Archive of SID

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"

Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

دوره چهارم، شماره هفتم، سال ۱۳۸۸، صفحه ۱ تا ۱۱

Vol. 4, No.7, 2009, pp.1-11

بهینه‌سازی محدوده استخراج در معادن زیرزمینی با استفاده از الگوریتم حریصانه

محمد اسماعیل جلالی[۱*]، سید هادی حسینی[۲]

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ jalalisme@shahroodut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ h.hoseinie@mine.tus.ac.ir

(دریافت ۲۷ مهر ۱۳۸۷ ، پذیرش ۱۲ مرداد ۱۳۸۸)

چکیده

تا کنون تعداد معدودی الگوریتم برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی ارائه شده که شمار آنها در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدود استخراج روباز بسیار کمتر است. در هر یک از این الگوریتم‌ها تنها برخی از محدودیت‌های فنی و هندسی کارگاه استخراج وابسته به یک یا چند روش استخراج خاص برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در نظر گرفته شده است. در این مقاله یک الگوریتم جدید برای بهینه‌سازی محدوده کارگاه استخراج زیرزمینی در یک طبقه استخراجی بر مبنای الگوریتم حریصانه ارائه شده است. این الگوریتم بر روی مدل اقتصادی دو بعدی اجرا می‌شود. برای اجرای الگوریتم، ابتدا محدوده مدلسازی شده با یک مدل گرافی که در آن اوزان یال‌های گراف بیانگر ارزش اقتصادی تجمعی بلوک‌ها در مدل بلوکی است، شبیه‌سازی می‌شود. سپس با بهره‌گیری از روش دیکسترا، مسیری از گراف که دارای طول بیشینه است، جستجو می‌شود. روش دیکسترا یکی از بهترین روش‌های حل الگوریتم حریصانه است. مسیری که باکاربرد این الگوریتم بر روی مدل محدوده معدنی جستجو می‌شود در واقع نشان‌دهنده مرزهای محدوده استخراج بهینه است که در صورت استخراج آن دستیابی به سود حداکثر محقق می‌گردد.

کلمات کلیدی

معدنکاری زیرزمینی، کارگاه استخراج، بهینه‌سازی، الگوریتم حریصانه، روش دیکسترا

* عهده‌دار مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

تا کنون شمار معدودی الگوریتم برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی ارائه شده که شمار آنها در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه در مبحث استخراج روباز اندک است. علل عمده این موضوع را می‌توان در سه عامل زیر جستجو کرد:

الف- روش‌های استخراج معادن زیرزمینی بسیار متعدد و از نظر فنی کاملاً متفاوت هستند. بنابراین بسط یک الگوریتم که پاسخگوی تمام محدودیت‌های فنی و هندسی روش‌های متعدد استخراج زیرزمینی باشد، دشوار است.

ب- محاسبه پارامترهای اقتصادی در محدوده استخراج زیرزمینی که عامل اصلی تصمیم‌گیری در تعیین محدوده بهینه استخراج است، به علت وابستگی به عوامل متعددی همچون روش استخراج، موقعیت هندسی و جانمایی کارگاه‌های استخراج با پیچیدگی زیادی همراه است.

ج- تاکنون بستر مناسب برای استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی به نحو شایسته فراهم نشده است. برای استفاده از این الگوریتم‌ها، فرهنگ‌سازی عمومی در بین طراحان معادن زیرزمینی ضروری است، زیرا طراحان معمولاً تمایل دارند با تکیه بر تجارب مهندسی، طراحی معدن را با روش‌های دستی و یا دستی- کامپیوتری و با ترسیم مقاطع قائم و افقی در محدوده کانسار انجام دهند.

در هر یک از الگوریتم‌های ارائه شده برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی تنها برخی از محدودیت‌های فنی و هندسی کارگاه استخراج وابسته به یک یا چند روش استخراج خاص برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در نظر گرفته شده که قطعاً برای بیان شرایط واقعی همه روش‌های استخراج زیرزمینی کافی نیست.

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی را به دو دسته تقسیم نمود. گروهی از این الگوریتم‌ها که بر روی تمام محدوده معدنی مدل‌سازی شده اجرا می‌شوند و محدوده بهینه را جستجو می‌کنند، الگوریتم‌های کل‌گرا نامیده می‌شوند. در این گروه از الگوریتم‌ها پس از یافتن محدوده بهینه استخراج، محدوده مورد نظر به پهنه‌ها یا طبقات استخراجی تقسیم می‌شود. گروه دیگر الگوریتم‌هایی هستند که در آنها ابتدا محدوده معدنی به طبقات یا پهنه‌های استخراجی تقسیم شده و سپس الگوریتم مورد نظر بر روی هر طبقه یا پهنه به طور مجزا اجرا می‌شود. این دسته از الگوریتم‌ها، جزگرا نامیده می‌شوند. در این گروه پس از تعیین محدوده بهینه استخراج در هر طبقه یا پهنه، محدوده بهینه بر روی کل محدوده معدنی جانمایی می‌شود[۱].

در این مقاله یک الگوریتم جدید با عملکرد جزگرا برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی در یک طبقه یا پهنه بر مبنای الگوریتم حریصانه[۱] ارائه شده است. این الگوریتم بر روی مدل اقتصادی دو بعدی اجرا می‌شود. از آنجا که کانسارهای زیرزمینی عمدتاً رگه‌ای یا لایه‌ای هستند و حتی در بسیاری از موارد در کانسارهای توده‌ای نیز ابتدا کانسار به برشهای قائم، افقی و یا مایل تقسیم می‌شود، لذا عموماً یکی از ابعاد استخراجی کانسار خیلی کمتر از دو بعد دیگر است، بطوری که می‌توان محدوده استخراجی را دو بعدی در نظر گرفت. در این شرایط مدل‌سازی دو بعدی کارآیی مناسبی داشته و نتایج بهینه قابل قبولی را ارائه می‌کند.

۲- مروری بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی

تاکنون پنج الگوریتم با هدف بهینه‌سازی اقتصادی محدوده استخراج زیرزمینی ارائه شده است که عبارتند از الگوریتم‌های: برنامه‌ریزی پویای ریدل (RDP)[۲]، شاخه و حد (BB)[۳]، کارگاه شناور (FS)[۴]، با ارزش‌ترین همسایگی (MVN)[۵] و اُلیپس (OLIPS)[۶][۱]. تمامی این الگوریتم‌ها بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی و یا عیاری اجرا می‌شوند.

