





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

برنامه ریزی تولید بلندمدت معدن روباز با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی

گردآورنده: سید علیرضا قاسمی

استاد راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا کاکایی

استاد مشاور:

دکتر رامین رفیعی

خرداد ۱۴۰۰

شماره

تاریخ

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای با شماره دانشجویی

..... رشته گرایش تحت عنوان

..... که در تاریخ با حضور

هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد

☐ الف) درجه عالی نمره ۲۰-۱۹	☐ ب) درجه خیلی خوب نمره ۱۸/۹۹-۱۸
☐ ج) درجه خوب نمره ۱۷/۹۹-۱۶	☐ د) درجه متوسط نمره ۱۵/۹۹-۱۴
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☐ نظری	☐ عملی
نوع تحقیق	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادارهنمای اول			
۲- استادارهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی			
۵- استاد ممتحن اول			
۶- استاد ممتحن دوم			

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده

تقدیم بہ

برادر عزیزم "سید مجتبیٰ قاسمی"

تقدیر و شکر

منت خدای را عرو جل که طاعتش موجب قوت و به شکر اندرش مزید نعمت ...

و چه کسی زیاتر از لسان انیسب شاکر باری تعالی است: شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم

همه می پرسند:

چیت در زمزمه ی مبهم آب؛ چیت در همهمه ی دلکش برگ؛ چیت در بازی آن ابر سپید روی این آبی آرام بلند که تو را می برد ایگونه به ژرفای خیال؛ چیت در خلوت خاموش کبوترها؛ چیت در کوشش بی حاصل موج؛ چیت در خنده ی جام که تو چندین ساعت مات و مبہوت به آن می نگری؛ نه به ابر؛ نه به آب؛ نه به برگ؛ نه به این آبی آرام بلند؛ نه به این خلوت خاموش کبوترها؛ نه به این آتش سوزنده که لغزیده به جام؛ من به این جمله نمی اندیشم؛ من مناجات در حقان را هنگام سحر؛ رقص عطر گل بیخ را با باد؛ نفس پاک شقایق را در سینه کوه؛ صحبت چلچله را با صبح؛ نبض پائیده ی حتی را در گندم زار؛ گردش رنگ و طراوت را در کونزی گل؛ همه را می شنوم می بینم؛ من به این جمله نمی اندیشم به تو می اندیشم ای سراپا همه خوبی تک و تنها به تو می اندیشم ...

با زبانی قاصر اما از صمیم قلب از پدر و مادر عزیزم که عمری را با معرفت و صبوری، صرف تربیت این جانب نموده اند سپاس گزاری می کنم.

اگر نبود حمایت ها و راهنمایی های اساتید راهنما، جناب دکتر محمد عطایی و جناب دکتر رضا کاکی تدوین این اثر امکان پذیر نبود، بدین سان از زحمات این دو بزرگوار نهایت سپاس و قدردانی خویش را ابراز می دارم، همچنین بر خود لازم می دانم از جناب دکتر رامین رفیعی (استاد مشاور) و جناب دکتر مسعود فیض بخش را نکوه (عضو دانشگاه آاتو فلاند) جهت راهنمایی این تحقیر تدوین این پایان نامه شکر به عمل آورم، حمایت های این بزرگواران و جناب مهندس مجاد رستمیان سبب شد این اثر تکمیل شود.

تعهد نامه

اینجانب سید علیرضا قاسمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته استخراج معدن دانشکده مهندسی

معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه

"برنامه ریزی تولید معدن روباز با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی"

تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رضا کاکایی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

امضای دانشجو سید علیرضا قاسمی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

کلیه نیازهای بشری از کره‌ی زمین تامین می‌شوند و صنایع معدن‌کاری و کشاورزی دو منبع اصلی تامین این نیازها هستند. کانسارهای معدنی عموماً یا به روش زیرزمینی و یا به روش سطحی از زمین با هدف استخراج ماده معدنی و دستیابی به سود استخراج می‌شوند. از طرفی معدن‌کاری روباز یکی از مهم‌ترین روش‌های معدن‌کاری سطحی است. برای تولید ماده‌ی معدنی به این روش نیازمند برنامه‌ریزی هستیم. مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز تعیین سکانس استخراجی تعریف می‌شود که در آن بلوک‌ها با در نظر گرفتن انواع محدودیت‌های فیزیکی و اقتصادی باید از معدن استخراج شوند تا اینکه سود تنزیل یافته کل معدن بیشینه شود.

یکی از چالش‌های اصلی در مسئله برنامه‌ریزی تولید، روش حل این مسئله است. با توجه به اینکه این مسئله جزو مسائل بزرگ مقیاس محسوب می‌شود، در نتیجه حل این مسئله با استفاده از روش‌های ریاضی بسیار پیچیده، زمان‌بر و در نتیجه هزینه محاسباتی بالایی دارد. از این‌رو روش‌های فرا ابتکاری جایگزین مناسبی نسبت به روش‌های ریاضی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن است. در این تحقیق سعی شده است در دو مثال مختلف (دو مثال از یک مدل بلوکی فرضی و یک مدل بلوکی واقعی) که محدوده بهینه نهایی بر روی آن‌ها به روش برنامه‌ریزی پویا بدست آمده است، فازهای استخراجی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی تعیین و ارزش خالص فعلی محاسبه شود. مدل بلوکی واقعی مربوط به معدن مس سونگون است. ارزش خالص فعلی (برای مدل بلوکی فرضی) برای حالت‌های متفاوت (با تغییر فاکتور مقیاس جهش) محاسبه شده است. در ادامه برای سنجش کارایی الگوریتم مورد نظر بر روی مدل بلوکی فرضی از روش ریاضی برنامه‌ریزی پویا استفاده شده است. ارزش خالص فعلی محاسبه شده برای سه مقطع دو بعدی از یک مدل بلوکی سه بعدی واقعی به ترتیب حدوداً برابر ۲/۳۶، ۵/۹۳ و ۲۷/۴۴ میلیون دلار است.

کلمات کلیدی معدن روباز، برنامه‌ریزی تولید، بهینه‌سازی، الگوریتم تکامل تفاضلی، برنامه‌ریزی پویا

فهرست مطالب

چکیده.....	۵
فهرست مطالب	۶
فهرست اشکال	۶
فهرست جداول.....	۶
(۱) فصل نخست: مقدمه و کلیات.....	
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تعریف مسئله.....	۲
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۳
۱-۳-۱- اهمیت برنامه‌ریزی برای تولید در معدن روباز.....	۳
۲-۳-۱- ضرورت طراحی برنامه‌ریزی بلندمدت.....	۴
۳-۳-۱- ضرورت استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در برنامه‌ریزی تولید معدن.....	۴
۴-۳-۱- ضرورت استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی.....	۶
۴-۱- اهداف و روش تحقیق.....	۶
۵-۱- ساماندهی پایان‌نامه.....	۷
(۲) فصل دوم: مبانی، مفاهیم و سابقه‌ی تحقیق.....	
۱-۲- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- تعیین محدوده نهایی معادن روباز.....	۱۰
۳-۲- برنامه‌ریزی تولید در معدن.....	۱۲
۴-۲- روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی تولید.....	۲۱
۱-۴-۲- برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط.....	۲۱
۱-۴-۲-۱- برنامه‌ریزی خطی فازی.....	۲۲
۲-۴-۲-۱- برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی.....	۲۳
۲-۴-۲- برنامه‌ریزی پویا.....	۲۴
۳-۴-۲- روش‌های فرا ابتکاری.....	۲۵
۱-۳-۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.....	۲۶
۲-۳-۴-۲- الگوریتم تکامل تفاضلی.....	۲۷
۳-۳-۴-۲- الگوریتم خفاش.....	۲۸

۲۹	۴-۳-۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان
۳۱	۵-۳-۴-۲- الگوریتم رقابت استعماری
۳۴	۶-۳-۴-۲- الگوریتم ژنتیک
۳۵	۵-۲- کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی در مسائل دیگر
۳۵	۱-۵-۲- کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی در پرتاب سنگ
۳۶	۲-۵-۲- کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی در تهویه
۳۶	۶-۲- جمع‌بندی
۳۷	۳ فصل سوم: الگوریتم تکامل تفاضلی
۳۸	۱-۳- مقدمه
۳۸	۲-۳- مسئله بهینه‌سازی
۴۰	۳-۳- انواع الگوریتم‌های جستجو
۴۱	۱-۳-۳- جستجوی تحلیلی
۴۱	۲-۳-۳- جستجوی نا آگاهانه
۴۲	۳-۳-۳- جستجوی آگاهانه
۴۳	۴-۳- الگوریتم‌های فرا ابتکاری
۴۴	۵-۳- طبقه‌بندی الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای
۴۵	۶-۳- الگوریتم‌های تکاملی
۴۸	۷-۳- مراحل یک الگوریتم تکاملی
۵۰	۸-۳- الگوریتم تکامل تفاضلی
۵۰	۱-۸-۳- ایجاد جمعیت اولیه
۵۱	۲-۸-۳- عملگر جهش
۵۱	۳-۸-۳- عملگر تقاطع
۵۳	۴-۸-۳- عملیات انتخاب
۵۵	۹-۳- پارامترهای کنترل در تکامل تفاضلی
۵۵	۱۰-۳- الگوریتم تکامل تفاضلی خود تطبیقی
۵۷	۱۱-۳- سنجش کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی
۶۰	۱۲-۳- جمع‌بندی
۶۱	۴ فصل چهارم: برنامه‌ریزی تولید معدن روباز
۶۲	۱-۴- مقدمه

۶۲	۲-۴- تعیین سکانس استخراجی با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا
۸۱	۳-۴- مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی تولید
۸۲	۴-۴- ایجاد جمعیت اولیه
۸۳	۴-۴-۱- مرحله نخست: تعیین بلوک کاندیدا
۸۳	۴-۴-۲- مرحله دوم: مقدار دهی بعدها
۸۴	۴-۵- عمل‌گر جهش
۸۵	۴-۶- عمل‌گر تقاطع
۸۵	۴-۷- مرحله انتخاب
۸۸	۴-۸- فاکتورهای کنترل در الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مسئله
۸۹	۴-۹- اعمال همزمان محدودیت‌ها
۸۹	۴-۱۰- جزئیات مثال نخست
۹۳	۴-۱۱- جزئیات مثال دوم
۱۰۰	۴-۱۲- مطالعه موردی
۱۰۶	۴-۱۳- جمع‌بندی
۱۰۹	۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۱۰	۵-۱- نتیجه‌گیری
۱۱۲	۵-۲- پیشنهادها
۱۱۳	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: مثال ساده از برنامه‌ریزی و زمان‌بندی..... ۱۵
- شکل ۲-۲: ترتیب معدن‌کاری طرح ۱..... ۱۶
- شکل ۳-۲: ترتیب معدن‌کاری طرح ۲..... ۱۷
- شکل ۴-۲: ترتیب معدن‌کاری طرح ۳..... ۱۸
- شکل ۵-۲: ترتیب معدن‌کاری طرح ۴..... ۱۹
- شکل ۶-۲: ترتیب معدن‌کاری طرح ۵..... ۲۰
- شکل ۱-۳: مراحل الگوریتم‌های تکاملی..... ۵۰
- شکل ۲-۳: یک مثال دو بعدی تابع هزینه و نمایش حد فاصل خطوط آن و فرایند برای تولید..... ۵۲
- شکل ۳-۳: ۵۲
- شکل ۴-۳: فرایند کراس‌اور با $D=7$ پارامتر..... ۵۲
- شکل ۱-۴: تعیین محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی (مثال نخست)..... ۶۳
- شکل ۲-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۸..... ۶۳
- شکل ۳-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۷..... ۶۴
- شکل ۴-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۶..... ۶۶
- شکل ۵-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۸..... ۶۹
- شکل ۶-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۲..... ۷۲
- شکل ۷-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۳..... ۷۵
- شکل ۸-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۲..... ۷۷
- شکل ۹-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۱..... ۷۹
- شکل ۱۰-۴: تعیین فاز نهایی، با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا..... ۸۱
- شکل ۱۱-۴: تعیین فاز نهایی، با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا با سه فاز استخراجی..... ۸۱
- شکل ۱۲-۴: مخروط استخراجی رو به پائین (شکل الف) - مخروط استخراجی رو به بالا (شکل ب) (میرزائی و کاکائی، ۱۳۸۴)..... ۸۲
- شکل ۱۳-۴: روندنمای اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی در حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز..... ۸۴
- شکل ۱۴-۴: تعداد بلوک‌های موجود در مخروط استخراجی رو به پائین برای هر عضو (شکل سمت راست). تعیین بلوک کاندیدا و بلوک غیر کاندیدا (شکل سمت چپ)..... ۸۴
- شکل ۱۵-۴: نمایش سه بردار هدف، جهش و سنجش برای مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز..... ۸۶

- شکل ۴-۱۶: فاز آخر استخراجی در مثال نخست با اعمال تنها محدودیت ظرفیت استخراج..... ۹۰
- شکل ۴-۱۷: فاز آخر استخراجی در مثال نخست با اعمال محدودیت شیب..... ۹۰
- شکل ۴-۱۸: فاز آخر استخراجی در مثال نخست با اعمال همزمان همه‌ی محدودیت‌ها..... ۹۰
- شکل ۴-۱۹: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای نخستین حالت با اعمال تنها محدودیت ظرفیت استخراج..... ۹۱
- شکل ۴-۲۰: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای نخستین حالت با اعمال محدودیت شیب..... ۹۱
- شکل ۴-۲۱: فاز دوم استخراجی تعیین شده با اعمال همزمان همه‌ی محدودیت‌ها..... ۹۱
- شکل ۴-۲۲: تعیین فاز های استخراجی در مثال نخست برای نخستین حالت..... ۹۱
- شکل ۴-۲۳: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای سومین حالت با اعمال تنها محدودیت ظرفیت استخراج..... ۹۲
- شکل ۴-۲۴: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای سومین حالت با اعمال محدودیت شیب..... ۹۲
- شکل ۴-۲۵: فاز دوم استخراجی با اعمال همزمان همه‌ی محدودیت‌ها در مثال نخست برای دومین حالت..... ۹۲
- شکل ۴-۲۶: تعیین سکانس استخراجی در مثال نخست برای دومین حالت..... ۹۳
- شکل ۴-۲۷: نمودار همگرایی مربوط به اجرای الگوریتم برای مثال نخست در ۱۰ حالت متفاوت..... ۹۷
- شکل ۴-۲۸: نمودار همگرایی مربوط به اجرای الگوریتم برای مثال دوم در ۱۰ حالت متفاوت..... ۹۸
- شکل ۴-۲۹: تعیین فاز استخراجی برای مقطع نخست در مثال مربوط به مطالعه موردی..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۰: تعیین فاز استخراجی برای مقطع دوم در مثال مربوط به مطالعه موردی..... ۱۰۶
- شکل ۴-۳۱: تعیین فاز استخراجی برای مقطع سوم در مثال مربوط به مطالعه موردی..... ۱۰۶

فهرست جداول

جدول ۳-۱: مقایسه الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات.....	۵۹
جدول ۴-۱: بررسی استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۷.....	۶۴
جدول ۴-۲: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۷.....	۶۵
جدول ۴-۳: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.....	۶۷
جدول ۴-۴: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.....	۶۷
جدول ۴-۵: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.....	۶۷
جدول ۴-۶: بررسی مجموعه چهارم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.....	۶۸
جدول ۴-۷: بررسی مجموعه پنجم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.....	۶۸
جدول ۴-۸: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۶.....	۶۸
جدول ۴-۹: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۵.....	۷۰
جدول ۴-۱۰: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۵.....	۷۰
جدول ۴-۱۱: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۵.....	۷۱
جدول ۴-۱۲: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۵.....	۷۱
جدول ۴-۱۳: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۴.....	۷۳
جدول ۴-۱۴: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۴.....	۷۳
جدول ۴-۱۵: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۴.....	۷۴
جدول ۴-۱۶: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۴.....	۷۴
جدول ۴-۱۷: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۳.....	۷۵
جدول ۴-۱۸: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۳.....	۷۶
جدول ۴-۱۹: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۳.....	۷۶
جدول ۴-۲۰: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۲.....	۷۸
جدول ۴-۲۱: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۲.....	۷۸
جدول ۴-۲۲: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۲.....	۷۸
جدول ۴-۲۳: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۲.....	۷۹
جدول ۴-۲۴: محاسبه ارزش خالص فعلی نهایی.....	۸۰
جدول ۴-۲۵: مرحله انتخاب (انتخاب فاز آخر استخراجی) اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی روی مدل بلوکی فرضی.....	۸۷

جدول ۴-۲۶: محاسبه ارزش خالص فعلی پس از تعیین سکناس استخراجی در مثال نخست (فاکتور مقیاس ۰/۲).....	۹۴
جدول ۴-۲۷: محاسبه ارزش خالص فعلی پس از تعیین سکناس استخراجی در مثال نخست برای ۱۰ حالت مختلف.....	۹۵
جدول ۴-۲۸: محاسبه ارزش خالص فعلی پس از تعیین سکناس استخراجی در مثال دوم برای ۱۰ حالت مختلف.....	۹۶
جدول ۴-۲۹: مقایسه‌ی ارزش خالص فعلی (با نرخ بهره ۱۵ درصد) به دست آمده در مثال نخست با روش برنامه‌ریزی پویا.....	۹۹
جدول ۴-۳۰: مقایسه‌ی ارزش خالص فعلی (با نرخ بهره ۱۵ درصد) به دست آمده در مثال دوم با روش برنامه‌ریزی پویا.....	۹۹
جدول ۴-۳۱: ادامه جدول ۲۷.....	۱۰۰
جدول ۴-۳۲: اطلاعات اقتصادی و زمین‌شناسی مربوط به مطالعه موردی.....	۱۰۰
جدول ۴-۳۳: تعداد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی و سپری شدن زمان هر اجرا برای مقطع نخست.....	۱۰۱
جدول ۴-۳۴: ادامه جدول ۳۳.....	۱۰۲
جدول ۴-۳۵: تعداد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی و سپری شدن زمان هر اجرا برای مقطع دوم.....	۱۰۲
جدول ۴-۳۶: تعداد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی و سپری شدن زمان هر اجرا برای مقطع سوم.....	۱۰۳
جدول ۴-۳۷: خلاصه وضعیت مربوط به مقطع نخست.....	۱۰۴
جدول ۴-۳۸: خلاصه وضعیت مربوط به مقطع دوم.....	۱۰۴
جدول ۴-۳۹: ادامه جدول ۳۸.....	۱۰۴
جدول ۴-۴۰: خلاصه وضعیت مربوط به مقطع سوم.....	۱۰۵

فصل نخست

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در معادن روباز تعیین کاواک بهینه^۱ است. کاواک‌ها بسیاری اوقات در طول عمر معدن در واکنش به تغییرات پارامترهای طراحی با بدست آمدن اطلاعات بیشتر و تغییرات در مقادیر پارامترهای فنی و اقتصادی، ممکن است باز طراحی شود. طی ۳۵ سال گذشته تعیین کاواک‌های بهینه یکی از کاری‌ترین حوزه‌های تحقیق در عملیاتی در صنعت معدن بوده و الگوریتم‌های زیادی ارائه شده است. رایج‌ترین معیار بهینه‌سازی در این الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های استخراج (دسترسی) در کاواک طراحی شده بیشینه‌سازی سود کلی است (Khalokakaie et al., 2000a). تولید در معدن کاری مانند هر صنعت دیگر نیاز به برنامه‌ریزی دارد، از ملزومات برنامه‌ریزی برای تولید در معدن طرح کاواک تعیین شده است. بدون این برنامه‌ریزی عملاً امکان استخراج مواد معدنی وجود ندارد. به دلیل استخراج مواد معدنی در سال‌های متفاوت سود مورد نظر بصورت تنزیل یافته^۲ خواهد بود.

در این فصل سعی شده است بصورت مختصر محدوده نهایی و مسئله برنامه‌ریزی تولید تعریف شوند، مهم‌ترین ضرورت‌های این مسئله مورد بررسی قرار گیرد. همچنین اهداف، مراحل و سازماندهی این تحقیق در این فصل گنجانده شده است.

۱-۲- تعریف مسئله

یک مسئله اساسی در برنامه‌ریزی معدن، تعیین محدوده بهینه نهایی^۳ یک معدن است. محدوده بهینه نهایی یک معدن به گونه‌ای تعریف می‌شود که نتیجه‌ی استخراج حجمی از مواد است که حداکثر سود کل را تامین می‌کند، درحالی‌که نیاز عملیاتی شیب دیواره پایدار را برآورده سازد. مسئله برنامه‌ریزی تولید^۴ معدن روباز تعیین سکانس استخراجی تعریف می‌شود که در آن بلوک‌ها با در نظر گرفتن انواع محدودیت‌های فیزیکی

^۱ Optimal Pit^۲ Discounted Profit^۳ Optimum Ultimate Pit Limit^۴ Production Scheduling Problem

و اقتصادی باید از معدن استخراج شوند تا اینکه سود تنزیل یافته کل معدن بیشینه شود (Caccetta and Hill, 2003).

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

مهم‌ترین ضرورت‌های انجام این تحقیق را می‌توان به چهار ضرورت، لزوم برنامه‌ریزی برای تولید، برنامه‌ریزی تولید بلندمدت، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری^۱ در برنامه‌ریزی، استفاده از الگوریتم مورد نظر (تکامل تفاضلی)^۲ تقسیم کرد. لازم بذکر است باتوجه به اینکه برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز تاکنون روش قابل قبولی ارائه نشده است، به دلیل مزیت‌های الگوریتم تکامل تفاضلی سعی شده است از این الگوریتم برای حل این مسئله استفاده شود.

۱-۳-۱- ضرورت و اهمیت برنامه‌ریزی برای تولید در معدن روباز

بعد از حل مسئله برنامه‌ریزی تولید و بدست آوردن محدوده معدن، از آنجایی که استخراج مواد موجود در محدوده نهایی در واحد زمان امکان پذیر نیست و بایستی در طی چندین سال استخراج شود، لذا در برنامه‌ریزی تولید و فاز بندی معادن روباز لازم است ابتدا قسمت‌های پر عیار کانسار را استخراج کنیم و نتیجتاً ارزش خالص فعلی بیشتری حاصل شود و همچنین قسمت‌های کم عیار و همراه باطله در سال‌های آخر عمر معدن استخراج شود (میرزایی و کاکایی، ۱۳۸۴).

این مسئله به ارزش زمانی پول مربوط می‌شود. چون ارزش یک دلاری که امروز بدست می‌آوریم، خیلی بیشتر از ارزش یک دلاری است که ممکن است سال‌های بعد بدست آوریم. برای استخراج یک کانسار حالات و ترتیب‌های مختلفی ممکن است وجود داشته باشد که از بین این حالات، ترتیبی را انتخاب می‌کنیم که ماکزیمم NPV را داشته باشد (میرزایی و کاکایی، ۱۳۸۴).

^۱ Metaheuristic

^۲ Differential Evolution

۱-۳-۲- ضرورت طراحی برنامه‌ریزی بلندمدت

طرح سکانس تولیدی (سکانس استخراج) بصورت روزانه، هفتگی یا ماهانه، از مجموعه اهداف تولیدی برنامه‌ریزی تولید بلندمدت پیروی می‌کند. فرایند بهینه‌سازی، تخصیص منابع را که مطابق ظرفیت ناوگان موجود، طرح‌بندی معدن و موارد عملیاتی (مانند جهت استخراج) است، در نظر می‌گیرد. درحالی‌که موارد مذکور در نظر گرفته می‌شود، تابع هدف فرمولاسیون مربوط به‌طور معمول انحراف از اهداف طرح تولید سالانه را به حداقل می‌رساند. اگر این اهداف برآورده شود، سپس اهداف بلندمدت مورد انتظار و ارزیابی نهایی معدن هم احتمالاً برآورده می‌شود. در صورت عدم استخراج از تولید ماهانه مورد انتظار، جریمه سنگینی وجود دارد زیرا کلیه مواد برنامه‌ریزی شده برای دوازده ماه باید برای همسان‌سازی برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت با اهداف برنامه‌ریزی بلندمدت، استخراج شود (Matamoros and Dimitrakopoulos, 2016).

برنامه‌ریزی بلندمدت استراتژی رسیدن به اهداف شرکت (بالاترین ارزش خالص فعلی به عنوان مثال) را از قبل تعیین می‌کنند. برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت با هدف پیروی کردن از برنامه‌ریزی بلندمدت انجام می‌شود و هدف دیگر برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، تا حد ممکن به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی است. برای این منظور مهندسان سعی به پیدا کردن یک سیستم قابل اطمینان با کمترین هزینه را دارند (Rahmanpoor and Osanloo, 2017).

۱-۳-۳- ضرورت استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در برنامه‌ریزی تولید معدن

یک الگوریتم فراابتکاری یک مجموعه مفاهیمی از یک الگوریتم است که برای تعریف روش‌های ابتکاری^۱ در یک طیف گسترده از مسائل دشوار قابل استفاده است که این مفاهیم معمولاً از زیست‌شناسی و طبیعت الهام گرفته‌اند. (Sattarvand and Niemann-Delius, 2008).

^۱ Heuristic

روش‌های ریاضی مختلف مانند برنامه‌ریزی خطی در مسائل برنامه‌ریزی تولید کاربرد زیادی دارند اما همه آن روش‌ها از این واقعیت رنج می‌برند که نمی‌توانند نمونه‌هایی از اندازه واقعی و سطح جزئیات را در یک زمان قابل قبول حل کنند (Shishvan and Sattarvand, 2015).

کاربرد برنامه‌ریزی ریاضی از کاهش کارایی محاسباتی به علت حجم بالای متغیر تصمیم رنج می‌برد. همه این روش‌های دقیق به وسیله‌ی متغیرهای تصمیم محدود شده‌اند و می‌توانند مسائل نسبتاً کوچک مقیاس به استثنای مفاهیم عملی را حل کنند، روش‌های فرا ابتکاری ظرفیت رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه را برای نمونه‌های بزرگ مقیاس داراست (Shishvan and Sattarvand, 2015).

در برنامه‌ریزی معدن، برنامه‌ریزی خطی یک روش غالب محسوب نمی‌شود. اگرچه این تئوری ممکن است پذیرفته شود اما یک دلیل غالب نبودن این روش، مشکلات محاسباتی ناشی از حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی است (Gershon, 1983).

به هر حال مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی (عدد صحیح مختلط) در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز به تعداد زیادی متغیر صفر و یک نیازمند است که حل آن را بسیار مشکل یا غیر ممکن می‌سازد. به عنوان مثال اگر ۱۰۰۰۰ بلوک استخراجی در یک پوش‌بک^۱ برای برنامه‌ریزی سه ساله وجود داشته باشد، مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به ۳۰۰۰۰ متغیر صفر و یک نیازمند است که این امر مدل‌سازی را بسیار دشوار یا حتی غیر ممکن می‌سازد (Ramazan, 2007).

اصلی‌ترین محدودیت‌های روش‌های ریاضی، هزینه محاسباتی بالای آنها در مسائل واقعی می‌باشد. اگرچه روش‌های فرا ابتکاری تضمینی در رسیدن به جواب بهینه نمی‌دهند اما هزینه محاسباتی پایین آنها باعث می‌شود که هر روش بهینه‌سازی دیگر به دلیل هزینه محاسباتی بالا نتواند جایگزین این روش‌ها شود (Khan and Niemann-Delius, 2015).

^۱ Pushback

۱-۳-۴- ضرورت استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی یک استراتژی ساده و سر راست است. موتور جستجوگر اصلی این الگوریتم در کمتر از ۳۰ سطر کدنویسی قابل نوشتن است. همچنین استفاده از این الگوریتم بسیار آسان است زیرا تنها به چند متغیر کنترل قدرت مند نیاز دارد که می توان از یک بازه عددی به خوبی تعریف شده آن را تهیه کرد (Storn and Price, 1997).

با افزایش پیچیدگی مسائل بهینه سازی دنیای واقعی، تقاضا برای بهینه سازهای قوی، سریع و دقیق در بین محققان حوزه های مختلف رو به افزایش است. بیش از یک دهه قبل الگوریتم تکامل تفاضلی به عنوان یک طرح ساده و کارآمد برای بهینه سازی سراسری فراتر از فضاهای پیوسته پدیدار شد. در الگوریتم تکامل تفاضلی هیچ توزیع احتمالی^۱ برای تولید فرزندان مورد استفاده قرار نمی گیرد و در مقایسه با دیگر الگوریتم های تکاملی بسیار ساده تر برای پیاده سازی است. بدنه اصلی این الگوریتم چهار تا پنج خط را برای کدنویسی در هر زبان برنامه نویسی به خود اختصاص می دهد (Das and Suganthan, 2011).

هرچند در سال ۲۰۱۸ حل مسئله برنامه ریزی تولید با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی توسط آصف خان^۲ و نیمان-دلیوس^۳ بصورت کاملاً جامع و با در نظر گرفتن عدم قطعیت انجام گرفته (Khan and Niemann-Delius, 2018)، اما سادگی الگوریتم تکامل تفاضلی سبب شده است که مجدداً با استفاده از این الگوریتم برنامه ریزی انجام گیرد.

۱-۴- اهداف و روش تحقیق

هدف از این تحقیق تعیین فازهای استخراجی و محاسبه ای ارزش خالص فعلی بر اساس الگوریتم تکامل تفاضلی با هزینه، زمان و پیچیدگی محاسباتی کم و جوابی نزدیک به جواب بهینه برای برنامه ریزی تولید

^۱ Probability Distribution

^۲ Asif-Khan

^۳ Nieman-Delius

معدن روباز است. برای این منظور، روی دو مدل بلوکی^۱ دو بعدی (فرضی و واقعی) با توجه به این که روش برنامه‌ریزی پویا^۲ قادر است محدوده بهینه واقعی را بدست آورد، محدوده نهایی با استفاده از این روش تعیین و سپس با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی مسئله برنامه‌ریزی تولید روی این دو مدل بلوکی انجام گرفته و همچنین برای سنجش کارایی (مربوط به مدل بلوکی فرضی) از روش ریاضی برنامه‌ریزی پویا استفاده و میزان تفاوت بین ارزش خالص فعلی در این دو روش محاسبه شده است.

۱-۵- ساماندهی پایان نامه

در فصل نخست این تحقیق، تعاریف اولیه، ضرورت‌ها، اهداف و مراحل مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم به محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید معدن روباز بصورت مفصل اشاره و روش‌های حل این مسئله طبقه‌بندی شده است. همچنین در این بخش به برخی از روش‌هایی که اخیراً برای حل این مسئله پیشنهاد شده‌اند (بررسی سابقه تحقیق) پرداخته شده است. در فصل سوم ابتدا به مسئله بهینه‌سازی و سپس نحوه جستجو در این نوع از مسائل اشاره شده است. همچنین الگوریتم‌های فرا ابتکاری (هوش مصنوعی^۳) و الگوریتم تکامل تفاضلی و یک نوع جدید از این الگوریتم که اخیراً پیشنهاد شده است بررسی و در نهایت از نظر کارایی سه الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ در این بخش مقایسه شده است. در فصل چهارم مراحل اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز چنانچه در بخش ۱-۴ اشاره شده، به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. فصل پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهادها اختصاص داده شده است.

^۱ Block Model

^۲ Dynamic Programming

^۳ Artificial intelligence

^۴ Particle Swarm Optimization

فصل دوم

مبانی، مفاهیم و سابقه‌ی تحقیق

۲-۱- مقدمه

کانسارهای معدنی عموماً یا به روش زیرزمینی و یا به روش سطحی از زمین با هدف استخراج ماده معدنی و دستیابی به سود استخراج می‌شوند. در معدن کاری زیرزمینی، استخراج زیر سطح انجام می‌گیرد و بوسیله‌ی چاه قائم، چاه شیبدار یا تونل‌ها از سطح به کانسار دسترسی یافته می‌شود. در معدن کاری سطحی، به عبارت دیگر همه‌ی عملیات از سطح انجام می‌گیرد. معدن کاری روباز یکی از مهم‌ترین روش‌های معدن کاری سطحی است. انتخاب بین روش معدن کاری سطحی و معدن کاری زیرزمینی به عمق، عیار و تناژ ماده‌ی معدنی و در نتیجه به معیارهای فنی و اقتصادی وابسته است. روش‌های معدن کاری سطحی بصورت گسترده در سراسر دنیا برای استخراج ماده‌ی معدنی نزدیک سطح زمین استفاده می‌شود. کانسارهای معدنی در عمق ممکن است به روش‌های معدن کاری زیرزمینی استخراج شود. روش‌های مختلفی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بصورت جدی از دهه ۶۰ میلادی تا امروز پیشنهاد شده است که همه‌ی روش‌ها از پیچیده بودن مسئله به دلیل بزرگ مقیاس بودن آن رنج می‌برند. از دهه‌ی ۹۰ میلادی الگوریتم‌های فرا ابتکاری به عنوان یک روش هوش مصنوعی جایگزین مناسبی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بوده است.

