طراحی محدودهٔ بهینه نهایی در معادن روباز با روش مخروط شناور دو و مقایسهٔ آن با روش لرچ و گروسمن

رحمان خالو کاکائی

دانشکده مهندسی معدن و ژئو فیزیک دانشگاه شاهرود

E-mail: R_kakaie@Shahrood.ac.ir

چکیده

قبل از استخراج مواد معدنی به روش روباز، لازم است که اندازه و شکل نهایی معدن به منظور تعیین میزان ذخیره قابل استخراج و میزان باطله برداری و همچنین تعیین محل سد باطله و دیگر تآسیسات سطحی، طراحی شود. محدودهٔ معدن تابع پارامترهای مختلفی می باشد که ممکن است در طول عمر معدن، بدلیل تغییر این پارامترها چندین بار بازنگری شود. بنابر این استفاده از کامپیوتر برای طراحی مجدد در کوتاهترین زمان ممکن ضروری است. پس از اختراع کامپیوتر و استفاده همه جانبه آن، الگوریتمهای مختلفی نظیر روش مخروط شناور، روش گراف تئوری لرچ و گروسمن و . . . جهت طراحی محدودهٔ بهینه نهایی معرفی شده است. از میان این الگوریتمها، روش گراف تئوری لرچ و گروسمن تنها روشی است که قادر است محدودهٔ بهینه واقعی را در تمام مدلها محاسبه نماید. پیچیدگی این روش و نیاز به وقت کامپیوتری بالا جهت حصول به جواب از معایب روش مذکور می باشد. روش مخروط شناور به دلیل اینکه در مدت زمان کمتری قادر است محدودهٔ بهینه را محاسبه نماید و همچنین به دلیل سادگی، از سایر الگوریتمها بیشتر استفاده می شود. این الگوریتم در بعضی از حالات قادر به تعیین محدودهٔ بهینه نیست. به همین دلیل روش مخروط شناور دو برای بر طرف نمودن بعضی از معایب روش مذکور توسط رایت ارائه و ادعا شده است که این روش قادر به تعیین محدودهٔ بهینه واقعی می باشد. در این مقاله روش مخروط شناور دو برای بهینه بودن، مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور یک برنامه کامپیوتری به زبان برنامه نویسی C++ تهیه شد و کارائی روش مذکور برای مدلهای مختلف بررسی و نتایج آن با نتایج حاصل از روش گراف تئوری لرچ و گروسمن مقایسه گردید.

واژگان کلیدی: روش لرچ و گروسمن، گراف تئوری، روش مخروط شناور، محدودهٔ بهینه، معادن روباز، روش مخروط شناور دو

مقدمه

قبل از استخراج مواد معدنی به روش روباز، لازم است که اندازه و شکل محدودهٔ نهائی معدن جهت تعیین میزان ذخیره قابل استخراج و مقدار باطله برداری، طراحی برنامه ریزی تولید و تعیین محل دیگر تأسیسات سطحی نظیر مسیرهای دسترسی، دپوی باطله، کارخانه های فرآوری تعیین گردد. محدودهٔ معدن که تابع پارامترهای مختلفی نظیر عیار ماده معدنی، عیار حد، هزینه های استخراج، باطله برداری و فرآوری، راندمان و قیمت ماده معدنی می باشد ممکن است در طول عمر معدن بدلیل تغییر این پارامترها و یا کسب اطلاعات اکتشافی جدید چندین بار بازنگری شود. بنابر این استفاده از کامپیوتر جهت طراحی معدن ضروری است. برای تعیین محدودهٔ معدن روشهای مختلفی استفاده می شود. این روشها را می توان به سه دسته کلی شامل طراحی دستی، طراحی کامپیوتری و طراحی بهینه تقسیم نمود. از میان اینها روشهای طراحی بهینه که بر اساس الگوریتمهای مشخصی محدودهٔ نهائی معادن روباز را تعیین می کنند از اهمیت خاصی برخوردار است.

