹: یک نمونه از مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر

۴-۱- طبقه محتمل[۱۹] (PL)

همانطور که ذکر شد، در هر محدوده مدلسازی شده می‌توان مجموعه‌ای از حالات مختلف جانمایی طبقات با ارتفاع‌های متفاوت که معرف تمام حالات محتمل برای جانمایی طبقات باشد را تعریف کرد. هر یک از اعضای این مجموعه یک طبقه محتمل نامیده می‌شود. در شکل ۱۰ تمام طبقات محتمل در یک محدوده مدلسازی شده با ۱۳ سطر در شرایطی که حداقل ارتفاع مجاز طبقه ۵ بلوک و حداکثر آن ۷ بلوک باشد، نمایش داده شده است. موقعیت و ارتفاع هر طبقه محتمل با یک زوج مرتب به صورت $PL_{(S,H)}$ نشان داده می‌شود که در آن اندیس S معرف نقطه شروع و یا در واقع نشان‌دهنده جانمایی طبقه محتمل و H معرف ارتفاع طبقه می‌باشد. به عنوان مثال $PL_{(2,6)}$ کارگاه محتملی را معرفی می‌نماید که محدوده بالایی آن از انتهای بلوک‌های واقع درسطر دوم محدوده مدلسازی شده آغاز و به ارتفاع ۶ بلوک احداث می‌شود. طبیعی است که چنین طبقه‌ای در بر گیرنده بلوک‌های واقع درسطرهای سوم تا هشتم محدوده مدل‌سازی شده خواهد بود.

اگر محدوده مدلسازی شده دارای R سطر باشد، تعداد طبقات محتمل آن از رابطه ۲ قابل محاسبه است.

$$N_{PL}=\sum_{i=H_m}^{H_M}(R-i)+1 \qquad (۲)$$

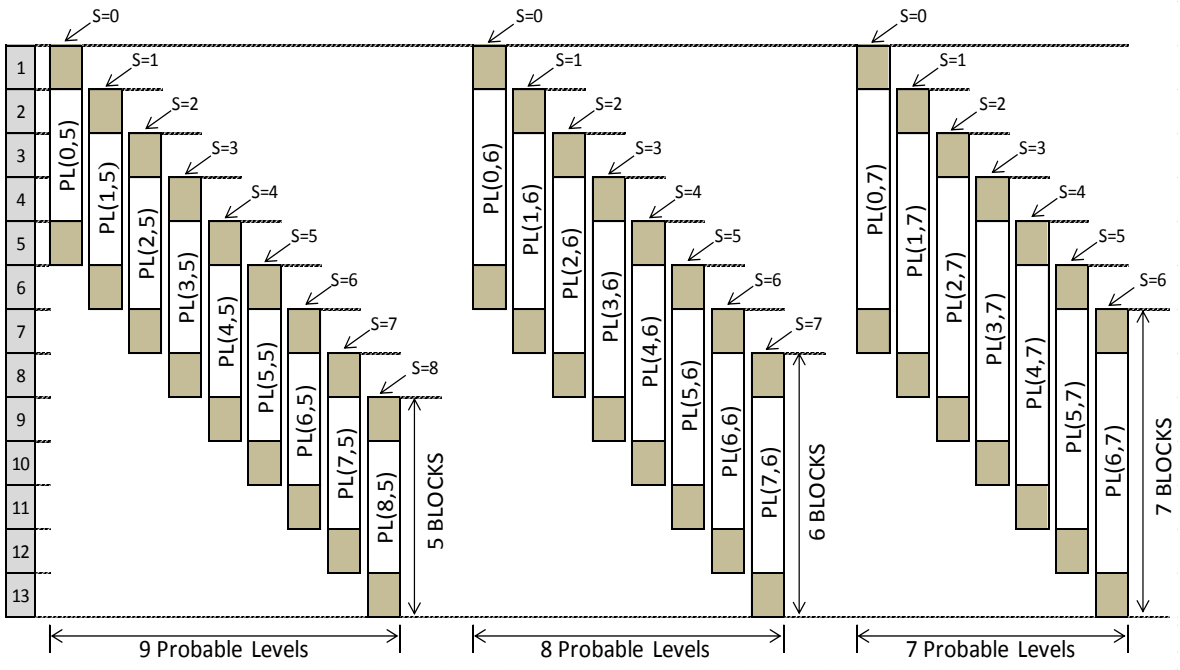
که در آن، R تعداد سطرهای محدوده مدلسازی شده، H_m حداقل ارتفاع مجاز طبقات، H_M حداکثر ارتفاع مجاز طبقات و i یک شمارنده است.