در این فصل نخست سعی شده است، محدوده نهایی و مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن بصورت جامع تعریف شوند، همچنین نشان داده شده است که مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن یک مسئله بهینه‌سازی است. سپس به عنوان سابقه‌ی تحقیق مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز به بررسی روش‌های مختلف حل این مسئله در چند سال گذشته پرداخته شده است.

۲-۲- تعیین محدوده نهایی معادن روباز

محدوده نهایی یک معدن روباز، اندازه و شکل آن معدن را در آخر عمر معدن مشخص می‌کند (Khalokakaie, 1999). اندازه، محل و شکل یک معدن روباز در برنامه‌ریزی محل دپوی باطله^۱، انباشتگاه‌ها^۲، کارخانه فرآوری^۳،

^۱ waste Dump^۲ Stockpiles^۳ Processing Plant

راه‌های دسترسی و سایر امکانات سطحی و توسعه برنامه‌ریزی تولید از اهمیت برخوردار است. همچنین طراحی کاواک ذخایر قابل معدن‌کاری و مقدار باطله‌ای را که در طول عمر عملیات معدن‌کاری باید برداشت شود، مشخص می‌کند (Khalokakaie et al., 2000a).

استفاده از کامپیوترها در طراحی معادن روباز با توسعه‌ی یک مدل بلوکی ماده‌ی معدنی شروع می‌شود، برای این منظور یک بلوک مستطیلی بزرگ تعریف می‌شود. این بلوک بزرگ به تعدادی محدود بلوک کوچکتر تقسیم می‌شود. به هر بلوک در مدل یک عیار تخمینی بوسیله روش زمین آمار یا سایر روش‌های تخمین عیار تخصیص داده می‌شود. ارتفاع عمودی این بلوک‌ها معمولاً به اندازه ارتفاع برنامه‌ریزی شده پله در نظر گرفته می‌شود که در عملیات معدن‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابعاد افقی بلوک‌ها به فاصله نمونه‌برداری و خطای تخمین بستگی دارد (Khalokakaie et al., 2000b).

با ظهور و استفاده گسترده از کامپیوترها تعدادی الگوریتم برای تعیین محدوده بهینه معدن روباز پیشنهاد شده‌اند. هدف اصلی این الگوریتم‌ها که تقریباً همه این‌ها بر مدل‌های بلوکی استوار است، پیدا کردن مجموعه‌ای از بلوک‌هاست که باید برای بدست آوردن سود کلی بیشینه در شرایط اقتصادی مشخص و محدودیت‌های فنی، استخراج شوند. رایج‌ترین روش‌ها عبارتند از نظریه گراف (روش لرچ-گروسمن)، روش جریان شبکه، نسخه‌های مختلف روش مخروط شناور، الگوریتم کوروبوف، الگوریتم کوروبوف اصلاح‌شده، برنامه‌ریزی پویا و روش‌های پارامترسازی. الگوریتم لرچ-گروسمن بر اساس نظریه گراف، تنها روشی است که همیشه تضمین می‌شود محدوده بهینه به دست آید (Khalokakaie et al., 2000a).

در حالت ایده‌آل، محدوده بهینه معدن باید بر اساس ارزش خالص فعلی بیشینه تعیین شود. همانطور که در سال ۱۹۸۹ توسط ویتل^۱ بیان شده است و در سال ۱۹۹۳ توسط دود^۲ تفسیر شده است تا زمانیکه ارزش بلوک مشخص نشود، طرح کاواک با بالاترین ارزش خالص فعلی تعیین نمی‌شود و ارزش بلوک زمانی شناخته

^۱ Whittle^۲ Dowd

می‌شود که سکانس استخراجی مشخص شده باشد و سکانس استخراجی مشخص نمی‌شود تا زمانی که طرح کاواک در دسترس باشد، بنابراین مسئله غیر قابل حل است (Khalokakaie, 1999).

۲-۳- برنامه‌ریزی تولید در معدن

مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز تعیین سکانس استخراجی تعریف می‌شود که در آن بلوک‌ها با در نظر گرفتن انواع محدودیت‌های فیزیکی و اقتصادی باید از معدن استخراج شوند تا اینکه سود تنزیل یافته کل معدن بیشینه شود (Caccetta and Hill, 2003).

برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با توجه به مدت زمان برنامه‌ریزی به سه نوع بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت تقسیم می‌شود. برای مثال برنامه یک تا پنج ساله بلندمدت نامده می‌شود و برنامه‌های یک تا ۶ ماه میان مدت و برنامه‌های یک روزه تا یک ماه کوتاه‌مدت گفته می‌شوند. اگرچه ممکن است در این سه نوع برنامه‌ریزی برخی فرضیات و محدودیت‌ها متفاوت باشند ولی ماهیت مسئله در هر سه نوع یکسان است (میرزایی و کاکایی، ۱۳۸۴).

اهداف برنامه‌ریزی تولید به خوبی توسط متیسون^۱ در سال ۱۹۸۲ تبیین شده است (هاسترویلد و کوچتا، ۱۹۹۵):

الف. استخراج ماده معدنی به نحوی که هزینه تولید یک کیلوگرم فلز در هر سال حداقل ممکن باشد، به عبارت دیگر فلسفه استخراج در هر مرحله، بهترین کانسنگ بعدی است.

ب. حفظ قابلیت تداوم عملیاتی طرح از طریق آماده بودن فضای عملیاتی کافی برای ماشین‌آلات، راه‌های دسترسی باربری به هر کدام از پله‌های فعال و ...

ج. آشکارسازی کانسنگ به میزان کافی به عنوان تضمینی برای جبران یا مقابله با احتمال تخمین‌های نادرست از تناژ و عیار کانسنگ در مدل ذخیره. این موضوع به ویژه در سال‌های اولیه بر موفقیت اقتصادی طرح تاثیر حیاتی دارد، از اهمیت برخوردار است.

^۱ Mathieson

د. به تعویق انداختن ملزومات باطله‌برداری تا حد ممکن، ضمن فراهم کردن مجموعه‌ای نسبتاً یکنواخت و سازگار از تجهیزات و نیروی انسانی.

ه. تهیه یک برنامه زمان‌بندی راه‌اندازی منطقی و عملی قابل دسترس با در نظر گرفتن آموزش نیروی انسانی، فعالیت‌های اولیه آماده‌سازی، تامین و به کارگیری تجهیزات، تاسیسات و تسهیلات زیر بنایی و پشتیبانی تدارکاتی، به‌طوری که ریسک تاخیر در شروع جریان نقدینگی مثبت عملیات را کمینه نماید.

و. بیشینه‌سازی زوایای شیب کاواک طراحی شده بر مبنای مطالعات و بررسی‌های ژئوتیکنیکی کافی، ضمن کمینه‌سازی تاثیرات نامطلوب ناشی از ناپایداری شیب که می‌تواند اتفاق بیفتد، از طریق برنامه‌ریزی دقیق و هوشمندانه.

ز. بررسی کامل مزیت‌های اقتصادی برای گزینه‌های مختلف نرخ تولید و عیار حد.

ح. مطالعه و بررسی جامع استراتژی پیش‌بینی شده برای معدنکاری، انتخاب ماشین‌آلات و تجهیزات و طرح آماده‌سازی به منظور برنامه‌ریزی پیش‌آمدهای احتمالی، قبل از اینکه در جریان عمل این وقایع اتفاق بیفتد.

ط. به طور روشن برنامه‌ریزی، یک فعالیت مستمر در طول عمر معدن است. برنامه‌ریزی‌ها برای کاربرد در دوره یا فواصل مختلف زمانی انجام می‌گیرد.

دو نوع برنامه‌ریزی تولید منطبق با دو دوره یا فاصله زمانی مختلف، توسط کوزنس^۱ در سال ۱۹۷۹ ارائه شده است (هاسترولید و کوچتا، ۱۹۹۵):

- برنامه‌ریزی عملیاتی یا کوتاه‌مدت، که برای عملیات یک معدن در حال کار ضروری است.

^۱ Couzens

• برنامه‌ریزی تولید درازمدت، که اغلب برای مطالعات امکان‌سنجی یا بودجه‌ای انجام می‌گیرد. این برنامه‌ریزی طراحی کاواک و تخمین ذخیره را تکمیل می‌کند و جزء مهمی در فرایند تصمیم‌گیری است.

کوزنس در سال ۱۹۷۹ توصیه‌های بسیار مفیدی بصورت پنج قانون یا قاعده برای راهنمایی طراحان و برنامه‌ریزان و افراد درگیر در فعالیت‌های برنامه‌ریزی درازمدت ارائه داده است که باید به‌طور کامل مد نظر قرار گیرد (هاسترولید و کوچتا، ۱۹۹۵):

الف. ضمن قبول این واقعیت که در برنامه‌ریزی سرو کار با برآوردهایی از عیار، نقشه‌های زمین شناسی و حدسیاتی درباره اقتصاد است، اهداف باید به روشنی تعریف شده باشند. باید قابلیت هرگونه تغییر وجود داشته باشد.

ب. برقراری ارتباط با تمامی افراد دخیل در تمام مراحل برنامه‌ریزی و طراحی، امری ضروری است. اگر برنامه‌ها برای کسانی که باید تصمیم بگیرند و آنهایی که باید طرح‌ها را اجرا کنند، روشن نباشد به درکی نادرست از برنامه یا نادیده گرفته شدن آن منجر خواهد شد.

ج. باید بخاطر داشت سروکار با حجم‌هایی از زمین است که باید بترتیب برداشت و جابجا شوند. اهمیت هندسه برای برنامه‌ریز و طراح به اندازه اهمیت حساب است.

د. باید بخاطر داشت که سروکار با زمان است. حجم‌ها باید در زمانی جابجا شوند که اهداف تولید تحقق پیدا کند. استفاده تولیدی از زمان، کارآرایی و تاثیر هزینه‌ها را تعیین خواهد کرد.

هـ. مقبولیت طرح‌ها را باید در تحقق اهداف شرکت و نه فقط ایده‌های طراح، جستجو کرد.

زمان‌بندی تولید یکی از مهم‌ترین بخش‌های فرایند معدنکاری است. این کار با یک مثال ساده توضیح داده خواهد شد. کانسار نشان داده شده در شکل ۲-۱ را که در آن ۱۰ بلوک کانسنگ با ۱۰ بلوک باطله پوشانده شده است، در نظر بگیرد. میزان تولید در سال (اعم از اینکه بلوک‌ها کانسنگ یا باطله باشند) پنج بلوک فرض

می‌شود. ارزش خالص یک بلوک کانسنگ ۲ دلار و هزینه برداشت هر بلوک باطله ۱ دلار است. کل هزینه باطله‌برداری ۱۰ دلار و ارزش کانسنگ ۲۰ دلار خواهد بود. اگر کانسنگ و باطله هر دو بتوانند به‌طور آنی معدنکاری شوند، ارزش خالص فعلی ۱۰ دلار خواهد شد، ولی به‌دلیل محدودیت‌های عملیاتی، این کار نمی‌تواند انجام گیرد. بنابراین باید چند طرح برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی (ترتیب) در نظر گرفته شود.

W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	سال صفر
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	

شکل ۱-۲: مثال ساده از برنامه‌ریزی و زمان‌بندی (هاسترویلد و کوچتا، ۱۹۹۵).

طرح ۱: برداشت کل باطله قبل از استخراج کانسنگ

برای سادگی عملیات بهتر است که در صورت امکان ابتدا تمام باطله برداشت شود و بعد از آن کانسنگ استخراج گردد (شکل ۲-۲). ارزش خالص فعلی این ترتیب با نرخ بهره ۱۰ درصد برابر است با رابطه ۱-۲.

$$NPV = \frac{-5\$}{(1.10)^1} + \frac{-5\$}{(1.10)^2} + \frac{10\$}{(1.10)^3} + \frac{10\$}{(1.10)^4} = 5.66 \quad (1-2)$$

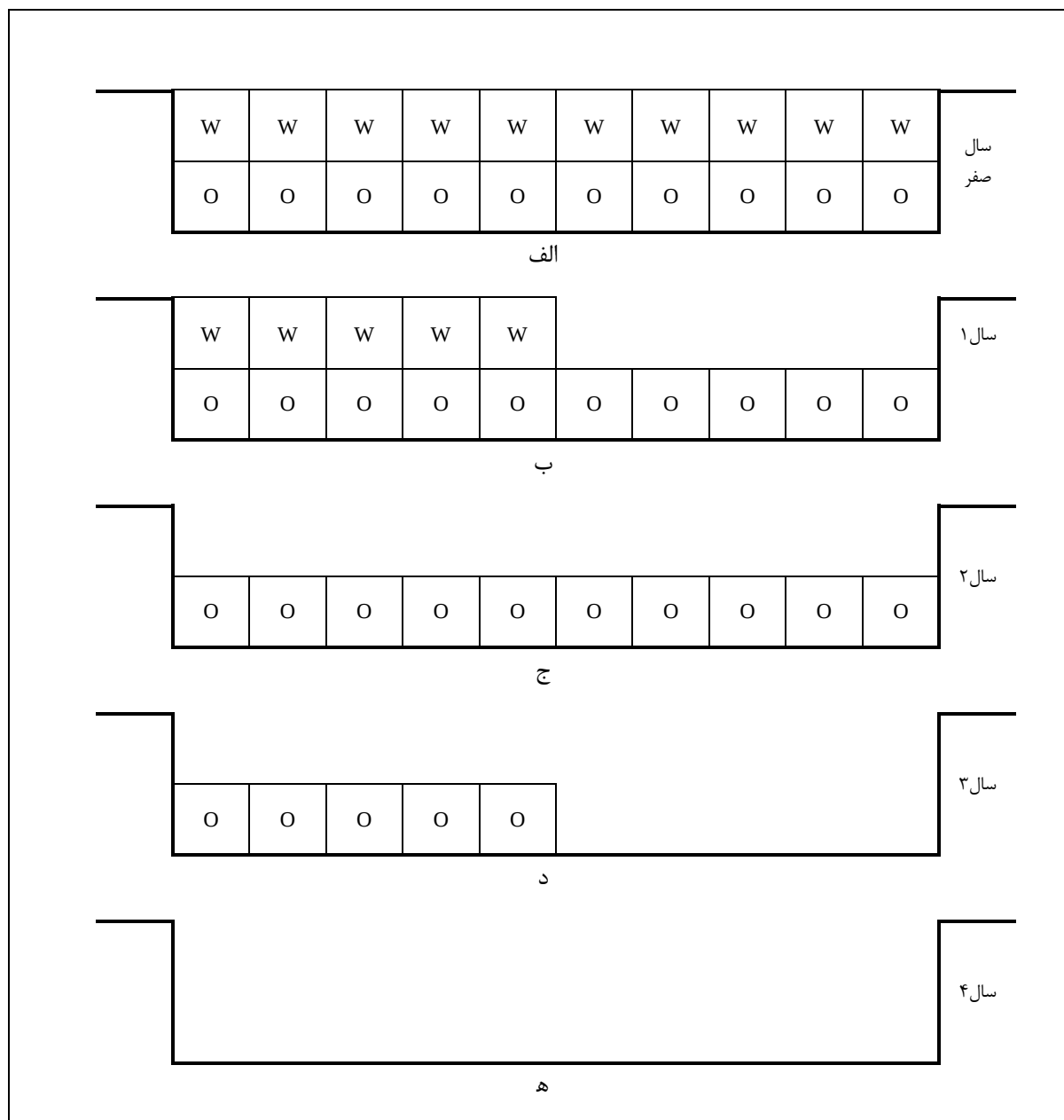
طرح ۲: یکسال پیش باطله‌برداری و به دنبال آن معدنکاری ۳ بلوک کانسنگ و ۲ بلوک باطله در هر سال طبق این طرح لازم است در سال نخست ۵ بلوک باطله برداشت. در سال‌های ۲ و ۳ به ازای هر ۲ بلوک باطله ۳ بلوک کانسنگ استخراج خواهد شد. در سال آخر ۱ بلوک باطله و ۴ بلوک کانسنگ وجود خواهد داشت. این ترتیب معدنکاری در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. ارزش خالص فعلی برابر است با رابطه ۲-۲.

$$NPV = \frac{-5\$}{(1.10)^1} + \frac{4\$}{(1.10)^2} + \frac{4\$}{(1.10)^3} + \frac{7\$}{(1.10)^4} = 6.56 \quad (2-2)$$

طرح ۳: باطله‌برداری یک بلوک جلوتر از کانسنگ

مقایسه طرح‌های ۱ و ۲، نشان می‌دهد که کوتاه شدن فاصله زمانی بین باطله‌برداری و استخراج، ارزش خالص فعلی را بهبود می‌بخشد. در طرح سوم، باطله‌برداری فقط یک بلوک جلوتر از استخراج کانسنگ انجام خواهد شد، تا زمان تاخیر بازهم کوتاه‌تر شود (شکل ۲-۴) همچنین ارزش خالص فعلی برابر است با رابطه ۳-۲.

$$NPV = \frac{1\$}{(1.10)^1} + \frac{2.50\$}{(1.10)^2} + \frac{2.50\$}{(1.10)^3} + \frac{4\$}{(1.10)^4} = 7.59 \quad (۳-۲)$$



شکل ۲-۲: ترتیب معدن‌کاری طرح ۱ (هاسترویلید و کوچتا، ۱۹۹۵).

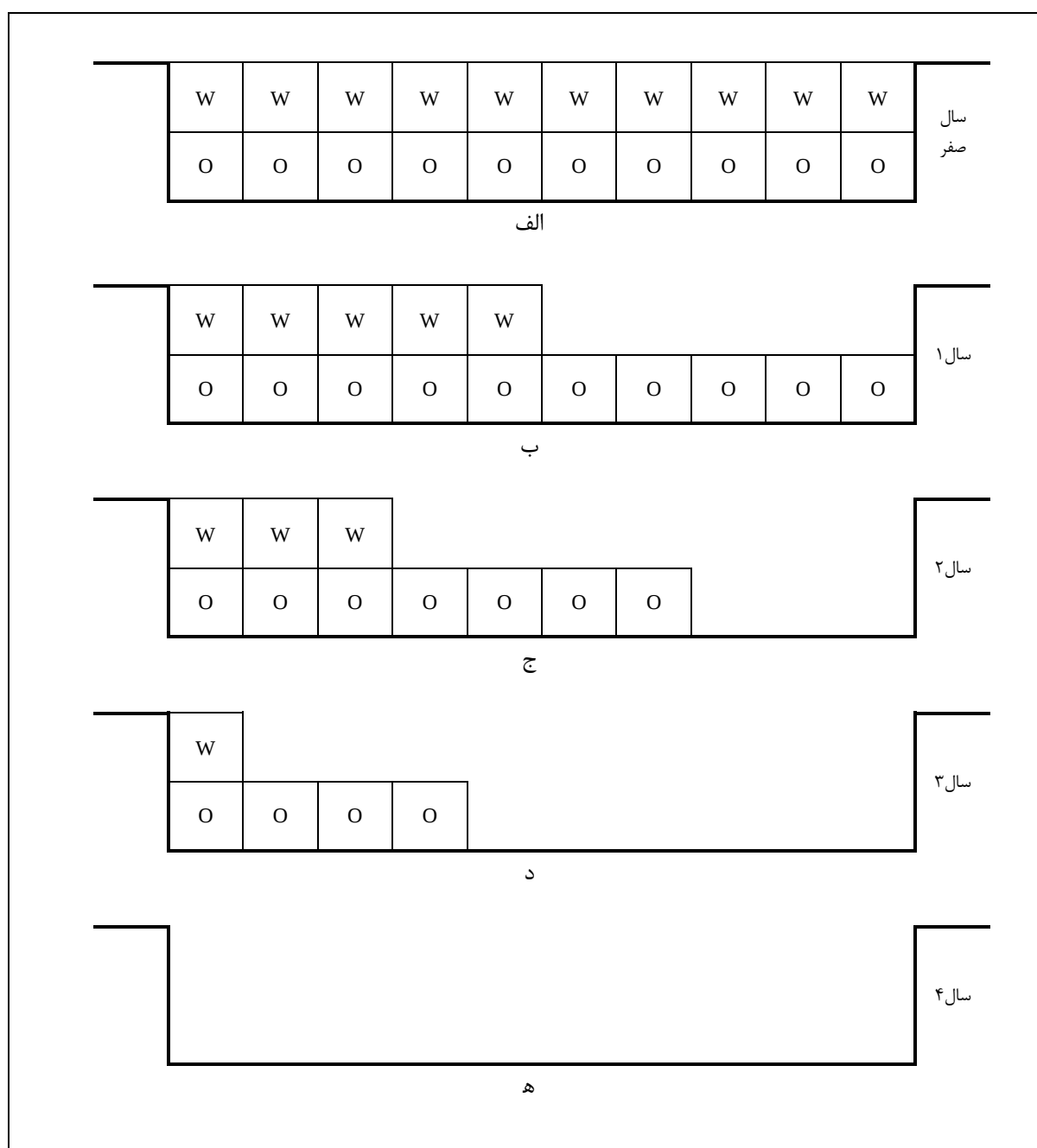
طرح ۴: باطله‌برداری نیم بلوک جلوتر از استخراج کانسنگ

بین طرح‌های ۲ و ۳ بهبود عمده‌ای در ارزش خالص فعلی مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن وضعیتی که باطله‌برداری نیم بلوک جلوتر از استخراج کانسنگ باشد، این روند بهبود بررسی می‌شود (شکل ۲-۵) که داریم:

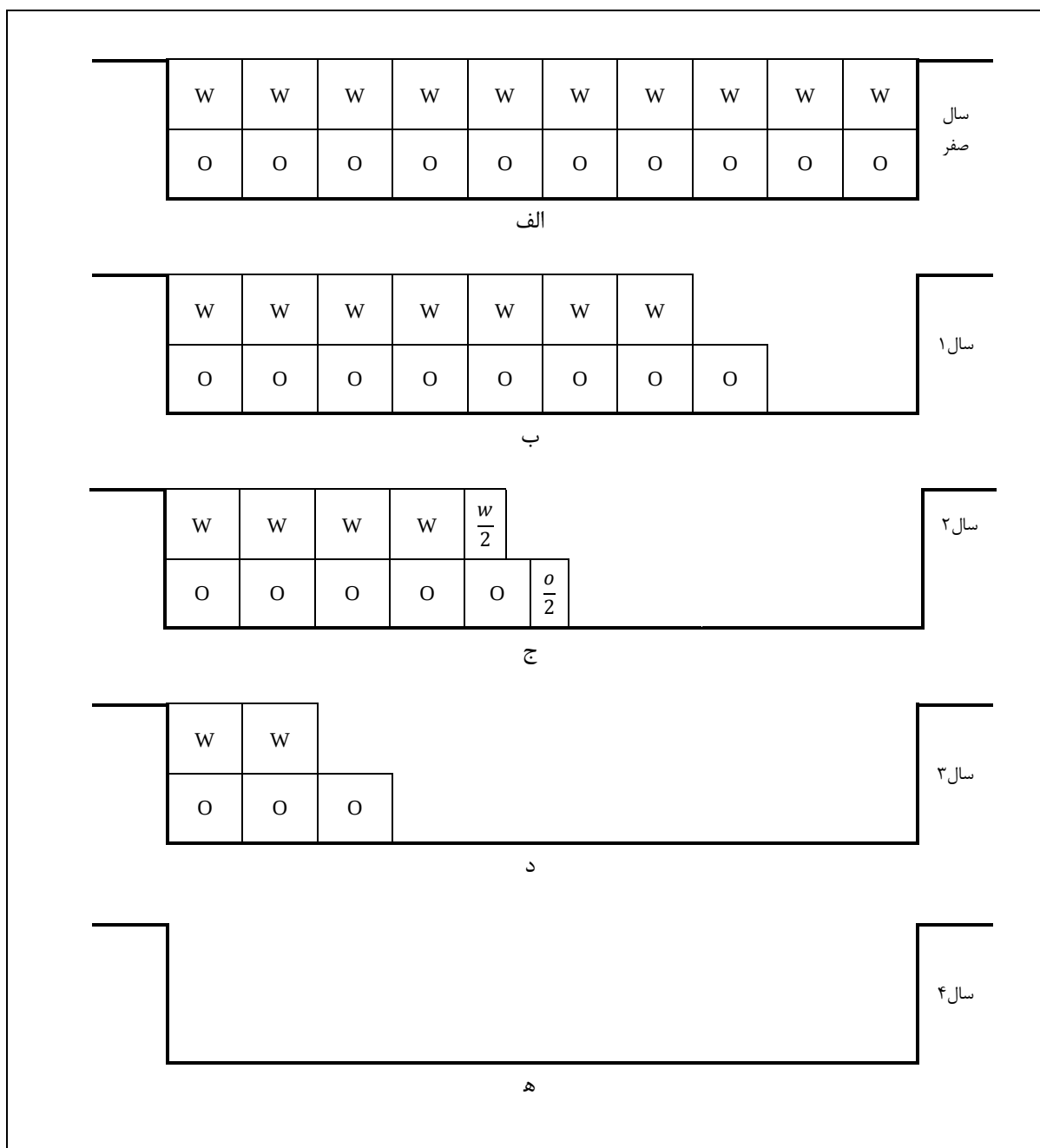
$$M = \frac{O}{4} \text{ و } N = \frac{3W}{4}, S = \frac{3O}{4}, P = \frac{W}{4}$$

همچنین ارزش خالص فعلی برابر است با رابطه ۲-۴، به نظر می‌رسد که این طرح مطلوب‌ترین گزینه از بین ۴ طرح مذکور است. با این وجود معلوم شده است که فرض کاهش فاصله

زمانی بین باطله‌برداری و استخراج، هزینه‌های عملیاتی کانسنگ و باطله را $0/05$ دلار برای هر بلوک افزایش می‌دهد، که این افزایش هزینه می‌تواند ناشی از فقدان فضای کاری کافی یا عدم دقت چال‌زنی به دلیل فشارهای زمانی باشد. بنابراین هزینه باطله‌برداری به میزان $1/05$ دلار به ازای هر بلوک، افزایش و عایدی خالص کانسنگ به میزان $1/95$ دلار به ازای هر بلوک کاهش خواهد یافت. ارزش خالص فعلی واقعی برابر است با رابطه ۲-۵، در این حالت طرح ۳ جذاب‌ترین گزینه خواهد بود.



شکل ۲-۳: ترتیب معدن‌کاری طرح ۲ (هاسترویلید و کوچتا، ۱۹۹۵).



شکل ۲-۴: ترتیب معدن‌کاری طرح ۳ (هاسترویلد و کوچتا، ۱۹۹۵).

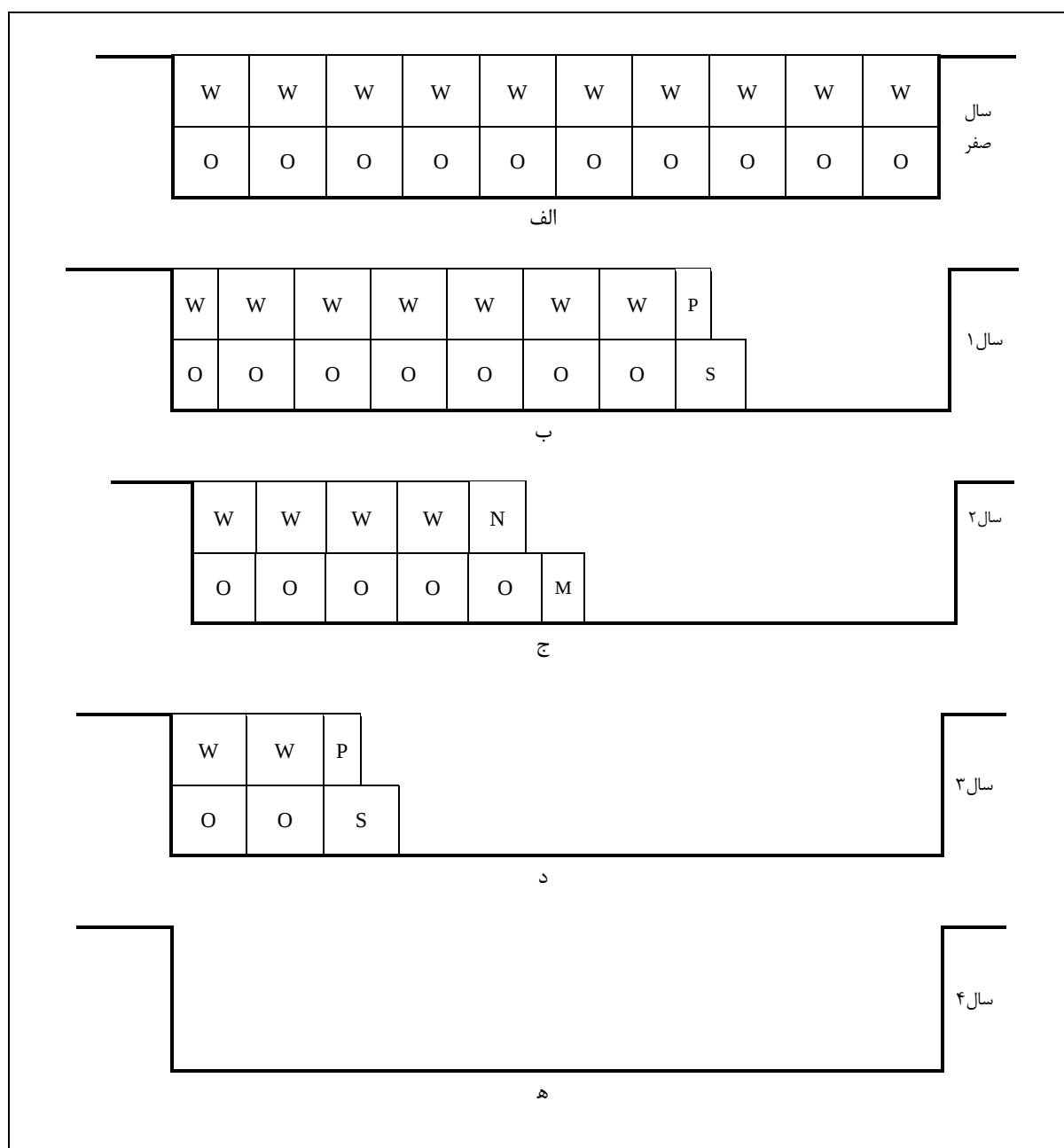
$$NPV = \frac{1.75\$}{(1.10)^1} + \frac{2.50\$}{(1.10)^2} + \frac{2.50\$}{(1.10)^3} + \frac{3.25\$}{(1.10)^4} = 7.76 \quad (۴-۲)$$

$$NPV = \frac{1.50\$}{(1.10)^1} + \frac{2.25\$}{(1.10)^2} + \frac{2.25\$}{(1.10)^3} + \frac{3\$}{(1.10)^4} = 6.96 \quad (۵-۲)$$

طرح ۵: دو برابر کردن ظرفیت معدن‌کاری

گفته شده است که با خرید ماشین‌آلات بیشتر، نرخ یا ظرفیت معدن‌کاری می‌تواند به ۱۰ بلوک در سال افزایش یابد. به هر حال افزایشی که در هزینه‌های مالکیت تجهیزات به‌وجود خواهد آمد، بر باطله و کانسنگ تحمیل

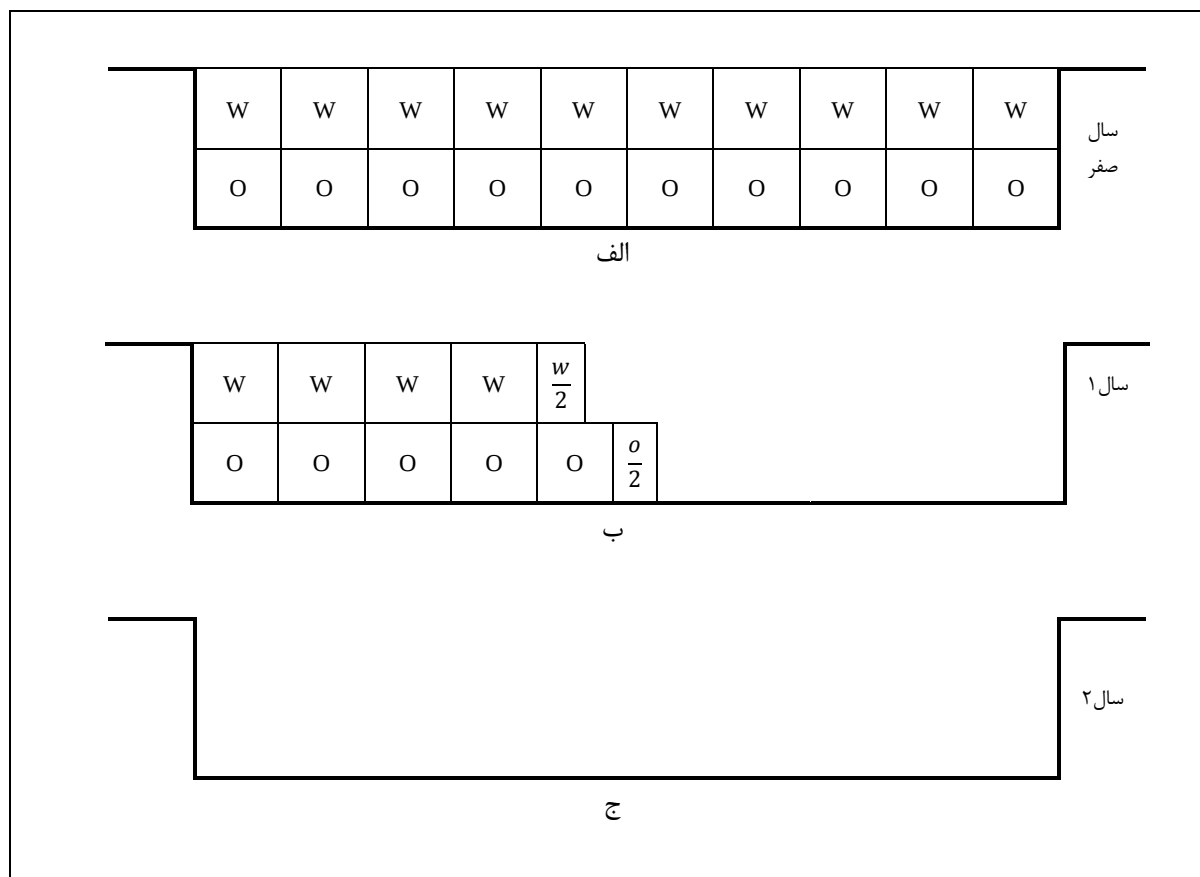
می‌شود. مقادیر هزینه باطله‌برداری برابر $1/10$ دلار بر بلوک، عایدی کانسنگ برابر $1/90$ دلار بر بلوک است، باطله‌برداری مشابه طرح ۳، یک بلوک جلوتر از استخراج کانسنگ حفظ خواهد شد. زمان‌بندی در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. ارزش خالص فعلی برابر است با رابطه ۶-۲. همانطور که می‌توان ملاحظه کرد، طرح ۳ مطلوب‌ترین گزینه باقی می‌ماند. اگر هزینه اضافی وجود نداشت، در این صورت NPV در رابطه ۷-۲ نشان داده شده است و طرح پنجم مطلوب‌ترین گزینه است.