استفاده از کامپیوتر برای طراحی بهینه محدودهٔ معادن روباز معمولا" با ساختن یک مدل بلوکی از کانسار شروع می شود. برای این منظور ابتدا ذخیره بصورت یک بلوک بزرگ در نظر گرفته می شود بطوری که تمام نواحی کانه سازی شده را در بر گیرد. سپس در مرحله بعد آنرا به بلوکهای کوچکتر تقسیم نموده و به هر کدام عیار تخمینی کانه یا ارزش آن اختصاص داده می شود. بلوکهای مذکور ممکن است شکل و ابعاد مختلفی داشته باشند. مدلهای بلوکی کانسار با توجه به تقسیم آن به بلوکهای کوچکتر، مدل سه بعدی منظم، سه بعدی نا منظم، دو بعدی منظم و دو بعدی نامنظم گویند که از میان اینها مدل سه بعدی منظم که در آن تمام بلوکها به یک اندازه هستند استفاده بیشتری دارد. ارتفاع بلوکها در این مدل را معمولا" به اندازه ارتفاع طراحی شده پله در نظر می گیرند ولی ابعاد افقی آنها بستگی به اطلاعات اکتشافی و فواصل نمونه برداری دارد.

طراحی بهینه محدودهٔ نهائی در معادن روباز موضوعی است پیچیده که مستلزم انجام محاسبات بسیاری می باشد. پس از اختراع و توسعه همه جانبه کامپیوتر الگوریتمهای زیادی جهت تعیین محدودهٔ بهینه معادن روباز معرفی شده که هدف اصلی همه آنها پیدا کردن مجموعه بلوکهایی است که اگر استخراج شوند سود بدست آمده تحت محدودیتهای فنی و اقتصادی حداکثر شود. مهمترین الگوریتمهای طراحی بهینه محدودهٔ نهائی در معادن روباز عبارتند از: روش مخروط شناور (Floating cone method) [۱]، روش مخروط شناور دو (Floating cone method II) [۲]، برنامه ریزی پویا (Dynamic programming) [۳، ۴ و ۵]، روش گراف تئوری (Graph theory) لرچ و گروسمن (Lerchs & Grossmann) [۳ و ۶]، الگوریتم کوروبوف (Korobov algorithm) [۷]. از میان الگوریتمهای مذکور روش مخروط شناور، گرچه در بعضی از حالات قادر نیست محدودهٔ بهینه را بدست آورد، ساده ترین روش بوده و در مدت کمتری جواب بهینه را محاسبه

می نماید. همچنین ثابت شده است روش گراف تئوری لرچ و گروسمن تنها روشی است که قادر است محدودهٔ بهینه را در تمام حالات محاسبه نماید.

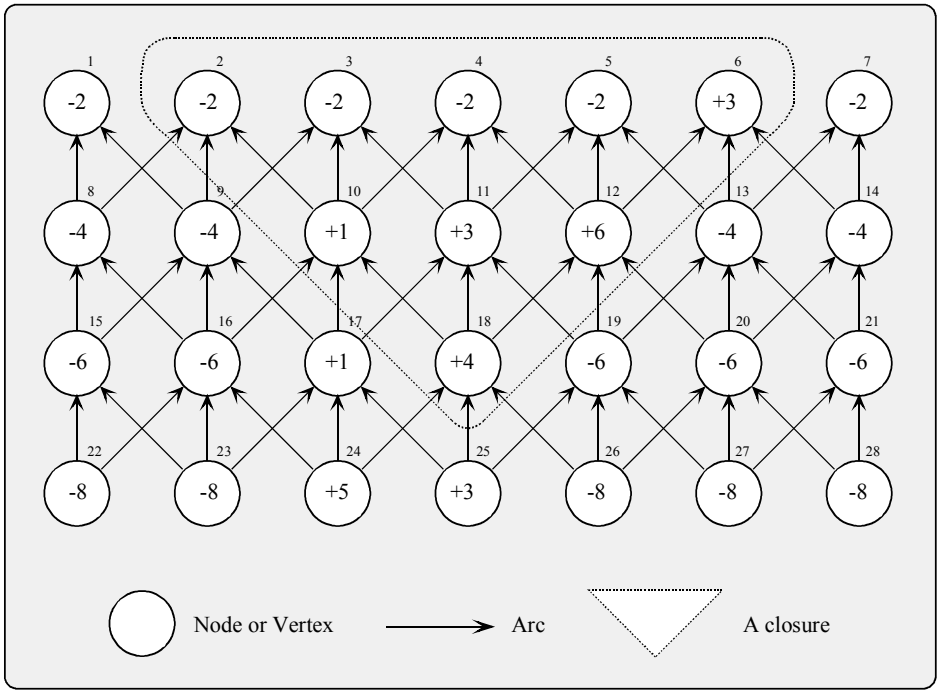
روش مخروط شناور دو اولین بار توسط رایت (Wright) در سال ۱۹۹۹ برای بر طرف کردن بعضی از ضعفهای روش مخروط شناور معرفی گردید. بر طبق ادعای نامبرده، روش مذکور در عین سادگی قادر به تعیین محدودهٔ بهینه واقعی در معادن روباز می باشد بدون اینکه ادعای مذکور به اثبات برسد [۲]. در این مقاله روش مخروط شناور دو برای بهینه بودن بررسی شده است و برای این منظور یک برنامه کامپیوتری به زبان برنامه نویسی C++ برای آن تهیه گردید. همچنین کارائی روش مذکور برای مدلهای مختلف بررسی و نتایج آن با نتایج حاصل از روش های مخروط شناور و گراف تئوری لرچ و گروسمن مقایسه شده است.