الگوریتم ریدل با انجام اصلاحاتی بر روی الگوریتم لرچ و گراسمن توسعه داده شده است. الگوریتم لرچ و گراسمن[۷]، قدیمی‌ترین الگوریتمی است که با مبنا قرار دادن مدل اقتصادی دو بعدی محدوده معدنی، برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز به کار رفته است. اولین بار در سال ۱۹۷۷ کاربرد الگوریتم ریدل برای بهینه‌سازی محدوده استخراج به روش تخریب توده‌ای[۸] و به صورت جزگرا گزارش شده است[۲]. هر چند این الگوریتم نزدیک به دو دهه زودتر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی ارائه شده امّا بدلیل محدودیت‌های کاربردی، چندان مورد توجه واقع نشده و توسعه نیافته است.

الگوریتم شاخه و حد در سال ۱۹۹۵ برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیزمینی در یک پهنه یا طبقه به صورت جزگرا، توسط اوانیک و یانگ[۹] پیشنهاد شده است[۳]. این الگوریتم بر روی مدل اقتصادی دو بعدی محدوده معدنی تعریف می‌شود و با تکیه بر یک منطق ریاضی، نقاط شروع و پایان کارگاه را در امتداد محدوده مدلسازی شده مشخص

www.SID.ir

Archive of SID

می‌کند.

الگوریتم کارگاه شناور یک الگوریتم کل‌گرا است که در سال ۱۹۹۵ توسط آلفورد[۱۰] ارائه شده است. این الگوریتم بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی یا عیاری کانسار قابل اجرا است. الگوریتم کارگاه شناور در طراحی معادن زیرزمینی توسط نرم افزار دیتاماین مورد استفاده قرار گرفته است[۴].

مبانی الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی در سال ۱۹۹۷ توسط عطایی‌پور تدوین و طی سال‌های بعد برای استفاده در تحلیل‌های سه بعدی تکمیل شده است. این الگوریتم بر روی مدل اقتصادی سه بعدی محدوده معدنکاری تعریف می‌شود و از آن می‌توان برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی با هر روش استخراجی به صورت کل‌گرا سود برد[۵].

الگوریتم اُلیپس در سال ۲۰۰۶ توسط جلالی ارائه شده است. اُلیپس یک الگوریتم با منطق ریاضی است که از روش برنامه‌ریزی پویا بهره می‌برد. این الگوریتم بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی دو بعدی اجرا می‌شود و بنابراین عمدتاً برای کانسارهای رگه‌ای یا لایه‌ای قابل استفاده است. الگوریتم اُلیپس با عملکرد جزگرا و کاربرد روش برنامه‌ریزی پویا بر روی مدل بلوکی اقتصادی، محدوده بهینه کارگاه استخراج را تعیین می‌کند[۱].

علاوه بر الگوریتم‌های فوق، الگوریتم‌های دیگری مانند الگوریتم تقسیم هشت گانه[۱۱] و رهیافت‌های زمین آماری[۱۲] نیز وجود دارند که بر روی نوع خاصی از مدل‌های بلوکی زمین شناسی محدوده معدنی (غیر اقتصادی) تعریف شده‌اند[۶].

۳ - مدل‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی

برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی، همانند معادن روباز، از مدل بلوکی استفاده می‌شود. برای ساخت مدل بلوکی محدوده معدنی، ابتدا کانسار و بخشی از سنگ‌های اطراف آن به صورت یک بلوک بزرگ در نظر گرفته می‌شود که تمامی نواحی کانی‌سازی شده را در برگیرد. سپس بلوک مورد نظر به بلوک‌های کوچکتر تقسیم شده و به هر کدام از آنها عیار برآورد شده اختصاص داده می‌شود. به این ترتیب مدل بلوکی عیاری محدوده معدنی را می‌توان تهیه نمود. برای ساخت مدل بلوکی اقتصادی، با توجه به مقدار و عیار ماده معدنی و همچنین پارامترهای اقتصادی روش استخراج، می‌توان ارزش اقتصادی هر یک از بلوک‌های مورد نظر را تعیین و مدل اقتصادی محدوده استخراج را تولید نمود.

در اکثر الگوریتم‌ها برای تعیین محدوده بهینه از مدل بلوکی اقتصادی استفاده می‌شود. زیرا به طور معمول، ملاک بهینه‌سازی، دستیابی به حداکثر سود است. در بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی، هدف دستیابی به مجموعه‌ای از بلوک‌ها است به طوری که بالاترین ارزش اقتصادی (سود) با استخراج آن بلوک‌ها حاصل شود.

در مدل‌سازی محدوده‌های معدنی که به روش روباز استخراج می‌شوند، پس از ساخت مدل بلوکی اقتصادی اولیه، مدل اقتصادی تجمعی ساخته می‌شود. با توجه به این که در معدنکاری روباز استخراج از بالا به پائین انجام می‌شود، ارزش تجمعی بلوک‌های موجود در هر ستون از مدل بلوکی از بالا به پائین محاسبه می‌شود. اما در مدلسازی اقتصادی محدوده معدنی برای استخراج به روش زیرزمینی همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، برای شروع استخراج و تخلیه مواد استخراج شده، یک زیر برش ایجاد می‌شود و دهانه‌های تخلیه در زیر محدوده مدلسازی شده و در بالای تونل ترابری احداث می‌شوند. طبیعی است که در این شرایط در هر ستون از محدوده مدل‌سازی شده قبل از استخراج هر بلوک باید تمامی بلوک‌های واقع در زیر آن استخراج شوند. به همین دلیل در مدل بلوکی محدوده معدنی، ارزش تجمعی هر ستون از بلوک‌های مدل اقتصادی بر خلاف معدنکاری روباز از پائین به بالا محاسبه می‌شود.

در شکل ۲، یک مدل بلوکی اقتصادی اولیه و همچنین مدل بلوکی تجمعی متناظر با آن نشان داده شده است.

۴- شبیه‌سازی مدل بلوکی با گراف

از آنجا که در این مقاله مدل بلوکی معدن با گراف شبیه‌سازی شده است، برای تشریح چگونگی شبیه‌سازی مدل بلوکی با گراف، بعضی از تعاریف و اصطلاحات مورد نیاز به اختصار مرور می‌شود[۷].