شکل ۶-۲: ترتیب معدن‌کاری طرح ۴ (هاسترولید و کوچتا، ۱۹۹۵).

$$NPV = \frac{2.50\$}{(1.10)^1} + \frac{5.50\$}{(1.10)^2} = 6.82 \quad (۶-۲)$$

$$NPV = \frac{3.50\$}{(1.10)^1} + \frac{6.50\$}{(1.10)^2} = 8.55 \quad (۷-۲)$$



شکل ۶-۲: ترتیب معدن کاری طرح ۵ (هاسترویلد و کوچتا، ۱۹۹۵).

به‌طور خلاصه، این مثال بسیار ساده بعضی از جنبه‌های مهم زمان‌بندی تولید را نشان می‌دهد. ارزش خالص فعلی بستگی دارد به (هاسترویلد و کوچتا، ۱۹۹۵):

الف. فاصله زمانی بین باطله‌برداری و استخراج کانسنگ بیشترین مقدار NPV وقتی است که این زمان کوتاه باشد. هرچند به‌دلیل افزایش هزینه‌های ناشی از کوتاه شدن این زمان، ممکن است بهبودی در NPV حاصل شود یا نشود.

ب. نرخ یا ظرفیت تولید با هزینه واحد ثابت، بیشترین ارزش خالص فعلی با بالاترین نرخ تولید بدست می‌آید. با افزایش هزینه‌های ناشی از افزایش نرخ تولید، ممکن است بهبودی در NPV حاصل شود یا نشود.

۲-۴- روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی تولید

روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی تولید را می‌توان به سه بخش ریاضی، ابتکاری و فرا ابتکاری تقسیم کرد. روش‌های ریاضی شامل برنامه‌ریزی پویا، روش‌های برنامه‌ریزی خطی، روش برنامه‌ریزی عدد صحیح، شبکه جریان ... است. از مهمترین روش‌های ابتکاری در حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز، روش ابتکاری گرشون است. همچنین روش‌های فرا ابتکاری بسیاری در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از مهمترین آن می‌توان به الگوریتم ژنتیک اشاره کرد.

۲-۴-۱- برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

با توجه به مشکلات ذاتی در حل مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط حاوی از متغیرهای صفر و یک با نرم‌افزار محاسباتی و سخت‌افزار موجود، در سال ۱۹۸۳ توسط گرشون یک رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی معدن، مورد بحث و بررسی قرار گرفت که اجازه می‌دهد بلوک‌های جزئی (بخشی از بلوک‌ها) با شرط استخراج کامل بلوک‌های قبلی استخراج شود. این مدل قادر نیست مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح بزرگ مقیاس را حل نماید. در سال ۱۹۸۵ توسط داگدلن^۱ روش لاگرانژ برای حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح بکار رفت، در جستجوی پاسخ جایگزین، داگدلن قادر به یافتن قابلیت‌های محاسباتی برای حل مستقیم مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح بزرگ مقیاس، نبود. در سال ۱۹۹۹ توسط آکائیک^۲ روش چهار بعدی برای تبدیل مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید به یک ساختار شبکه پیشنهاد شد که این امکان به وجود می‌آید تا نظریه گراف یا تئوری شبکه برای این تبدیل، استفاده شود. برای کاهش تاثیر مسئله گراف، توسط آکائیک به علاوه، شبکه به وسیله‌ی محدودیت‌های ظرفیت تولید تغییر شکل داده شد (Ramazan and Dimitrakopoulos, 2004).

مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید بلندمدت طراحی معدن روباز، مناسب هستند. برنامه‌ریزی تولید معمولاً یک مسئله‌ای از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است. برنامه‌ریزی

^۱ Dagdelen

^۲ Akaike

خطی و عدد صحیح مختلط با داشتن پتانسیل قابل توجه برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز شناخته شده است که در آن هدف بهینه‌سازی سود تنزیل یافته کل است (Ramazan, 2007).

مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط یا برنامه‌ریزی خطی، از این انعطاف برخوردارند تا فرآوری ماده معدنی چندگانه مانند آسیاب کردن و لیچینگ را در برگیرد. این انعطاف پذیری مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی ممکن است در برنامه‌ریزی تولید، تولید قابل توجه بالاتر ارزش خالص فعلی را نسبت به روش‌های سنتی بر اساس روش‌های غیر ریاضی، نتیجه دهد (Ramazan et al., 2005).

۲-۴-۱-۱- برنامه‌ریزی خطی فازی

برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت معدن روباز، روش برنامه‌ریزی خطی فازی توسط رحمان‌پور و اصالو در سال ۲۰۱۷ پیشنهاد شد. یک مدل برنامه‌ریزی خطی فازی برگرفته از یک مدل برنامه‌ریزی خطی است که چند یا همه‌ی پارامترها فازی شده‌اند (دارای عدد فازی هستند). این مدل کاربردهای زیادی در مسائل واقعی شامل برنامه‌ریزی تولید، حمل و نقل، سرمایه‌گذاری، طراحی مهندسی و مدیریت محیط‌زیست دارد که این مفهوم می‌تواند بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید را برای معادن روباز اجرا کند. مدل برنامه‌ریزی خطی فازی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت برای یک معدن آهک فرمول‌بندی شده است. بدیهی است زمانیکه پارامترهای برنامه‌ریزی تغییر می‌کند، طرح‌های تولید باید با استفاده از داده‌های به‌روز دوباره بهینه‌سازی شوند. بنابراین یک مدل برنامه‌ریزی خطی ساده و تعیین کننده یک ابزار مناسب برای این نوع از مشکلات نیست جایی که پارامترهای برنامه‌ریزی دارای عدم قطعیت هستند (Rahmanpour and Osanloo, 2017).

علاوه بر این همیشه حد قابل قبول (حد تضمینی) برای هر محدودیت معدن وجود دارد. به عنوان مثال، یک نیروگاه حرارتی ممکن است به زغالسنگ با حداکثر گوگرد با حد ۰/۹ درصد نیاز داشته باشد. لازم به ذکر است که زغالسنگ با مقدار گوگرد ۰/۹۱ درصد برای کارخانه قابل قبول است، در مدل‌های رایج برنامه‌ریزی خطی، محدودیت‌ها این گزینه را نادیده می‌گیرند، در چنین شرایطی برنامه‌ریزی خطی فازی یک ابزار مناسب به نظر می‌رسد. برنامه‌ریزی خطی فازی پیش از این برای برنامه‌ریزی تولید یک معدن زغالسنگ و بوکسیت

استفاده شده است. مطالعه مورد نظر با هدف ارائه حالت خوش بینانه و بدبینانه در برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت انجام شده است (Rahmanpour and Osanloo, 2017).

۲-۴-۱-۲- برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی

برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن روباز در سال ۲۰۱۸ توسط رمضان و دیمیتراکوپولوس ارائه شد. برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی یک نوع از مدل‌ها و برنامه‌ریزی‌های ریاضی است که چندین سناریوهای به همان اندازه محتمل را دربر می‌گیرد و نتیجه بهینه برای یک مجموعه از اهداف تعریف شده با پاسخ امکان پذیر در فضای جواب محدود به وسیله‌ی یک مجموعه از محدودیت‌ها را تولید می‌کند. برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تعمیم یافته با در نظر گرفتن عدم قطعیت یک یا بیشتر ضرایب مرتبط، است و در مقایسه با برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تمایل به افزایش مسئله و پیچیدگی دارد (Ramazan and Dimitrakopoulos, 2018).

پیشنهاد مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی در اینجا عدم قطعیت ورودی‌ها را با در نظر گرفتن تحقق عیار شبیه‌سازی شده در فرایند بهینه‌سازی، به حساب می‌آورد. از این طریق می‌تواند ریسک عدم تحقق اهداف تولیدی یک معدن را به عنوان نتیجه عدم قطعیت زمین‌شناسی کاهش دهد. این مدل یک تابع هدف، یک مجموعه از محدودیت‌های ارائه دهنده نیازهای عملیاتی معدن را داراست. در این محدودیت‌ها، مدل مورد نظر محاسبات لازم برای رسیدن به هدف را انجام می‌دهد. تابع هدف بر اساس بیشینه سازی ارزش خالص فعلی کل پروژه به استثنای هزینه‌ی انحراف بین مقدار برنامه‌ریزی شده تناژ ماده معدنی، عیار و کیفیت و مقدار تولید از عملیات واقعی، تعریف شده است. مقادیر ارزش فعلی خالص بلوک‌های منفرد در تابع هدف از میانگین مقادیر اقتصادی غیر قابل تخمین در مدل‌های شبیه‌سازی شده محاسبه شده است نه از میانگین عیار. پارامترهایی در تابع هدف برای محاسبه انحرافات معین شده و برای هر مدل ماده معدنی شبیه‌سازی شده و برای هر دوره زمانی و برای هر نوع هدف تولید مانند حداکثر عیار دوره‌ای ماده معدنی، کمترین عیار ماده معدنی، حداکثر ظرفیت فرآوری ماده معدنی و کم‌ترین تناژ ماده معدنی که باید فرآوری شود، در نظر گرفته شده است. این عوامل انحراف در فرمولاسیون محدودیت‌ها مرتبط، محاسبه شده‌اند که مدل‌های ماده معدنی

شبیه‌سازی شده منفرد برای هریک از دوره‌های تولید را دربر می‌گیرد تابع هدف مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی به عنوان حداکثرسازی یک تابع سود، ساخته شده است (Ramazan and Dimitrakopoulos, 2018).

۲-۴-۲- برنامه‌ریزی پویا

در سال ۱۹۷۴، توسط رومن برای تعیین ترتیب معدنکاری و حدود پیت بهینه روشی ارائه شده است که امروزه در برخی از نرم‌افزارهای تجاری برای برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز کاربرد وسیعی دارد. در مدل بلوکی اقتصادی روش رومن، شماره مشخصی به هر بلوک نسبت داده می‌شود که این شماره موقعیت سطر و ستون بلوک مربوطه را نشان می‌دهد. در استفاده از روش رومن منسوب به برنامه‌ریزی پویا، دو محدودیت معرفی شده است که عبارتند از (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰):

الف. **محدودیت نخست:** شیب دیواره محدوده نهایی، نباید در هیچ نقطه از ۱:۱ تجاوز نماید.

ب. **محدودیت دوم:** ورود به هر افق معدن کاری، تنها در یک نقطه انجام می‌گیرد.

برای شروع فرایند بهینه‌سازی ترتیب معدن کاری، مدل بلوکی اقتصادی برای تعیین بیش‌ترین گسترش ممکن که می‌تواند برای پیت آینده فرض شود، جستجو می‌شود. تمام بلوک‌های مثبت موجود در مقطع (یک مقطع دو بعدی) باید درون این محدوده (محدوده بهینه نهایی تعیین شده به روش مخروط شناور) قرار گیرند و تابع شیب مجاز محدوده نیز باشند. هدف معین کردن موقعیت مکانی آخرین بلوکی است که امکان استخراج دارد و هر بلوک بر یک محدوده زمانی واحد (به طول نا مشخص) منطبق خواهد بود.

پس از پیدا کردن ترتیب بهینه استخراج، طرح پیت را می‌توان مشخص کرد. تعیین این که کدام یک از بلوک‌های واقع در ترتیب بهینه واقعا استخراج خواهد شد، بصورت زیر انجام می‌شود:

الف. آخرین بلوک موجود در ترتیب بهینه که دارای ارزش مثبت است معین می‌شود. تمام بلوک‌های بعد از این بلوک رها می‌شوند.

ب. مجموعه‌ی باقی مانده از بلوک‌ها بررسی می‌شود و آخرین بلوک منفی که برای استخراج زمان‌بندی شده تعیین می‌شود. اگر تعدادی بلوک منفی پشت سر هم وجود داشته باشد، نخستین آن‌ها انتخاب می‌شود.

ج. اگر ارزش فعلی منفی باشد، تمام این بلوک‌ها از ترتیب بهینه حذف شده و مرحله ۲ تکرار می‌شود. اگر ارزش فعلی نتیجه شده مثبت باشد، مجموعه بلوک با ارزشی معادل ارزش فعلی آن‌ها، در انتهای ردیف جایگزین می‌شود.

د. مراحل ب و ج تا زمانی که نخستین بلوک معدن‌کاری شده در ترتیب را در بر گیرد، تکرار می‌شود. ارزش فعلی نهایی همان ارزش فعلی پیت بهینه است.

۲-۴-۳- روش‌های فرا ابتکاری

برای حل کاربردی موارد بزرگ، اغلب از روش‌های تقریبی استفاده می‌شود که راه حل‌های تقریباً بهینه را در یک زمان نسبتاً کوتاه برمی‌گرداند. این نوع الگوریتم‌های بی قاعده، ابتکاری نامیده می‌شود. آن‌ها غالباً برای ایجاد یا بهبود راه حل‌ها از یک دانش خاص استفاده می‌کنند. (Sattarvand and Niemann-Delius, 2008).

بسیاری از مسائل برخاسته از کاربردهای مهندسی مانند برنامه‌ریزی تولید یک معدن روباز، NP-hard هستند بدین معنی که با زمان محاسباتی چند محدودیتی، نمی‌توان آن را بهینه‌سازی کرد. از این رو، عملاً برای حل موارد بزرگ مقیاس باید از روش‌های تخمینی که در مدت زمان نسبتاً کم به پاسخ نزدیک به بهینه را بر می‌گرداند، استفاده کرد، این نوع الگوریتم‌ها ابتکاری نامیده می‌شوند. آن‌ها اغلب از برخی دانش خاص از مسئله برای ایجاد راه حل بهبود یافته، استفاده می‌کنند (Sattarvand and Niemann-Delius, 2008).

یک الگوریتم فرا ابتکاری یک مجموعه مفاهیمی از یک الگوریتم است که برای تعریف روش‌های ابتکاری در یک طیف گسترده از مسائل دشوار قابل استفاده است که این مفاهیم معمولاً از زیست‌شناسی و طبیعت الهام گرفته‌اند. استفاده از روش‌های فرا ابتکاری توانایی پیدا کردن پاسخ‌های خیلی کیفی برای مشکلات

ترکیبی سخت (که اغلب در بیان آسان هستند اما حل آن‌ها بسیار دشوار است) در یک زمان معقول، بصورت قابل توجهی افزایش داده است. این امر منحصر برای مسائل درک شده ضعیف و بزرگ صادق است (Sattarvand and Niemann-Delius, 2008).

واژه "ابتکاری" اشاره دارد به روش‌هایی مبتنی بر تجربه برای پیدا کردن راه حل بهینه یا تقریباً بهینه مسئله درحالی‌که واژه "فرا" به سطح بالای روش اشاره دارد (Khan and Niemann-Delius, 2018).

۲-۴-۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با هدف حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن روباز در سال ۲۰۱۴ توسط خان و نیمان دلیوس ارائه شد. هدف از روش پیشنهادی، به‌کارگیری روشی فرا ابتکاری که به عنوان بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز، بررسی و مقایسه‌ی کارآرایی انواع مختلف آن است. برای تولید جمعیت اولیه‌ی پاسخ‌های امکان پذیر تصادفی از یک روش ابتکاری ترتیبی استفاده شده است. فرایند با تولید یک فهرستی از بلوک‌هایی که در دسترس هستند برای معدن‌کاری در دوره جاری آغاز می‌شود. یک بلوک بصورت تصادفی از فهرست بلوک‌ها انتخاب می‌شود و به دوره جاری اختصاص پیدا می‌کند و فهرست مورد نظر دوباره به‌روز می‌شود. این فرایند در دوره‌جاری قبل از حرکت به دوره بعدی ادامه پیدا می‌کند تا زمانی‌که ظرفیت معدن‌کاری و فرآوری برای آن برآورده شود. این فرایند زمانی متوقف می‌شود که فهرست بلوک‌ها خالی شده باشد یا تعداد دوره‌ها برای پاسخ جاری به پایان رسیده باشد (Khan and Niemann-Delius, 2014).

دو مجموعه از کانسار مس برای انجام آزمایش‌های عددی استفاده شده‌اند. فرایند با تقسیم بلوک‌ها به دو بخش ماده‌ی معدنی و باطله با استفاده از یک استراتژی عیار حد ثابت از قبل تعریف شده و به دنبال آن تعریف مدل بلوکی اقتصادی آغاز شد. برای هر دو کانسار محدوده نهایی معدن با حل مسئله محدوده نهایی معدن تعیین شد. زاویه شیب مورد نیاز در تمام جهت‌ها ۴۵ درجه فرض شد. طول هر دوره برنامه‌ریزی یک

^۱ Particle Swarm Optimization

سال فرض شد. شکاف نسبی میانگین^۱ (بر حسب درصد) بین بهترین پاسخ‌های تولید شده بوسیله‌ی انواع مختلف الگوریتم PSO و پاسخ بهینه یافته شده بوسیله‌ی CPLEX محاسبه شده است (Khan and Niemann-Delius, 2014).

شکاف نسبی تقریباً در همه موارد مقادیر کمی دارد که نشان دهنده‌ی استحکام روش است. معمولاً شکاف نسبی میانگین (بر حسب درصد) با اندازه مسئله تمایل به افزایش دارد. زمان محاسباتی مورد نیاز الگوریتم به عوامل تعیین کننده و افزایش اندازه محاسبات مورد نیاز قبل از برآورد معیار پایان مانند اندازه جمعیت، تعداد بلوک‌ها و تعداد دوره‌ها بستگی دارد. زمان محاسباتی با تعداد تکرارها برای یک مسئله خاص بصورت خطی افزایش می‌یابد. روش پیشنهادی در همه موارد می‌تواند نتایج نسبتاً بهتری را در مدت زمان کوتاه‌تر در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی دقیق که بوسیله‌ی CPLEX محاسبه می‌شوند، تولید کند (Khan and Niemann-Delius, 2014).

۲-۴-۳-۲ الگوریتم تکامل تفاضلی

برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن روباز الگوریتم تکامل تفاضلی، نخستین بار در سال ۲۰۱۸ خان و نیمان دلیوس ارائه شد. روش پیشنهادی از رویکرد پیشنهاد شده توسط آصف-خان و نیمان-دلیوس بوسیله‌ی بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای برنامه‌ریزی تولید معدن، بهره می‌گیرد. اما بجای استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای جستجوی فضای جواب، الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. هدف از ارائه این روش کشف ظرفیت‌ها و کارایی انواع مختلف الگوریتم تکامل تفاضلی است زمانی که برای مسئله برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معادن روباز بکار برده می‌شود. در این روش دو فرمول برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط متفاوت که انواع قطعی و تصادفی مسائل برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معدن روباز است، ارائه شده است. این فرمول‌ها با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی تجاری CPLEX برنامه‌نویسی شده است. راه حل بدست آمده برای ارزیابی ظرفیت‌ها و کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی در شرایط کیفیت راه حل و هزینه

^۱ Average Relative Gap

محاسباتی زمانی که برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معادن روباز بکار برده می‌شوند، استفاده خواهد شد (Khan and Niemann-Delius, 2018).

سه مجموعه‌ای از داده که نمایانگر سه کانسار متفاوت می‌باشد، برای آزمایش‌های عددی استفاده شده‌اند. تعداد بلوک‌های این سه مجموعه کانسار به ترتیب ۱۰۱۲۰، ۷۸۳۶ و ۷۱۰۷، همچنین تعداد دوره برای مجموعه نخست ۵ برای مجموعه دوم ۴ برای مجموعه سوم ۵ دوره در نظر گرفته شده است. طول هر دوره برنامه‌ریزی یکسال و نرخ تنزیل سالانه ۸ درصد در نظر گرفته شده است. پس از در نظر گرفتن رفتار همگرایی الگوریتم تکامل تفاضلی برای یک ترکیب خاص از CR و F، مقادیر مناسب برای آن‌ها انتخاب شد. شکاف نسبی متوسط با استفاده از محاسبه شده است (Khan and Niemann-Delius, 2018).

۲-۴-۳- الگوریتم خفاش^۱

برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن روباز الگوریتم خفاش، نخستین بار در سال ۲۰۱۸ توسط خان ارائه شد. روش پیشنهادی یگ گسترشی است از چهارچوبی که پیش از این توسط آصف-خان و نیمان-دلیوس در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است، که برای برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معادن روباز ارائه شده است. این روش برای ادغام عدم قطعیت عیار در فرایند بهینه‌سازی ایجاد شده است (Khan, 2018).

برای تولید جمعیت اولیه‌ی پاسخ‌های امکان پذیر از یک روش ابتکاری استفاده شده است. فرایند با تولید یک فهرستی از بلوک‌هایی که در دسترس هستند برای معدن کاری در دوره جاری آغاز می‌شود. یک بلوک بصورت تصادفی از فهرست بلوک‌ها انتخاب می‌شود و به دوره جاری اختصاص پیدا می‌کند و فهرست مورد نظر دوباره به‌روز می‌شود. این فرایند در دوره جاری قبل از حرکت به دوره بعدی ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که ظرفیت معدن کاری و فراوری برای آن برآورده شود. این فرایند زمانی متوقف می‌شود که فهرست بلوک‌ها خالی شده باشد یا تعداد دوره‌ها برای پاسخ جاری به پایان رسیده باشد (Khan, 2018).

^۱ Bat Algorithm

در آزمایش عددی یک کانسار مس با تعداد ۷۱۰۷ بلوک و نرخ تنزیل ۸٪ همچنین تعداد دوره‌ها ۵ دوره در نظر گرفته شده است. شکاف نسبی برحسب درصد بین بهترین پاسخ‌های تولید شده بوسیله‌ی انواع مختلف الگوریتم خفاش و راه حل بهینه به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار CPLEX محاسبه شده است (Khan, 2018).

۲-۴-۳-۴- الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۱

برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن روباز الگوریتم کلونی مورچگان در سال ۲۰۱۳ توسط ستاروند و نیمان دلیوس ارائه شد. فرایند قابلیت بهینه‌سازی محدوده نهایی معدن و بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن بصورت همزمان بر طبق تابع هدف چند منظوره و محدودیت‌های پیچیده پیشنهاد شده است (Sattarvand and Niemann-Delius, 2013).

مقدار اولیه‌ی متغیرها بر اساس برنامه‌ریزی معدن بوسیله‌ی الگوریتم لرج و گروسمن که در سال ۱۹۶۵ ارائه شد و همچنین وانگ^۲ و سوئیم^۳ که در سال ۱۹۹۵ ارائه شد، ایجاد شده است. سپس بصورت تصادفی برنامه‌ریزی معدن بر طبق فرمون اولیه ساخته شده است. این برنامه‌ریزی فرمون اضافه متناسب با کیفیت اقتصادی آن‌ها را ذخیره می‌کند. این عمل به همراه تبخیر فرمون، الگوریتم را به سمت حد بهینه پوش‌بک‌های معدن سوق می‌دهد. تجربیات نشان می‌دهد که زمان محاسباتی با استفاده از الگوی فرمون اولیه یکنواخت افزایش چشمگیری یافته است. سپس راه حل نزدیک به بهینه برای مسئله برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن ابتدا با استفاده از الگوریتم لرج و گروسمن که در سال ۱۹۶۵ ارائه شد و همچنین طراحی پیت‌های تو در تو توسط وانگ و سوئیم که در سال ۱۹۹۵ ارائه شد، تعیین شد. برای ایجاد راه حل‌های برنامه‌ریزی معدن، یک مجموعه از شکل‌های کاواک امکان پذیر مرتبط با پوش‌بک‌های استخراجی متفاوت باید ایجاد شود. هر یک از

^۱ Ant Colony Optimization (ACO)

^۲ Wang

^۳ Sevim

کاواک‌ها از یک مجموعه‌ای از ستون‌های بلوک تشکیل می‌شود. مقدار فرمون عنصر اصلی در تعیین عمق کاواک روی یک ستون است (Sattarvand and Niemann-Delius, 2013).

گاهی اوقات استفاده از اطلاعات ابتکاری مانند ارزش اقتصادی بلوک‌ها می‌تواند به کارایی روش کمک کند. احتمالی که با آن مورچه k بلوک i را انتخاب می‌کند بصورت رابطه ۲-۸ است که در آن τ_i مقدار فرمون بلوک i و $i \in N_i^k$ و همچنین η_{ij} اطلاعات ابتکاری است. α و β دو پارامتری هستند که نفوذ نسبی مسیر فرمون را تعیین می‌کنند و اطلاعات ابتکاری هستند. N_i^k همسایگی امکان‌پذیر مورچه k است (Sattarvand and Niemann-Delius, 2013).

$$p_i^k = [\tau_i]^\alpha [\eta_i]^\beta / \sum [\tau_i]^\alpha [\eta_i]^\beta \quad (2-8)$$

کران بالا و پایین عمق کاواک مجاز باید برای ستون در تعیین عمق کاواک در دسترس باشد. بیشترین عمق مجاز، عمیق‌ترین عمق معدن‌کاری ممکن در ستون تعریف می‌شود در صورتی که کمترین عمق بر طبق شکل معدن در نزدیکی پوش‌بک تعیین می‌شود. باید توجه داشت که فرایند یافتن عمق تنها برای ستون دارای عمق همسایگی انتخاب شده انجام می‌گیرد. نکته‌ی مهم دیگر این است که مقدار اولیه‌ی فرمون‌ها فقط به بلوک‌های ماده‌ی معدنی اختصاص داده می‌شود. سپس عمق انتخاب شده همیشه روی یک بلوک ماده‌ی معدنی منطبق می‌شود. به‌همین ترتیب فرمون‌ها برای بلوک‌های باطله به‌روز نخواهد شد. عموماً نتیجه‌ی مستقل تعیین عمق در هر ستون همیشه به‌دلیل نیاز زاویه‌ی شیب امکان‌پذیر نیست از این‌رو بر اساس عمق انتخاب شده برای تولید شکل کاواک امکان‌پذیر، به یک عادی‌سازی نیاز است. گام عادی‌سازی قبل از تعیین عمق برای اطمینان که شکل کاواک ساخته شده همه‌ی عمق‌های تعیین شده را پوشش می‌دهد، انجام می‌شود. در نهایت کاواک‌های نرمال شده‌ی منحصر بفرد که برای دوره‌های مختلف معدن ایجاد شده است، برای برنامه‌ریزی تولید معدن با هم ترکیب می‌شوند (Sattarvand and Niemann-Delius, 2013).

برای ارزیابی کاربرد الگوریتم پیشنهادی برای برنامه‌ریز بلندمدت معادن روباز، یک برنامه‌ی کامپیوتری در محیط برنامه‌نویسی Visual Studio 2005 برای انجام محاسبات توسعه یافته است. به‌منظور امتحان برنامه،

یک مدل بلوکی از کانسار معدنی آهن حاوی ۱۰۰۰ بلوک ایجاد شد و عیار Fe و SiO_2 بصورت تصادفی به همه‌ی بلوک‌ها تخصیص داده شده است. عیار Fe و SiO_2 بترتیب از ۴۵ تا ۶۵ و از ۵ تا ۱۵ درصد متفاوت بود. محدوده نهایی معدن محاسبه شده بوسیله‌ی الگوریتم لرج-گروسمن ۴۵۵ بلوک ماده‌ی معدنی و ۱۶۱ بلوک باطله را شامل می‌شود که ۶۸۱ واحد پولی ارزش اقتصادی تنزیل‌یافته را هدایت می‌کند. پوشش‌های استخراجی بوسیله‌ی الگوریتم تغییر پارامترسازی وانگ-سوئیم تولید شده است. از این طریق ۹ پوشش‌یک‌یکنواخت با اندازه‌ی ۷۰ بلوک ساخته شده است. نرخ بهره سالانه ۱۰ درصد و عمر معدن کاری ۲۰ سال در نظر گرفته شده است، ارزش اقتصادی تنزیل‌یافته برنامه‌ریزی اولیه‌ی ساخته شده ۳۲۳ واحد محاسبه شده است. به عنوان شرایط برنامه‌ریزی ساده مقدار نرخ معدن کاری و فرآوری بترتیب از ۵۹ تا ۶۴ و از ۴۷ تا ۵۳ بلوک برای هر دوره در نظر گرفته شده است. عیار متوسط مجاز آهن و سیلیس بترتیب بین ۵۴ تا ۵۶ و بین ۹ تا ۱۱ درصد فرض شده است. هرچیزی فراتر از این محدودیت‌ها یک واحد پولی هزینه‌ی مربوط به جریمه برای هر بلوک اضافه یا کم‌تر در نظر گرفته شده است. در نتیجه مقدار راه حل برنامه‌ریزی اولیه ساخته شده، ۷۹ واحد پولی هزینه‌های مربوط به جریمه دریافت شده و ارزش اقتصادی ۲۴۴ واحد کاهش یافته است (Sattarvand and Niemann-Delius, 2013).

۲-۴-۳-۵- الگوریتم رقابت استعماری^۱

برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز الگوریتم رقابت استعماری در سال ۲۰۱۸ (روی یک مدل بلوکی سه بعدی) توسط مختاریان اصل و ستاروند ارائه شد. برای شروع الگوریتم بهینه‌سازی یک جمعیت اولیه حاوی پاسخ‌های (برنامه‌ریزی معدن) N_{pop} تولید می‌شود که در آن میان، قوی‌ترین پاسخ‌ها (بر اساس ارزش خالص فعلی آن‌ها) به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند. بقیه اعضای جمعیت ($N_{col} = N_{pop} - N_{imp}$) مستعمره‌های امپراتوری انتخاب شده خواهند بود (Mokhtarian-Asl and Sattarvand, 2016).