روشهای مختلف مخروط شناور

روشهای مختلف مخروط شناور ساده ترین راه حل را برای تعیین محدودهٔ بهینه معادن روباز ارائه می دهد که در سال ۱۹۶۶ توسط کارلسون (Carlson) توضیح داده شده است [۱]. در این روش برای هر بلوک مثبت (ماده معدنی) یک مخروط معکوس با توجه به زاویه شیب پایداری معدن طوری ساخته می شود که راس آن در بلوک ماده معدنی باشد. سپس ارزش بلوکهای واقع در داخل مخروط را با هم جمع کرده و در صورتیکه نتیجه مثبت باشد تمام بلوکهای واقع در داخل آن جزء، محدودهٔ معدن در نظر گرفته می شوند. در غیر اینصورت جستجو برای بلوکهای مثبت دیگر ادامه می یابد. در این روش، جستجو برای بلوکهای ماده معدنی از طبقه اول شروع شده و به طرف طبقات پائینتر ادامه می یابد. گرچه این روش بسیار ساده است و تهیه برنامه کامپیوتری آن نیز آسان می باشد ولی این الگوریتم قادر نیست در بعضی از مدلها محدودهٔ بهینه را پیدا نماید.

روش لرچ و گروسمن

این روش که بر اساس نظریه گرافها (Graph theory) استوار است در سال ۱۹۶۵ توسط لرچ و گروسمن [۳] معرفی گردید و تنها روشی است که ثابت شده است در همه حالات محدودهٔ بهینه واقعی را بدست می آورد. روش مذکور مدل بلوکی اقتصادی کانسار را به یک گراف مستقیم (Directed graph) تبدیل می نماید که در آن هر بلوک با گره (Vertex or node) و ارتباط بین آنها با بردار (Arc) طوری نشان داده می شود که نمایانگر یک پیت قابل اجرا باشد. شکل ۱ یک گراف مستقیم را نشان می دهد که برای یک مدل دو بعدی از کانساری بکار رفته که در آن ابعاد بلوکها یکسان و زاویه شیب معدن ۴۵ درجه فرض شده است. در این مثال برای استخراج بلوک ۱۰ ابتدا لازم است که بلوکهای ۲، ۳ و ۴ برداشته شوند.



شکل ۱ – گراف مستقیم برای یک مدل دو بعدی [۸]

در گراف مذکور مجمو عه ای از گره ها را که با توجه به شیب پایداری معدن می تواند تشکیل یک پیت قابل اجرا را نماید کلوژر (Closure) می گویند. هر کلوژر دارای ارزشی است که برابر مجموع ارزش گره های (بلوکهای) داخل آن است. لذا این الگوریتم با استفاده از یک سری قواعد سعی می کند که کلوژر یا پیت با بیشترین ارزش اقتصادی را پیدا نماید. مهمترین مزیت این روش قابلیت آن برای پیدا کردن محدودهٔ بهینه واقعی معادن روباز در همه حالات است. معایب آن عبارتند از:

۱- پیچیدگی روش: یکی از انتقاداتی که بر این روش وارد شده است پیچیدگی الگوریتم و همچنین مشکل بودن تهیه برنامه کامپیوتری آن است که از عهده یک مهندس معدن با دانش متوسط خارج است. خیلی ها این انتقاد را وارد ندانسته و اظهار داشته اند در صورت تهیه نرم افزار صحیح بر اساس این روش نیاز به دانستن جزئیات آن نیست.

۲- صرف وقت کامپیوتری زیاد برای حصول به جواب: در این شکی نیست که این روش با مقایسه با روشهای دیگر نیاز به صرف مدت زمان زیاد وقت کامپیوتر برای رسیدن به جواب دارد. بهمین دلیل الگوریتمهای دیگری برای رفع این عیب معرفی گردیده است. در حال حاضر با توجه به پیشرفت سریع کامپیوتر، این عیب بزرگی نیست.