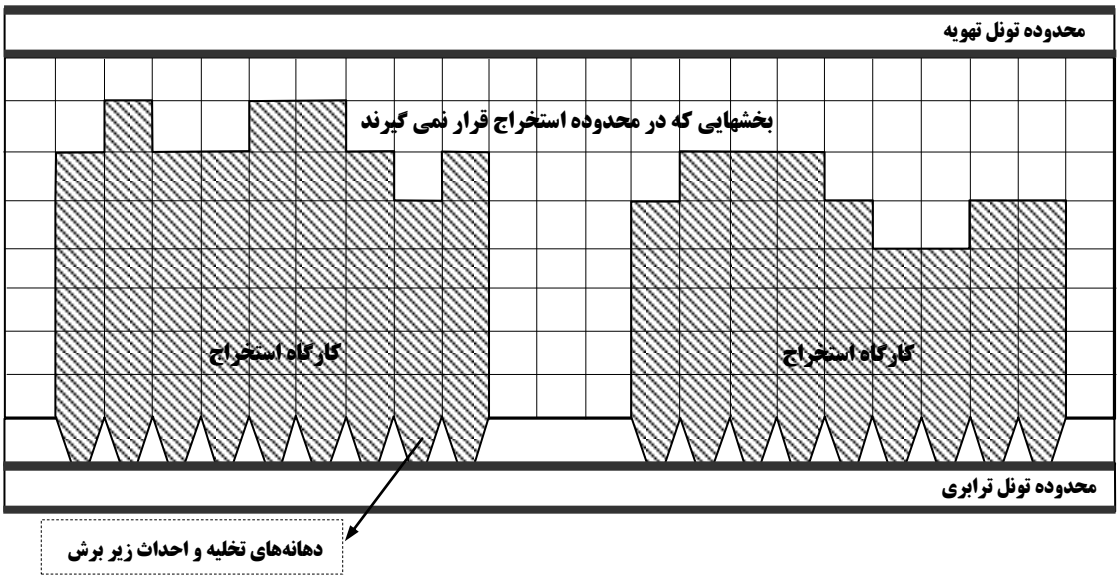
۴-۱- تعاریف

هر گراف از تعدادی رأس و یال تشکیل می‌شود. در نمایش تصویری گراف‌ها، رأس‌ها با دایره و یال‌ها با خط نشان داده می‌شوند. اگر یال‌های گراف دارای جهت باشند، گراف را "جهت‌دار" می‌گویند. در این گونه گراف‌ها، هنگام رسم یال‌ها از پیکان برای نشان دادن جهت استفاده می‌شود. در یک گراف جهت‌دار، ممکن است بین دو رأس دو یال وجود داشته باشد.

اگر یال‌های موجود در گراف دارای مقدار باشند، این مقادیر را وزن و گراف حاصل را "وزن‌دار" می‌نامند. در بسیاری از کاربردها، مقدار اختصاص یافته به یک یال نشانگر فاصله بین

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: شمای کلی از اجزای یک طبقه استخراجی در روش‌های استخراج قائم

دو رأس متناظر یال می‌باشد. فاصله میان هر دو رأس دلخواه در یک گراف یک مسیر نامیده می‌شود. در شکل ۳ یک گراف جهت‌دار وزن‌دار نشان داده شده است.

در یک گراف جهت‌دار، مسیر مجموعه‌ای از رأس‌ها است به طوری که از یک رأس به رأس بعدی یک یال وجود داشته باشد.

۱	۸	۴	۱	-۱	۱	۱	-۲	-۲
۱	۶	۲	-۲	-۱	-۲	۶	-۱	۱
۲	۴	۲	-۱	-۲	-۲	۳	۳	۱
۱۰	۲	۱	-۴	-۱	-۱	۵	۴	۳

الف- مدل بلوکی اقتصادی اولیه

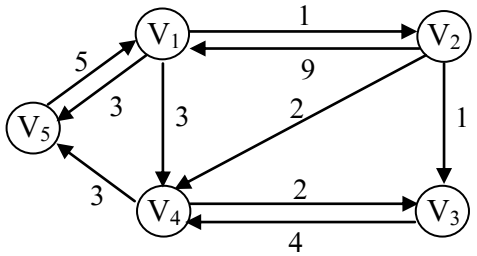
۱۴	۲۰	۹	-۶	-۴	-۵	۱۵	۴	۳
۱۳	۱۲	۵	-۷	-۵	-۴	۱۴	۶	۵
۱۲	۶	۳	-۵	-۳	-۳	۸	۷	۴
۱۰	۲	۱	-۴	-۱	-۱	۵	۴	۳

ب- مدل بلوکی اقتصادی تجمعی

شکل ۲: مدل بلوکی اقتصادی اولیه و تجمعی

برای مثال، در شکل ۳ ترتیب $[V_1, V_4, V_3]$ یک مسیر است زیرا از V_1 به V_4 یک یال و از V_4 به V_3 یک یال وجود دارد. اگر یک مسیر هیچ‌گاه از یک رأس دو بار نگذرد، مسیر ساده نامیده می‌شود. مسیر $[V_1, V_2, V_3]$ در شکل ۳ ساده است، ولی مسیر $[V_1, V_4, V_5, V_1, V_2]$ ساده نیست. طول یک مسیر در گراف وزن‌دار، حاصل جمع اوزان یال‌های موجود در طی مسیر است. در یک گراف غیر وزن‌دار، طول مسیر عبارت از تعداد رئوس موجود در آن مسیر است.

یکی از مسائل کاربردی در گراف‌ها، یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین دو رأس دلخواه در یک گراف است. جستجوی کوتاه‌ترین مسیر بین دو رأس گراف یک مسئله بهینه‌سازی است. بسته به نوع مسئله و هدف آن، مقدار بهینه می‌تواند حداقل یا حداکثر باشد.



شکل ۳: نمونه‌ای از گراف جهت دار و وزن‌دار

۴-۲- مدل گرافی یک کانسار

در بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی با استفاده از مدل گرافی، مسئله بهینه‌سازی از نوع بیشینه‌سازی است. هدف از بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی، بیشینه‌سازی ارزش اقتصادی محدوده قابل استخراج بوده و طول مسیر بهینه، حداکثر ارزش کارگاه (یا کارگاه‌های) قابل استخراج در آن محدوده معدنی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که تمامی الگوریتم‌هایی که تابع هدف آن‌ها از نوع بیشینه‌سازی است، بر روی گراف‌هایی با مسیرهای ساده قابل اجرا هستند.