^۱ Imperialist Competitive Algorithm

برای شکل دادن به امپراتوری‌های اولیه، مستعمره‌ها بصورت تصادفی در بین استعمارگرها تقسیم می‌شوند. بر این اساس که تعداد بیشتری از مستعمره‌ها به یک امپراتوری یا قدرت بالاتر متعلق خواهند بود. برای توزیع مناسب مستعمره به استعمارگر، هزینه‌های نرمال شده n امین استعمارگر بصورت رابطه ۲-۹ است که در آن C_n و c_n به ترتیب هزینه و هزینه نرمال شده n امین استعمارگر است. هدف الگوریتم رقابت استعماری کمینه‌سازی مجموع مقدار تابع هزینه همه کشورها در نظر گرفته شده است. برای تبدیل مسئله برنامه‌ریزی تولید از بیشینه‌سازی به کمینه‌سازی، منفی ارزش خالص فعلی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است (رابطه ۲-۱۰) (Mokhtarian-Asl and Sattarvand, 2016).

$$C_n = \max \{c_i\} - c_n \quad (۲-۹)$$

$$\text{Cost (country)} = - \text{NPV} \quad (۲-۱۰)$$

عامل جذب‌کننده برای مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز بصورت گام‌های زیر است (Mokhtarian-Asl and Sattarvand, 2016):

- ایجاد کردن آرایه‌های کشور با اندازه‌ی مساوی تعداد بلوک‌ها در مدل بلوکی معدن. مقدار سلول n در آرایه برابر است با یک در صورتی که بلوک استخراج شود و در غیر این صورت برابر است با صفر
 - انتخاب کردن تصادفی زیر آرایه در ارائه‌ی استعمارگر
 - کپی کردن استعمارگر زیر آرایه برای ارائه مستعمره
- معمولا مستعمره جذب شده در یک شکل کاواک امکان‌پذیر باعث نمی‌شود منتج به زاویه شیب و تقدم بلوک‌ها شود. در نتیجه روش نرمال‌سازی برای رفع تناقض ترتیب‌دهی محدودیت‌ها ضروریست. عملگر انقلاب الگوریتم رقابت استعماری را برای شناسایی مناطق جدید متنوع می‌سازد. ساز و کار انقلاب مانع به دام افتادن الگوریتم در بهینه محل می‌شود. برای این منظور ضعیف‌ترین مستعمره (برنامه‌ریزی تولید با پایین‌ترین ارزش خالص فعلی) در هر تکرار انتخاب شده است و با یک مستعمره جدید که بصورت تصادفی انتخاب می‌شود، جایگزین می‌شود. در حالیکه بسوی استعمارگر حرکت می‌کند، یک مستعمره می‌تواند به یک موقعیت با تابع

هزینه‌ی کمتر نسبت به استعمارگر خود برسد. در این شرایط موقعیت استعمارگر و مستعمره تعویض می‌شود. عمدتاً قدرت کل یک امپراتوری، بر اساس قدرت کشور استعمارگر است. به هر حال قدرت منحصر به فرد مستعمره همچنین تاثیر دارد، با اینکه ناچیز است.

یک بررسی عددی برای امتحان کارایی الگوریتم رقابت استعماری انجام شده در مسئله برنامه‌ریزی تولید است. یک کانسار مس با مدل بلوکی زمین‌شناسی که دارای ۲۰۰ بلوک است، در نظر گرفته شده است. برای ۵ سال بهره برداری از معدن انجام می‌شود و به ترتیب بیشترین و کمترین ظرفیت استخراج ۲۳ و ۱۷ بلوک است. بیشترین و کمترین ظرفیت فرآوری در سال به ترتیب ۱۵ و ۹ بلوک ماده‌ی معدنی را در نظر می‌گیرد و نرخ تنزیل ۱۰ درصد فرض شده است. تعداد دوره‌ها هم ۵ دوره در نظر گرفته شده است. روش پیشنهادی برای اجرای الگوریتم رقابت استعماری برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از محیط برنامه‌نویسی C++ انجام گرفته است.

روند تحقیقات این برنامه برای امتحان کارایی الگوریتم رقابت استعماری انجام شد. همانطور که پیش از این ذکر شد، فاکتورهای کنترل در روش الگوریتم رقابت استعماری، ξ ، تعداد کشورها (N_{pop}) و تعداد استعمارگر (N_{imp}) هستند. سطحی متفاوت از این فاکتورها در بهینه‌سازی استفاده شده است. با توجه به طبیعت تصادفی الگوریتم رقابت استعماری، هر مسئله ۱۰ بار حل شده است. بهترین پاسخ برای $N_{pop}=35$ ، $N_{imp}=5$ و $\xi=0/05$ تولید شده است. که درصد انحراف نسبی آن برابر است با ۱/۶۷ درصد. برای ارزیابی تاثیر هر فاکتور کنترل روی روند بهینه‌سازی الگوریتم، مقدار میانگین درصد انحراف نسبی برای ترکیبات متفاوت این فاکتورها انجام شده است. کارایی الگوریتم رقابت استعماری زمانی که تعداد کشورها و استعمارگرها افزایش پیدا می‌کند، بهتر می‌شود. همچنین کارایی خوبی در $\xi=0/05$ دارد. تعداد بلوک‌های داخل محدوده نهایی معدن در هر دو روش ریاضی و الگوریتم رقابت استعماری برابر در نظر گرفته شده است و مقایسه نشان می‌دهد که ارزش خالص فعلی محاسبه شده بوسیله‌ی الگوریتم رقابت استعماری، تقریباً با روش ریاضی برابر است. این مقدار حدوداً معادل ۱۹۹ دلار است. همچنین مقادیر کم درصد انحراف نسبی نشان دهنده‌ی اثر بخشی الگوریتم رقابت استعماری در برنامه‌ریزی تولید معدن است.

۲-۴-۳-۶- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک نخستین بار برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز در سال ۲۰۱۹ توسط علیپور و همکاران پیشنهاد شد. در گام نخست از الگوریتم، بسیاری از پاسخ‌های اولیه‌ی تصادفی به عنوان اندازه‌ی جمعیت اولیه تعیین شده‌اند. یک آرایه از دامنه‌ی پاسخ از الگوریتم ژنتیک شامل بلوک‌های $X \times Y \times Z$ با ابعاد $(60 \times 60 \times 17)$ تشکیل می‌شود. سپس هر جمعیت یک ماتریس است با ابعاد $(60 \times 60 \times 17)$ که بصورت P_{ijk} فراخوانی می‌شود که در آن $P_{ijk} = t$ به این معنی است که $block_{ijk}$ باید در دوره‌ی t استخراج شود. به‌طور مشخص جمعیت‌های اولیه محدودیت‌ها را برآورده نمی‌سازند. پس هر کدام از آن‌ها نرمال‌سازی می‌شود. در این نرمال‌سازی، اگر $block_{ijk}$ به دلیل محدودیت دسترسی قابلیت استخراج نداشته باشد (مثل زاویه‌ی شیب) بصورت اولیه $P_{i'j'k'} = 0$ فرض شده است. اگر $P_{ijk} > 0$ آنگاه، بلوک بالای P_{ijk} را در نظر می‌گیرد که در آن شیب متغیر لحاظ شده است (Alipour et al., 2019).

بر این اساس ارزش تجمعی بلوک‌ها به عنوان محدودیت بعدی هر دوره در نظر گرفته می‌شود. ابتدا بلوک‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که مرتبط با دوره‌ی اولیه ($P_{i'j'k'} = 1$) هستند اگر محدودیت‌ها برآورده شوند، سپس عملی انجام نمی‌گیرد. اگر مجموع ارزش‌های بلوک در دوره نخست بزرگتر از ظرفیت معدنکاری بیشینه باشد، آنگاه بسیاری از آن‌ها به دوره‌ی دوم انتقال داده می‌شوند و $P_{ijk} = 2$. اگر مجموع ارزش بلوک‌ها کمتر از ظرفیت معدنکاری بیشینه باشد، آنگاه بسیاری از بلوک‌های دیگر برای اعمال همه‌ی محدودیت‌های مشخص شده به دوره‌ی جاری انتقال داده می‌شوند. این عمل بصورت مشابه برای همه‌ی دوره‌ها انجام می‌گیرد. برای محدودیت ظرفیت فرآوری یک روش جریمه‌ای مخصوص در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه مقدار جریمه برای هر دوره محاسبه شده است. بدیهی است که یک پاسخ زمانی عملی است که جریمه‌ی آن صفر در نظر گرفته شود (Alipour et al., 2019).

تعداد ۵۳۲۷۱ بلوک در این روش تجزیه و تحلیل و ۱۰ دوره‌ی برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. از آن‌جا که مسئله مطالعه‌ی مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار CPLEX طی ۲۵ روز دقیق بهینه نشده است، از GA استفاده شده است. زمان محاسباتی مورد نیاز برای حل مسئله بوسیله‌ی الگوریتم ژنتیک حدود ۲۰ تا ۳۰

دقیقه است. Simsched یک نرم‌افزار کاربردی ادغام شده با روش‌های مدرن بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و روش‌های ابتکاری است. برای بررسی بیشتر الگوریتم ژنتیک، نتایج با خروجی‌های نرم‌افزار Simsched مقایسه شده است. NPV بدست آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار Simsched بترتیب ۳۴۹۴ و ۳۳۵۱ میلیون دلار مشاهده شده است. در انتهای دوره‌ی برنامه‌ریزی NPV کل بدست آمده الگوریتم ژنتیک ۱۴۴ میلیون دلار بالاتر از NPV بدست آمده از نرم‌افزار Simsched است که بهبود ۴ درصدی را نشان می‌دهد (Alipour et al., 2019).

۲-۵- کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی در مسائل دیگر

این الگوریتم علاوه بر برنامه‌ریزی تولید کاربردهای دیگری در مهندسی معدن دارد. یکی از این کاربردها در زمینه تهویه و دیگری در زمینه آتشکاری مربوط به پدیده پرتاب سنگ است. لازم به ذکر است که این الگوریتم علاوه بر مسائل مختلف مربوط به رشته مهندسی معدن مانند برنامه‌ریزی تولید و آتشکاری در رشته‌های مهندسی مانند مهندسی شیمی و مهندسی برق برای بهینه‌سازی جریان برق قدرت پایدار استفاده شده است.

۲-۵-۱- کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی در پرتاب سنگ

با توجه به نامطلوب بودن پدیده‌ی پرتاب سنگ در آتشکاری، به دلیل آسیب رساندن به تجهیزات اطراف و حتی کشنده بودن، این پدیده خطرناک‌ترین اثر آتشکاری تلقی می‌شود. برای کنترل و کاهش اثر این پدیده، پیش‌بینی آن ضروریست. به دلیل تعدد و پیچیدگی پارامترهای پرتاب سنگ، روش‌های تجربی برای برآورد این پدیده کاملاً مناسب نیستند. هدف از تحقیق انجام گرفته پیش‌بینی پرتاب سنگ ناشی از انفجار بوسیله‌ی یک روش جدید بر اساس الگوریتم تکامل تفاضلی است (Dehghani & Shafaghi, 2017).

برای این منظور پارامترهای مربوط به ۳۰۰ عملیات آتشکاری بصورت دقیق ثبت شده‌اند و برای هر عملیات فاصله پرتاب سنگ اندازه‌گیری شده‌اند و نتایج آن با دو روش تجربی مقایسه شده است که این نتایج نشان دهنده‌ی برتری این رویکرد نسبت به روش‌های تجربی بوده است (Dehghani & Shafaghi, 2017).

۲-۵-۲- کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی در تهویه

در شبکه تهویه معدن، توزیع منطقی جریان هوا برای ایمنی و اقتصاد بسیار مهم است. در این مطالعه برای جستجوی راه حل بهینه سراسری از الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. در هر مرحله از تکامل راه حل امکان پذیر برای توزیع مقدار هوا ابتدا بوسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته تولید شده و سپس پاسخ بهینه افت فشار تنظیم کننده تعیین شده است که این مقدار با شرط خاتمه تکرار به دست می‌آید. ابتدا جمعیت اولیه برای افزایش قابلیت جستجوی سراسری مرتب و گروه بندی شده و جمعیت مورد نظر برای حفظ تنوع به تصادف در یک گروه عمومی قرار گرفته‌اند (Kaiyan et al., 2015).

در ضمن اعضای نزدیک به همسایگی این گروه، برای دستیابی به تعادل بین بهینه سراسری و محلی مورد جستجو قرار گرفته است که باعث بهبود نرخ همگرایی می‌شود. در نهایت دو شبکه تهویه تک پروانه و چند پروانه حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مزایای استفاده از الگوریتم مورد نظر عبارتست از: اثربخشی بالا، همگرایی سریع، مقاومت و انعطاف پذیری خوب (Kaiyan et al., 2015).

۲-۶- جمع بندی

تا کنون روش‌های بسیار متنوعی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز پیشنهاد شده است. این روش‌ها بر اساس خاصیت جستجو محوری‌شان به روش‌های ریاضی، ابتکاری و هوش مصنوعی (فرا ابتکاری) تقسیم می‌شوند. لازم به ذکر است که در تعیین محدوده نهایی معادن روباز روش نظریه گراف یک روش بهینه و برای سنجش کارایی دیگر روش‌ها قابل استفاده است اما در مسئله برنامه‌ریزی تولید هیچ روش قابل قبولی نمی‌تواند نقش روش نظریه گراف را بازی کند.

فصل سوم

الگوریتم تکامل تفاضلی

۳-۱- مقدمه

امروزه بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حل کردن مسائل پیچیده‌ی دنیای واقعی مبتنی بر روش‌های فرا ابتکاری هستند که بر خلاف روش‌های تحقیق در عملیات سنتی است. یک الگوریتم فرا ابتکاری، روشی برای حل یک طبقه عمومی از مسائل بهینه‌سازی است. با توجه به توانایی الگوریتم‌های تکاملی در یافتن راه حل‌های عالی برای مسائل پویا و معمولاً در مدت قابل قبول، در سال‌های اخیر الگوریتم‌های تکاملی مورد توجه بسیاری از محققان و دست اندرکاران قرار گرفته‌اند.

این الگوریتم‌ها، روش‌های جستجوی تصادفی هستند که در بسیاری از مسائل جستجو، بهینه‌سازی و یادگیری ماشین با موفقیت بکار گرفته شده‌اند. الگوریتم تکامل تفاضلی یک الگوریتم فرا ابتکاری تکاملی است که به دلیل ساده بودن اخیراً بسیار مورد استفاده قرار گرفته است.

در این فصل به تعریف مسئله‌ی بهینه‌سازی، انواع جستجو در فضای مسئله، تعریف الگوریتم‌های فرا ابتکاری، الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم تکامل تفاضلی و یک نوع از الگوریتم تکامل تفاضلی با عنوان الگوریتم تکامل تفاضلی خود تطبیقی پرداخته شده است. در آخر هم از نظر کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات سنجیده شده است.

۳-۲- مسئله بهینه‌سازی

تقریباً هر نوع طراحی یا وظیفه‌ی تصمیم‌گیری که با تجارت، صنعت یا خدمات عمومی مواجه است، از نظر ماهیت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی است. از دیدگاه مدیریتی، یک مسئله بهینه‌سازی یک وضعیتی است که نیازمند تصمیم‌گیری برای انتخاب مجموعه‌ای از گزینه‌های احتمالی به منظور دستیابی به یک مزیت مورد نیاز از پیش تعیین شده با کمترین هزینه است. از دیدگاه ریاضی حل مسئله بهینه‌سازی نیازمند یافتن یک مقدار ورودی x^* است که یک تابع هدف اصطلاحاً f ، کوچک‌ترین یا بزرگترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد. به عبارت دیگر هر وظیفه که هدف نزدیک شدن به شکل خاصی را دارد به عنوان مطلوب در زمینه‌ی معیارهای از پیش تعریف شده، در نظر گرفته شود، می‌تواند به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مشاهده شود.

امروزه بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حل کردن مسائل پیچیده‌ی دنیای واقعی مبتنی بر روش‌های فرا ابتکاری است که بر خلاف روش‌های تحقیق در عملیات سنتی است. دلیل آن ساده است، به دلیل پیچیدگی مسائل است. حل مسائل در دنیای واقعی معمولاً به دلایل مختلف دشوار است که برخی از آن‌ها عبارتست از (Blum et al., 2012):

- الف. تعداد پاسخ‌های امکان‌پذیر ممکن است بسیار بزرگ باشد به‌طوری که جستجوی کامل برای بهترین پاسخ غیر عملی شود.
- ب. تابع هدف f ممکن است متناسب با زمان متفاوت باشد در نتیجه نه تنها یک راه حل واحد بلکه یکسری کامل از پاسخ‌ها نیازمند است.
- ج. پاسخ‌های ممکن آن‌قدر محدود است که تولید یک جواب عملی دشوار است، چه رسد به جستجو برای یک راه حل بهینه.

به طور طبیعی این فهرست می‌تواند گسترش یابد تا بسیاری از موانع احتمالی دیگر را نیز شامل شود. به عنوان مثال جنجال ناشی از مشاهدات، اندازه‌گیری، عدم اطمینان در مورد اطلاعات داده شده، مسائلی که دارای توابع متناقض چند منظوره هستند، تنها ذکر چند مورد است. علاوه بر این محاسبه‌ی مقادیر هدف ممکن است زمان زیادی طول بکشد و بنابراین، تعداد تابع هدف امکان‌پذیر برای فراخوانی می‌تواند کم باشد. تمام این دلایل فقط برخی از جنبه‌هایی هستند که یک مسئله بهینه‌سازی را دشوار می‌سازد. شایان ذکر است که هر زمان یک مسئله حل می‌شود، در واقعیت آن‌چه کشف شده است تنها راه حل یک مدل از مسئله است و همه‌ی مدل‌ها ساده‌سازی دنیای واقعی هستند. برای مثال، هنگام تلاش برای حل مسئله فروشنده دوره گرد، خود مسئله معمولاً بصورت گراف طراحی می‌شود که گره‌ها با شهرها مطابقت دارند و مرزها مثلاً مسافت بین شهرها با هزینه‌ها نمایش داده می‌شوند. پارامترهایی مانند ترافیک، آب و هوا، قیمت بنزین و زمان روز به‌طور معمول حذف می‌شوند.

با توجه به این، روند کلی حل مسئله بهینه‌سازی شامل دو مرحله جداگانه است. مرحله نخست ایجاد یک مدل از مسئله و مرحله دوم استفاده از آن مدل برای تولید راه حل است. باز هم راه حل در این جا یک راه حل از نظر مدل است. اگر مدل راستی بالایی داشته باشد، این راه حل به احتمال زیاد معنی‌دار خواهد بود. در مقابل، اگر در مدل بیش از حد فرضیات برآورده نشده و تقریب‌های بزرگ داشته باشد، ممکن است راه حل بی معنی و بدتر شود. از این منظر حداقل دو راه برای پیش‌برد حل مسائل در دنیای واقعی وجود دارد (Blum et al., 2012).

- تلاش برای ساده کردن مدل تا اینکه روش‌های معمول پاسخ‌های بهتری را برگرداند
- نگه‌داشتن مدل با تمام پیچیدگی‌های آن و استفاده از رویکردهای غیر متعارف برای یافتن یک راه حل تقریباً بهینه

بنابراین هرچه مسئله مشکل‌تر باشد، استفاده از روش‌های فرا ابتکاری مناسب‌تر است. در اینجا قابل رویت است که بدست آوردن راه حل‌های دقیق برای یک مسئله به هر حال دشوار خواهد بود. زیرا باید مدل یا راه حل تقریب زده شود. حجم زیادی از شواهد تجربی نشان داده است که رویکرد دوم اغلب می‌تواند برای مزایای عملی مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳- انواع الگوریتم‌های جستجو

به‌طور کلی تصمیم‌گیری برای چگونگی نمایش هر راه حل در یک مسئله، بر روی انتخاب روش مناسب برای حل آن مسئله تاثیر می‌گذارد. استفاده از یک الگوریتم جستجو برای حل یک مسئله، قبل از نهایی کردن چگونگی نمایش راه حل‌های آن، کاری غیر ممکن است. زیرا در صورت عدم نمایش راه حل‌های یک مسئله، هیچ‌گونه فضای جستجویی بوجود نخواهد آمد تا برای پویش در اختیار یک الگوریتم جستجو قرار گیرد. زمانی که هر راه حل، وضعیت یا پاسخ برای یک مسئله نمایش داده شد، به یک الگوریتم جستجو برای کاوش فضای راه حل‌های موجود نیاز داریم. در صورتی که معیار برای ایجاد تمایز بین راه حل‌های مختلف وجود داشته باشد، علاقمند به یافتن بهترین راه حل هستیم. عموماً دو نوع بهینگی وجود دارد محلی و سراسری. بهینگی محلی بهترین راه حل پیدا شده در یک ناحیه (همسایگی) از فضای جستجو می‌باشد، اما لزوماً بهترین راه حل

در همه فضای جستجو نیست. راه حل بهینه سراسری بهترین راه حل در همه فضای جستجو است (صنّعی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

یافتن بهینه سراسری در بیشتر مسائل واقعی کاری دشوار است. روش‌های جستجو معمولاً سعی می‌کنند بجای یافتن پاسخ بهینه، راه حل‌های رضایت بخش یا به اندازه‌ی کافی خوب را بیابند. برای جستجو راه حل‌های محلی، سراسری یا رضایت بخش، به استفاده از یک روش جستجو نیاز خواهیم داشت. در متون علمی سه نوع روش برای الگوریتم‌های جستجو وجود دارد روش‌های جستجو تحلیلی، نا آگاهانه و آگاهانه. در ادامه به توضیح هر کدام از آن‌ها خواهیم پرداخت (صنّعی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

۳-۳-۱- جستجوی تحلیلی

الگوریتم‌های جستجوی تحلیلی با استفاده از یک تابع ریاضی هدایت می‌شوند. برای مثال، برخی از الگوریتم‌های جستجو تحلیلی برای حل مسائل بهینه‌سازی، با استفاده از گرادیان و برخی دیگر با مشتق دوم هدایت می‌شوند. این الگوریتم‌ها، یافتن جواب بهینه را در صورت وجود تضمین می‌کنند (صنّعی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

۳-۳-۲- جستجوی نا آگاهانه

جستجوی نا آگاهانه یا کور به آن دسته از الگوریتم‌هایی اطلاق می‌شود که الگوریتم هیچ اطلاعات اضافه‌ای به جز آنچه در تعریف مسئله آمده است درباره‌ی هر نقطه (راه حل) از فضای جستجو ندارد. این الگوریتم‌ها تنها قادر به پیمایش فضای جستجوی درختی مساله و نیز تشخیص یک حالت هدف از یک حالت غیر هدف هستند. این نکته بسیار مهم است که کاربرد اصلی الگوریتم‌های جستجوی نا آگاهانه برای مسائلی است که بتوان وضعیت‌ها یا همان راه حل‌های موجود در فضای جستجو را به شکل یک درخت ترسیم نمود. در واقع انواع مختلف الگوریتم‌های جستجوی نا آگاهانه با توجه به انواع روش‌های ممکن برای پیمایش درخت جستجو حاصل شوند. این نوع الگوریتم‌ها که گاهی اوقات استراتژی پیمایشی آنها جستجوی هدایت نشده نیز عنوان می‌شود، به دو دسته قابل تقسیم هستند کامل و ناکامل (صنّعی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

روش جستجوی کامل، فضای جستجو را شمارش می‌کند (جاروب می‌کند) و با جستجوی کامل فضا، قادر است که همیشه یافتن راه حل‌های موجود را تضمین کند. یک روش جستجوی ناکامل، مجموعه‌ای از راه حل‌ها را تا زمانی که یک راه حل یافته شود، تولید می‌کند. روش‌های جستجوی ناکامل، یافتن یک راه حل را (در صورت وجود) تضمین نمی‌کنند. بایستی توجه نمود که روش‌های جستجوی کامل ممکن است بهینه و یا غیر بهینه باشند. یک روش جستجوی کامل و بهینه تضمین می‌کند که همیشه راه حل بهینه را بیابد در حالی که روش جستجوی کامل و غیر بهینه تنها می‌تواند در مورد یافتن یک راه حل که شاید لزوماً بهینه هم نباشد تضمین بدهد. بدیهی است که بحث بهینگی را نمی‌توان برای یک الگوریتم جستجوی ناکامل مطرح نمود (صنّعی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

۳-۳-۳- جستجوی آگاهانه

الگوریتم‌های جستجوی آگاهانه بر خلاف روش‌های جستجوی نا آگاهانه، که هیچ اطلاعاتی از فضای جستجو نداشتند، با بهره‌مندی از یک تابع تخمینی، استراتژی هوشمندانه‌تری را برای کاوش فضای جستجو در پیش می‌گیرند. روش‌های مبتنی بر جستجوی آگاهانه و یا مکاشفه‌ای می‌توانند راه حل‌ها را بیابند. الگوریتم‌هایی که در دسته جستجوی آگاهانه قرار می‌گیرند، خود به دو دسته مکاشفه‌ای و فرا مکاشفه‌ای قابل تفکیک هستند. الگوریتم‌های مکاشفه‌ای در یک فضای جستجوی منظم درختی سعی در یافتن جواب دارند و مهم‌ترین تفاوت آن‌ها با روش‌های جستجوی نا آگاهانه (که آن‌ها هم در یک فضای درختی عملیات پیمایشی خود را انجام می‌دادند)، در پیمایش هوشمندانه درخت جستجو است. الگوریتم‌های مکاشفه‌ای، گره‌هایی از درخت جستجو را که شانس نزدیک تر شدن به گره هدف با پیمایش آن‌ها افزایش می‌یابد، زودتر پیمایش می‌کنند (صنّعی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

در بسیاری از مسائل جستجو در دنیای واقعی، نمی‌توان فضای جستجو را به شکل یک درخت نمایش داد (مخصوصاً هنگامی که این فضا بسیار بزرگ و نامنظم باشد). در این گونه موارد نمی‌توان در استفاده از هیچ‌کدام از روش‌های جستجوی ذکر شده موفق بود. جستجوی فرا مکاشفه‌ای نام خانواده‌ای از الگوریتم‌های جستجوی آگاهانه است که در آن‌ها از یک پدیده طبیعی، برای کاوش فضای جستجو، الهام گرفته می‌شود.

الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای^۱ با الهام گرفتن از یک پدیده طبیعی این امکان را می‌یابند که فضای جستجو بسیار بزرگ طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی پیچیده را بصورت بسیار هوشمندانه‌ای مورد کاوش قرار دهند. منظور از هوشمندانه در اینجا آن است که الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای کل فضای جستجو را به دلیل بزرگی آن پیمایش نکرده (که به همین دلیل ناکامل و البته غیر بهینه هستند) و تنها به پیمایش بخشی از فضا که احتمال وجود یک پاسخ به اندازه کافی خوب در آن بیشتر است، اکتفا می‌کنند (صنعتی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

۳-۴- الگوریتم‌های فرا ابتکاری

یک الگوریتم فرا ابتکاری، روشی برای حل یک طبقه عمومی از مسائل بهینه‌سازی است. اقدامات کاربردی بصورت یک روش کارآمد امیدوارکننده و انتزاعی را بدون بینش‌های عمیق تر در مورد ساختار درونی آن‌ها، ترکیب می‌کند. الگوریتم‌های فرا ابتکاری نیاز به فرضیه در مورد مسئله بهینه‌سازی و هیچ نوع دانش قبلی درباره‌ی تابع هدف ندارد. بهبود تابع هدف به عنوان جعبه‌های سیاه برجسته‌ترین و جذاب‌ترین ویژگی الگوریتم‌های فرا ابتکاری است. این الگوریتم‌ها با استفاده از آمار بدست آمده از راه حل‌های ممکن (راه حل‌های کاندید) که در گذشته ارزیابی شده‌اند، در مورد ساختار یک مسئله بهینه‌سازی دانش کسب می‌کنند. این دانش برای تولید پاسخ‌های کاندید که احتمالاً دارای فایده‌ی بالایی است، استفاده شده است. الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌توانند بر اساس معیارهای متفاوت طبقه‌بندی شوند، برای مثال برخی از آن‌ها یک راه حل واحد را پردازش می‌کنند مانند تبرید شبیه‌سازی^۲ شده در حالی که برخی دیگر یک مجموعه‌ای از راه حل‌ها را پردازش می‌کنند و روش‌های جمعیت محور نامیده می‌شوند مانند الگوریتم‌های تکاملی. برخی از آن‌ها مانند تبرید شبیه‌سازی شده تصادفی است و برخی دیگر مانند جستجوی ممنوعه^۳ قطعی است. برخی از آن‌ها مانند

^۱ Metaheuristic

^۲ Simulated Annealing

^۳ Tabu Search

الگوریتم‌های تکاملی راه حل‌های کامل را اصلاح می‌کنند در حالی که بعضی دیگر در هر تکرار راه حل‌های جدید تولید می‌کنند مانند بهینه‌سازی کلونی مورچگان (Blum et al., 2012).

۳-۵- طبقه‌بندی الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای

معیارهای مختلفی می‌تواند برای طبقه‌بندی الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای استفاده شوند. این معیارها عبارتند از (صنّعی آباده و جبل عاملیان، ۱۳۹۴):

- **جمعیتی و غیر جمعیتی** الگوریتم‌های جمعیتی در حین جستجو، یک جمعیت از جواب‌ها را در نظر می‌گیرند. این درحالی است که الگوریتم‌های غیر جمعیتی (مبتنی بر یک جواب)، در حین فرایند جستجو یک جواب را تغییر می‌دهند.
- **زیستی و غیر زیستی** بسیاری از الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای از زندگی موجودات در طبیعت الهام گرفته شده‌اند و به عبارت دیگر زیستی هستند، در این میان برخی از الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای نیز از زندگی موجودات در طبیعت الهام گرفته نشده‌اند. بایستی توجه کنیم که الگوریتم‌های تکاملی نیز عضو خانواده الگوریتم‌های زیستی هستند.
- **تکاملی و غیر تکاملی** الگوریتم‌های زیستی که بصورتی مستقیم از فرا مکاشفه بقاء اصلح که مبتنی بر نظریه داروین است استفاده می‌کنند تکاملی محسوب می‌شوند. این درحالی است که سایر روش‌های جستجوی زیستی که بصورتی غیر مستقیم مبتنی بر فرا مکاشفه بقاء اصلح داروین هستند، غیر تکاملی هستند. تعلق غیر مستقیم مبتنی بر فرا مکاشفه روش‌های زیستی-غیر تکاملی به فرا مکاشفه بقاء اصلح داروین به این معناست که عملاً همگی این روش‌ها خود مولود فرایند تکامل می‌باشند.
- **با حافظه و بدون حافظه** برخی از الگوریتم‌های فرا مکاشفه ای فاقد حافظه می‌باشند، به این معناکه این الگوریتم‌ها از اطلاعات بدست آمده در حین فرایند جستجو استفاده نمی‌کنند (به‌طور مثال تبرید شبیه‌سازی شده). این درحالی است که در برخی از الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای نظیر جستجوی

ممنوعه از حافظه استفاده می‌شود. این حافظه، اطلاعات بدست آمده در حین جستجو را در خود ذخیره می‌کند.

- **احتمالی و قطعی** در الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای احتمالی نظیر تبرید شبیه‌سازی شده، یک سری قوانین احتمالی در حین جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما یک الگوریتم فرا مکاشفه‌ای قطعی نظیر جستجوی ممنوعه، مسئله را با استفاده از تصمیمات قطعی حل می‌کند.

- **روش‌های علامت-محور:** دسته‌ای از الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی، از یک حافظه محیطی مشترک برای برقراری ارتباط غیر مستقیم میان موجودات بهره می‌برند. این حافظه محیطی در الگوریتم‌های مبتنی بر رفتار مورچه‌ها با ترشح و تبخیر فرمون مدیریت می‌شود. حافظه محیطی در الگوریتم‌های مبتنی بر رفتار زنبور عسل، با توجه به رفتار رقص گونه زنبورها در هنگام یافتن مکان‌های غنی از گل‌های خوشبو مدل‌سازی می‌شود. الگوریتم‌هایی از این دست که ارتباط میان موجودات در آن‌ها بصورت غیر مستقیم بوده (استیگمرجی) و فاقد هرگونه رفتار تقلیدگونه مستقیم هستند، علامت-محور نامیده می‌شوند.

- **روش‌های تقلید-محور:** دسته‌ای از الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی از یک مفهوم سرعت، اینرسی و یا تکامل حرکتی در فرایند جستجوی خود بهره می‌برند. در این روش‌ها ارتباط میان موجودات در جمعیت بصورت مستقیم می‌باشد و هیچ حافظه مشترکی وجود ندارد. موجود مذکور تمایلی را به سمت بهترین پاسخ‌های محلی و سراسری دارد. در این‌گونه رفتار معمولاً برخی از موجودات دسته به عنوان سرگروه یا رهبر مورد توجه سایر موجودات دسته قرار می‌گیرند. پرندگان و ماهی‌ها نمونه‌هایی از این‌گونه موجودات هستند.