۳- مشکلات مربوط به استفاده از شیبهای متغیر: در محدودهٔ معدن با توجه تنوع سنگهای مختلف و درزه و شکستگی ها ممکن است شیب پایداری دیواره متغیر باشد. بنا بر این الگوریتمهای طراحی بهینه بایستی قادر باشند محدودهٔ معدن را با شیبهای متغیر طراحی نمایند. یکی دیگر از معایب این روش مشکل بودن اصلاح آن برای استفاده از شیبهای متغیر می باشد که کوششهای زیادی برای رفع آن صورت گرفته است. این مشکل نیز با طرح یک روش کلی پیشنهاد شده توسط نگارنده بر طرف گردیده [۸] و یک نرم افزار تحت ویندوز بر اساس روش مذکور و با شیب های متغییر تهیه شده است [۹].

لذا با توجه به معایب فوق، تحقیق و جستجو برای تهیهٔ یک الگوریتم که در عین سادگی، بتواند محدودهٔ بهینه واقعی را در زمان کم تعیین نماید توجیه پذیر است.

روش مخروط شناور دو

روش مخروط شناور دو اولین بار در سال ۱۹۹۹ توسط رایت برای بر طرف کردن بعضی از ضعفهای روش مخروط ارائه شد و بر طبق ادعای نامبرده، روش مذکور قادر به تعیین محدودهٔ بهینه واقعی در معادن روباز می باشد. الگوریتم این روش با انجام کمی تغییرات در شکل ۲ نشان داده شده است. در روش مذکور، شبیه روش مخروط شناور جستجو برای بلوکهای ماده معدنی از طبقه اول شروع شده و به طرف طبقات پائینتر ادامه می یابد و برای هر طبقه عملیات زیر زیر انجام می شود.

۱- برای هر بلوک مثبت (ماده معدنی) یک مخروط معکوس با توجه به زاویه شیب پایداری معدن طوری ساخته می شود که راس آن در بلوک ماده معدنی باشد و سپس ارزش آن محاسبه می گردد.

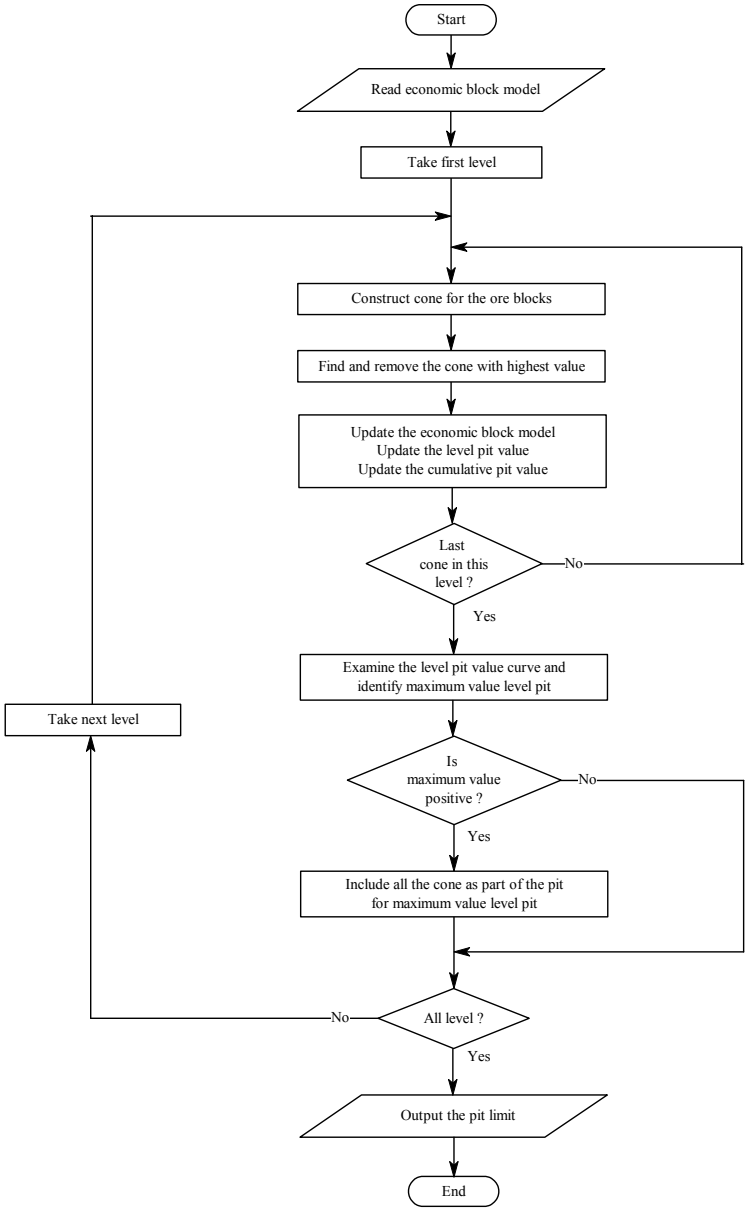
۲- پس از اتمام محاسبهٔ ارزش مخروط استخراجی تمام بلوکهای مادهٔ معدنی در طبقهٔ مورد بررسی، مخروط استخراجی با بالاترین ارزش را پیدا کرده و آنرا جزء محدودهٔ معدن فرض کرده و ارزش تجمعی پیت را محاسبه می نمایند.