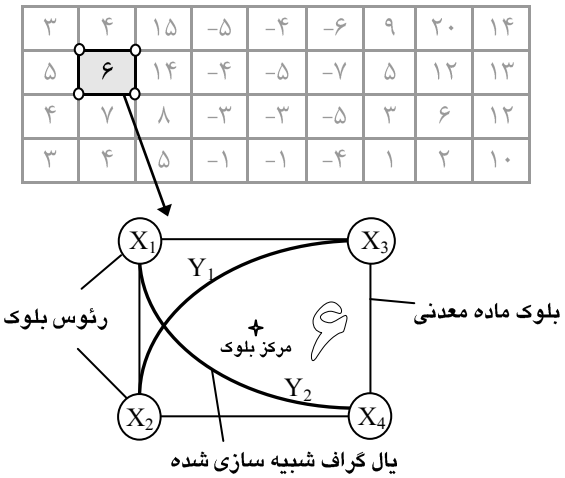
برای ساخت مدل گرافی یک محدوده معدنی، از مدل بلوکی اقتصادی آن استفاده می‌شود. هندسه کلی و نیز کلیه ارتباطات موجود در مدل گرافی بر مبنای مدل بلوکی اقتصادی

www.SID.ir

Archive of SID

و با توجه به محدودیت‌های فنی و هندسی روش استخراج تعریف می‌شود.

در تشکیل مدل گرافی از روی یک مدل بلوکی اقتصادی، هر گوشه از یک بلوک به عنوان یک رأس گراف و ارتباط بین بلوک‌ها با یال‌های گراف تعریف می‌شوند. در حقیقت هر یال مبین ارتباط یک بلوک با سایر بلوک‌های قبل و بعد از خود است. برای نشان دادن نحوه برداشت بلوک در حین استخراج، یال‌های گراف قوس‌دار رسم می‌شوند. در شکل ۴ یک بلوک از یک مدل بلوکی اقتصادی تجمعی (که در شکل ۲-ب آمده است) و قسمتی از گراف شبیه‌سازی شده متناظر با آن ملاحظه می شود.



شکل ۴: شمای کلی نحوه شبیه‌سازی یک بلوک

اگر تقعر یال به سمت پائین باشد و مرکز بلوک در زیر آن قرار گیرد، نشان می‌دهد که در محاسبه وزن یال، ارزش اقتصادی بلوک مورد نظر نیز منظور شده است. به عنوان مثال ارزش یال Y_1 در شکل ۴ برابر با ۶ است. طبیعی است که وزن این یال و یال افقی که رئوس X_1 و X_3 را به هم متصل می‌کند باهم برابر است. چنانچه تقعر یال به سمت بالا باشد (یال Y_2)، مرکز بلوک در بالای یال قرار می‌گیرد و در محاسبه وزن یال، ارزش اقتصادی بلوک مورد نظر محاسبه نمی‌شود. برای مثال مثال ارزش یال Y_2 برابر با ۷ است. در این شرایط نیز وزن این یال و یال افقی که رئوس X_2 و X_4 را به هم متصل می‌کند باهم برابر است. در واقع ارزش هر یال که بر روی آن درج می‌شود نشانگر ارزش اقتصادی تجمعی بلوک‌های زیر آن یال می‌باشد.

در این مقاله برای بیان ارتباط بین بلوک‌ها، سه فرض اصلی در نظر گرفته شده است:

الف) هنگامی که در یک ستون از یک مدل بلوکی، ارتفاع کارگاه در موقعیت n بلوک بالاتر از نقاط تخلیه قرار دارد، در ستون مجاور آن با توجه به محدودیت‌های هندسی روش استخراج مورد نظر، ارتفاع کارگاه می‌تواند در همان تراز یا به اندازه یک بلوک بالاتر (در موقعیت بلوک n+1) یا یک بلوک پائین‌تر (در موقعیت بلوک n-1) نسبت به آن قرار گیرد.

ب) برای عدم استخراج مجموعه‌ای از بلوک‌ها که ارزش اقتصادی منفی دارند (و باقی گذاردن آنها به صورت لنگه) می‌توان گسترش امتدادی کارگاه را در هر نقطه متوقف کرد. برای شبیه‌سازی این امر توسط گراف، از هر رأس به رأس واقع در سطر صفر (که در زیر کارگاه واقع است) نیز یک یال رسم می‌شود تا الگوریتم توانایی جستجوی مناسب بلوک‌های با ارزش و جایگذاری بلوک‌های باطله را داشته باشد.

ج) برای اینکه امکان بازگشت الگوریتم از روی یال‌ها واقع در سطر صفر به ترازهای بالاتر فراهم شود، از هر رأس واقع در سطر صفر به تمامی رأس‌های موجود در ستون بعدی، یال‌هایی رسم می‌شود.

۵- الگوریتم حریصانه

الگوریتم حریصانه یک الگوریتم جستجوگر[۱۳] است که برای حل مسائل بهینه‌سازی به کار می‌رود. این الگوریتم به ترتیب عناصر داده‌ها را گرفته و هر بار عنصری را که طبق یک معیار معین، "بهترین" است، بدون توجه به انتخاب‌های قبلی و انتخاب‌های آینده، برمی‌گزیند. الگوریتم حریصانه غالباً به راه حل‌هایی بسیار ساده و کار آمد منجر می‌شود[۸].

در الگوریتم حریصانه با انجام یک سری انتخاب، بهینه‌سازی انجام می‌شود. هر یک از انتخاب‌های انجام شده در طی اجرای الگوریتم، در لحظه انتخاب، بهترین گزینه به نظر می‌رسند، یعنی در واقع انتخاب صورت گرفته در آن لحظه بهینه است. هدف نهایی الگوریتم دست‌یابی به یک حل بهینه سرتاسری است[۸].

۵-۱- مراحل اجرای الگوریتم حریصانه

در الگوریتم حریصانه ابتدا یک مجموعه تهی از نقاط متناظر با جواب‌ها به صورت اولیه تشکیل می‌شود، سپس برای حل مسئله بهینه‌سازی سه مرحله اصلی زیر انجام می‌گیرد [۸]:

الف- فرآیند انتخاب: الگوریتم در این مرحله عنصر بعدی را که باید به مجموعه اضافه شود، انتخاب می‌کند. انتخاب طبق یک ملاک حریصانه انجام می‌شود که یک شرط بهینه را در همان مرحله برآورده می‌سازد.