۳-۶- الگوریتم‌های تکاملی

به عنوان یک مظهری از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی جمعیت محور که از تکامل طبیعی تقلید می‌کنند، الگوریتم‌های تکاملی از عملگرهای ژنتیکی مانند کراس‌اور و جهش برای فرایند جستجو برای تولید راه حل‌های جدید از طریق کاربرد مکرر تغییر و انتخاب، استفاده می‌کند. الگوریتم‌های تکاملی با توجه به

توانایی آن‌ها در یافتن راه حل‌های عالی برای مسائل پویا و معمولاً در مدت قابل قبول، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان و دست‌اندرکاران قرار گرفته‌اند. خاصیت جعبه سیاه گونه‌ی همه منظوره الگوریتم‌های تکاملی، آن‌ها را برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای دنیای واقعی مناسب ساخته است. الگوریتم‌های تکاملی استاندارد مانند ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیک^۱، بیشتر و بیشتر در صنعت و تجارت پذیرفته شده‌اند. با افزایش چشمگیر قدرت محاسباتی امروز، یک گوناگونی باورنکردنی حوزه‌های کاربردی جدید از این روش‌ها قابل مشاهده است. بصورت همزمان انواع و سایر طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی تکاملی مانند تکامل تفاضلی، الگوریتم‌های توزیع تخمین، مجموعه الگوریتم‌های تکاملی و الگوریتم‌های تکاملی چند منظوره، توسعه داده شده‌اند (Chiong et al., 2012).

الگوریتم‌های تکاملی، روش‌های جستجوی تصادفی هستند که در بسیاری از مسائل جستجو، بهینه‌سازی و یادگیری ماشین^۲ با موفقیت بکار گرفته شده‌اند. یک تابع ارزیابی یک مقدار برازندگی را برای هر یک از اعضا شریک می‌کند که نشان دهنده‌ی مناسب بودن آن‌ها برای مسئله است. این الگوریتم متعارف عملکردهای تصادفی مانند انتخاب، کراس‌اور و جهش بر روی یک جمعیت تصادفی اولیه به منظور محاسبه تمام نسل اعضای جدید استفاده می‌کند. (Alba and Tomassini, 2002).

در ذیل برخی از مفاهیم مهمی که در الگوریتم‌های تکاملی به وفور از آن‌ها یاد می‌شود تشریح شده‌اند (صنّعی آباد و جبل عاملیان، ۱۳۹۴):

- **کروموزوم اطلاعات ژنی** یک موجود در کروموزوم ذخیره می‌شود. هر کروموزوم از DNA تشکیل شده است. در یک الگوریتم تکاملی منظور از کروموزوم، یک رشته، گراف، درخت و دنباله‌ی صفر و یک است که معمولاً معادل یک پاسخ برای مسئله مورد بررسی است.
- **ژن** کروموزوم‌ها به چندین قسمت تقسیم‌بندی می‌شوند که ژن نام دارند. ژن‌ها خصوصیات گونه‌ها یا همان افراد را تشکیل می‌دهند. در یک الگوریتم تکاملی، هر پاسخ از چندین بخش تشکیل

^۱ Genetic Programming

^۲ Machine Learning

شده است که به هر کدام از آن بخش‌ها یک مشخصه یا ویژگی گفته می‌شود. مشخصه یا ویژگی در هر پاسخ معادل ژن در کروموزوم است.

- آلل^۱ هر ژن مجموعه‌ای از مقادیر مجاز را می‌تواند اختیار کند. به هر کدام از این مقادیر یک آلل گفته می‌شود. به عنوان مثال یک ژن مربوط به رنگ چشم است و آلل‌های ممکن برای آن عبارتند از خاکستری، قهوه‌ای، آبی، سبز و عسلی (و نه سفید). در یک الگوریتم تکاملی، مقادیر مجاز برای مشخصه‌های هر پاسخ معادل مفهوم آلل است.
- ژنوتایپ^۲ ترکیب کامل تمامی ژن‌ها برای یک فرد مشخص، ژنوتایپ (ژنوتیپ) نامیده می‌شود. دنباله‌ی ژنی مربوط به هر پاسخ در یک الگوریتم تکاملی ژنوتایپ آن پاسخ را نشان می‌دهد.
- فنوتایپ^۳ خصوصیات ظاهری یک شخص که از رمزگشایی یک ژنوتایپ حاصل می‌شود، فنوتایپ (فنوتیپ) نامیده می‌شود. به عبارت دیگر تجلی معنایی ژنوتایپ مربوط به یک پاسخ در دنیای واقعی گویای فنوتایپ آن پاسخ است.
- برازش شایستگی یک موجود در یک جمعیت، برازش آن موجود نامیده می‌شود. برازش هر پاسخ در جمعیت با توجه به شایستگی فنوتایپ آن پاسخ تعیین می‌گردد. در یک الگوریتم تکاملی، با استفاده از یک یا چند تابع، برازش هر پاسخ محاسبه می‌شود. تابع برازش تنها ارتباط یک الگوریتم تکاملی با مسئله مورد تحلیل است.

از نظر بیولوژیکی، جهش به معنی تغییر ناگهانی در مشخصات ژن یک کروموزوم است. اما در زمینه‌ی الگوی محاسباتی تکاملی، به هر حال جهش نیز به عنوان یک تغییر یا یک آشفستگی با یک عنصر تصادفی مشاهده می‌شود (Das and Suganthan, 2011).

^۱ Allele

^۲ Genotype

^۳ Phenotype

۳-۷- مراحل یک الگوریتم تکاملی

فرایند تکامل از طریق انتخاب طبیعی موجودات در یک جمعیت را می‌توان بصورت یک جستجو در فضای مقادیر ممکن کروموزوم‌ها در نظر گرفت. در این صورت یک الگوریتم تکاملی، جستجویی هوشمندانه و فرا مکاشفه‌ای است برای یافتن یک راه حل به اندازه کافی خوب برای مسئله داده شده. مراحل یک الگوریتم تکامل عبارتند از (صنعی آباد و جبل عاملیان، ۱۳۹۴)

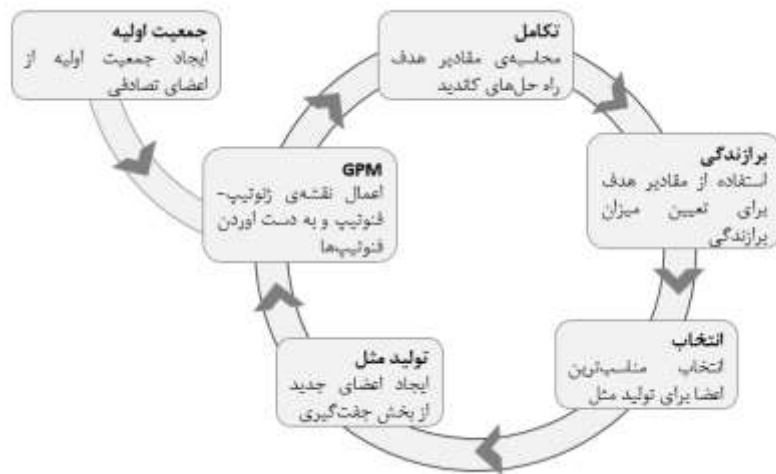
- مرحله ۱- تولید جمعیت اولیه: در این مرحله یک جمعیت از کروموزوم‌ها یا همان پاسخ‌های مسئله تولید می‌شود. بدیهی است که قبل از تولید جمعیت اولیه بایستی نحوه‌ی نمایش کروموزوم‌ها، که گویای یک پاسخ برای مسئله‌ی مورد بررسی است، تعیین شود. خروجی مرحله‌ی نخست یک جمعیتی از پاسخ‌هاست.
- مرحله ۲- محاسبه‌ی برازش جمعیت ورودی: در این مرحله برازش تک تک کروموزوم‌های جمعیت تولید شده با توجه به تابع برازش تعیین شده، محاسبه می‌شود. خروجی این مرحله یک جمعیت از پاسخ‌های ارزیابی شده می‌باشد.
- مرحله ۳- انتخاب برای تولید مثل: در این مرحله، آن دسته از اعضاء جمعیت ورودی که برازش بالاتری نسبت به سایر اعضا دارند، برای تبیین قانون بقاء اصلح داروین، انتخاب می‌شوند. خروجی این مرحله جمعیتی از والدین برازنده است.
- مرحله ۴- باز ترکیب والدین انتخاب شده: در این مرحله، با توجه به جمعیت والدین برازنده و با استفاده از عملگر باز ترکیب، جمعیتی از فرزندان تولید می‌شوند. اعمال عملگر باز ترکیب، با توجه به یک پارامتر با نام احتمال باز ترکیب (P_C) انجام می‌شود. خروجی این مرحله جمعیتی از فرزندان تولید شده است.
- مرحله ۵- جهش فرزندان تولید شده: در این مرحله، فرزندان جدید مرحله قبل تحت عملگر جهش قرار می‌گیرند. البته عملگر جهش با یک احتمال بر روی دنباله‌ی ژنی فرزندان رخ می‌دهد. این احتمال با نام احتمال جهش (P_m) شناخته می‌شود. خروجی این مرحله جمعیتی از فرزندان جهش‌یافته است.

- مرحله ۶- محاسبه برازش جمعیت فرزندان: در این مرحله، شایستگی فرزندان جهش یافته با استفاده از تابع برازش، محاسبه می‌شود. خروجی این مرحله، جمعیت فرزندان ارزیابی شده است.

- مرحله ۷- انتخاب برای جایگزینی: در این مرحله، با توجه به جمعیت والدین (ورودی مرحله ی سوم) و جمعیت فرزندان ارزیابی شده (خروجی مرحله ی ششم) یک جمعیت جدیدی برای نسل بعد (هر تکرار در این الگوریتم معادل یک نسل است) تولید می‌شود. بدیهی است که خروجی این مرحله جمعیتی است که در آن بخشی از والدین نسل قبل و تعدادی از فرزندان جدید تولید شده نسل جاری وجود دارند.

- مرحله ۸- بررسی شرط توقف: در این مرحله، در مورد ادامه فرایند تکاملی الگوریتم تصمیم‌گیری می‌شود. در صورت عدم ارضاء شرط توقف، فرایند تکاملی الگوریتم با رجوع به مرحله ۳ ادامه می‌یابد. در غیر این صورت الگوریتم متوقف شده و بهترین پاسخ در آخرین نسل به عنوان حاصل جستجوی تکاملی در خروجی ارائه می‌شود.

به‌طور خلاصه، اصول داروینی تکامل نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، گونه‌ها برازندگی خود را در طول نسل‌ها بهبود می‌بخشند (یعنی توانایی آن‌ها برای سازگاری با محیط). شبیه‌سازی تکامل مبتنی بر مجموعه‌ای از راه حل‌های کاندید که برازندگی آن به خصوص با تابع هدف برای بهینه‌سازی ارتباط دارد، به‌طور متوسط منجر به بهبود برازندگی آن‌ها می‌شود و بنابراین جمعیت شبیه‌سازی شده را به سمت راه حل سوق می‌دهد. مانند طبیعت یک فرد ممکن است دو ارائه متفاوت داشته باشد ساختار داده‌ای که با روش‌های جستجوی ژنتیکی پردازش می‌شود و شکلی که بوسیله‌ی محیط ارزیابی می‌شود (و در نهایت به اپراتور انسانی داده می‌شود). مانند زیست‌شناسی، در زمینه‌ی الگوریتم تکاملی نمایه‌ی قبلی به عنوان ژنوتیپ و بعدی به عنوان فنوتیپ شناخته می‌شود. معمولاً الگوریتم‌های تکاملی با طرح نشان داده شده در شکل ۳-۱ ادامه می‌یابد (Blum et al., 2012).



شکل ۳-۱: مراحل الگوریتم‌های تکاملی (Blum et al., 2012).

۳-۸- الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی یک روش جستجوی مستقیم است که از بردارهای پارامتری D -بعدی جمعیت محور استفاده می‌کند. به عنوان یک جمعیت برای هر نسل G ، تعداد جمعیت در طول فرایند تغییر نمی‌کند. جمعیت برداری اولیه بصورت تصادف انتخاب می‌شود و باید کل فضای پارامتر را پوشش دهد. این الگوریتم با افزودن اختلاف وزن بین دو بردار جمعیت به بردار سوم، بردارهای جدید پارامتری ایجاد می‌شود. پارامترهای بردار جهش‌یافته سپس با پارامترهای دیگر بردار از قبل تعیین شده (بردار هدف) مختلط می‌شود که بردار سنجش حاصل شده و به این اختلاط کراس‌اور گفته می‌شود. هر بردار جمعیت باید یکبار به عنوان تابع هدف انجام وظیفه کند تا اینکه رقابت تعداد جمعیت در یک نسل صورت پذیرد (Storn and Price, 1997).

۳-۸-۱- ایجاد جمعیت اولیه

این الگوریتم با یک جمعیت اولیه تصادفی از تعداد جمعیت پارامتر برداری با ارزش واقعی آغاز می‌شود. هر بردار به عنوان کروموزوم شناخته می‌شود که یک راه حل کاندید را برای مسائل بهینه‌سازی چند بُعدی تشکیل می‌دهد. با توجه به تغییر احتمالی بردارها در نسل‌های بعدی رابطه ۳-۱ برای نمایش i امین بردار جمعیت در نسل فعلی ارائه شده است. برای هر پارامتر مسئله یک محدوده‌ی خاصی ممکن است وجود داشته باشد که در آن مقدار پارامتر محدود شود. اغلب به این دلیل است که پارامترها به مولفه‌های فیزیکی یا اندازه‌گیری که

دارای مرز طبیعی هستند، مربوط می‌شود (برای مثال برای پارامترهای طول یا جرم). تا حد امکان بوسیله‌ی اعضای به‌طور یکنواخت تصادفی، جمعیت اولیه در نسل صفر باید این محدوده را پوشش دهد که بوسیله‌ی حد بالا و پایین تعیین شده در فضای جستجو محدود شده است. رابطه ۳-۲ نشان دهنده‌ی نحوه ایجاد جمعیت اولیه‌ی مولفه‌ی z از بردار i ام است. که در آن $rand_{i,j} [0, 1]$ یک عدد تصادفی توزیع یکنواخت بین صفر و یک است (Das and Suganthan, 2011).

$$X_{i,G} = [x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, x_{3,i,G}, \dots, x_{D,i,G}] \quad (۱-۳)$$

$$u_{j,i,0} = x_{j,min} + rand_{i,j} [0, 1] \cdot (x_{j,max} - x_{j,min}) \quad (۲-۳)$$

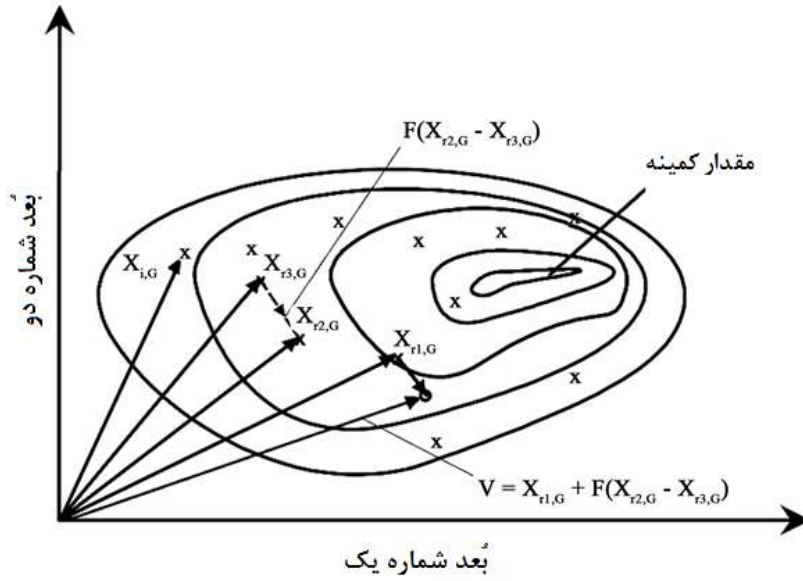
۳-۸-۲- عملگر جهش

برای هر بردار هدف یک بردار جهش با شاخص‌های تصادفی r_1, r_2 و r_3 بصورت رابطه ۳-۴ تولید می‌شود. و تعداد جمعیت باید بزرگتر یا مساوی ۴ باشد. F یک فاکتور واقعی و ثابت است و $\epsilon \in [0, 2]$ که تقویت تغییرات تفاضل بردارها را کنترل می‌کند. شکل ۳-۲ نشان دهنده‌ی یک مثال دو بعدی است که بردارهای متفاوت را به تصویر می‌کشد که یک قسمت در نسل بردار جهش یافته را بازی می‌کند (Storn and Price, 1997).

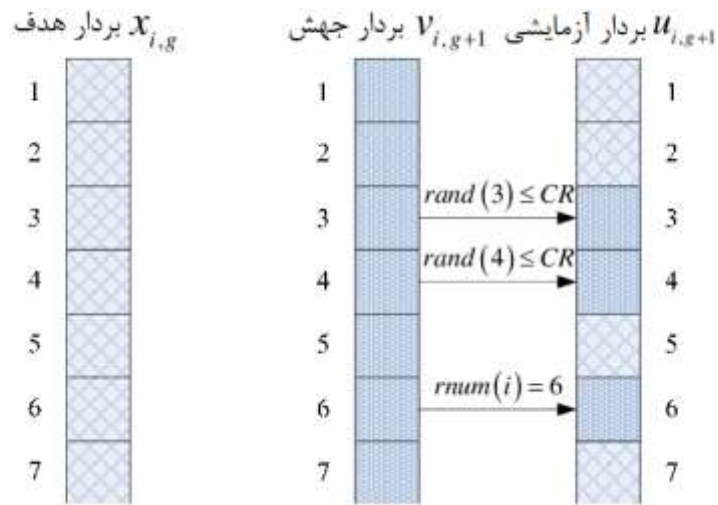
$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (۳-۳)$$

۳-۸-۳- عملگر تقاطع

به منظور افزایش تنوع در بردارها کراس‌اور معرفی می‌شود. بدین منظور بردار سنجش بصورت روابط ۳-۴ و ۳-۵ تعریف می‌شود. که در آن $randb(j)$ زامین ارزیابی یک تولیدکننده‌ی عدد تصادفی یکنواخت است که $\epsilon \in [0, 1]$ است. CR ثابت کراس‌اور که $\epsilon \in [0, 1]$ است و باید بوسیله‌ی کاربر تعیین شود. $mnbr(i)$ یک شاخصی است که بصورت تصادفی انتخاب می‌شود $\epsilon 1, 2, \dots, D$ است و تضمین می‌کند بردار جهش حداقل یک پارامتر از بردار جهش می‌شود. شکل ۳-۳ نشان دهنده‌ی یک مثال از ساز و کار کراس‌اور با بردارهای هفت بعدی است (Storn and Price, 1997).



شکل ۳-۲: یک مثال دو بعدی تابع هزینه و نمایش حد فاصل خطوط آن و فرایند برای تولید $u_{i,G+1}$ (Storn and Price, 1997).



شکل ۳-۳: فرایند کراس اور با $D=7$ پارامتر (Storn and Price, 1997).

$$u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1}, u_{2i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1}) \quad (۴-۳)$$

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } (rand(j) \leq CR) \text{ or } j \neq rnbr(i) \\ x_{ji,G} & \text{if } (rand(j) > CR) \text{ or } j = rnbr(i) \end{cases} \quad (۵-۳)$$

۳-۸-۴- عملیات انتخاب

بردار سنجش و بردار هدف با استفاده از یک معیار حریصانه مقایسه می‌شوند. اگر بردار سنجش $u_{i,G+1}$ مقدار تابع هزینه کوچکتر نسبت به بردار هدف $x_{i,G}$ را نشان دهد در نتیجه $x_{i,G+1}$ جایگزین $u_{i,G+1}$ می‌شود و در غیر این صورت، بردار قدیمی $x_{i,G}$ حفظ می‌شود (Storn and Price, 1997).

از این رو، جمعیت در وضعیت برازندگی، یا بهتر می‌شود یا اینکه جمعیت باقی می‌ماند، اما هرگز بدتر نمی‌شود. رابطه ۳-۶ نشان‌دهنده‌ی مرحله‌ی انتخاب الگوریتم تکامل تفاضلی است (Das and Suganthan, 2011).

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} u_{ji,G+1} & \text{if } (u_{ji,G+1} \leq x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{if } (u_{ji,G+1} > x_{i,G}) \end{cases} \quad (۳-۶)$$

از انواع الگوریتم تکامل تفاضلی می‌توان به DE/x/y/z اشاره کرد. X بردار جهش‌یافته را مشخص می‌کند که در حال حاضر می‌تواند rand (یک بردار جمعیت که تصادفی انتخاب شده است) یا best (بردار کمترین هزینه از جمعیت فعلی) باشد. y تعداد بردارهای اختلاف است. z نشان‌دهنده‌ی طرح کراس‌اور است. با این اوصاف یک روش بسیار سودمند که شایان به ذکر است، روش DE/best/2/bin است که طبق رابطه ۳-۷ در سال ۱۹۹۶ توسط پرایس پیشنهاد شد. استفاده از دو بردار اختلاف به نظر می‌رسد تنوع جمعیت را در صورت کافی بودن تعداد بردارهای جمعیت، بهبود می‌بخشد. تکامل تفاضلی یک استراتژی ساده و سرراست است. موتور جستجوگر اصلی این الگوریتم در کمتر از ۳۰ سطر کدنویسی قابل نوشتن است. همچنین استفاده از تکامل تفاضلی بسیار آسان است زیرا تنها به چند متغیر کنترل قدرت‌مند نیاز دارد که می‌توان از یک بازه عددی به خوبی تعریف شده آن را تهیه کرد (Storn and Price, 1997).

$$u_{i,G+1} = x_{best,G} + F \cdot (x_{r1,G} + x_{r2,G} - x_{r3,G} - x_{r4,G}) \quad (۳-۷)$$

با افزایش پیچیدگی مسائل بهینه‌سازی دنیای واقعی، تقاضا برای بهینه‌سازهای قوی، سریع و دقیق در بین محققان حوزه‌های مختلف رو به افزایش است. بیش از یک دهه قبل الگوریتم تکامل تفاضلی به عنوان یک طرح ساده و کارآمد برای بهینه‌سازی سراسری فراتر از فضاها پیوسته پدیدار شد. در الگوریتم تکامل

تفاضلی هیچ توزیع احتمالی برای تولید فرزندان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های تکاملی بسیار ساده‌تر برای پیاده‌سازی است. بدنه اصلی این الگوریتم چهار تا پنج خط را برای کدنویسی در هر زبان برنامه‌نویسی به خود اختصاص می‌دهد (Das and Suganthan, 2011).

الگوریتم تکامل تفاضلی، دارای شباهت‌های بسیاری با سایر الگوریتم‌های تکاملی است اما اساساً از جهت استفاده از اطلاعات جمعیت کنونی برای هدایت فرایند جستجو با کلیه روش‌های تکاملی متفاوت است. چون در الگوریتم تکامل تفاضلی از عملگر انتخاب، به عنوان راهکار اعمال قانون بقاء اصلح داروین، استفاده نمی‌شود (نه برای تولید مثل و نه برای جایگزینی) بنابراین نمی‌توان ذات نسخه اولیه این الگوریتم را تکاملی دانست. لیکن به دلیل بهره‌مندی این الگوریتم از یک عملگر منحصر به فرد باز ترکیب (که مبتنی بر تفاوت‌های پاسخ‌ها در جمعیت است) و البته امکان بهره‌برداری از عملگر انتخاب بدون نیاز به اعمال تغییرات بنیادین در تکامل تفاضلی استاندارد، این الگوریتم را به عنوان یک روش تکاملی مورد بررسی قرار می‌دهیم. خصوصیات مهم تکامل تفاضلی عبارتند از (صنّعی آباء و جبل عاملیان، ۱۳۹۴).

- الگوریتم تکامل تفاضلی به دلیلی انجام عملگر باز ترکیب بر روی کلیه اعضا و نه فقط بهترین اعضا در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی توانایی پویای بیشتری دارد.
- برخلاف استراتژی‌های تکامل و برنامه‌نویسی تکاملی، در این الگوریتم اندازه‌های گام از یک توزیع شناخته شده از قبل نمونه‌گیری نمی‌شوند.
- اندازه‌های گام، تحت تاثیر تفاوت بین موجودات جمعیت کنونی است.
- میزان فاصله اولیه بین موجودات تحت تاثیر اندازه جمعیت است. هر چقدر که موجودات در یک جمعیت بیشتر باشند، فاصله بین آن‌ها کمتر است.
- اندازه جمعیت دارای تاثیر مستقیم بر روی قابلیت پویای تکامل تفاضلی است. هر چقدر که تعداد موجودات در جمعیت بیشتر باشد، بردار تفاضل بیشتری در دسترس می‌باشد و جهت‌های بیشتری قابل جستجو هستند. در هر حال باید توجه داشت که پیچیدگی محاسباتی هر نسل با اندازه جمعیت افزایش می‌یابد.

- فاصله بین موجودات، نمایش دهنده تنوع در جمعیت کنونی و اندازه‌های گامی است که باید برای رسیدن به یک نقطه برداشته شود. در صورتی که بین موجودات فاصله زیادی باشد، موجودات باید گام‌های بزرگی را برای پویش بهتر فضای جستجو بردارند. از طرف دیگر، اگر فاصله بین موجودات کم باشد، اندازه گام‌ها باید کوچک باشد.

۳-۹- پارامترهای کنترل در تکامل تفاضلی

سه پارامتر اصلی کنترل برای الگوریتم تکامل تفاضلی وجود دارد فاکتور مقیاس جهش، ثابت کراس‌اور و اندازه جمعیت. در سال ۱۹۹۵ توسط استورن و پرایس نشان داده شد که یک مقدار معقول برای اندازه جمعیت بین ۵ و ۱۰ و یک فاکتور مقیاس جهش خوب مقدار ۰/۵ است. دامنه تاثیرگذار فاکتور مقیاس معمولاً بین ۰/۴ تا ۱ است (Das and Suganthan, 2011). یک انتخاب اولیه خوب برای ثابت کراس‌اور مقدار ۰/۱ است اما با توجه به اینکه مقدار بزرگ برای این ثابت، سبب بالاتر رفتن سرعت همگرایی می‌شود، سعی می‌شود مقدار ۰/۱ یا ۰/۹ برای این ثابت در نظر گرفته شود تا این که سرعت دست‌یابی به پاسخ افزایش یابد (Storn and Price, 1997).

۳-۱۰- الگوریتم تکامل تفاضلی خود تطبیقی

پارامترهای کنترل و فراگیری استراتژی‌های موجود در تکامل تفاضلی بسیار وابسته به مسائل مورد بررسی است. برای یک کار خاص، ممکن است زمان زیادی صرف امتحان استراتژی‌های مختلف و تنظیم دقیق پارامترهای مرتبط شود. این معضل انگیزه می‌دهد تا الگوریتم تکامل تفاضلی خود تطبیقی برای حل مسائل با کارآمدی بیشتر، ارائه شود. همچنین، در مراحل مختلف تکامل، استراتژی‌های مختلف و تنظیم پارامترهای مرتبط با قابلیت جستجوی سراسری و محلی ممکن است ارجح باشد. ایده پیشنهاد فراگیری استراتژی تطبیقی این است که احتمالاً یکی از چندین استراتژی‌های فراگیری موجود انتخاب و برای جمعیت فعلی اجرا شود. در پیاده‌سازی مورد نظر دو فراگیری استراتژی کاندید می‌شوند یعنی rand/1/bin و best/2/bin که (جهش در آن‌ها) به ترتیب برابر با رابطه ۳-۸ و ۳-۹ هستند (Qin and Suganthan, 2005).

$$v_{i,G} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (۸-۳)$$

$$u_{i,G+1} = x_{i,G} + F \cdot (x_{best,G} - x_{i,G}) + F \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (۹-۳)$$

دلیل انتخاب این دو استراتژی، استفاده‌ی رایج در بسیاری از آثار گذشته الگوریتم تکامل تفاضلی و گزارش اجرای خوب روی مسائلی با خصوصیات متمایز، است. در میان آن‌ها استراتژی rand/1/bin معمولاً تنوع خوبی را نشان می‌دهد درحالی‌که استراتژی best/2/bin خاصیت همگرایی خوبی را نشان می‌دهد. از آن‌جا که دو استراتژی کاندید شده‌اند، با فرض بر این‌که احتمال استفاده از استراتژی rand/1/bin برای هر یک از اعضا در جمعیت جاری برابر با P_1 باشد، احتمال استفاده از استراتژی best/2/bin بصورت $P_2 = 1 - P_1$ خواهد بود. اگر احتمالات اولیه برابر با 0.5 در نظر گرفته شود یعنی $P_1 = P_2 = 0.5$. بنابراین هر دو استراتژی برای استفاده برای هریک از اعضا در جمعیت اولیه، احتمال یکسان دارند. برای اندازه‌ی جمعیت NP یک بردار از اندازه‌ی NP با توزیع یکنواخت [0,1] برای هر عنصر به تصادف تولید می‌شود. اگر زامین مقدار عنصر بردار کوچکتر یا مساوی با P_1 باشد، استراتژی rand/1/bin برای زامین عضو در جمعیت فعلی و در غیر این صورت استراتژی دوم استفاده می‌شود (Qin and Suganthan, 2005).

بعد از ارزیابی از همه‌ی بردارهایی آزمایشی که اخیراً تولید شده‌اند، تعدادی از بردارهای آزمایشی که با موفقیت به نسل بعد منتقل می‌شوند زمانیکه بوسیله‌ی استراتژی نخست و دوم تولید شده باشند بترتیب ns_1 و ns_2 ثبت می‌شوند و زمانیکه تعدادی از بردارهای آزمایشی بوسیله‌ی استراتژی نخست و دوم دور انداخته می‌شوند بترتیب nf_1 و nf_2 ثبت می‌شوند. این دو تعداد با یک تعداد مشخص از نسل که جمع‌آوری می‌شوند، دوره‌ی فراگیری نامیده می‌شوند (Qin and Suganthan, 2005).

در نهایت احتمال P_1 بصورت رابطه ۳-۱۰ به‌روز می‌شود که عبارت مورد نظر نشان‌دهنده‌ی نرخ موفقیت بردار سنجش تولید شده بوسیله‌ی استراتژی نخست در جمع‌بندی آن نرخ موفقیت بردار سنجش تولید شده بوسیله‌ی استراتژی دوم در طول دوره فراگیری است. بنابراین احتمال استفاده از دو استراتژی بعد از دوره‌ی فراگیری به‌روز می‌شوند. همچنین همه‌ی کنتورهای ns_1 , ns_2 , nf_1 و nf_2 یک‌بار بروز می‌شوند تا از اثر زیان‌آور انباشته شده قبل از مرحله‌ی فراگیری جلوگیری شود. این روش تطبیقی می‌تواند بتدریج با

مناسب‌ترین فراگیری استراتژی در مراحل مختلف فراگیری برای مسئله تحت شرایط تکامل یابد (Qin and Suganthan, 2005).

$$P_1 = ns_1 \cdot (ns_2 + nf_2) / ns_2 \cdot (ns_1 + nf_1) + ns_1 \cdot (ns_2 + nf_2), P_1 = 1 - P_1 \quad (۱۰-۳)$$

با این میانگین توزیع نرمال جدید و انحراف معیار 0.1، مجدداً روش مورد نظر تکرار می‌شود. در نتیجه، محدوده مقدار کراس‌اور مناسب برای مسئله جاری متناسب با مسئله خاص فراگرفته می‌شود. باید توجه داشت که مقادیر کراس‌اور که با موفقیت ثبت شده است، یکبار خالی خواهد شد و برای دوری از تأثیرات انباشت نا مناسب بلند مدت احتمالی، میانگین توزیع نرمال محاسبه دوباره خواهد شد (Qin and Suganthan, 2005).

۳-۱۱- سنجش کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی

در سال ۲۰۱۳ تحقیقی برای بررسی کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی صورت گرفته است که هدف از این تحقیق مقایسه کارایی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تکامل تفاضلی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بوسیله‌ی تنظیم پارامترهای یکسان و مسائل بهینه‌سازی است. به هر حال با توجه به توابعی که به تصادف برای اجرا انتخاب شده‌اند، نتیجه‌ی دقیقی حاصل نشده است (Lim and Heron, 2013).

تنظیم پارامترها بر اساس پیشنهادهای تحقیقات قبلی اختصاص داده شده است. در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های تکاملی، DE بهتر و ساده‌تر است. با توجه به این که عملگر جهش و کراس‌اور به عنوان یک فرایند در نظر گرفته شده‌اند، هیچ پارامتر استاندارد برای الگوریتم تکامل تفاضلی وجود ندارد. حداکثر نسل به عنوان شرط خاتمه استفاده شده است (Lim and Heron, 2013).

برخی از توابع معیار با طیفی از مجموعه داده که به عنوان تابع برازندگی برای امتحان کارایی هر روش استفاده می‌شوند، انتخاب شده‌اند. مقایسه‌ی سه الگوریتم GA، DE و PSO با استفاده از 10 مورد از توابع معیار (به عنوان مثال Sphere(x)) انجام گرفته است. هر یک از توابع معیار شامل مجموعه داده‌های متفاوتی است که بصورت تصادفی تولید شده‌اند و هیچ مجموعه داده استاندارد در امتحان این توابع در نظر نگرفته

شده است. هر یک از توابع معیار ده بار امتحان شده است. کمترین و بیشترین مقادیر آن ثبت شده‌اند. (Lim and Heron, 2013).