۳- پس از اصلاح مدل بلوکی اقتصادی قدمهای مذکور برای بقیه بلوک های مثبت انجام می گردد.

پس از انجام مراحل فوق بلوک با بالاترین ارزش تجمعی را پیدا کرده و در صورتیکه مقدار آن مثبت باشد مخروط های استخراجی برای این بلوک به محدودهٔ بهینه اضافه می گردد.

روش مذکور را با یک مثال ساده دو بعدی بهتر میتوان توضیح داد، شکل ۳ یک مدل دو بعدی اقتصادی از یک مقطع قائم کانساری را نشان می دهد که در آن ابعاد بلوکها یکسان و زاویه شیب معدن در تمام جهات برابر ۴۵ درجه فرض شده است. در مدل مذکور ۵ بلوک مثبت (ماده معدنی) وجود دارد که مخروط استخراجی آنها دارای ارزش های زیر است:

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۳، ۲) ۲- = ۱۳+ ۵- ۵- ۵-



شکل ۲ - الگوریتم روش مخروط شناور دو

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۵، ۲) ۱- = ۱۴+ ۵- ۵- ۵-

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۳، ۳) ۲۲- = ۱۰+ ۱۰- ۱۳+ ۱۰- ۵- ۵- ۵- ۵- ۵-

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۴، ۳) ۲- = ۶+ ۱۴+ ۱۰- ۱۳+ ۵- ۵- ۵- ۵- ۵-

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۵، ۳) ۱- = ۳۰+ ۱۰- ۱۴+ ۱۰- ۵- ۵- ۵- ۵- ۵-

با توجه باینکه ارزش مخروط استخراجی بلوک های ماده معدنی در مثال مذکور منفی می باشد بنابر این با استفاده از روش مخروط شناور محدودهٔ بهینه برای مدل فوق بدست نمی آید.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2	-10	-10	+13	-10	+14	-10	-10
3	-15	-15	+10	+6	+30	-15	-15

شکل ۳ - مدل دو بعدی اقتصادی

محاسبهٔ محدودهٔ بهینه با روش مخروط شناور دو به شرح ذیل است:

طبقهٔ اول

در این روش عملیات جستجو برای بلوکهای ماده معدنی از طبقه اول شروع می شود و چون در طبقه اول بلوک مثبت وجود ندارد بنابر این عملیات از طبقه دوم ادامه می یابد.

طبقهٔ دوم

در طبقه دوم دو بلوک ماده معدنی وجود دارد: بلوکهای (۳، ۲) و (۵، ۲) که ارزش مخروط استخراجی آنها به ترتیب برابر ۲- و ۱- می باشد. از بین دو بلوک مذکور بلوک با بالاترین ارزش مخروط، یعنی بلوک (۵، ۲) جزء محدودهٔ معدن فرض می گردد (شکل ۴). همچنین ارزش تجمعی پیت به صورت جدول ۱ محاسبه شده است.

جدول ۱ – ارزش تجمعی پیت برای اولین بلوک مادهٔ معدنی

ارزش تجمعی پیت	ارزش مخروط	ارزش بلوک	شمارهٔ بلوک
-۱	-۱	+۱۴	(۵، ۲)

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2	-10	-10	+13	-10	+14	-10	-10
3	-15	-15	+10	+6	+30	-15	-15

شکل ۴ – مخروط استخراجی بلوک (۵، ۲) که جزء محدودهٔ معدن فرض شده است.

پس از انجام مرحلهٔ فوق و اصلاح مدل بلوکی اقتصادی، تنها بلوک مادهٔ معدنی باقیمانده در این طبقه بلوک (۳، ۲) می باشد که ارزش مخروط استخراجی آن برابر ۳+ = ۱۳+ ۵- ۵- می باشد (شکل ۵).