ب- فرآیند امکان‌سنجی: در این مرحله امکان‌پذیری مجموعه

www.SID.ir

Archive of SID

جدید برای رسیدن به حل نهایی بررسی می‌شود.
ج- بررسی راه حل: در این مرحله تعیین می‌شود که آیا مجموعه جدید، حل مورد نظر را ارائه می کند یا خیر.

در زیر، الگوریتم حریصانه با یک مثال ساده تشریح می‌شود.

فروشندگان کالا پس از فروش کالا و دریافت پول معمولاً برای پس‌دادن بقیه پول به خریداران دچار مشکل می‌شوند. زیرا مشتریان مایل نیستند مقدار زیادی پول خرد دریافت کنند. بنابراین هدف فروشندگان نه تنها پس‌دادن بقیه پول به میزان صحیح، بلکه انجام این کار با حداقل تعداد اسکناس یا سکه ممکن است. برای سادگی فرض می‌شود که مابقی پولی که فروشنده باید به مشتری پس دهد تنها از نوع سکه باشد. بنابراین حل این مسئله عبارت است از مجموعه‌ای از سکه‌ها که جمع آن‌ها معادل بقیه پول مشتری باشد. حل بهینه همین مجموعه با حداقل تعداد سکه‌ها انجام می‌شود. روش حریصانه برای این مسئله به این صورت است [۷]:

در آغاز هیچ سکه‌ای در مجموعه جواب وجود ندارد. لذا ابتدا بزرگ‌ترین سکه از نظر ارزش (بهینه محلی) انتخاب می‌شود. این کار در الگوریتم حریصانه "فرآیند انتخاب" نامیده می‌شود. در مرحله بعد باید دید که آیا با افزودن سکه بعدی که باز هم به صورت حریصانه انتخاب شده و دارای بیشترین ارزش ممکن است، جمع کل ارزش سکه‌ها از مجموع پولی که فروشنده باید پس بدهد بیشتر می‌شود یا خیر؟ این کار در الگوریتم حریصانه "فرآیند امکان‌سنجی" نامیده می‌شود. اگر ارزش مجموع سکه‌ها از میزان مورد نظر کمتر بود این سکه به مجموعه سکه‌ها اضافه شده و میزان مجموع سکه‌ها با مقدار مورد نظر مقایسه می‌شود. این عمل "بررسی راه حل" نامیده می‌شود. روال انتخاب پی در پی تکرار می‌شود تا مجموع سکه‌ها با میزان پول مورد نظر برای پس‌دادن به مشتری برابر شود. این فرآیند را یک فرآیند "حریصانه" می‌نامند زیرا روال انتخاب صرفاً شامل در نظر گرفتن و انتخاب حریصانه‌ی بزرگترین سکه بعدی است [۷].

از میان روش‌هایی که برای اجرای فرآیندهای فوق در یک الگوریتم حریصانه ارائه شده است، یکی از مهمترین و بهترین روش‌ها، روش دیکسترا[۱۴] است که بر روی یک گراف وزن‌دار و جهت‌دار اجرا می‌شود.

۵-۲- روش دیکسترا برای حل الگورتیم حریصانه

روش دیکسترا برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر در یک گراف از یک رأس به سایر رئوس ارائه شده است. این روش با بهره‌مندی از منطق ریاضی تضمین می‌کند که جستجوی کوتاه‌ترین مسیر بر روی گراف، منجر به ارائه جواب بهینه شود[۸].

در روش دیکسترا ابتدا مجموعه [V] که مشتمل بر تمامی رئوس گراف است، انتخاب می‌شود سپس دو مجموعه تهی، یکی به صورت زیرمجموعه‌ای تهی از یال‌ها، به نام [F] و دیگری زیرمجموعه‌ای تهی از رئوس، به نام [Y]، تعریف می‌شوند. برای مقداردهی اولیه به مجموعه [Y] رأسی به صورت دلخواه انتخاب می‌شود. سپس کوتاهترین مسیرهای بین آن رأس و سایر رئوس مشخص می‌شوند. برای مثال بر روی گراف نشان داده شده در شکل ۵- الف، با فرض این که V_1 رأس دلخواه باشد، ابتدا رأس V_1 در مجموعه [Y] قرارمی‌گیرد. سپس یک رأس عضو [V] که از همه بهV_1 نزدیک‌تر باشد (یعنی رأس V_5)، انتخاب می‌شود (شکل ۵- ب). واضح است که یال بین V_1 و V_5 کوتاهترین مسیر میان V_1 و مجموعه [V] خواهد بود. در ادامه آن رأس به مجموعه [Y] و یال (V_1-V_5) به مجموعه [F] اضافه می‌شود. سپس مسیرهایی از V_1 به رئوس موجود در مجموعه [V] منهای [Y] مورد بررسی قرار می‌گیرند. یکی از این مسیرها کوتاه‌ترین مسیر است. رأسی که در انتهای چنین مسیری باشد به مجموعه[Y] و یالی (بر روی مسیر) که آن رأس را در برگیرد، به مجموعه [F] افزوده می‌شود. چنانچه در شکل ۵- پ دیده می‌شود V_1-V_5-V_4 کوتاهترین مسیر است و لذا رأس انتهایی آن یعنی V_4 به مجموعه [Y] اضافه می‌شود. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که [Y] با [V] یعنی مجموعه همه رئوس برابر شود. در این حالت مجموعه[F] شامل یال‌های موجود در کوتاه‌ترین مسیر است[۷]. در این مثال مسیر V_2-V_1-V_5-V_4 کوتاهترین مسیر بین رئوس V_1 و V_2 است و ارزش آن برابر مجموع ارزش یال‌های موجود در مسیر، یعنی ۵ می‌باشد (شکل ۵- ث).