میانگین مقدار ۱۰ بار آزمایش برای همه توابع محاسبه شده است و برای کارایی سنجی استفاده شده است. بنابراین روشی که قادر به تولید کمترین و متوسط مقدار با بیشترین سرعت است به عنوان بهترین روش با کارایی عالی در نظر گرفته می‌شود. همه‌ی آزمایش‌ها با زبان برنامه‌نویسی C++ انجام شده است (Lim and Heron, 2013).

با توجه به جدول ۳-۱ تجزیه و تحلیل نشان می‌دهند که GA شامل ۵ مورد از ۱۰ مورد بهترین برازندگی کمینه شامل ۳ مورد از ۱۰ مورد بهترین برازندگی متوسط و ۱۰ مورد از ۱۰ مورد بهترین سرعت در مقایسه با DE و PSO است. اثبات شد که GA بهترین روش در برآورده کردن هدف این تحقیق با بدست آوردن بالاترین تعداد بهترین برازندگی کمینه و بهترین سرعت در مقایسه با DE و PSO است. اگرچه GA در بهینه‌سازی مسائل به خوبی عمل می‌کند اما به شدت به روش‌های اجرا در عملیات وابسته است. الگوریتم تکامل تفاضلی شامل 10/10 سریع‌تر از PSO است (Lim and Heron, 2013).

بر اساس ظرفیت بهترین برازندگی کمینه و متوسط، PSO شامل ۳ مورد از ۱۰ مورد بهترین برازندگی کمینه و ۶ مورد از ۱۰ مورد بهترین برازندگی متوسط است که بهتر از DE است. PSO کمی کندتر از DE است که در نتیجه کارایی PSO بهتر از DE است. الگوریتم ژنتیک سریع‌تر از دیگر روش‌ها عمل می‌کند (Lim and Heron, 2013).

الگوریتم تکامل تفاضلی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به زمان طولانی‌تری برای مقایسه با الگوریتم ژنتیک نیاز دارند. در واقع، عملگر جهش تکامل تفاضلی وابسته به عملگر احتمال کراس‌اور است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات بسیار وابسته به پارامترهای بکار رفته است. همه‌ی پارامترهای استفاده شده زمانی که تکرار افزایش می‌یابد نتیجه‌ی ذرات را کاهش می‌دهد. اما الگوریتم ژنتیک شامل هیچ پارامتری نیست که بصورت مستقیم در طول اجرای عملیات در نتیجه تاثیر داشته باشد (Lim and Heron, 2013).

جدول ۳-۱: مقایسه الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Lim and Haron, 2013).

روش	کارآرایی			مزایا	معایب	پیشنهادهای
	کمترین برازندگی	برازندگی متوسط	زمان متوسط			
الگوریتم ژنتیک	شامل ۵/۱۰ بهترین حداقل برازندگی	شامل ۳/۱۰ بهترین برازندگی متوسط	شامل ۱۰/۱۰ سریع‌ترین	۱. خاتمه سریع و افزایش کارآرایی ۲. افزایش تنوع کروموزوم با عملیات تولید مثل	۱. به‌روز رسانی نسلی ۲. به‌روز رسانی حالت پایدار ۳. عدم توانایی در معرفی هیچ مقدار ژنتیکی جدید به جمعیت، اگرچه مقدار کروموزوم جدید در طول جهش و کراس‌اور ایجاد می‌شود	افزایش شدن برخی از مقادیر ژنتیکی به جمعیت بدون افزایش زمان جستجو
الگوریتم تکامل تفاضلی	شامل ۲/۱۰ بهترین برازندگی حداقل	شامل ۳/۱۰ بهترین برازندگی متوسط	شامل ۱۰/۱۰ سریع‌تر از بهینه‌سازی ازدحام ذرات	۱. استفاده از الگوریتم همان جمعیت در شکل‌گیری نسل جدید ۲. اجرا بهتر در مقایسه با الگوریتم ژنتیک	۱. عدم انتقال (احتمالاً) هیچ کدام از کروموزوم‌های نسل قبلی به نسل بعد ۲. اجرا عملیات جهش و کراس‌اور به عنوان یک فرایند	آگاهی یافتن کروموزوم به سمت بهینه سراسری در صورت عدم اجرای عملیات جهش و کراس‌اور
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	شامل ۳/۱۰ بهترین حداقل برازندگی	شامل ۶/۱۰ بهترین برازندگی متوسط	شامل ۱۰/۱۰ سریع‌ترین	۱. کنترل سرعت و مقدار موقعیت بوسیله‌ی پارامترهای محدود کردن سرعت ۲. اجرای آسان‌تر در مقایسه با الگوریتم ژنتیک ۳. تنظیم پارامترهای کمتر در مقایسه با الگوریتم ژنتیک	۱. وابستگی بیش از حد به بهترین موقعیت سراسری ۲. دور شدن از بهترین پاسخ سراسری به دلیل افزایش موقعیت ذرات ناشی از سرعت قبلی و بهترین موقعیت اجرا شده ۳. وابستگی بیش از حد به پارامترهای استفاده شده برای کاهش نتیجه	کاهش تعداد پارامترهای مورد استفاده

۳-۱۲- جمع‌بندی

الگوریتم‌های جستجوی تحلیلی با استفاده از یک تابع ریاضی هدایت می‌شوند. این الگوریتم‌ها، یافتن جواب بهینه را در صورت وجود تضمین می‌کنند. الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای کل فضای جستجو را به دلیل بزرگی آن پیمایش نکرده (که به همین دلیل ناکامل و البته غیر بهینه هستند) و تنها به پیمایش بخشی از فضا که احتمال وجود یک پاسخ به اندازه کافی خوب در آن بیشتر است، اکتفا می‌کنند. الگوریتم تکامل تفاضلی جزو ساده‌ترین الگوریتم‌های تکاملی است که جمعیت محور و تصادفی است. تاکنون انواع مختلفی از الگوریتم تکامل تفاضلی از جمله تکامل تفاضلی تطبیق یافته پیشنهاد شده است که عموماً تغییر نوع آن‌ها با تغییراتی که روی جهش انجام می‌شود صورت می‌پذیرد. با توجه با سنجش کارایی انجام گرفته بر روی سه الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، این نتیجه بدست آمد که هرچند الگوریتم تکامل تفاضلی نسبت به الگوریتم ژنتیک کندتر است اما نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سریع‌تر عمل می‌کند و نسبت به دو الگوریتم دیگر ساده‌تر است.

فصل چهارم

برنامه‌ریزی تولید معدن روباز

۴-۱- مقدمه

در این فصل به حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی پرداخته شده است. برنامه‌ریزی برای یک مدل بلوکی فرضی با دو مثال متفاوت (در مثال نخست سه محدودیت شیب، ظرفیت استخراج و ظرفیت فرآوری و در مثال دوم فقط دو محدودیت شیب و ظرفیت استخراج اعمال می‌شود) و سه مقطع دو بعدی از یک مدل بلوکی سه بعدی (مطالعه موردی معدن مس سونگون) واقعی انجام گرفته است. در دو مثال مرتبط به مدل بلوکی فرضی با تغییر فاکتور مقیاس جهش با طول گام $0/1$ به تعداد ۱۰ حالت متفاوت برنامه‌ریزی روی این دو مدل انجام گرفته و مقدار ارزش خالص فعلی در این دو مثال با هدف سنجش کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی با روش ریاضی برنامه‌ریزی پویا سنجیده شده است. در این دو مثال شیب ۴۵ درجه به عنوان محدودیت شیب و تعداد سه بلوک به عنوان محدودیت ظرفیت استخراج لحاظ شده است. در مدل واقعی ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Datamine مدل بلوکی زمین‌شناسی بدست آمده سپس با استفاده از اطلاعات اقتصادی مدل بلوکی اقتصادی در نرم‌افزار Matlab بصورت یک ماتریس تعریف شده است شده است.

لازم به ذکر است به دلیل اینکه ثابت شده است روش برنامه‌ریزی پویا قادر است که محدوده بهینه نهایی را روی مدل بلوکی دو بعدی به دست آورد در هر دو مثال مدل بلوکی فرضی و واقعی، محدوده بهینه نهایی با استفاده از این روش بدست آمده است. تعداد بلوک‌های موجود در مقاطع دو بعدی به ترتیب ۶۵۶، ۶۷۲ و ۷۴۲ بلوک است. بر روی این سه مقطع دو بعدی، فازهای استخراجی به وسیله الگوریتم تکامل تفاضلی به دست آمده است.

۴-۲- تعیین سکانس استخراجی با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا

برای سنجش کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی در حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز، از روش برنامه‌ریزی پویا استفاده می‌شود. مدل بلوکی اقتصادی فرضی که تعیین محدوده بهینه نهایی به روش برنامه‌ریزی پویا روی آن انجام شده است در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای شروع فرایند با این روش

همانطور که در فصل دوم توضیح داده شده است ابتدا می‌بایست بلوک‌هایی با ارزش مثبت در خارج از محدوده بهینه را نیز در نظر گرفت که در این مدل بلوکی هیچ بلوکی با ارزش مثبت خارج از محدوده بهینه وجود ندارد. در شکل ۴-۱ محدوده بهینه به روش برنامه‌ریزی پویا بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، درون محدوده بهینه نهایی تعداد ۹ بلوک وجود دارد.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	+۱
2	-۲	+۳	-۲	+۲	-۲
3	-۲	-۲	۱۰	-۳	-۱

شکل ۴-۱: تعیین محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی (مثال نخست).

اگر هر بلوک بر یک محدوده‌ی زمانی واحد به (طول نامشخص) منطبق باشد، برای معدن‌کاری تمام بلوک‌ها ۹ محدوده زمانی مورد نیاز است و بلوک (۳و۳) آخرین بلوکی است که باید استخراج شود. این بلوک در دوره‌ی ۹ استخراج می‌شود. به منظور استخراج این بلوک، در ابتدا باید بلوک‌های (۲و۲)، (۲و۳) و (۲و۴) برداشته شوند. امکان استخراج بلوک (۲و۳) در نوبت زمانی ۸ به دلیل نقض محدودیت مربوط به افق معدن‌کاری، وجود ندارد. پس فقط دو انتخاب وجود دارد (شکل ۴-۲).

	1	2	3	4	5
1					
2		۸			
3			۹		

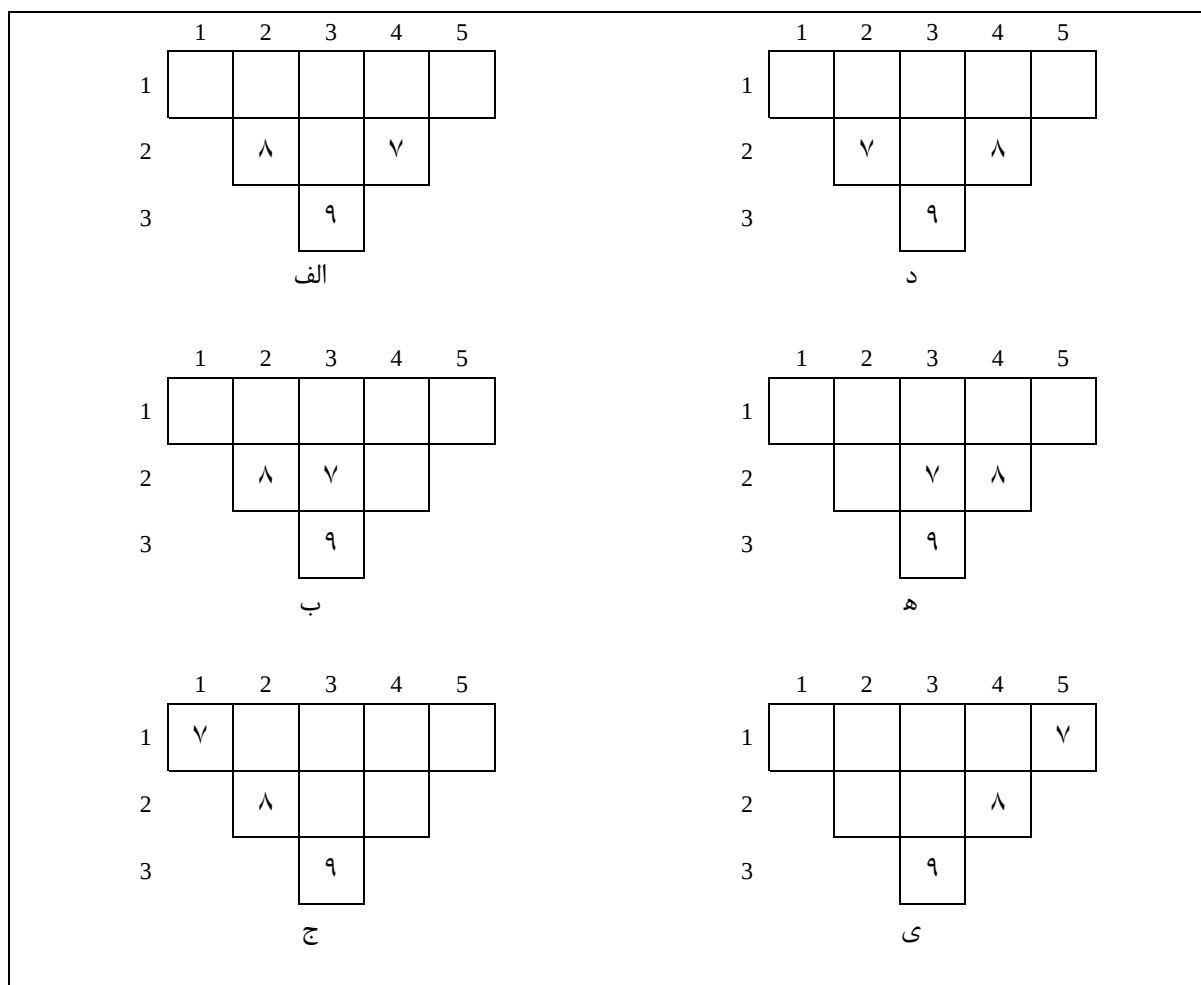
الف

	1	2	3	4	5
1					
2				۸	
3			۹		

ب

شکل ۴-۲: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۸.

در نوبت زمانی ۷، بسته به بلوک استخراج شده در نوبت ۸، چند انتخاب برای بلوکی که باید استخراج شود وجود دارد. برای دو حالت انتخاب (۲و۲)، (۳و۳) و (۲و۴)، هرکدام سه حالت جدید در این دوره زمانی بوجود خواهد آمد این شش حالت ممکن در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۷.

هرچند که دو مورد از این ترتیب‌ها سه بلوک یکسان را دربر می‌گیرد (مورد الف و د) که برای انتخاب بهتر میان این دو انتخاب، یک ارزیابی اقتصادی قرار می‌گیرد و انتخاب کم جاذبه‌تر از بررسی‌ها بعدی کنار گذاشته می‌شود. اکنون با انتخاب نرخ بهره ۱۵٪ و تنزیل نسبت به آغاز نوبت زمانی ۷ در جدول ۴-۱ داریم:

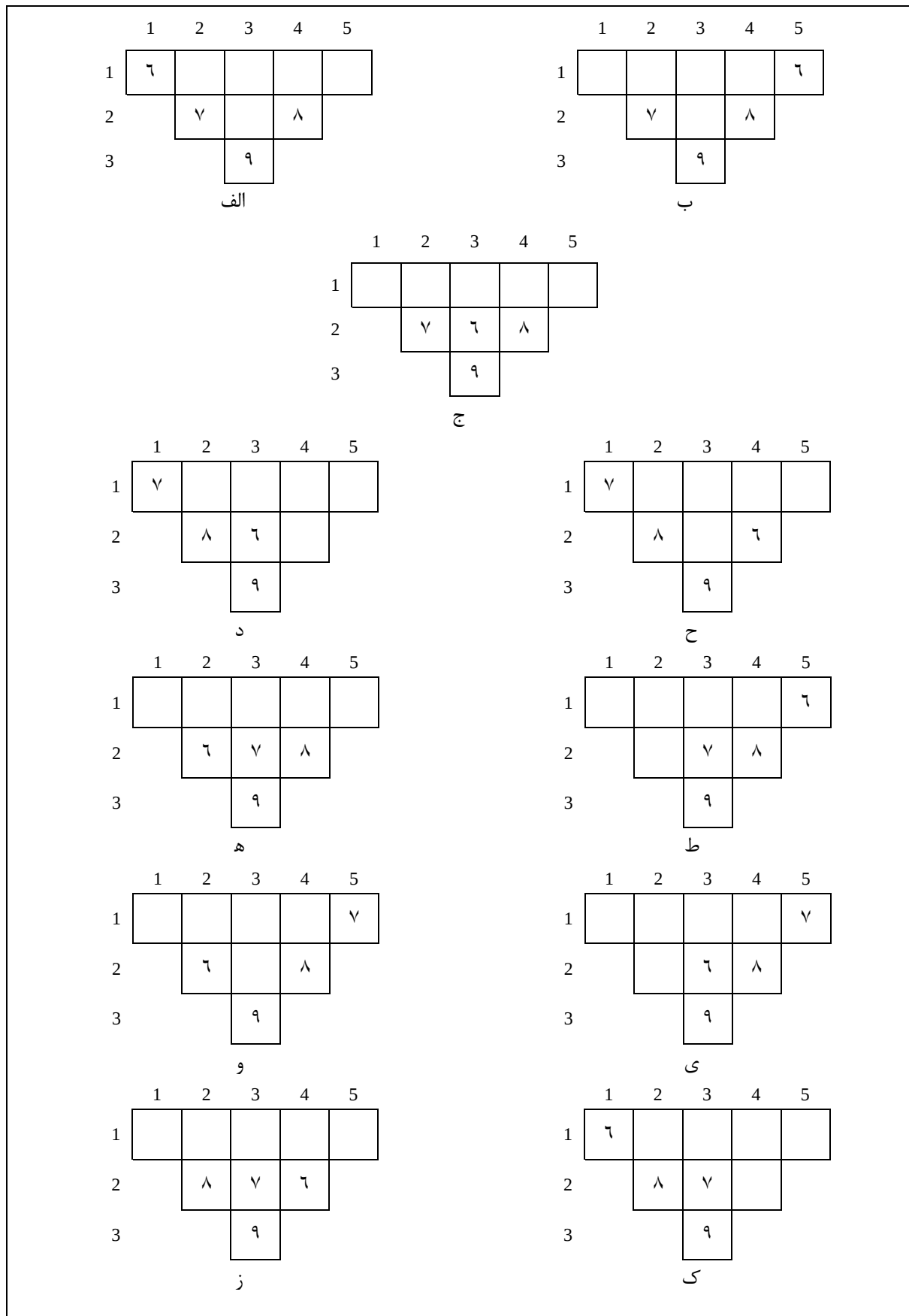
جدول ۴-۱: بررسی استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۷.

ارزش خالص فعلی	ترتیب‌های یکسان				ردیف								
NPV= 10.58 \$	<table><tr><td>نوبت</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۴)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>				نوبت	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۴)	(۲و۲)	(۳و۳)	۱
نوبت	۷	۸	۹										
بلوک	(۲و۴)	(۲و۲)	(۳و۳)										
NPV=10.69\$ ✓	<table><tr><td>نوبت</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>				نوبت	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)	۲
نوبت	۷	۸	۹										
بلوک	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)										

همانطور که از جدول ۴-۱ ملاحظه می‌شود، ترتیب نخست ارزش خالص فعلی کمتری دارد و به همین دلیل از ادامه محاسبات کنار گذاشته می‌شود. در جدول ۴-۲ پنج ترتیب باقی مانده از بلوک‌ها تا نوبت ۷ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، شکل ۴-۴ نشان دهنده حالات مختلف ترتیب استخراج در نوبت ۶ است. در مرحله بعد نیز ترتیب‌های حاوی بلوک‌های یکسان که تنها ترتیب استخراج آن‌ها تغییر یافته بازهم وجود دارد که برای انتخاب حالت بهتر از میان آن‌ها ارزیابی اقتصادی مطابق جدول ۴-۳ تا ۴-۷ باید انجام شود و انتخاب کم جاذبه‌تر را از بررسی‌های بعدی کنار گذاشته می‌شود. انتخاب‌های باقی مانده برای ترتیب‌بندی بلوک‌های استخراجی نوبت ۵ پس از حذف ترکیب‌های مضاعف بلوک‌ها به وسیله‌ی تحلیل ارزش فعلی خالص در جدول ۴-۸ اکنون نسبت به آغاز نوبت زمانی ۶ برای ترتیب‌های مشابه داریم:

جدول ۴-۲: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۷.

ترتیب	ترتیب معدن کاری بلوک‌ها	ترتیب	ترتیب معدن کاری بلوک‌ها																
۱	<table border="1"> <tr> <td>نوبت</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr> <tr> <td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr> </table>	نوبت	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)	۴	<table border="1"> <tr> <td>نوبت</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr> <tr> <td>بلوک</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr> </table>	نوبت	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)
نوبت	۷	۸	۹																
بلوک	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)																
نوبت	۷	۸	۹																
بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)																
۲	<table border="1"> <tr> <td>نوبت</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr> <tr> <td>بلوک</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr> </table>	نوبت	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	۵	<table border="1"> <tr> <td>نوبت</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr> <tr> <td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr> </table>	نوبت	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)
نوبت	۷	۸	۹																
بلوک	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)																
نوبت	۷	۸	۹																
بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)																
۳	<table border="1"> <tr> <td>نوبت</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr> <tr> <td>بلوک</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr> </table>	نوبت	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)										
نوبت	۷	۸	۹																
بلوک	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																



شکل ۴-۴: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۶.

جدول ۴-۳: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی										
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱ و ۱)</td><td>(۲ و ۳)</td><td>(۲ و ۲)</td><td>(۳ و ۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱ و ۱)	(۲ و ۳)	(۲ و ۲)	(۳ و ۳)	NPV= 4.43 \$ ✓
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۱ و ۱)	(۲ و ۳)	(۲ و ۲)	(۳ و ۳)								
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲ و ۳)</td><td>(۱ و ۱)</td><td>(۲ و ۲)</td><td>(۳ و ۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲ و ۳)	(۱ و ۱)	(۲ و ۲)	(۳ و ۳)	NPV= 4.43 \$
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۲ و ۳)	(۱ و ۱)	(۲ و ۲)	(۳ و ۳)								

جدول ۴-۴: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی										
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱ و ۵)</td><td>(۲ و ۳)</td><td>(۲ و ۴)</td><td>(۳ و ۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱ و ۵)	(۲ و ۳)	(۲ و ۴)	(۳ و ۳)	NPV= 6.38 \$ ✓
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۱ و ۵)	(۲ و ۳)	(۲ و ۴)	(۳ و ۳)								
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲ و ۳)</td><td>(۱ و ۵)</td><td>(۲ و ۲)</td><td>(۳ و ۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲ و ۳)	(۱ و ۵)	(۲ و ۲)	(۳ و ۳)	NPV= 6.04 \$
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۲ و ۳)	(۱ و ۵)	(۲ و ۲)	(۳ و ۳)								

جدول ۴-۵: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی										
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 8.12 \$ ✓
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)								
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۴)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۴)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 7.91 \$
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۲و۴)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)								
۳	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۳)	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 7.56 \$
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۲و۳)	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)								

جدول ۴-۶: بررسی مجموعه چهارم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی										
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV=10.39\$ ✓
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)								
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 10.17 \$
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۱و۵)	(۲و۲)	(۲و۴)	(۳و۳)								

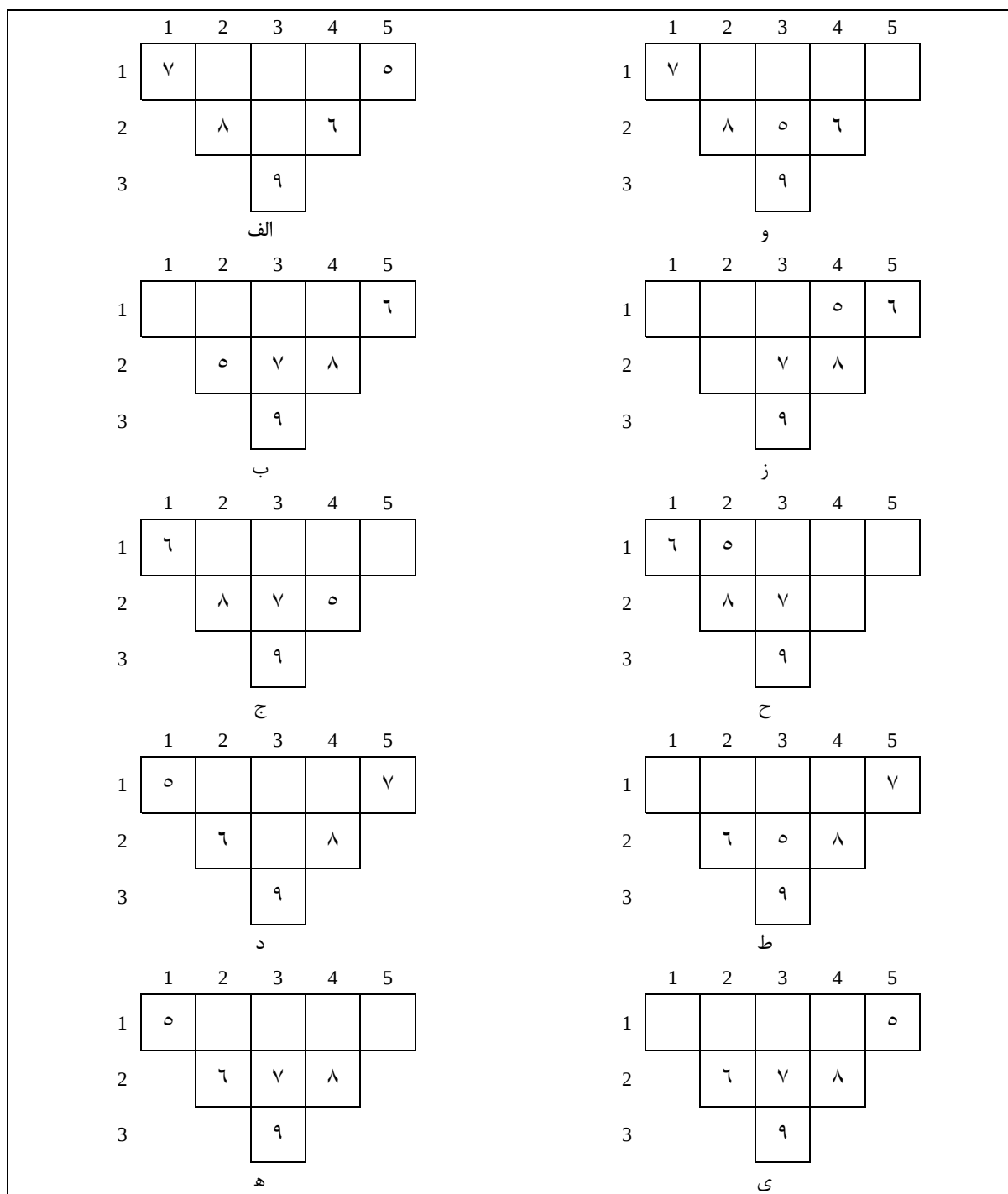
جدول ۴-۷: بررسی مجموعه پنجم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۶.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی										
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲۰۴)</td><td>(۱۰۱)</td><td>(۲۰۲)</td><td>(۳۰۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲۰۴)	(۱۰۱)	(۲۰۲)	(۳۰۳)	NPV= 7.91 \$ ✓
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۲۰۴)	(۱۰۱)	(۲۰۲)	(۳۰۳)								
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱۰۱)</td><td>(۲۰۲)</td><td>(۲۰۴)</td><td>(۳۰۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱۰۱)	(۲۰۲)	(۲۰۴)	(۳۰۳)	NPV= 7.56 \$
نوبت	۶	۷	۸	۹								
بلوک	(۱۰۱)	(۲۰۲)	(۲۰۴)	(۳۰۳)								

جدول ۴-۸: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۶.

ترتیب	ترتیب معدن کاری بلوک‌ها	ترتیب	ترتیب معدن کاری بلوک‌ها																				
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)	۴	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)
	نوبت	۶	۷	۸	۹																		
بلوک	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)																			
نوبت	۶	۷	۸	۹																			
بلوک	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																			
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)	۵	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)
	نوبت	۶	۷	۸	۹																		
بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)																			
نوبت	۶	۷	۸	۹																			
بلوک	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																			
۳	<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)		<table><tr><td>نوبت</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)
	نوبت	۶	۷	۸	۹																		
بلوک	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																			
نوبت	۶	۷	۸	۹																			
بلوک	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																			

همانطور که در جدول ۴-۳ مشاهده می‌شود دو ترتیب متفاوت دارای ارزش یکسانی هستند، ابتدا برای ترتیب نخست محاسبات انجام می‌گیرد پس از تعیین فاز نهایی بدست آمده از محاسبات این شاخه، برای شاخه دوم محاسبات از ابتدا باید انجام گیرد. سپس به بررسی شاخه نخست پرداخته می‌شود. ترتیب استخراج بلوک‌ها در نوبت ۵ در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۵: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۸.

اکنون نوبت به حذف گزینه‌های نا مطلوب با NPV پائین‌تر می‌رسد. انتخاب این گزینه‌ها از بین ترتیب‌هایی با بلوک استخراجی مشابه انجام می‌شود (جدول ۴-۹ تا ۴-۱۲).

جدول ۴-۹: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۵.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی												
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۳)	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 7.30 \$
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۲و۳)	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)									
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 8.16 \$ ✓
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)									
۳	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 7.93 \$
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۱و۵)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)									

جدول ۴-۱۰: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۵.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی												
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 7.75 \$ ✓
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)									
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 7.30 \$
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۳و۳)									

جدول ۴-۱۱: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۵.

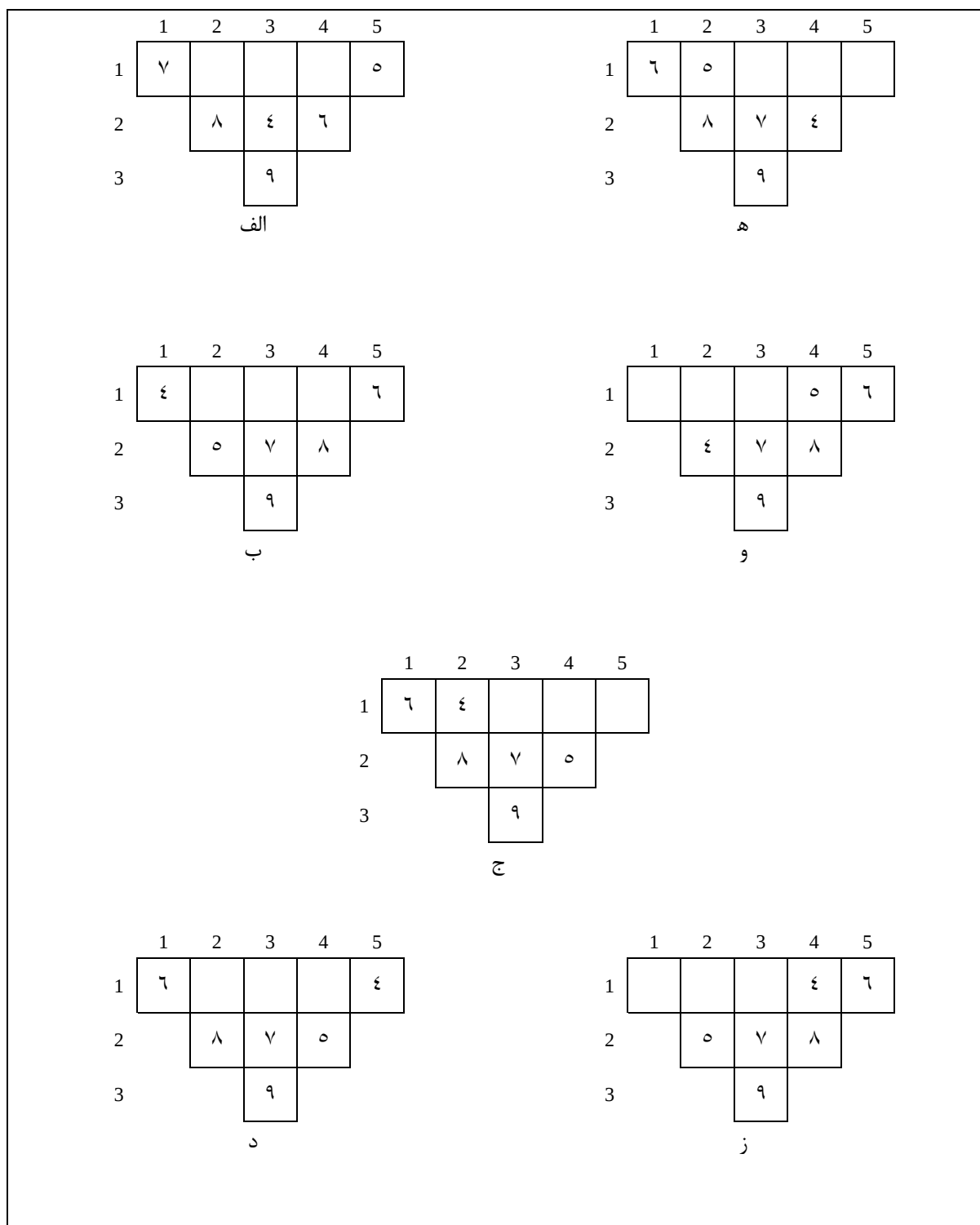
ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی												
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۳)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 5.14 \$
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۲و۳)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)									
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 5.59 \$ ✓
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)									
۳	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 5.32 \$
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹									
بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)									

بنابراین سایر ترتیب‌های استخراجی که در دوره‌ی زمانی بعدی ارزیابی می‌شوند مطابق جدول ۴-۱۲

خواهد بود و در ادامه برای بررسی ترتیب‌های استخراجی نوبت ۴ پرداخته خواهد شد (شکل ۴-۶).