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2	-10	-10	+13	-10	+14	-10	-10
3	-15	-15	+10	+6	+30	-15	-15

شکل ۵ – مخروط استخراجی بلوک (۳، ۲)

مخروط استخراجی این بلوک را نیز جزء محدودهٔ معدن فرض کرده و ارزش تجمعی پیت به صورت جدول ۲ محاسبه می گردد.

جدول ۲ – ارزش تجمعی پیت برای دومین بلوک مادهٔ معدنی

ارزش تجمعی پیت	ارزش مخروط	ارزش بلوک	شمارهٔ بلوک
-۱	-۱	+۱۴	(۵، ۲)
+۲	+۳	+۱۳	(۳، ۲)

با توجه به اینکه بلوک مثبت دیگری در این طبقه وجود ندارد و همچنین با توجه به جدول ۲ بلوک (۳، ۲) دارای بالاترین ارزش تجمعی است و چون مقدار آن مثبت می باشد، لذا مخروط های استخراجی تا این بلوک به محدودهٔ بهینه اضافه می گردد که شامل مخروط استخراجی هر دو بلوک مذکور خواهد بود (شکل ۶).

ارزش محدودهٔ معدن تا این طبقه برابر ۲+ می باشد و پس از اصلاح مدل بلوکی اقتصادی (شکل ۷) عملیات از طبقه سوم ادامه می یابد.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2	-10	-10	+13	-10	+14	-10	-10
3	-15	-15	+10	+6	+30	-15	-15

شکل ۶ – محدودهٔ معدن برای طبقه دوم

طبقهٔ سوم

در طبقه سوم سه بلوک مادهٔ معدنی وجود دارد که ارزش مخروط استخراجی آنها با توجه به شکل ۷ دارای ارزش های زیر است :

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۳، ۳) −۵ −۱۰ −۱۰ +۱۰ = −۱۵

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۴، ۳) −۱۰ +۶ = −۴

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۵، ۳) −۵ −۱۰ −۱۰ +۳۰ = +۵

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5						-5
2	-10	-10		-10		-10	-10
3	-15	-15	+10	+6	+30	-15	-15

شکل ۷ – مدل بلوکی اقتصادی پس از بررسی طبقهٔ دوم

از بین سه بلوک مذکور بلوک با بالاترین ارزش مخروط، یعنی بلوک (۵، ۳) جزء محدودهٔ معدن فرض می شود (شکل ۸) و ارزش تجمعی پیت به صورت جدول ۳ محاسبه می گردد.

جدول ۳ – ارزش تجمعی پیت برای اولین بلوک مادهٔ معدنی در طبقهٔ سوم

شمارهٔ بلوک	ارزش بلوک	ارزش مخروط	ارزش تجمعی پیت
(۵، ۳)	+۳۰	+۵	+۵

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5						-5
2	-10	-10		-10		-10	-10
3	-15	-15	+10	+6	+30	-15	-15

شکل ۸ – مخروط استخراجی بلوک (۵، ۳) که جزء محدودهٔ معدن فرض شده است.

پس از اصلاح مدل بلوکی اقتصادی، ارزش مخروط استخراجی بلوک های مادهٔ معدنی باقیمانده در این طبقه به شرح ذیل می باشد:

ارزش مخروط استخراجی بلوک (۳، ۳) ۵- = ۱۰+ ۱۰- ۵-

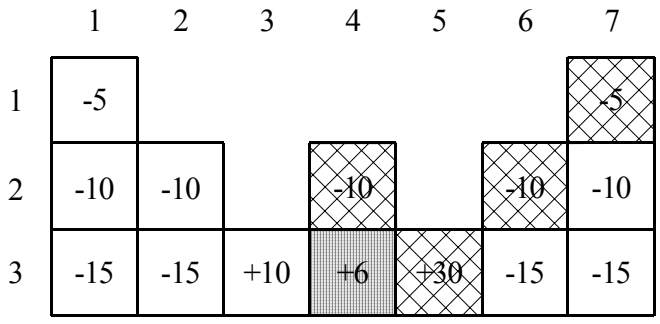
ارزش مخروط استخراجی بلوک (۴، ۳) ۶+

بنابر این بلوک (۴، ۳) نیز جزء محدودهٔ معدن فرض می شود و ارزش تجمعی پیت به صورت جدول ۴ محاسبه می گردد.

جدول ۴ – ارزش تجمعی پیت برای اولین بلوک مادهٔ معدنی در طبقهٔ سوم

ارزش تجمعی پیت	ارزش مخروط	ارزش بلوک	شمارهٔ بلوک
۵+	۵+	۳۰+	(۵، ۳)
۱۱+	۶+	۶+	(۴، ۳)

پس از اصلاح مدل بلوکی اقتصادی و با توجه به شکل ۹، ارزش مخروط استخراجی تنها بلوک مادهٔ معدنی باقیمانده در این طبقه یعنی بلوک (۳، ۳) برابر ۵- = ۱۰+ ۱۰- ۵- می باشد.