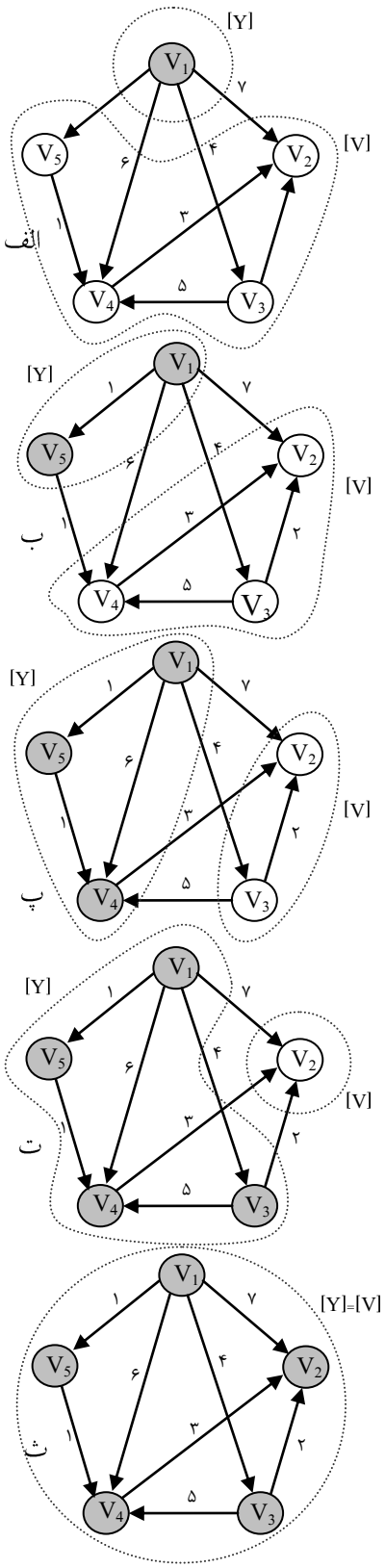
در این مقاله از روش دیکسترا برای یافتن طولانی‌ترین مسیر استفاده شده است. از آنجا که در هیچ یک از مسیرهای محتمل بر روی گراف شبیه‌سازی شده، چرخه وجود ندارد می‌توان با انجام اصلاحاتی از این روش برای یافتن طولانی‌ترین مسیر در یک گراف استفاده نمود.

۶- مثال عددی

چنانچه در بخش مدل‌سازی کانسار شرح داده شد، برای بهینه‌سازی محدوده کارگاه استخراج زیرزمینی توسط الگوریتم حریصانه، ابتدا مدل بلوکی به یک گراف وزن‌دار تبدیل می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۵: مثالی از کاربرد روش دیکسترا در یافتن کوتاهترین مسیر بین رئوس یک گراف

برای تشکیل گراف از روی مدل بلوکی، از سمت چپ به راست، از هر رأس یک یال به رأس بالاتر در ستون روبه‌رو، یک یال به رأس روبه‌رو، یک یال به رأس پائین‌تر در ستون روبه‌رو و یک یال نیز به رأس بالای سطر صفر در ستون روبه‌رو رسم می‌شود. همچنین با توجه به شرایط واقعی استخراج در معادن زیرزمینی، از هر رأس موجود در سطر بالایی سطر صفر (سطر دوم از پائین شکل۶) به تمامی رئوس موجود در ستون بعدی یال رسم می‌شود. برای پرهیز از شلوغی گراف موجود، این یال‌ها در ستون‌های اول، دوم، سوم، چهارم، هشتم و نهم نشان داده نشده‌اند.

چنانچه در بخش ۴-۲ توضیح داده شد، برای تعیین وزن یا ارزش هر یال که بر روی آن درج می‌شود ارزش اقتصادی تجمعی بلوک‌های زیر آن یال به عنوان وزن به آن یال اختصاص می‌یابد (شکل ۶).

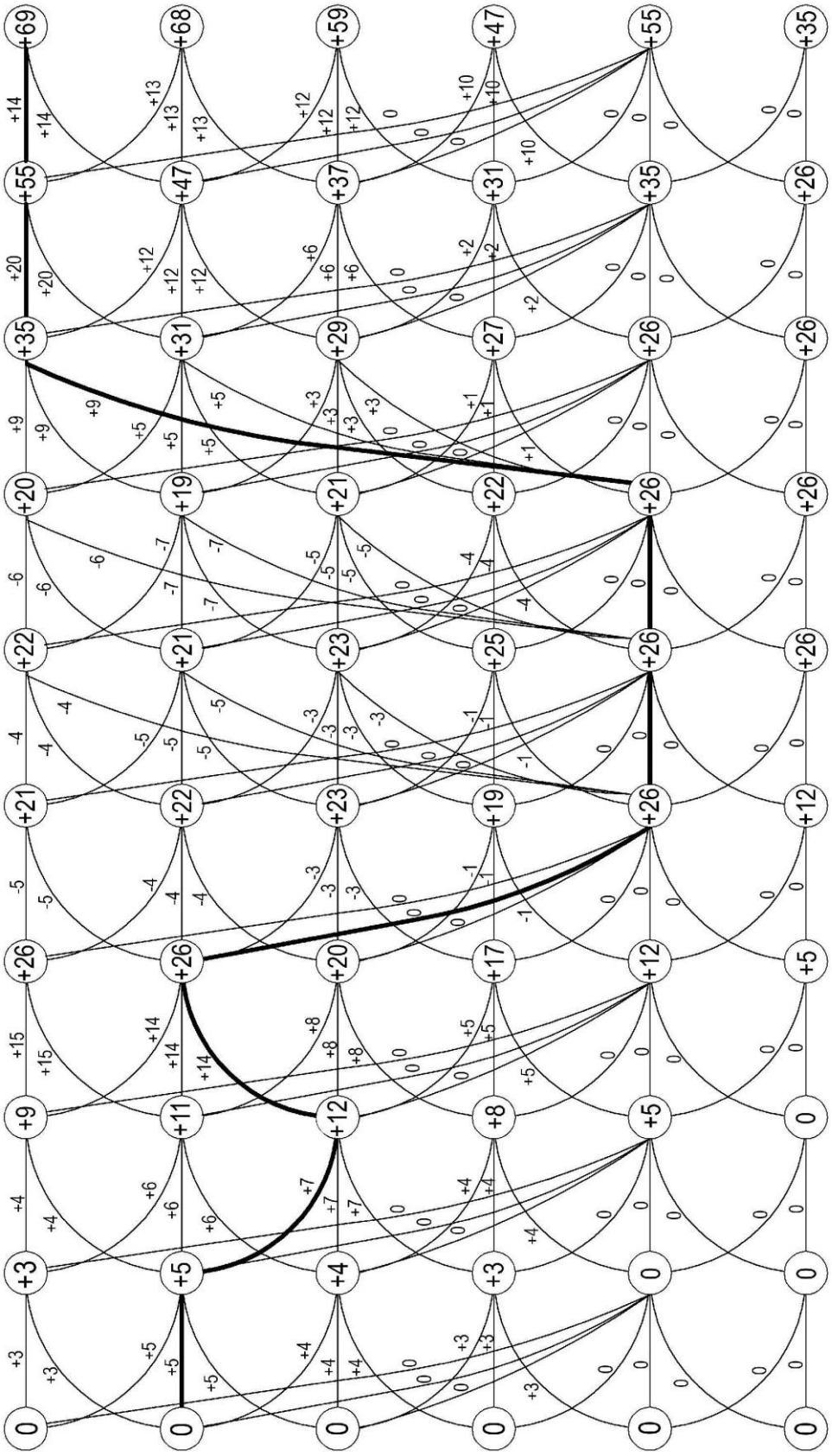
پس از تشکیل گراف و ارزش‌گذاری یال‌های موجود در آن می‌توان ارزش هر رأس که نشان‌دهنده ارزش اقتصادی کارگاه متناظر با مسیر منتهی به رأس مورد نظر است را محاسبه نمود. ارزش اقتصادی هر رأس با توجه به یال‌های ورودی به آن رأس محاسبه می‌شود. برای این منظور ارزش رئوس قبلی هر رأس با ارزش یال‌های وارد شده به رأس مذکور جمع می‌شوند و بیشترین مقدار از بین مقادیر مذکور به عنوان ارزش آن رأس انتخاب می‌شود.