در این شرایط به تعداد $R\text{-}H_m+1$ طبقه محتمل به ارتفاع H_m بلوک، $R\text{-}H_m+2$ طبقه محتمل به ارتفاع H_m+1 بلوک و در نهایت $R\text{-}H_M+1$ طبقه محتمل به ارتفاع H_M بلوک وجود خواهد داشت. به عنوان مثال چنانچه محدوده مدلسازی شده دارای ۱۳ سطر باشد و حداقل و حداکثر ارتفاع طبقه به ترتیب به ۵ و۷ بلوک محدود شود، تعداد طبقات محتمل در محدوده مذکور براساس رابطه ۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$N_{PL}=\sum_{i=5}^{7}(13-i)+1$$

$$N_{PL} = [(13-5)+1]+[(13-6)+1]+[(13-7)+1]$$

$$N_{PL} = 9+8+7 = 24$$



شکل ۱۰: تعداد و جانمایی طبقات محتمل

۴-۲- ارزش‌گذاری طبقات محتمل

پس از تعیین تعداد و جانمایی طبقات محتمل می‌توان BMC را برای تمام بلوک‌های واقع در هر یک از طبقات محتمل محاسبه و تخصیص داد. سپس ارزش اقتصادی بلوک ها برای تمام طبقات محتمل محدوده استخراج نشان داده شده در شکل ۱ بر اساس رابطه ۱ قابل محاسبه می باشد. به عنوان مثال، BEV مربوط به طبقاتی با ارتفاع ۶ بلوک در شکل ۱۱ نشان داده شده است. حداقل عرض پایه‌های تاج فوقانی و تحتانی برابر با یک بلوک، حداقل ارتفاع طبقه ۵ بلوک وحداکثر ارتفاع طبقه ۷ بلوک منظور شده است.

۴-۳- محدوده‌های استخراج محتمل[۲۰] (PMA)

یک محدوده استخراج محتمل محدوده‌ای شامل یک یا ترکیبی از چند طبقه محتمل بدون همپوشانی است. چیدمان‌های مختلف طبقات محتمل، محدوده‌های استخراج متفاوتی را بوجود می‌آورند. در شکل ۱۲ تمام محدوده‌های استخراج محتمل با توجه به طبقات محتمل نشان داده شده در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است.

با استفاده از رابطه ۳ می‌توان تعداد محدوده‌های استخراج محتمل را که شامل ترکیبی از طبقات محتمل است، محاسبه نمود.

$$N_{PMA} = \frac{\left[R-\left(n_1.H_m+n_2.(H_m+1)+\ldots+n_k.H_M\right)+\sum_{i=1}^{k} n_i\right]!}{\left[R-\left(n_1.H_m+n_2.(H_m+1)+\ldots+n_k.H_M\right)\right]!\times\left(\prod_{i=1}^{k} n_i!\right)} \qquad (۳)$$

که در آن $K=H_M-H_m+1$ است و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