شکل ۹ – مخروط استخراجی بلوک (۴، ۳) که جزء محدودهٔ معدن فرض شده است.

مخروط استخراجی این بلوک را نیز جزء محدودهٔ معدن فرض کرده و ارزش تجمعی پیت به صورت جدول ۵ محاسبه می گردد.

جدول ۵ – ارزش تجمعی پیت برای طبقهٔ سوم

ارزش تجمعی پیت	ارزش مخروط	ارزش بلوک	شمارهٔ بلوک
+۵	+۵	+۳۰	(۳ ،۵)
+۱۱	+۶	+۶	(۳ ،۴)
+۶	−۵	+۱۰	(۳ ،۳)

با توجه به اینکه بلوک مثبت دیگری در این طبقه وجود ندارد و همچنین با توجه به جدول ۵ بلوک (۴، ۳) دارای بالاترین ارزش تجمعی است و چون مقدار آن مثبت می باشد، لذا مخروط های استخراجی تا این بلوک به محدودهٔ بهینه اضافه می گردد که شامل مخروط استخراجی بلوک های (۴، ۳) و (۵، ۳) می باشد.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2	-10	-10	+13	-10	+14	-10	-10
3	-15	-15	+10	+6	+30	-15	-15

شکل ۱۰ – محدودهٔ بهینه معدن برای شکل ۳

با توجه به اینکه تمام طبقات بررسی شده است بنابر این محدودهٔ بهینه معدن به ارزش ۱۳+ مطابق شکل ۱۰ بدست می آید. لازم به یاد آوری است که روش مخروط شناور برای مثال مذکور قادر نبود محدودهٔ بهینه را تعیین نماید.

مطالعه موردی

برای بررسی کارائی روش مخروط شناور دو برای مدلهای واقعی، یک برنامه کامپیوتری به زبان برنامه نویسی C++ تهیه گردید و کارائی آن برای مدلهای مختلف بررسی و با نتایج حاصل از روش های مخروط

شناور و گراف تئوری لرچ و گروسمن مقایسه شد که در اینجا فقط نتایج کلی برای یک معدن واقعی ذکر می گردد. اطلاعات معدن مذکور مربوط به یک کانسار طلا که در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی سوئد واقع است میباشد. مدل بلوکی زمین شناسی کانسار مذکور با استفاده از روشهای زمین آمار تهیه شده و دارای ۱۰۱ بلوک در جهت شرقی - غربی، ۸۲ بلوک در جهت شمالی - جنوبی و ۳۶ بلوک در جهت قائم است. ابعاد بلوکها در جهت های مذکور به ترتیب برابر ۱۵، ۱۰ و ۵ متر و شیب دیواره در تمام جهات برابر ۵۸ درجه در نظر گرفته شده است.

جدول ۶- نتایج کلی طراحی محدودهٔ بهینه با هر سه روش

عیار متوسط	**ارزش (SEK) × ۱۰۰۰۰**		**تناژ (تن)**		**تعداد بلوکها در محدودهٔ معدن**			**محدودهٔ بهینه**
گرم برتن	باطله	ماده معدنی	باطله	ماده معدنی	باطله	ماده معدنی	کل	
۲/۴۰۲	-۱۱۵۹۷/۴	۷۶۸۹۵/۵	۱۴۳۰۸۲۶۷/۷	۶۱۲۴۴۵۵	۵۶۶۰	۴۳۹۳	۱۰۰۵۳	روش مخروط شناور
۲/۳۷۲	-۱۵۴۳۷/۸	۸۲۵۴۴/۳	۱۸۳۵۷۶۳۳/۹	۶۷۴۵۷۷۳/۷	۷۴۱۹	۴۹۳۲	۱۲۳۵۱	روش مخروط شناور دو
۲/۳۸۰	-۲۰۳۲۴/۹	۸۹۸۵۳/۷	۲۳۲۳۴۷۸۴/۱	۷۳۱۳۶۹۱/۱	۹۶۲۵	۵۴۰۵	۱۵۰۳۰	روش لرچ و گروسمن

نتایج کلی بهینه سازی با سه روش مذکور در جدول شماره ۶ ذکر شده است. همانطوریکه از جدول مذکور مشاهده می شود ارزش محدودهٔ معدن برای مدل واقعی مذکور برای روش مخروط شناور، روش مخروط شناور دو و روش لرچ و گروسمن به ترتیب برابر ۶۵۲۹۸۱۰۰، ۶۷۱۰۶۵۰۰ و ۶۹۵۲۸۸۰۰ SEK (واحد پول سوئد) می باشد.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2	-10	+10	-10	-10	-10	+12	-10
3	-15	-15	-15	+50	-15	-15	-15

شکل ۱۱ - یک مثال ساده که درآن روش مخروط شناور دو قادر نیست محدودهٔ بهینه را پیدا نماید.