جدول ۴-۱۲: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۵.

ترتیب	ترتیب معدن کاری بلوک‌ها	ترتیب	ترتیب معدن کاری بلوک‌ها																								
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)	۴	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۲)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹																						
بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۲)	(۳و۳)																						
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹																						
بلوک	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)																						
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)	۵	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹																						
بلوک	(۲و۲)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																						
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹																						
بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																						
۳	<table><tr><td>نوبت</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)														
نوبت	۵	۶	۷	۸	۹																						
بلوک	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)																						



شکل ۴-۶: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۲.

در این مرحله نیز ترتیب‌های دارای مجموعه بلوک تکراری که جذابی کمتری از نظر نرخ ارزش خالص فعلی دارند از دور خارج می‌شوند (جدول ۴-۱۳ تا ۴-۱۵) و ترتیب‌های مورد بررسی در نوبت زمانی ۳ بصورت جدول ۴-۱۶ خواهد بود. همچنین شکل ۴-۷ نشان دهنده‌ی بررسی ترتیب‌ها در نوبت زمانی ۳ است. در ادامه

به حذف ترتیب‌های یکسان تا نوبت ۳ پرداخته شده است (جدول ۴-۱۷ و ۴-۱۸) و ترتیب‌های باقی‌مانده برای بررسی در نوبت ۲ بصورت جدول ۴-۱۹ نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۴-۸ به بررسی ترتیب استخراج بلوک‌ها در دوره ۲ پرداخته شده است.

جدول ۴-۱۳: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۴.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی												
۱	<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۱و۴)</td><td>(۲و۲)</td></tr></table>	۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۱و۴)	(۲و۲)	NPV= 6.68 \$ ✓
۹	۸	۷	۶	۵	۴									
(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۱و۴)	(۲و۲)									
۲	<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۴)</td></tr></table>	۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۲و۲)	(۱و۴)	NPV= 6.23 \$
۹	۸	۷	۶	۵	۴									
(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۲و۲)	(۱و۴)									

جدول ۴-۱۴: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۴.

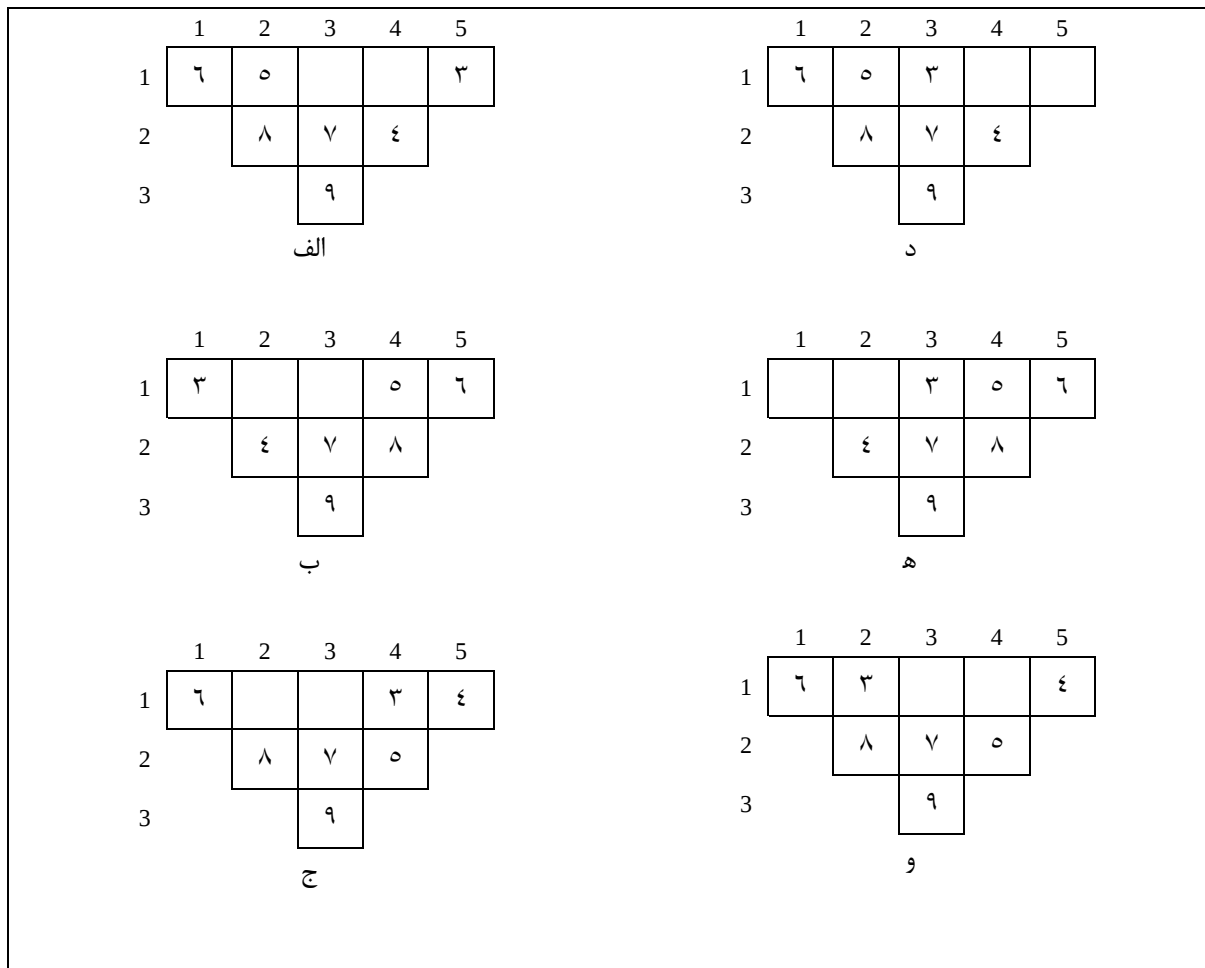
ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی												
۱	<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td></tr></table>	۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۲)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	NPV= 5.00 \$
۹	۸	۷	۶	۵	۴									
(۳و۳)	(۲و۲)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)									
۲	<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۱)</td></tr></table>	۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۲و۲)	(۱و۱)	NPV= 5.36 \$
۹	۸	۷	۶	۵	۴									
(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۲و۲)	(۱و۱)									
۳	<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۵)</td></tr></table>	۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۵)	NPV= 5.73 \$ ✓
۹	۸	۷	۶	۵	۴									
(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۵)									

جدول ۴-۱۵: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۴.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی												
۱	<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۱و۲)</td><td>(۲و۴)</td></tr></table>	۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۱و۲)	(۲و۴)	NPV= 4.33 \$ ✓
۹	۸	۷	۶	۵	۴									
(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۱و۲)	(۲و۴)									
۲	<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۲)</td></tr></table>	۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۲)	NPV= 3.99 \$
۹	۸	۷	۶	۵	۴									
(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۲)									

جدول ۴-۱۶: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۴.

ترتیب معدن کاری بلوک‌ها						ترتیب												
<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۱و۴)</td><td>(۲و۲)</td></tr></table>						۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۱و۴)	(۲و۲)	۱
۹	۸	۷	۶	۵	۴													
(۳و۳)	(۲و۴)	(۲و۳)	(۱و۵)	(۱و۴)	(۲و۲)													
<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۱و۲)</td><td>(۲و۴)</td></tr></table>						۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۱و۲)	(۲و۴)	۲
۹	۸	۷	۶	۵	۴													
(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۱و۲)	(۲و۴)													
<table><tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۷</td><td>۶</td><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>(۳و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۵)</td></tr></table>						۹	۸	۷	۶	۵	۴	(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۵)	۳
۹	۸	۷	۶	۵	۴													
(۳و۳)	(۲و۲)	(۲و۳)	(۱و۱)	(۲و۴)	(۱و۵)													



شکل ۴-۷: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۳.

جدول ۴-۱۷: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۳.

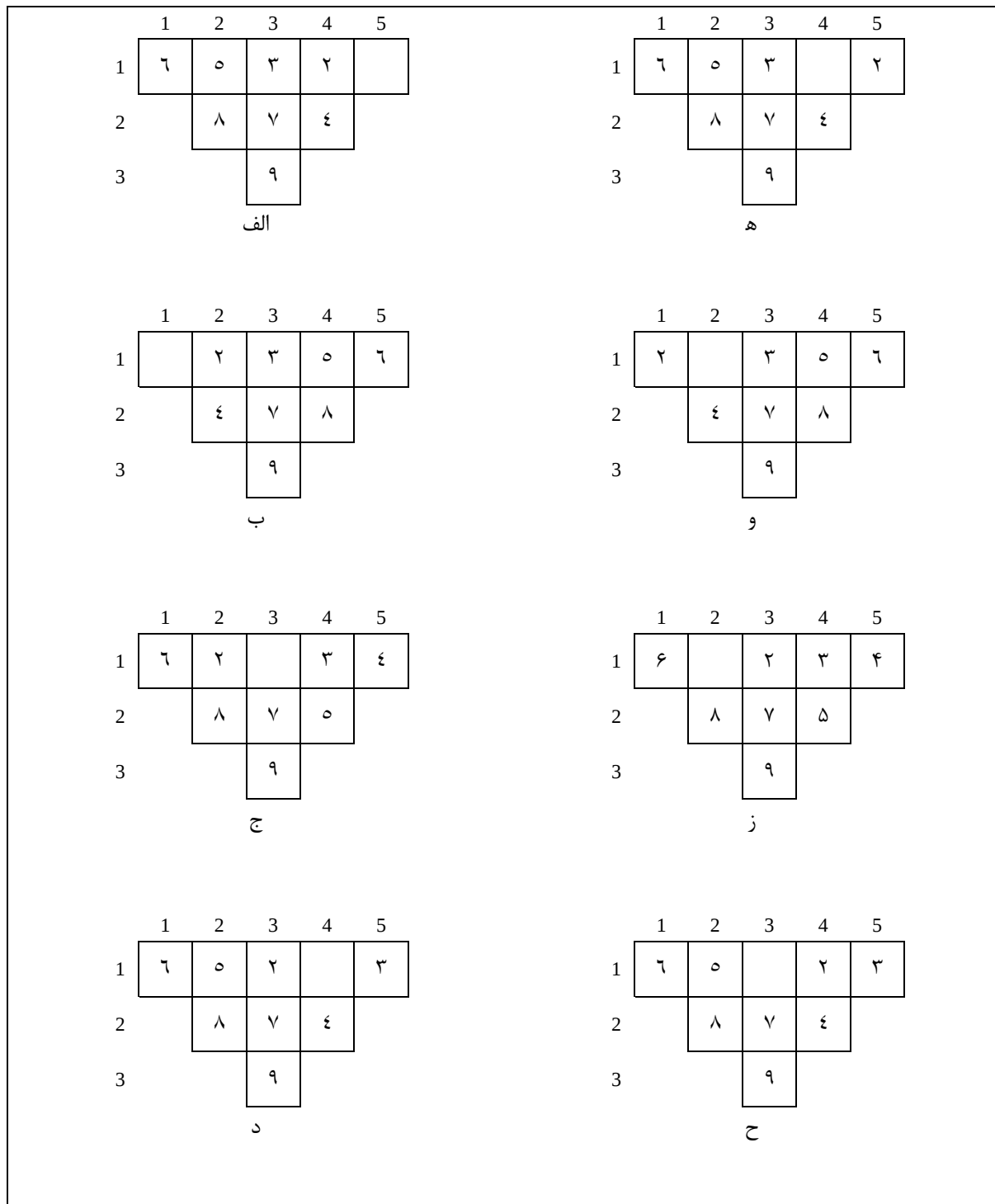
ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی																
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۲)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 4.12 \$
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹											
بلوک	(۱و۲)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)											
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۲)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 4.64 \$ ✓
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹											
بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)											

جدول ۴-۱۸: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۳.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی																
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 4.12 \$ ✓
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹											
بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)											
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)	NPV= 4.07 \$
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹											
بلوک	(۱و۱)	(۲و۲)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)											

جدول ۴-۱۹: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۳.

ترتیب معدن کاری بلوک‌ها								ترتیب																
<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۲)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>								نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۳)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	۱
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹																	
بلوک	(۱و۳)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)																	
<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۱و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>								نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۳)	(۲و۲)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)	۲
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹																	
بلوک	(۱و۳)	(۲و۲)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)																	
<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۲)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>								نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	۳
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹																	
بلوک	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)																	
<table><tr><td>نوبت</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>								نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	۴
نوبت	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹																	
بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)																	



شکل ۴-۸: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۲.

در ادامه به حذف ترتیب‌های یکسان تا نوبت ۲ پرداخته شده است (جدول ۴-۲۰ تا ۴-۲۲) و ترتیب‌های باقی‌مانده برای بررسی در نوبت ۱ بصورت جدول ۴-۲۳ نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۴-۹ به بررسی ترتیب استخراج بلوک‌ها در دوره ۱ پرداخته شده است.

جدول ۴-۲۰: بررسی مجموعه نخست استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۲.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی
۱		NPV= 2.71 \$ ✓
۲		NPV= 2.55 \$

جدول ۴-۲۱: بررسی مجموعه دوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۲.

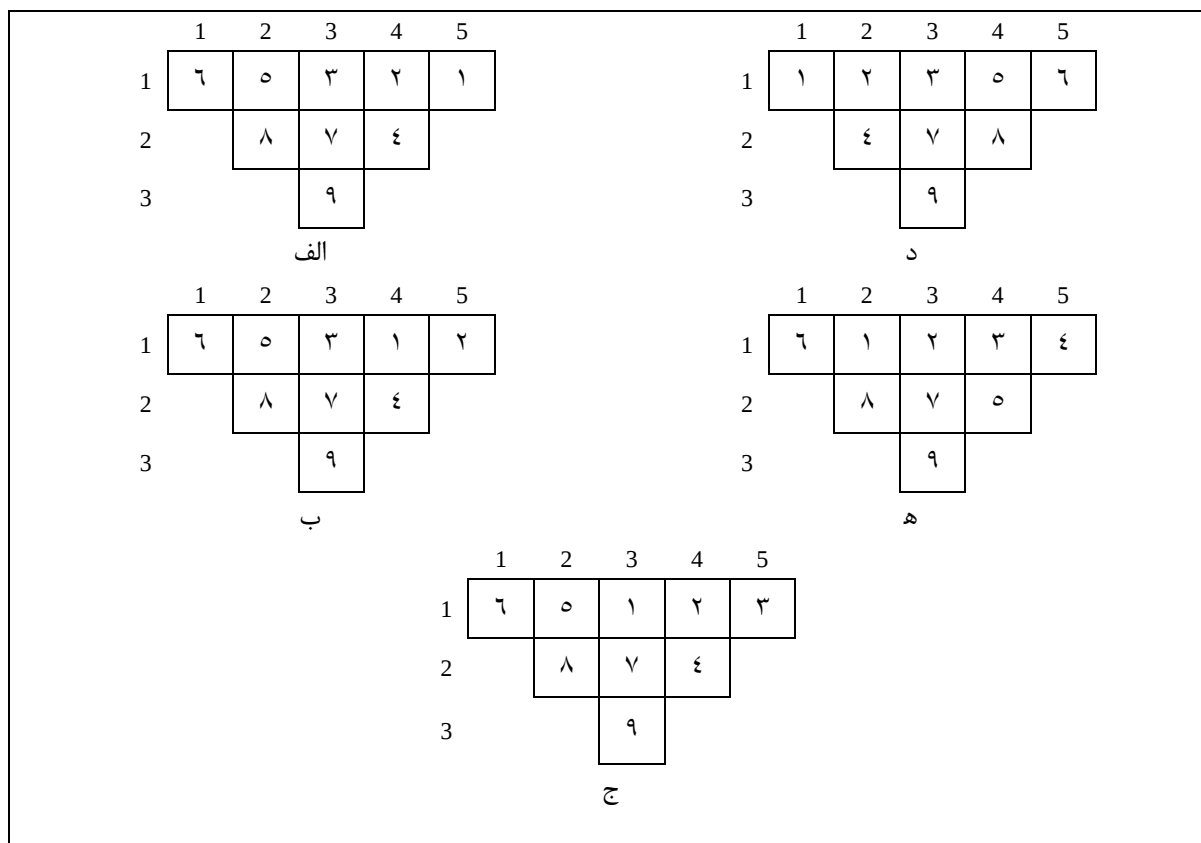
ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی																		
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۲</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱۰۵)</td><td>(۱۰۳)</td><td>(۲۰۴)</td><td>(۱۰۲)</td><td>(۱۰۱)</td><td>(۲۰۳)</td><td>(۲۰۲)</td><td>(۳۰۳)</td></tr></table>	نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱۰۵)	(۱۰۳)	(۲۰۴)	(۱۰۲)	(۱۰۱)	(۲۰۳)	(۲۰۲)	(۳۰۳)	NPV= 3.39 \$ ✓
		نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹										
		بلوک	(۱۰۵)	(۱۰۳)	(۲۰۴)	(۱۰۲)	(۱۰۱)	(۲۰۳)	(۲۰۲)	(۳۰۳)										
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۲</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱۰۳)</td><td>(۱۰۵)</td><td>(۲۰۴)</td><td>(۱۰۲)</td><td>(۱۰۱)</td><td>(۲۰۳)</td><td>(۲۰۲)</td><td>(۳۰۳)</td></tr></table>	نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱۰۳)	(۱۰۵)	(۲۰۴)	(۱۰۲)	(۱۰۱)	(۲۰۳)	(۲۰۲)	(۳۰۳)	NPV= 3.16 \$
		نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹										
		بلوک	(۱۰۳)	(۱۰۵)	(۲۰۴)	(۱۰۲)	(۱۰۱)	(۲۰۳)	(۲۰۲)	(۳۰۳)										

جدول ۴-۲۲: بررسی مجموعه سوم استخراج بلوک‌های مشابه در نوبت ۲.

ردیف	ترتیب‌های یکسان	ارزش خالص فعلی																		
۱	<table><tr><td>نوبت</td><td>۲</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۲)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 3.16 \$ ✓
		نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹										
		بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)										
۲	<table><tr><td>نوبت</td><td>۲</td><td>۳</td><td>۴</td><td>۵</td><td>۶</td><td>۷</td><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td>بلوک</td><td>(۱و۲)</td><td>(۱و۴)</td><td>(۱و۵)</td><td>(۲و۴)</td><td>(۱و۱)</td><td>(۲و۳)</td><td>(۲و۲)</td><td>(۳و۳)</td></tr></table>	نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلوک	(۱و۲)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)	NPV= 2.71 \$
		نوبت	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹										
		بلوک	(۱و۲)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)										

جدول ۴-۲۳: ترتیب معدنکاری تا نوبت ۲.

ترتیب	ترتیب معدنکاری بلوک‌ها
۱	نوبت
	بلوک
۲	نوبت
	بلوک
۳	نوبت
	بلوک
۴	نوبت
	بلوک
۵	نوبت
	بلوک



شکل ۴-۹: انتخاب بلوک استخراجی در نوبت ۱.

اکنون در گام آخر به جستجوی ترتیب زمانی بهینه برای مدل اقتصادی مورد مطالعه پرداخته شده است. در این مرحله ترتیب‌های مختلف آرایش‌های متفاوتی از ترکیب‌های یکسان بلوک‌ها خواهد بود. در نتیجه ترتیب بهینه را می‌توان از طریق محاسبه ارزش خالص فعلی تعیین کرد (جدول ۴-۲۴).

جدول ۴-۲۴: محاسبه ارزش خالص فعلی نهایی.

NPV= 1.88 \$	۱	نوبت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
		بلوک	(۱و۳)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)
NPV= 2.08 \$	۲	نوبت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
		بلوک	(۱و۴)	(۱و۵)	(۱و۳)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)
NPV= 1.48 \$	۳	نوبت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
		بلوک	(۱و۲)	(۱و۳)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۴)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)
NPV= 2.30 \$ ✓	۴	نوبت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
		بلوک	(۱و۵)	(۱و۴)	(۱و۳)	(۲و۴)	(۱و۲)	(۱و۱)	(۲و۳)	(۲و۲)	(۳و۳)
NPV= 1.24 \$	۵	نوبت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
		بلوک	(۱و۱)	(۱و۲)	(۱و۳)	(۲و۲)	(۱و۴)	(۱و۵)	(۲و۳)	(۲و۴)	(۳و۳)

بنابراین پس از بررسی همه‌ی نوبت‌های زمانی، بهترین ترتیب (ترتیب بهینه) با مقایسه ارزش خالص فعلی مشخص می‌شود. ارزش خالص فعلی این ترتیب برابر با ۵/۶۰ دلار خواهد بود. ترتیب بهینه در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که پس از محاسبه شاخه‌ی دوم (جدول ۴-۳) سکانس استخراجی بهینه بصورت شاخه‌ی نخست تعیین شده است. با توجه به عدم وجود هیچ بلوک مثبت در خارج

از محدوده نهایی، نیاز به مرحله تعیین پیت بهینه وجود ندارد. در شکل ۴-۱۱ تعیین فاز بندی نهایی، با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا با سه فاز استخراجی با هدف امکان مقایسه دو روش برنامه‌ریزی پویا و تکامل تفاضلی نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5
1	۶	۵	۳	۲	۱
2		۸	۷	۴	
3			۹		

شکل ۴-۱۰: تعیین فاز نهایی، با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا.

	1	2	3	4	5
1	۲	۲	۱	۱	۱
2		۳	۳	۲	
3			۳		

شکل ۴-۱۱: تعیین فاز نهایی، با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا با سه فاز استخراجی.

۴-۳- مدل سازی مسئله برنامه‌ریزی تولید

با مطالعه انواع روش‌های برنامه‌ریزی تولید مشخص می‌شود که برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز سه معیار قابل استفاده است. این سه معیار عبارتند از (میرزائی و کاکائی، ۱۳۸۴):

۱. جدا کردن با ارزش‌ترین فاز به عنوان فاز نخست و ادامه این روند تا فازبندی کامل کاواک

۲. جدا کردن کم ارزش‌ترین فاز به عنوان فاز آخر و ادامه این روند تا فازبندی کامل کاواک

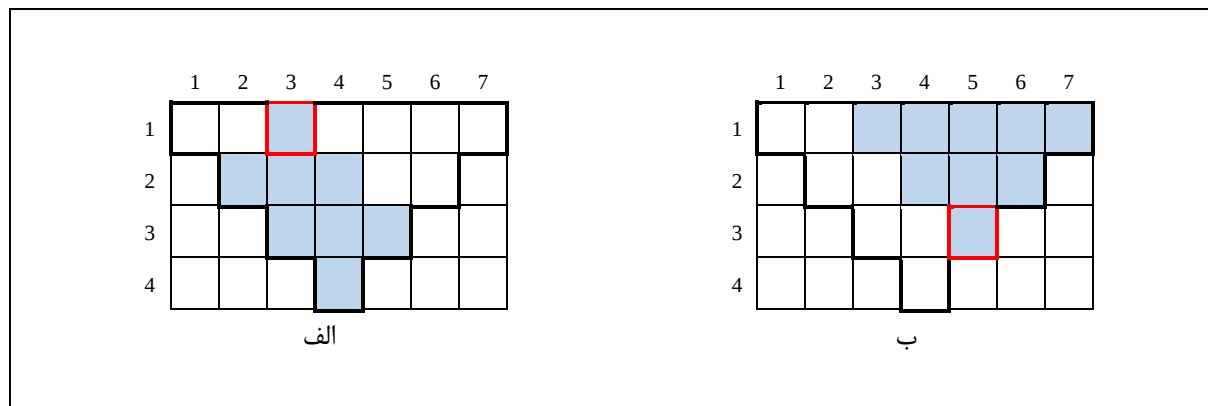
۳. جدا کردن همزمان فازها بر مبنای NPV

قبل از مدل کردن برنامه‌ریزی تولید، لازم است مفاهیم مخروط استخراجی رو به پائین و بلوک کاندیدا^۱ توضیح داده شوند. همانطور که در طراحی محدوده نهائی معادن روباز برای هر بلوک یک مخروط رو به بالا به نام مخروط استخراجی در نظر گرفته می‌شود، در برخی روش‌ها نیز همان مفهوم تولید مخروط با کمی

^۱ Candidate Block

پیچیدگی بکار می‌رود. در این روش‌ها برای هر بلوک یک مخروط رو به پائین در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۴-۱۲ مخروط رو به بالا (مخروط استخراجی) و مخروط رو به پائین نشان داده شده است. این مخروط‌های رو به پائین با تبعیت از زاویه شیب پیت ایجاد می‌شوند. بلوک واقع در راس مخروط به عنوان بلوک کلیدی تا زمانی که استخراج نشود، نمی‌توان سایر بلوک‌های واقع در مخروط رو به پائین را استخراج کرد. بلوک کانیدایا بلوکی است که که قابلیت و شرایط این را دارد که در فاز آخر از کاواک جدا شود. یعنی اگر برای این بلوک مخروط استخراجی رو به پائین را بسازیم، تعداد بلوک‌های واقع در این مخروط، کوچکتر یا مساوی تعداد بلوک‌های مورد نظر در فاز آخر باشد (میرزائی و کاکائی، ۱۳۸۴).

مراحل الگوریتم تکامل تفاضلی روی مدل بلوکی نشان داده شده در شکل ۴-۱ پیاده‌سازی خواهد شد، به عبارت دیگر، ورودی مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز (مدل بلوکی دو بعدی) محدوده نهایی تعیین شده روی مدل بلوکی اقتصادی نظر گرفته شده است. روندنمای الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز را به ترتیب در شکل ۴-۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۲: مخروط استخراجی رو به پائین (شکل الف) - مخروط استخراجی رو به بالا (شکل ب) (میرزائی و کاکائی، ۱۳۸۴).

۴-۴-۴ ایجاد جمعیت اولیه

در مسئله، فاز آخر بصورت یک آرایه مدل شده است که طول آرایه به تعداد ستون‌هایی که دارای بلوک کانیدایا هستند، در نظر گرفته می‌شود و برای هر عضو آرایه به تعداد بلوک‌های کانیدایا موجود در ستون متناظر آن، ژن در نظر گرفته می‌شود. از مجموع مخروط‌های استخراجی رو به پائین ژن‌های موجود در آن فاز

آخر بدست می‌آید (میرزائی و کاکائی، ۱۳۸۴). رویکرد پیشنهاد شده توسط میرزایی و کاکایی در سال ۱۳۸۴ به حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته است. در الگوریتم تکامل تفاضلی برای هر جمعیت اولیه به‌جای کروموزوم، بردار لحاظ می‌شود همچنین به‌جای ژن موجود در هر کروموزوم، در هر بردار بُعد در نظر گرفته می‌شود. آرایه‌های تشکیل شده نماینده فاز آخر استخراجی است.

۴-۴-۱- مرحله نخست: تعیین بلوک کاندیدا

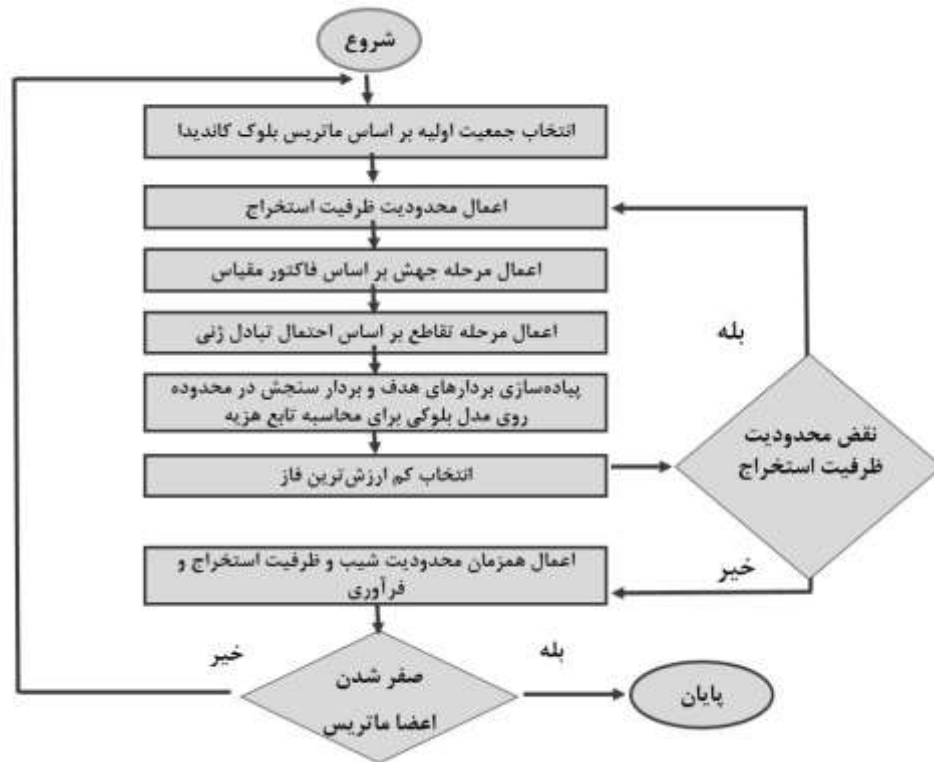
با توجه به ماهیت برداری الگوریتم تکامل تفاضلی برای ایجاد جمعیت اولیه (بردار) باید یک آرایه تشکیل شود. به تعداد بلوک‌های موجود در محدوده نهایی، مخروط استخراجی رو به پائین تشکیل و با استفاده از مخروط استخراجی رو به پائین بلوک‌های کاندیدا مشخص می‌شوند. در شکل ۴-۱۴ (سمت راست) تعداد بلوک‌های موجود در مخروط استخراجی رو به پائین برای هر عضو در راس بلوک مورد نظر نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴-۱۴ (سمت چپ) برای بلوک کاندیدا مقدار یک و برای بلوک‌های غیر کاندیدا مقدار صفر در نظر گرفته شده است (به این دلیل که تعداد بلوک‌های موجود در مخروط استخراجی رو به پائین کوچکتر مساوی سه بلوک نیست). در هر ۵ ستون از ماتریس محدوده نهایی حداقل یک بلوک کاندیدا وجود دارد. پس برای هر کدام از ماتریس‌های جمعیت اولیه تعداد ۵ بُعد در نظر گرفته می‌شود.

۴-۴-۲- مرحله دوم: مقدار دهی بُعدها

با مشخص شدن بلوک‌های کاندیدا، تعداد بُعد در یک بردار از جمعیت اولیه (آرایه) تعیین می‌شود. تعداد بُعد در یک بردار از جمعیت اولیه وابسته به بلوک‌های کاندیدا است، به عبارت دیگر برای هر جمعیت اولیه از بردارها به تعداد ستون‌های موجود در محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی که دارای حداقل یک بلوک کاندیدا است، بُعد در نظر گرفته می‌شود. سپس به بُعدهای موجود در آرایه مقداری اختصاص داده می‌شود. مقدار دهی بُعدهای یک بردار به تعداد بلوک کاندیدا در هر ستون وابسته است.

در صورت وجود یک بلوک کاندیدا در هر ستون، دو حالت صفر و یک در بُعدهای متناظرشان ذخیره می‌شود، اگر بلوک مورد نظر در فاز آخر قرار نداشته باشد، مقدار صفر، در غیر این صورت مقدار یک اختصاص

داده می‌شود. در صورت وجود دو بلوک کاندیدا در هر ستون، سه حالت صفر، یک و دو در بُعدهای متناظرشان ذخیره می‌شود. به عبارت دیگر به اندازه‌ی تعداد بلوک کاندیدا در هر ستون به اضافه یک حالت برای مقادیر هر بُعد وجود خواهد داشت. هر آرایه بصورت یک ماتریس با یک ستون و به تعداد ستون‌هایی از مدل بلوکی اقتصادی در محدوده نهایی که دارای حداقل یک بلوک کاندیدا است، سطر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴-۱۳: روندنمای اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی در حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ - & 1 & 1 & 1 & - \\ - & - & 1 & - & - \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 3 & 2 \\ - & 1 & 1 & 1 & - \\ - & - & 0 & - & - \end{bmatrix}$$

شکل ۴-۱۴: تعداد بلوک‌های موجود در مخروط استخراجی رو به پائین برای هر عضو (شکل سمت راست). تعیین بلوک کاندیدا و بلوک غیر کاندیدا (شکل سمت چپ).