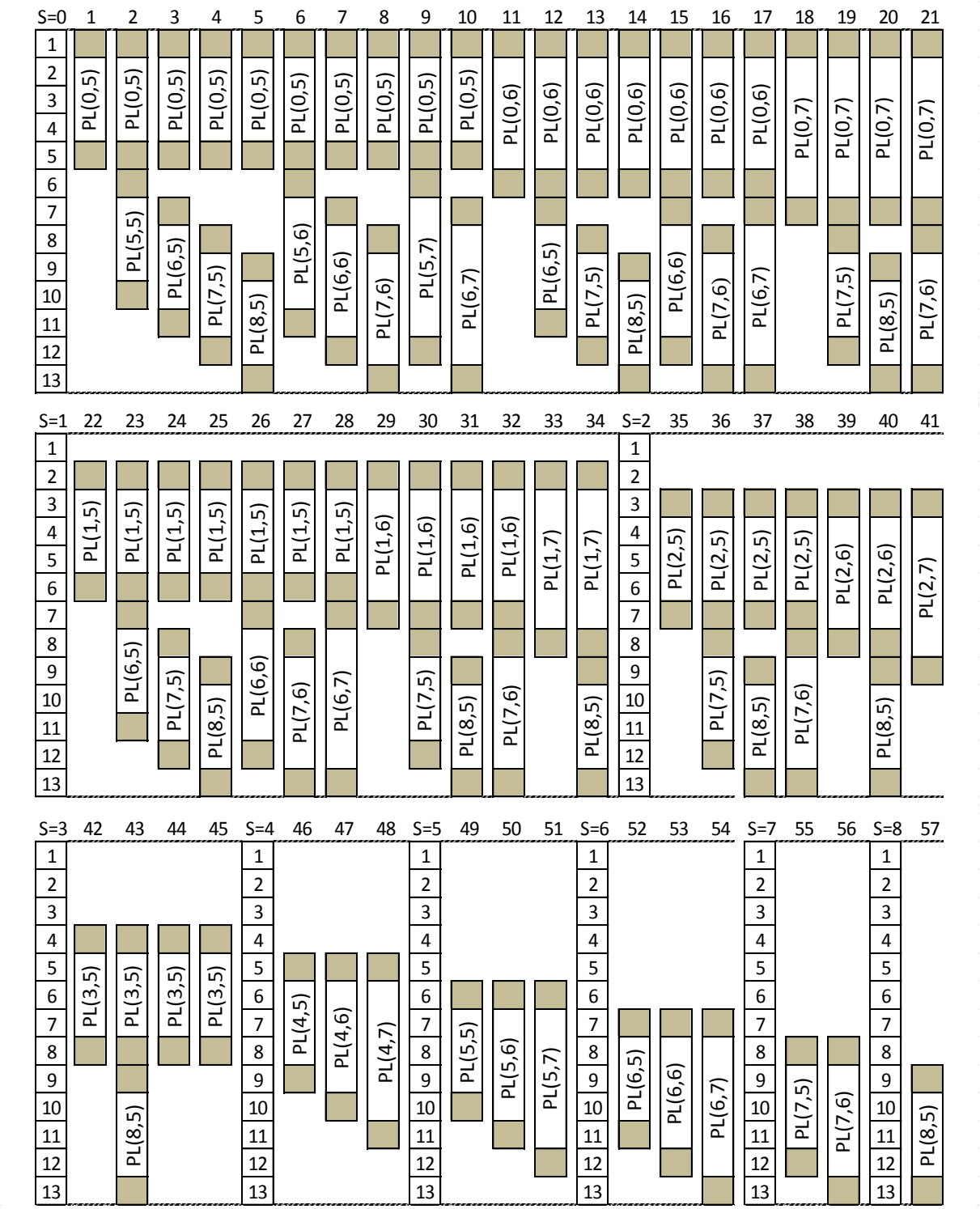
به عنوان مثال تعداد محدوده‌های استخراج محتمل متشکل از دو طبقه یکی به ارتفاع ۵ بلوک و دیگری به ارتفاع ۶ بلوک برای شرایطی که در شکل ۱۲ نشان داده شده، طبق رابطه ۳ برابر است با:

$$N_{PMA}=\frac{[13-(1\times5+1\times6)+(1+1)]!}{[13-(1\times5+1\times6)]!\times(1!\times1!)}=\frac{4!}{2!}=12$$

در هر محدوده مدلسازی شده، فضای نمونه تغییرات VVEM ، به عنوان یک مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر، مجموعه‌ای است که اعضای آن را محدوده‌های استخراج محتمل تشکیل می‌دهند. به عبارت دیگر به ازای هر محدوده مدلسازی شده دقیقاً به تعداد محدوده‌های استخراج محتمل، مدل VVEM که هر یک دارای ارزش ثابتی است، وجود دارد.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(0,6)	1	2	0	3	4	3	2	0	2	3	0	2	2	2	1
	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(1,6)	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(2,6)	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(3,6)	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(4,6)	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(5,6)	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	2	1
	0	2	3	4	1	1	2	1	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	1	3	3	2	4	2	2
	0	2	1	0	0	-2	-1	1	0	1	2	2	3	4	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(6,6)	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(7,6)	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	2	1	0	0	1	-2	1	3	1	-1	0	1	3	1	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u

شکل ۱۱: ارزش اقتصادی بلوک (BEV) در طبقاتی با جانمایی متفاوت و ارتفاع ۶ بلوک



شکل ۱۲: محدوده‌های استخراج محتمل

۵- الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی (GOUMA)

الگوریتم‌های جزءگرا، نظیر الگوریتم برنامه ریزی پویا و OLIPS، در بخشی از محدوده استخراج که در واقع یک طبقه یا پهنه است، محدوده بهینه واقعی را جستجو و معرفی