با توجه به نتایج مذکور ملاحظه می شود که روش مخروط شناور دو در مقایسه با روش مخروط شناور محدودهٔ بهینه با سود بیشتری بدست آورده است، ولی با مقایسه با روش لرچ و گروسمن محدودهٔ بهینه با سود کمتری محاسبه نموده است. با توجه به اینکه روش لرچ و گروسمن قادر به تعیین محدودهٔ بهینه واقعی برای تمام مدلها می باشد، بنابر این روش مخروط شناور دو قادر نیست محدودهٔ بهینه واقعی را برای تمام مدلها تعیین نماید. این ضعف را می توان با مثالهای ساده نیز نشان داد. به عنوان مثال برای مدل دو بعدی شکل ۱۱، روش مخروط شناور دو قادر به تعیین محدودهٔ بهینه نمی باشد. در صورتیکه برای مدل مذکور از روش لرچ و گروسمن استفاده شود، محدودهٔ بهینه نشان داده شده در شکل ۱۲ و به ارزش ۷+ حاصل می گردد.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
2	-10	+10	-10	-10	-10	+12	-10
3	-15	-15	-15	+50	-15	-15	-15

شکل ۱۲ - محدودهٔ بهینه برای مدل دو بعدی شکل ۱۱

نتیجه‌گیری

روش مخروط شناور دو گرچه این روش توانسته است بعضی از ضعفهای روش مخروط شناور را بپوشاند و نتایج بهتری نسبت به آن بدست آورد ولی با توجه بررسی های مذکور این الگوریتم قادر نیست در بعضی از مدلها محدودهٔ بهینه واقعی را پیدا نماید. علیرغم معایب مذکور این روش در مقایسه با روش لرچ و گروسمن دارای مزایای زیر است:

۱- روش مذکور در مدت کمتری محدودهٔ بهینه را محاسبه می نماید.
۲- این روش بسیار ساده است و درک و فهم الگوریتم آن نیز آسان می باشد.
۳- استفاده از زاویهٔ شیب متغیر در این روش به سهولت انجام می گیرد.
۴- تهیهٔ برنامهٔ کامپیوتری برای الگوریتم روش مذکور آسان می باشد.

مراجع

[1] Carlson, T. R., Erickson, J. D., O'Brain D. T. and Pana, M. T., (1966), "Computer techniques in mine planning", Mining Engineering, Vol. 18, No. 5, pp 53-56.

[2] Wright, E. A., (1999), "MOVING CONE II - A Simple Algorithm for Optimum Pit Limits Design", ", Proceedings of the 28th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM), (Colorado USA), pp 367-374.

[3] Lerchs, H. and Grossmann, I. F., (1965), "Optimum design of open pit mines", CIM Bulletin, No. 58, p.p. 47-54.

[4] Koenigsberg E., (1982), "The optimum contours of an open pit mine: an application of dynamic programming", Proceedings of the 17th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM), (New York: AIME), pp 247-287.

[5] Wilke, F. L. and Wright, E. A., (1984), "Determining the optimal ultimate pit design for hard rock open pit mines using dynamic programming", Erzmetall, No. 37, pp 139-144.

[6] Zhao, Y. and Kim, Y. C., (1992), "A new optimum pit limit design algorithm", Proceedings of the 23rd Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM) (Littleton, Colorado: AIME), pp 423-434.

[7] David, M., Dowd, P. A. and Korobov, S., (1974), "Forecasting departure from planning in open pit design and grade control", Proceedings of the 12th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM), (Golden, Colorado School of Mines), Vol. 2, pp F131-F142.

[8] Khalokakaie, R., Dowd, P. A. and Fowell, R. J., (2000), "Lerchs-Grossmann algorithm with variable slope angles", Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. industry), No. 109, pp A77-A85.

[9] Khalokakaie, R., Dowd, P. A. and Fowell, R. J., (2000), "A windows program for opimal open pit design with variable slope angles", International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, No. 14, pp 261-275.