با انجام کلیه مراحل فوق، در این بخش می‌توان مدل بلوکی ارائه شده در شکل ۲-ب را به صورت گراف وزن‌دار شکل ۶ شبیه‌سازی نموده و با استفاده از روش دیکسترا حل کرد.

به منظور یافتن محدوده استخراجی بهینه در شبکه گراف وزن‌دار معرفی شده در شکل ۶، ابتدا در سمت راست مدل رأس با بزرگترین ارزش موجود انتخاب می‌شود (رأس با ارزش ۶۹). سپس با طی یک مسیر برگشتی با تعقیب یال‌های منتهی به رأس انتخاب شده و مشخص نمودن آنها می‌توان به محدوده بهینه استخراج زیرزمینی دست یافت (این یال‌ها به صورت ضخیم نشان داده شده‌اند). برای اینکه بتوان محدوده نهایی را مجدداً در مدل بلوکی نشان داد کلیه بلوک‌های زیر یال‌های ضخیم به عنوان بلوک‌های ماده معدنی موجود در محدوده استخراجی بهینه انتخاب می‌شوند. در شکل ۷ جانمایی کارگاه‌های استخراج بهینه بر روی مدل بلوکی اقتصادی، نشان داده شده است. شایان ذکر است مقدار عددی با ارزش‌ترین رأس انتخاب شده در مرحله قبل (رأس ۶۹) نشان دهنده

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۶: گراف شبیه‌سازی شده از محدوده معدنی و حل آن با روش دیکسترا

www.SID.ir

Archive of SID

۱	۸	۴	۱	۱	-۱	۱	-۲	-۲
۱	۶	۲	-۲	-۲	-۱	۶	-۱	۱
۲	۴	۲	-۱	-۲	-۲	۳	۳	۱
۱۰	۲	۱	-۴	-۱	-۱	۵	۴	۳

شکل ۷: جانمایی کارگاه‌های استخراج بهینه بر روی مدل بلوکی

بیشینه ارزش اقتصادی محدوده استخراج زیرزمینی است که در مثال عددی حل شده این مقدار برابر ۶۹ واحد بدست آمده است. با محاسبه ارزش بلوک‌های خاکستری موجود در شکل ۷ نیز دقیقاً به این مقدار می‌رسیم.

۷- اعتبارسنجی روش پیشنهادی

به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش الگوریتم حریصانه، در این بخش خروجی این الگوریتم با نتیجه حاصل از اجرای الگوریتم Olips که مبتنی بر روش برنامه‌ریزی پویا[15] می‌باشد مقایسه شده است. برای این منظور از نرم‌افزار ارائه شده توسط جلالی و همکاران استفاده شده است[۹]. این نرم‌افزار که SBO[16] (بهینه‌ساز محدوده کارگاه استخراج) نامیده شده با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی پویا محدوده بهینه اقتصادی استخراج در معادن زیرزمینی را مشخص نموده و به صورت یک فایل داده ارائه می‌نماید. با توجه به منطقی ریاضی قوی و اثبات شده برنامه‌ریزی پویا، نرم‌افزار SBO جواب قطعی و محدوده بهینه واقعی را مشخص می‌کند[۹].

مشخصات کانسار بر مبنای مدل بلوکی اقتصادی اولیه و با استفاده از یک فایل داده وارد نرم‌افزار می‌شود. در فایل اطلاعاتی مذکور، مشخصات هر بلوک مشتمل بر مختصات بلوک و ارزش اقتصادی بلوک به نرم‌افزار معرفی می‌شود. شکل ۸ فایل ورودی مربوط به مثال عددی حل شده در این مقاله را نشان می‌دهد. اطلاعات این فایل از شکل ۲-الف استخراج شده است.

پس از ورود اطلاعات مربوط به مدل بلوکی کانسار و مشخصات هندسی کانسار، مراحل مختلف الگریتم برنامه‌ریزی پویا توسط نرم‌افزار انجام می‌شود و نتایج به دو صورت ارائه می‌گردد. دو حالت خروجی نرم‌افزار عبارتند از:

الف) لیست بلوک‌های قابل استخراج به همراه ارزش هر بلوک و ارزش نهایی محدوده استخراج

ب) مدل بلوکی کانسار با نشان دادن محدوده استخراج بهینه.

در شکل ۹ لیست بلوک‌های ماده معدنی قابل استخراج به همراه ارزش هر بلوک و ارزش نهایی محدوده استخراج و در شکل ۱۰ مدل بلوکی کانسار با نشان دادن محدوده استخراج بهینه حاصل از نرم‌افزار SBO نشان داده شده‌اند.

```
X     Y     Value
1     1       3
2     1       4
3     1       5
4     1      -1
5     1      -1
6     1      -4
7     1       1
8     1       2
9     1      10
1     2       1
2     2       3
3     2       3
4     2      -2
5     2      -2
6     2      -1
7     2       2
8     2       4
9     2       2
1     3       1
2     3      -1
3     3       6
4     3      -1
5     3      -2
6     3      -2
7     3       2
8     3       6
9     3       1
1     4      -2
2     4      -2
3     4       1
4     4      -1
5     4       1
6     4       1
7     4       4
8     4       8
9     4       1
```

شکل ۸: فایل اطلاعاتی وارد شده به نرم‌افزار- مربوط به مثال عددی تشریح شده ۲-الف

در خروجی نرم‌افزار (شکل ۱۰)، بلوک‌هایی که در محدوده بهینه استخراج قرار می‌گیرند، با عدد یک و بلوک‌هایی که در محدوده بهینه قرار نمی‌گیرند، با عدد صفر نشان داده شده‌اند. چنانکه از شکل ۱۰ برمی‌آید، نتایج حاصل از الگوریتم برنامه‌ریزی پویا و نرم‌افزار SBO دقیقاً با نتایج حاصل از الگوریتم حریصانه تطابق دارد.