می‌نمایند ولی بهینه‌سازی محدوده نهایی استخراج که مشتمل بر چندین طبقه است، با کاربرد چنین الگوریتم‌هایی مقدور نیست. در واقع با کاربرد یک الگوریتم جزءگرا مشکل بهینه‌سازی محدوده کارگاه استخراج در هر طبقه یا پهنه حل می‌شود اما مسأله بهینه‌سازی تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات یا پهنه‌ها در کل محدوده استخراج بدون پاسخ باقی می‌ماند. به عنوان یک اصل باید پذیرفت که لزوماً محدوده بهینه استخراج از ترکیب چند طبقه با گسترش و ارتفاع بهینه حاصل نمی‌شود بلکه در حالت کلی محدوده بهینه استخراج باید با در نظر گرفتن چیدمان‌های متفاوتی از طبقات محتمل که محدوده‌های استخراج محتمل را بوجود می‌آورند، جستجو شود. الگوریتم GOUMA در واقع با تلفیق الگوریتم جزءگرای OLIPS و مدل اقتصادی با ارزش متغیر VVEM روش نوینی را برای یافتن بهترین چیدمان کارگاه‌های استخراج بهینه شده ارایه می‌دهد. برای استفاده از این الگوریتم، ابتدا لازم است ارزش اقتصادی تمامی طبقات محتمل به عنوان اجزای سازنده محدوده‌های استخراج و سپس ارزش اقتصادی تمامی محدوده‌های استخراج محتمل محاسبه شود.

۵-۱- ارزش‌گذاری طبقات محتمل

هر محدوده استخراج محتمل مشتمل بر یک یا چند طبقه محتمل با مشخصات هندسی متفاوت است. محدوده بهینه استخراج در هر طبقه محتمل و ارزش اقتصادی متناظر با آن را می‌توان با استفاده از الگوریتم جزءگرا OLIPS تعیین نمود. در شکل ۱۳ برخی محدوده‌های بهینه استخراج و ارزش اقتصادی متناظر با آنها در هر یک از طبقات محتمل با ارتفاع ۶ بلوک نشان داده شده در شکل ۱۰، در شرایطی که حداقل طول کارگاه‌های استخراج به اندازه سه بلوک و ضرایب هم‌ترازی سقف و کف کارگاه به ترتیب برابر با یک و صفر بلوک باشد، با کاربرد الگوریتم OLIPS نشان داده شده است. برای استفاده از الگوریتم OLIPS یک برنامه کامپیوتری به نام SBO تهیه شده است که گزارش کامل آن در مرجه شماره ۱۲ آمده است.

۵-۲- ارزش‌گذاری محدوده‌های استخراج

پس از تعیین محدوده بهینه استخراج در هر یک از طبقات محتمل و برآورد ارزش اقتصادی متناظر با آن می‌توان ارزش اقتصادی محدوده‌های استخراج محتمل را که هر یک ترکیبی از یک یا چند طبقه محتمل است، محاسبه نمود. در جدول ۱ ارزش اقتصادی هر یک از محدوده‌های استخراج محتمل که در شکل ۱۲ ارائه شده، نشان داده شده است.

جدول ۱: ارزش اقتصادی محدوده های استخراج محتمل

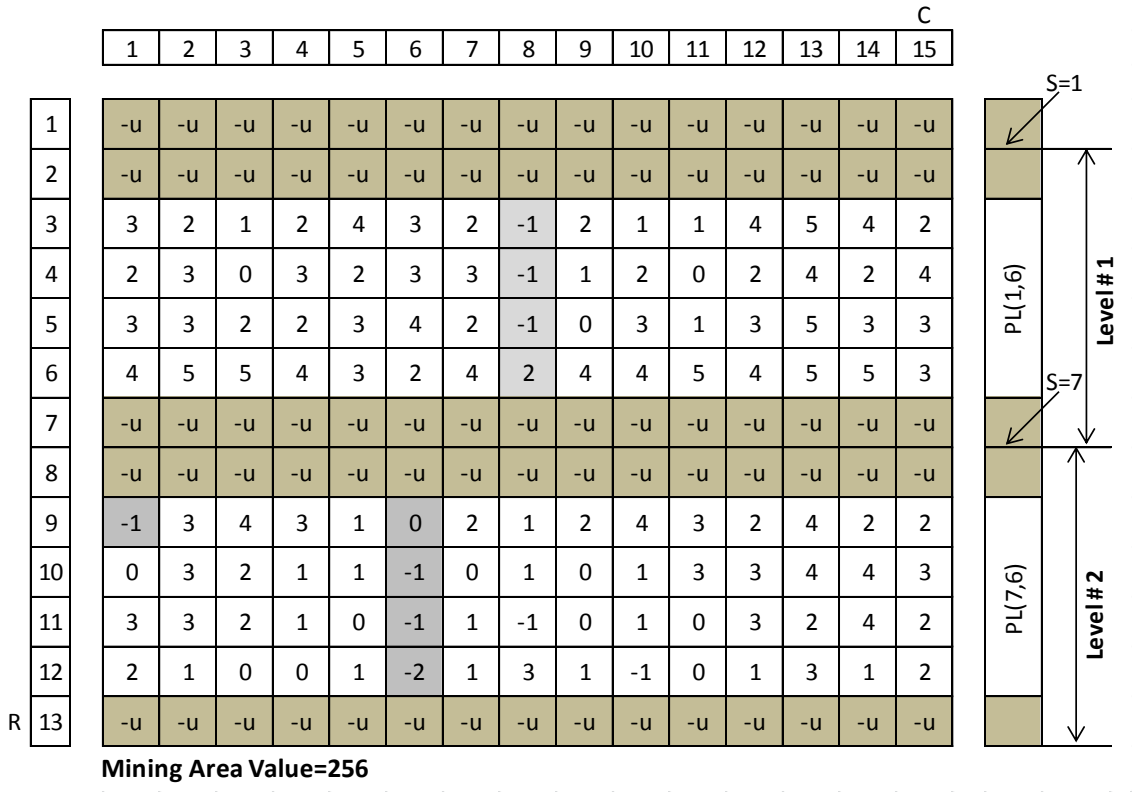
شماره محدوده محتمل	ارزش اقتصادی	شماره محدوده محتمل	ارزش اقتصادی	شماره محدوده محتمل	ارزش اقتصادی
1	52	21	215	41	123
2	152	22	62	42	81
3	110	23	120	43	108
4	94	24	104	44	165
5	79	25	89	45	124
6	164	26	178	46	83
7	168	27	157	47	160
8	147	28	127	48	113
9	129	29	161	49	100
10	117	30	203	50	112
11	131	31	188	51	77
12	189	**32**	**256**	52	58
13	173	33	120	53	116
14	158	34	147	54	65
15	247	35	83	55	42
16	226	36	123	56	95
17	196	37	110	57	27
18	120	38	178		
19	162	39	155		
20	147	40	182		

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(0,6)	1	2	0	3	4	3	2	0	2	3	0	2	2	2	1
	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(1,6)	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(2,6)	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(3,6)	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(4,6)	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(5,6)	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	2	1
	0	2	3	4	1	1	2	1	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	1	3	3	2	4	2	2
	0	2	1	0	0	-2	-1	1	0	1	2	2	3	4	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(6,6)	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(7,6)	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	2	1	0	0	1	-2	1	3	1	-1	0	1	3	1	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u

شکل ۱۳: محدوده بهینه استخراج در طبقات محتمل با ارتفاع ۶ بلوک و ارزش اقتصادی متناظر با آن

۵-۳- محدوده بهینه استخراج

محدوده بهینه استخراج از میان محدوده‌های استخراج محتمل و با توجه به ارزش اقتصادی متناظر با هر محدوده جستجو می‌گردد و محدوده‌ای که دارای بیشترین ارزش اقتصادی است به عنوان محدوده بهینه استخراج انتخاب می‌شود. همانطور که از جدول ۱ و شکل ۱۲ به دست می آید، محدوده شماره ۳۲ که مشتمل بر دو طبقه محتمل با مشخصات $PL_{(1,6)}$ و $PL_{(7,6)}$ است دارای بیشترین ارزش اقتصادی، برابر با ۲۵۶ واحد، بوده و به عنوان محدوده بهینه استخراج برگزیده می‌شود. در شکل ۱۴ محدوده بهینه استخراج بر روی محدوده مدلسازی شده متناظر با شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: محدوده بهینه استخراج

۶- نتیجه‌گیری

یکی از مشکلات اصلی الگوریتم‌هایی که تا کنون برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی ارایه شده‌اند، نحوه بهینه‌سازی آنها است. بر این اساس الگوریتم‌های موجود به دو دسته جزءگرا و کل‌گرا تقسیم می‌شوند. در الگوریتم های جزءگرا جستجو برای یافتن محدوده بهینه بر روی هر طبقه یا پهنه جداگانه انجام می شود و در الگوریتم‌های کل‌گرا محدوده بهینه استخراج بر روی کل مدل جستجو می‌شود.