به نظر می‌رسد یکی از مزایای الگوریتم‌های جستجوگر نظیر الگوریتم حریصانه نسبت به الگوریتم‌های دارای منطق مانند الگوریتم برنامه‌ریزی پویا، کمتربودن زمان محاسبات و سرعت دستیابی به جواب صحیح است. این موضوع می‌تواند مقبولیت روش حریصانه و انگیزه‌های توسعه استفاده از آن را افزایش دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

X	Y	Value
1	1	3
2	1	4
3	1	5
7	1	1
8	1	2
9	1	10
1	2	1
2	2	3
3	2	3
7	2	2
8	2	4
9	2	2
1	3	1
3	3	6
7	3	2
8	3	6
9	3	1
7	4	4
8	4	8
9	4	1
	sum	69

شکل ۹: لیست بلوک‌های ماده معدنی قابل استخراج با توجه به خروجی نرم‌افزار SBO

4	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	1	0	1	0	0	0	1	1	1
2	1	1	1	0	0	0	1	1	1
1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

شکل ۱۰: جانمایی کارگاه‌های استخراج بهینه بر روی مدل بلوکی با توجه به خروجی نرم‌افزار SBO

۸- نتیجه گیری

الگوریتمی که در این مقاله ارائه شده از یک منطق جستجوگر بر پایه الگوریتم حریصانه بهره می‌برد. این الگوریتم بر روی مدل گرافی متناظر با مدل بلوکی اقتصادی اجرا و با کاربرد روش دیکسترا محدوده بهینه استخراج زیرزمینی را جستجو می‌نماید.

جستجوی طولانی‌ترین مسیر بر روی گراف که متناظر با محدوده بهینه استخراج است به صورت یک فرآیند برگشتی با برخورداری از منطق روش دیکسترا انجام می‌شود.

اعتبار الگوریتم ارائه شده، از طریق مقایسه نتایج عددی حاصل از آن با نتایج حاصل از اجرای الگوریتم Olips بررسی شده است. از آنجایی که الگوریتم Olips از منطق ریاضی منطبق بر روش برنامه‌ریزی پویا بهره می‌برد، می‌تواند محدوده بهینه واقعی را ارائه نماید. مقایسه نتایج حاصله نشان می‌دهد که محدوده بهینه معرفی شده توسط هر دو الگوریتم دقیقاً بر هم منطبق است. به منظور حصول اطمینان از تطابق نتایج حاصل از دو الگوریتم مذکور، این الگوریتم‌ها بر روی تعداد بیشتری از مدل‌های اقتصادی مفروض اجرا شده که در همه موارد نتایج یکسانی به دست آمده است.

الگوریتم ارائه شده یک الگوریتم دو بعدی است اما این موضوع محدودیتی برای استفاده عملی از این روش ایجاد نمی‌کند زیرا کانسارهای زیرزمینی عمدتاً رگه‌ای یا لایه‌ای هستند و حتی در بسیاری از موارد در کانسارهای توده‌ای نیز ابتدا کانسار به برش‌های قائم، افقی و یا مایل تقسیم می‌شود، لذا عموماً یکی از ابعاد استخراجی کانسار خیلی کمتر از دو بعد دیگر است، بطوری که می‌توان محدوده استخراجی را دو بعدی در نظر گرفت. در این شرایط مدل‌سازی دو بعدی کارآیی مناسبی داشته و نتایج بهینه قابل قبولی را ارائه می‌کند.

با توجه به این که روش‌های استخراج زیزمینی بسیار متعدد هستند و امکان در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و هندسی همه روش‌های استخراج در یک الگوریتم وجود ندارد. لذا الگوریتم اخیر به دلیل کاربرد بیشتر روش‌های استخراج قائم با اعمال شرایط فنی و هندسی این گونه روش‌ها تدوین و پیاده‌سازی شده است.

در مدل‌های بزرگتر می‌توان با تدوین یک برنامه کامپیوتری یا نرم‌افزار، جستجوی محدوده بهینه بر مبنای الگوریتم جدید را با سرعت و دقت بالا اجرا نمود.

منابع

[1] Jalali, S.E., Ataee-pour. M., Shahriar, K.; 2007; "*Rigorous Algorithms to Optimise stope boundaries; Capabilities, Restrictions and Applications*"; Modern management of mine producing, Geology and environmental protection (SGEM 2007), Albena, Bulgaria.

[2] 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.

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

[4] Alford, C.; 1995; *"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.

www.SID.ir

Archive of SID

[5] Ataee-pour, M.; 2000; *"A Heuristic Algorithm to Optimise Stope Boundaries"*; Ph.D. Thesis, University of Wollongong, pp. 2_24 ت3_36.

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

[7] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rievest, R. L., Stein, C.; 2001; *"Introduction to Algorithms"*; 2nd Edition, Mc Grow-Hill.

[8] Neapolitan, R. E., Naimipour, K.; 2004; "*Foundation of Algorithms Using C++ Pseudo code*"*;* 3rd Edition, Jones and Bartleth Publisher.

[9] Jalali. S. E., Ataee-pour. M., Shahriyar. K.; 2007; "*A Computer Program to Optimize Stope Boundaries Using Probable Stope Algorithm*"; Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME), Vol. 2, No. 3, pp. 7-14.

پی‌نوشت‌ها

[1] Greedy Algorithm
[2] Riddle Dynamic Programming Algorithm
[3] Branch & Bound Algorithm
[4] Floating Stope
[5] Maximum Value Neighborhood
[6] Optimized Layout by Integrated Probable Stope
[7] Lerchs & Grossmann
[8] Block caving
[9] Ovanic & Young
[10] Alford
[11] Octree Division Algorithm
[12] Geostatistical Approach
[13] Heuristic
[14] Dijikstra
[15] Dynamic Programming
[16] Stope Boundaries Optimizer

www.SID.ir