در واقع الگوریتم های جزءگرا از بهینه سازی کل محدوده استخراج شامل چندین طبقه یا پهنه عاجزند و محدوده بهینه ارائه شده به کمک الگوریتم های کل گرا نیز پس از تقسیم محدوده کل استخراج به طبقات یا پهنه ها تغییر کرده و بهینه بودن نقض می شود. الگوریتم فراگیر ارائه شده در این مقاله (GOUMA) این امکان را فراهم می آورد تا ضمن استفاده از الگوریتمم جزءگرای OLIPS برای بهینه سازی کارگاه استخراج، جانمایی و ارتفاع طبقات و محدوده کل مدل نیز بهینه سازی شود. برای اجرای این الگوریتم مدل بلوکی جدیدی به نام "مدل اقتصادی با ارزش متغیر" (VVEM) در این مقاله ارائه شده تا ارزش متغیر و پویایی برای بلوک های

مدل تعریف شود. مدل VVEM در موارد دیگری از جمله در تعیین حد روباز و زیرزمینی نیز ممکن است به کار گرفته شود.

منابع

[1] Riddle, J., 1977, *A Dynamic Programming Solution of a Block-Caving Mine Layout*, 14th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Colorado, pp. 767-780.

[2] Ovanic, J., Young, D., 1995, *Economic Optimisation of Stope Geometry Using Separable Programming with Special Branch and Bound Techniques*, 3rd Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, H. Mitri (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 129-135.

[3] Jalali, S.E., Ataee-pour. M., 2004, *A 2D Dynamic Programming Algorithm to Optimise Stope Boundaries*, Proceedings of Mine Planning and Equipment Selection, MPES'04, (eds. M. Hardygora et al), Rotterdam, Balkema, pp 45-52

[۴] جلالی، سید محمد اسماعیل و عطایی‌پور، مجید (۱۳۸۴)، "بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی با الگوریتم برنامه ریزی پویا"، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،سال شانزدهم، شماره ج-۶۲، صص۴۸-۳۷ .

[5] Alford, C.; *"Optimisation in Underground Mine Design"*, 25th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 213-218 ,1995.

[6] Ataee-pour, M., 1997, *A New Heuristic Algorithm to Optimise Stope Boundaries*, Proceeding of the 2nd Regional APCOM Symposium on Computer Applications in the Minerals Industries, L. Puchkov (ed.), Moscow, Russia, pp.

[7] Ataee-pour, M., 2005, *A Critical Survey of the Existing Stope Layout Optimization Techniques*", Journal of Mining Science, Vol. 41, No. 5.

[8] N. Grieco and R. Dimitrakopoulos, "Grade uncertainty in stope design: Improving the optimization process", *Proceedings Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, ۲۰۰۴, pp. ۲۴۹–۲۵۵.

[9] Dimitrakopoulos R, Grieco N, ۲۰۰۹. "*Stope design and geological uncertainty: quantification of risk in conventional designs and probabilistic alternative*", Journal of Mining Science, ۴۵(۲): ۱۵۲-۱۶۳.

[10] Sens J J, Topal E, ۲۰۰۸. "*A new algorithm for stope boundary optimisation*", The AusIMM New Leaders' Conference. Brisbane, Australia, ۲۸-۲۵.

[11] Topal E, Sens J, ۲۰۱۰. "*A new algorithm for stope boundary optimization*", Journal of Coal Science & Engineering, ۱۶(۲): ۱۱۹-۱۱۳.

[12] Jalali. S. E., Ataee-pour. M., Shahriyar. K.; ۲۰۰۷; "*A Computer Program to Optimize Stope Boundaries Using Probable Stope Algorithm*"; Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME), Vol. ۲, No. ۳, pp. ۷-۱۴

[1]- Rigorous Algorithm
[2] - Heuristic Algorithm
[3] - Dynamic Programming
[4] - Branch and Bound
[5] - Floating Stope
[6]- Maximum Value Neighbourhood
[7]- Dimitrakopoulos
[8]- Topal Algorithm
[9]- Variable Value Economic Model
[10] - Insitu Income Model
[11] - Position Cost Model
[12] - Mining Cost Model
[13] - Block Insitu Income
[14] - Block Mining Cost
[15] - Upper Crown Pillar
[16] - Under Crown Pillar
[17] - Multi-layers Superposition Modeling
[18] - Block Economic Value
[19] - Probable Level
[20] - Probable Mining Area