۴-۵- عمل‌گر جهش

پس از ایجاد جمعیت اولیه، روی بردارهای اولیه ایجاد شده طبق رابطه ۴-۱ جهش صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر دو بردار از جمعیت اولیه به تصادف انتخاب و از یکدیگر کم می‌شوند. از آنجایی که این مقدار

نماینده‌ی یک بلوک است نمی‌تواند مقداری منفی باشد به همین دلیل در قدر مطلق قرار می‌گیرد و سپس در فاکتور مقیاس ضرب و با بردار سومی که به تصادف انتخاب شده است جمع می‌شود. از آنجایی که مقدار هریک از بُعدها می‌بایست عدد صحیح مثبت بزرگتر مساوی عدد صفر باشد، حاصل ضرب مقدار تفاضل بردارها در فاکتور مقیاس باید در جزء صحیح قرار گیرد. دلیل مثبت و عدد صحیح بودن بردار جهش یافته این است که هرکدام از مقادیر موجود در بُعدها نماینده‌ی یک بلوک در محدوده روی مدل بلوکی اقتصادی است.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (1-4)$$

۴-۶- عمل گر تقاطع

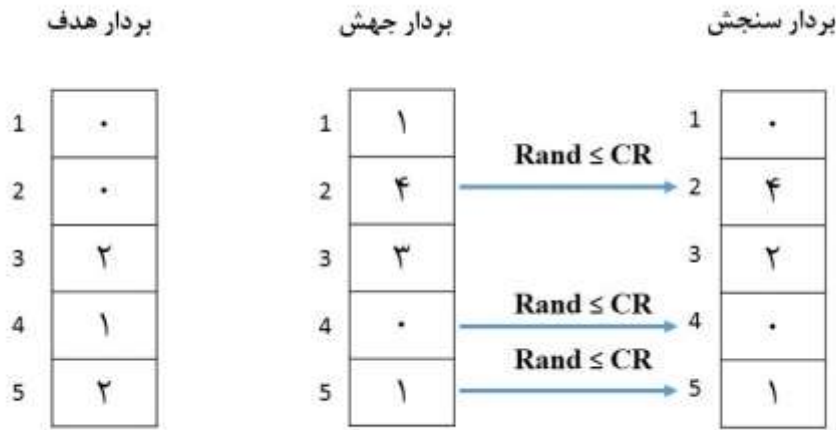
پس از اعمال جهش، بین بردار جهش‌یافته و بردار هدف یک مورد به عنوان بردار سنجش در نظر گرفته می‌شود. مبنای انتخاب بین این دو بردار بر اساس رابطه ۴-۲ و ۴-۳ به اینگونه است که در صورت بزرگتر مساوی بودن مقدار تبادلی نسبت به عدد تصادفی ایجاد شده در بازه‌ی صفر و یک، بردار جهش‌یافته و در غیر این صورت بردار هدف به عنوان بردار سنجش در نظر گرفته می‌شود. ساختار ماتریس‌های تولید شده در این سه مرحله از اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی از نظر ساختار (تعداد سطر و ستون ماتریس) یکسان بوده و فقط مقدار آن تغییر کرده است. عمل گر تقاطع در اجرای الگوریتم از نوع دو جمله‌ای در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۱۵ سه مرحله نخست اجرای الگوریتم روی مدل بلوکی فرضی نشان داده شده است.

۴-۷- مرحله انتخاب

در مرحله‌ی آخر از اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی، بردار سنجش بدست آمده در مرحله تقاطع و بردار هدف با معیار میزان برازندگی طبق رابطه ۴-۴ با هم مقایسه و به تعداد جمعیت اولیه یک مورد انتخاب می‌شوند. میزان برازندگی در الگوریتم تکامل تفاضلی از نوع تابع هزینه است. برای محاسبه میزان برازندگی بردار سنجش می‌بایست این بردار بدست آمده در مرحله قبل به عنوان فاز آخر موقت در محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی پیاده می‌شود.

$$u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1}, u_{2i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1}) \quad (2-4)$$

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } (rand(j) \leq CR) \text{ or } j \neq rnbr(i) \\ x_{ji,G} & \text{if } (rand(j) > CR) \text{ or } j = rnbr(i) \end{cases} \quad (3-4)$$



شکل ۴-۱۵: نمایش سه بردار هدف، جهش و سنجش برای مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} u_{ji,G+1} & \text{if } (u_{ji,G+1} \leq x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{if } (u_{ji,G+1} > x_{i,G}) \end{cases} \quad (4-4)$$

با توجه به اینکه فاز آخر استخراجی فازیست با کمترین مجموع ارزش اقتصادی بلوک، مجموع ارزش بلوک‌های پیاده شده در محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی به عنوان تابع برازندگی در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که مجموع ارزش بلوک‌های حاصل از پیاده‌سازی بردار هدف در محدوده روی مدل بلوکی اقتصادی کوچکتر از تابع برازندگی باشد، بردار سنجش و در غیر این صورت بردار هدف انتخاب می‌شود. پاسخ بدست آمده در مرحله‌ی آخر مجموع ارزش بلوک‌هایی است که از پیاده‌سازی نماینده‌های ماتریس فاز آخر در محدوده روی مدل بلوکی اقتصادی بوجود آمده و مقدار آن در مقایسه با دیگر پاسخ‌های تولید شده کمترین مقدار است. این پاسخ‌ها از نظر ساختار با پاسخ‌های تولید شده در سه مرحله قبل مشابه نیستند. لازم بذکر است که مقدار بدست آمده پاسخ نزدیک به بهینه است، به عبارت دیگر بلوک‌هایی که در فاز آخر می‌بایست استخراج شوند در این مرحله بدست می‌آید. شرط خاتمه‌ی اجرای الگوریتم، سپری شدن تعداد مشخصی از

بلوک‌های تعیین شده از محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی حذف می‌شود. به عبارت دیگر در ماتریس متناظر (ماتریس مرتبط با محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی و ماتریس مرتبط با بلوک کاندیدا) برای آن‌ها مقدار صفر لحاظ می‌شود و یکبار دیگر الگوریتم مورد نظر از ابتدا اجرا می‌شود تا فاز پیش از فاز آخر بدست بیاید. به همین ترتیب به تعداد فازهای استخراجی الگوریتم تکامل تفاضلی با شرایط جدید و پارامترهای ثابت اجرا می‌شود تا اینکه هیچ بلوکی در محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی باقی نماند و تمام اعضای ماتریس متناظر صفر شود.

۴-۸- فاکتورهای کنترل در الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مسئله

باتوجه به تجربی بودن پارامترهای کنترل در الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل یک مسئله بهینه‌سازی و آنچه در بخش ۳-۱۰ توضیح داده شده است، (در مثال نخست) فاکتور مقیاس جهش در بازه‌ی ۰ تا ۱ با گام ۰/۱ جدا شده است (به اندازه ۱۰ فاکتور مقیاس متفاوت). ثابت کراس‌اور معادل ۰/۱، و اندازه‌ی جمعیت معادل ۵۰ بردار برای هر دو مثال در نظر گرفته شده است.

محدودیت شیب در قالب نوع مدل تامین شده است. به این صورت که هر بلوکی که جزو فاز آخر جدا می‌شود، همراه با بلوک‌های واقع در مخروط استخراجی رو به پائین جدا می‌شود. یعنی بوسیله‌ی مخروط‌های استخراجی رو به پائین، تامین می‌شود. همانطور که در مسئله طراحی محدوده نهایی، بوسیله‌ی مخروط‌های استخراجی رو به بالا محدودیت شیب تامین می‌شود (میرزائی و کاکائی، ۱۳۸۴). به عبارت دیگر با تشکیل مخروط استخراجی رو به پائین برای هر بلوک در محدوده نهایی روی مدل بلوکی اقتصادی، محدودیت شیب برای بلوک مورد نظر پیاده می‌شود به این گونه که تمامی بلوک‌های کاندید استخراج در هر فاز می‌بایست با بلوک‌های موجود در مخروط استخراجی خود استخراج شود. برای این منظور به اندازه‌ی اختلاف عضوهای غیر صفر (عضوهای غیر صفر ماتریس‌های تولید شده در مرحله ایجاد جمعیت اولیه و مرحله جهش) از تعداد بلوکی که در فاز آخر استخراج می‌شوند (نه بیشتر و نه کمتر)، عدد صفر در جمعیت اولیه و ماتریس بردار هدف تولید می‌شود. برای مثال نخست تعداد بلوک‌های فاز آخر عدد ۳ و تعداد عضوهای ماتریس تمام مراحل اجرای الگوریتم (بعد بردار) عدد ۵ در نظر گرفته شده است، پس ۲ عدد صفر لزوماً در جمعیت اولیه باید تولید شود.

محدودیت ظرفیت فرآوری به این معنی است که در یک فاز استخراجی چه تعداد بلوک مثبت استخراج خواهند شد. این محدودیت در مثال نخست معادل حداقل یک بلوک مثبت و حداکثر دو بلوک مثبت در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه جمعیت اولیه بصورت مستقیم از ماتریس محدوده نهایی بدست نیامده است امکان اعمال این محدودیت در جمعیت اولیه وجود ندارد. این محدودیت به همراه محدودیت‌های ظرفیت استخراج و شیب بصورت همزمان پس از بدست آمدن فاز نهایی (پس از مرحله انتخاب) اعمال می‌شود.

۴-۹- اعمال همزمان محدودیت‌ها

همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد، ایجاد یک تعداد مشخصی عدد غیر صفر در جمعیت اولیه ضروریست زیرا عدم اعمال این فرایند موجب تولید و انتخاب بردار با مقادیر سراسر صفر به عنوان کم ارزش‌ترین فاز وجود می‌شود پس محدودیت ظرفیت استخراج می‌بایست در جمعیت اولیه ایجاد شود. اما با اعمال محدودیت شیب پس از مرحله انتخاب از اجرای الگوریتم، امکان نقض محدودیت ظرفیت استخراج وجود دارد. پس یک بار دیگر این محدودیت برای بار دوم و محدودیت فرآوری برای بار نخست می‌بایست پیاده شود. در این شرایط در انتخاب بلوک‌های موجود در هر فاز انعطاف بوجود می‌آید.

۴-۱۰- جزئیات مثال نخست

در این مثال (اجرای الگوریتم روی یک مدل بلوکی دو بعدی فرضی) ۱۰ حالت مختلف در نظر گرفته شده است و سه محدودیت شیب، ظرفیت استخراج و ظرفیت فرآوری اعمال شده است. این محدودیت‌ها بترتیب عبارتند از: شیب ۴۵ درجه، استخراج سه بلوک در هر فاز به عنوان محدودیت ظرفیت استخراج و استخراج حداقل یک بلوک و حداکثر دو بلوک با ارزش مثبت در هر فاز به عنوان محدودیت ظرفیت فرآوری. فرایند اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید روی مدل بلوکی فرضی با فاکتور مقیاس جهش ۰/۲ بصورت کامل در زیر اشاره شده است سپس ارزش خالص فعلی حالت‌های باقی‌مانده (با تغییر فاکتور مقیاس به طول گام ۰/۱) محاسبه شده است. فاز استخراجی به دست آمده در اجرای نخست الگوریتم تنها با اعمال محدودیت ظرفیت استخراج در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است، پس از اعمال

محدودیت شیب محدودیت ظرفیت استخراج نقض شده است (شکل ۴-۱۷). برای اعمال همزمان این دو محدودیت دو ترتیب مختلف که در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده وجود آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو ترتیب مختلف محدودیت ظرفیت فرآوری نیز اعمال شده است.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

شکل ۴-۱۶: فاز آخر استخراجی در مثال نخست با اعمال تنها محدودیت ظرفیت استخراج.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

شکل ۴-۱۷: فاز آخر استخراجی در مثال نخست با اعمال محدودیت شیب.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

الف

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

ب

شکل ۴-۱۸: فاز آخر استخراجی در مثال نخست با اعمال همزمان همه‌ی محدودیت‌ها.

فاز استخراجی بدست آمده در اجرای دوم الگوریتم تنها با اعمال محدودیت ظرفیت استخراج در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. پس از اعمال محدودیت شیب محدودیت ظرفیت استخراج نقض شده است (شکل ۴-۲۰). برای اعمال همزمان این دو محدودیت سه ترتیب مختلف که در شکل‌های ۴-۲۱ نشان داده شده وجود آمده است. برای فاز دوم در هیچ مورد محدودیت ظرفیت فرآوری نقض نشده است. در نهایت فازهای استخراجی تعیین و همانطور که در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

شکل ۴-۱۹: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای نخستین حالت با اعمال تنها محدودیت ظرفیت استخراج.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

شکل ۴-۲۰: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای نخستین حالت با اعمال محدودیت شیب.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

الف

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

ب

شکل ۴-۲۱: فاز دوم استخراجی تعیین شده با اعمال هم‌زمان همه‌ی محدودیت‌ها.

	1	2	3	4	5
1	۳	۲	۱	۱	۱
2		۳	۲	۲	
3			۳		

الف

	1	2	3	4	5
1	۳	۱	۱	۲	۱
2		۳	۲	۲	
3			۳		

ب

شکل ۴-۲۲: تعیین فاز های استخراجی در مثال نخست برای نخستین حالت.

فاز استخراجی بدست آمده برای ترتیب دوم در اجرای دوم الگوریتم تنها با اعمال محدودیت ظرفیت

استخراج در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. پس از اعمال محدودیت شیب محدودیت ظرفیت استخراج

نقض شده است (شکل ۴-۲۴). برای اعمال هم‌زمان این دو محدودیت سه حالت مختلف که در شکل ۴-۲۵

نشان داده شده بوجود آمده است که برای فاز دوم در هیچ مورد محدودیت ظرفیت فرآوری نقض نشده است. در نهایت فازهای استخراجی تعیین و در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است. در جدول ۴-۲۶ برای فاکتور مقیاس ۰/۲ ترتیب‌های مختلف تعیین و ارزش خالص فعلی آن‌ها محاسبه شده است. در جدول ۴-۲۷ برای ۱۰ حالت مختلف الگوریتم تکامل تفاضلی روی مثال نخست اجرا شده و ارزش خالص فعلی آن‌ها محاسبه شده است.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

شکل ۴-۲۳: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای سومین حالت با اعمال تنها محدودیت ظرفیت استخراج.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

شکل ۴-۲۴: فاز دوم استخراجی در مثال نخست برای سومین حالت با اعمال محدودیت شیب.

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

الف

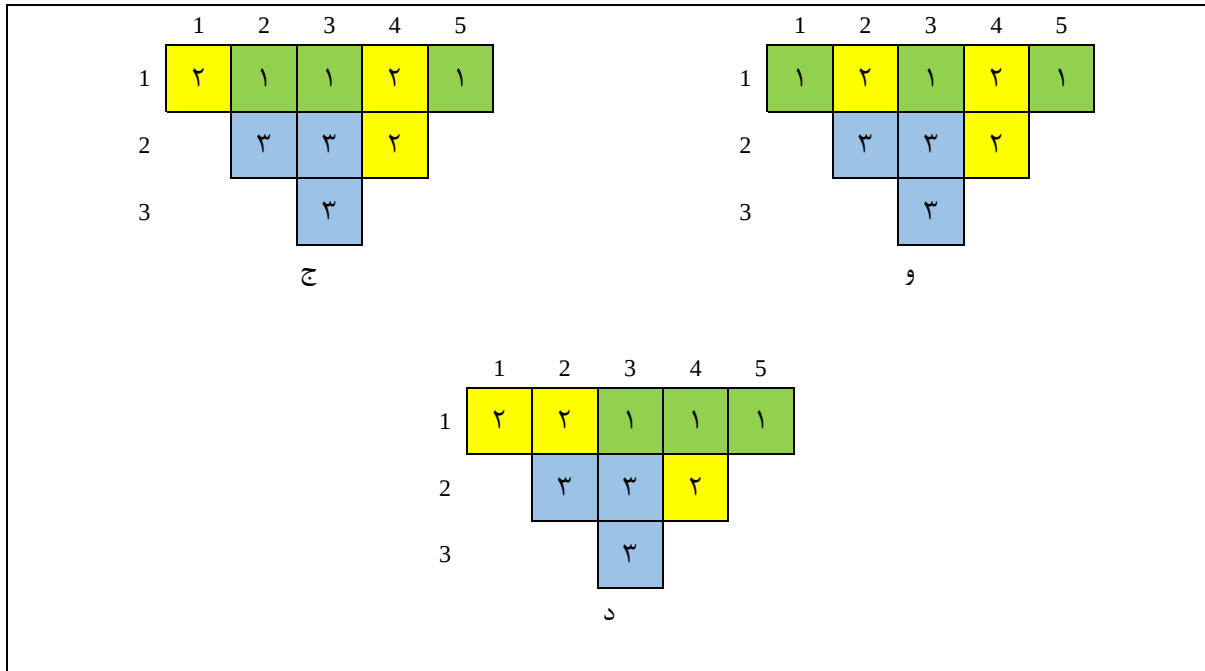
	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

ه

	1	2	3	4	5
1	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
2		۳	-۲	۲	
3			۱۰		

ب

شکل ۴-۲۵: فاز دوم استخراجی با اعمال هم‌زمان همه‌ی محدودیت‌ها در مثال نخست برای دومین حالت.



شکل ۴-۲۶: تعیین سکانس استخراجی در مثال نخست برای دومین حالت.

۴-۱۱- جزئیات مثال دوم

در این مثال الگوریتم تکامل تفاضلی تنها با اعمال دو محدودیت شیب (زاویه‌ی شیب ۴۵ درجه) و محدودیت ظرفیت استخراج (استخراج سه بلوک در هر فاز) روی یک مدل بلوکی دو بعدی فرضی اجرا شده است. با تغییر فاکتور مقیاس جهش به طول گام ۰/۱ تعداد ۱۰ حالت متفاوت برای اجرای الگوریتم، در نظر گرفته شده است و ارزش خالص فعلی با نرخ بهره ۱۵ درصد محاسبه و سکانس استخراجی تعیین شده است (جدول ۴-۲۸). در شکل‌های ۴-۲۷ و ۴-۲۸ به ترتیب برای مثال نخست و مثال دوم، نمودار همگرایی برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به اینکه شرط خاتمه در این الگوریتم، تعداد تکرار مشخص در نظر گرفته شده است، نسبت سود فاز آخر استخراجی به تکرار در این نمودارها نمایش داده شده است. در جدول‌های ۴-۲۹، ۴-۳۰ و ۴-۳۱ بترتیب برای مثال نخست و مثال دوم، ارزش خالص فعلی به دست آمده بوسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی با روش برنامه‌ریزی پویا مقایسه شده است. برای سنجش کارایی این دو روش از رابطه ۴-۵ استفاده شده است که در آن Z_{Dp} ارزش خالص فعلی محاسبه شده برای روش برنامه‌ریزی پویا و Z_{DE} ارزش خالص فعلی مربوط به الگوریتم تکامل تفاضلی و انحراف با Gap نشان داده شده است.

$$\text{Gap}(\%) = \frac{Z_{Dp} - Z_{DE}}{Z_{DE}} * 100 \quad (۴-۵)$$

جدول ۴-۲۶: محاسبه ارزش خالص فعلی پس از تعیین سکانس استخراجی در مثال نخست (فاکتور مقیاس ۰/۲).

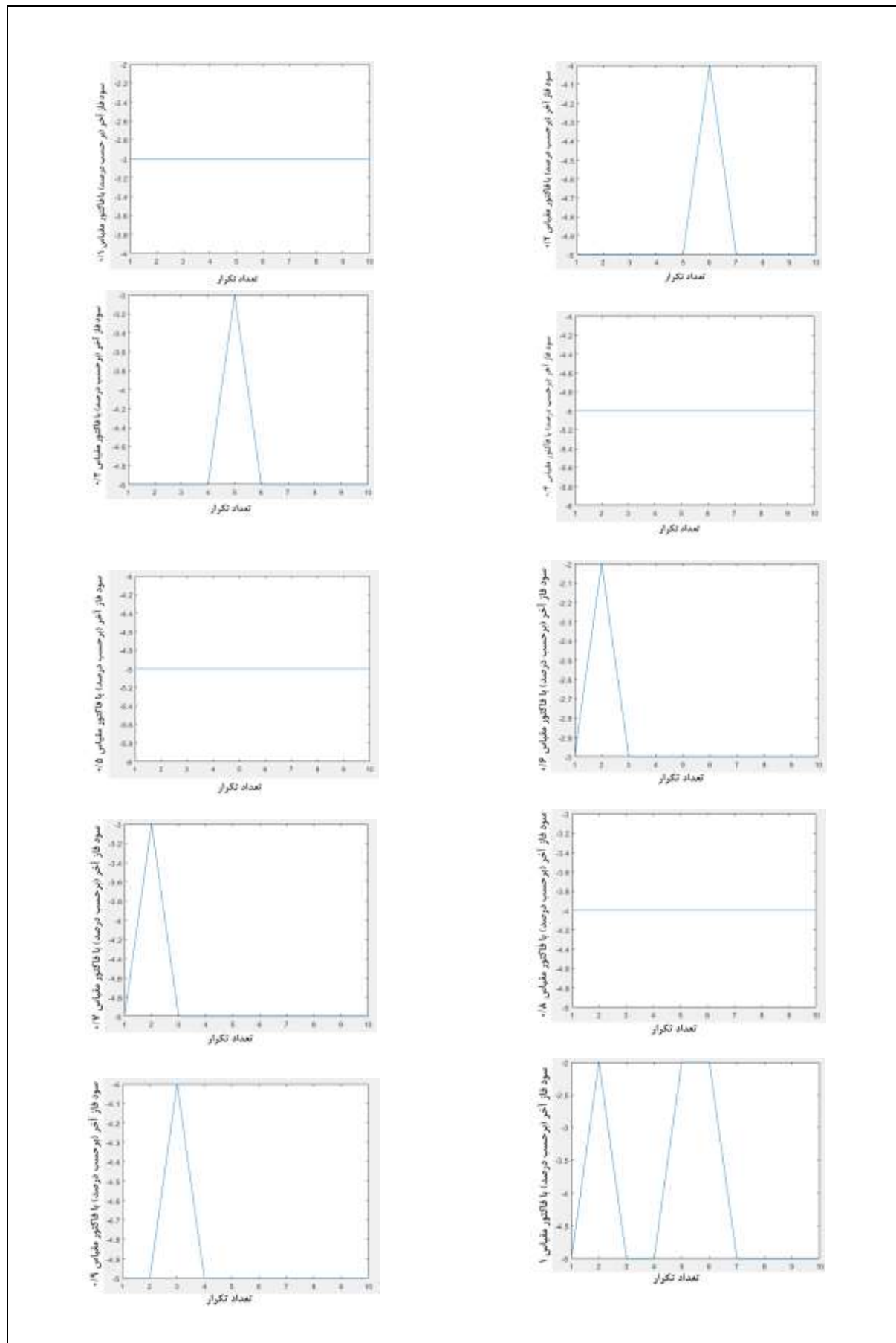
شماره	تعیین سکانس استخراجی برای نخستین حالت از مثال نخست	ارزش خالص فعلی (دلار)
۱		۵/۶۰
۲		۵/۶۰
۳		۵/۶۰
۴		۵/۴۹
۵		۵/۶۰

جدول ۴-۲۷: محاسبه ارزش خالص فعلی پس از تعیین سکانس استخراجی در مثال نخست برای ۱۰ حالت مختلف.

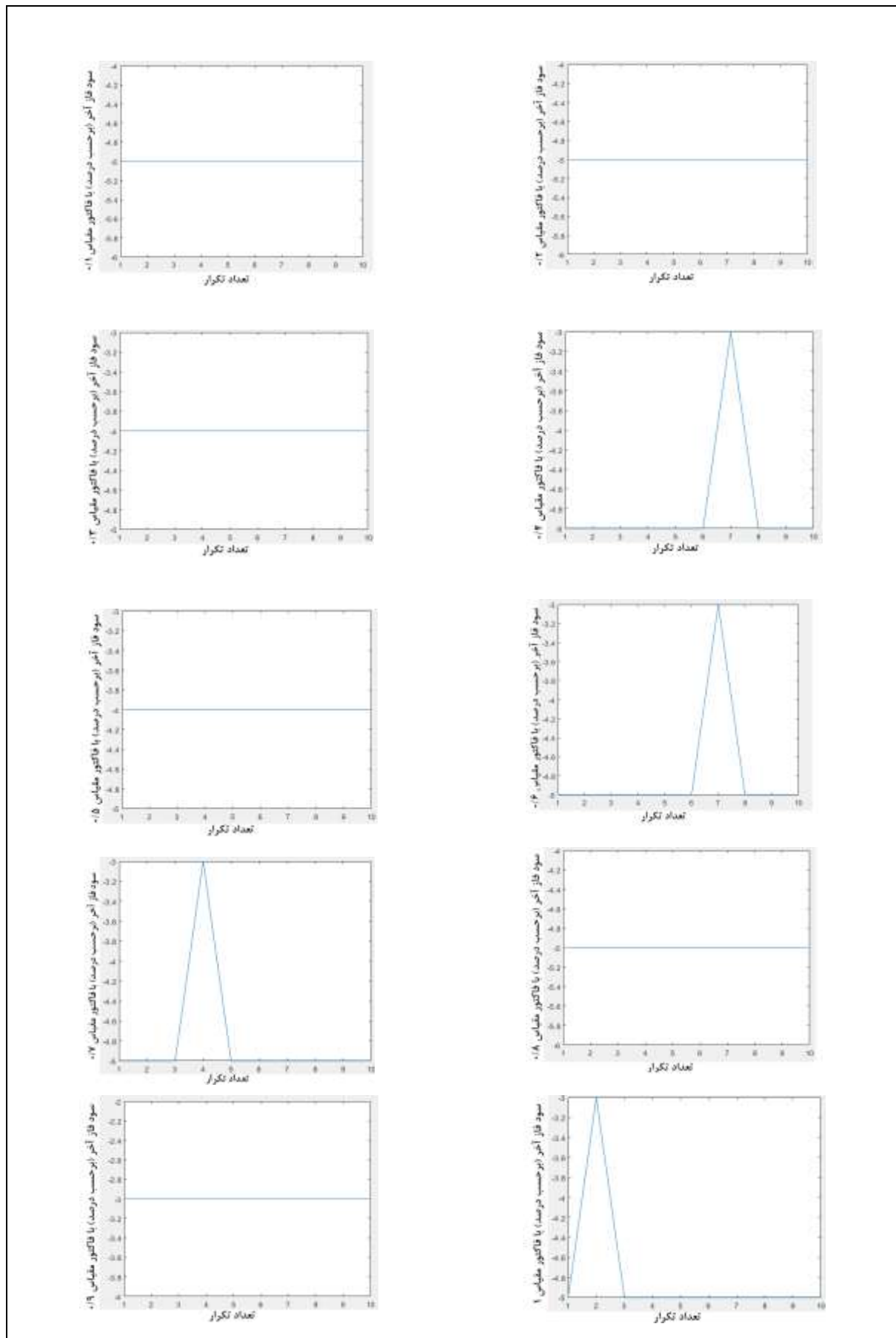
شماره	تعیین سکانس استخراجی برای نخستین حالت از مثال نخست	فاکتور مقیاس جهش	ارزش خالص فعلی (دلار)
۱		۰/۱	۵/۵۹
		۰/۷	
		۱	
۲		۰/۲	۵/۶۰
		۰/۶	
۳		۰/۳	۵/۶۰
		۰/۸	
		۰/۹	
۴		۰/۴	۵/۶۰
		۰/۵	

جدول ۴-۲۸: محاسبه ارزش خالص فعلی پس از تعیین سکانس استخراجی در مثال دوم برای ۱۰ حالت مختلف.

شماره	تعیین سکانس استخراجی برای نخستین حالت از مثال نخست	فاکتور مقیاس جهش	ارزش خالص فعلی (دلار)
۱		۰/۱	۵/۶۰
		۰/۲	
۲		۰/۳	۵/۶۰
۳		۰/۴	۵/۲۱
		۰/۵	
۴		۰/۶	۵/۲۱
		۰/۷	
۵		۰/۸	۵/۶۰
		۱	
۶		۰/۹	۵/۰۶



شکل ۴-۲۷: نمودار همگرایی مربوط به اجرای الگوریتم برای مثال نخست در ۱۰ حالت متفاوت.



شکل ۴-۲۸: نمودار همگرایی مربوط به اجرای الگوریتم برای مثال دوم در ۱۰ حالت متفاوت.

جدول ۴-۲۹: مقایسه‌ی ارزش خالص فعلی (با نرخ بهره ۱۵ درصد) به دست آمده در مثال نخست با روش برنامه‌ریزی پویا.

حالت	اندازه جمعیت	ثابت کراس‌اور	فاکتور مقیاس جهش	ارزش خالص فعلی در روش تکامل تفاضلی (دلار)	مقدار انحراف بدست آمده در مقایسه‌ی دو روش (درصد)
۱	۵۰	۰/۱	۰/۱	۵/۵۹	۰/۱۷
۲	۵۰	۰/۱	۰/۲	۵/۶۰	۰
۳	۵۰	۰/۱	۰/۳	۵/۶۰	۰
۴	۵۰	۰/۱	۰/۴	۵/۶۰	۰
۵	۵۰	۰/۱	۰/۵	۵/۶۰	۰
۶	۵۰	۰/۱	۰/۶	۵/۶۰	۰
۷	۵۰	۰/۱	۰/۷	۵/۵۹	۰/۱۷
۸	۵۰	۰/۱	۰/۸	۵/۶۰	۰
۹	۵۰	۰/۱	۰/۹	۵/۶۰	۰
۱۰	۵۰	۰/۱	۱	۵/۵۹	۰/۱۷

جدول ۴-۳۰: مقایسه‌ی ارزش خالص فعلی (با نرخ بهره ۱۵ درصد) به دست آمده در مثال دوم با روش برنامه‌ریزی پویا.

حالت	اندازه جمعیت	ثابت کراس‌اور	فاکتور مقیاس جهش	ارزش خالص فعلی در روش تکامل تفاضلی (دلار)	مقدار انحراف بدست آمده در مقایسه‌ی دو روش
۱	۵۰	۰/۱	۰/۱	۵/۶۰	۰
۲	۵۰	۰/۱	۰/۲	۵/۶۰	۰
۳	۵۰	۰/۱	۰/۳	۵/۶۰	۰
۴	۵۰	۰/۱	۰/۴	۵/۲۱	۷/۴۸
۵	۵۰	۰/۱	۰/۵	۵/۲۱	۷/۴۸
۶	۵۰	۰/۱	۰/۶	۵/۲۱	۷/۴۸

جدول ۴-۳۱: ادامه جدول ۲۷.

۷/۴۸	۵/۲۱	۰/۷	۰/۱	۵۰	۷
۰	۵/۶۰	۰/۸	۰/۱	۵۰	۸
-/۱	۵/۰۶	۰/۹	۰/۱	۵۰	۹
۰	۵/۶۰	۱	۰/۱	۵۰	۱۰

۴-۱۲- مطالعه موردی

در این مثال از داده‌های اکتشافی مربوط به عنصر مس مربوط به معدن مس سونگون استفاده شده است. پس از ساخت مدل بلوکی زمین‌شناسی تعداد ۹۱۷۲۸۲ بلوک به ابعاد ۲۵ در ۲۵ در ۱۲/۵ ایجاد شده است. در این بخش برای سه مقطع دو بعدی متفاوت در امتداد محور y (مقطع xz)، فازهای استخراجی تعیین شده‌اند. مقطع نخست در تراز ۴۴۰۷/۶۲، مقطع دوم در تراز ۴۴۳۲/۶۲ و مقطع سوم در تراز ۴۴۵۷/۶۲ در نظر گرفته شده است. برای برنامه‌ریزی ابتدا مدل بلوکی زمین‌شناسی با استفاده از اطلاعات اکتشافی و نرم‌افزار Datamine به دست آمده، سپس مدل بلوکی بصورت یک ماتریس در نرم‌افزار Matlab تعریف شده است. با استفاده از اطلاعات اقتصادی و زمین‌شناسی (جدول ۴-۳۲) مدل بلوکی اقتصادی ساخته شده است.

جدول ۴-۳۲: اطلاعات اقتصادی و زمین‌شناسی مربوط به مطالعه موردی.

مقدار	موارد	
۰/۱۷	عیار حد	۱
۲/۵ (تن بر متر مکعب)	وزن مخصوص کانسنگ	۲
۲/۵ (تن بر متر مکعب)	وزن مخصوص باطله	۳
۱/۱ (دلار بر تن)	هزینه استخراج کانسنگ	۴
۱/۱ (دلار بر تن)	هزینه برداشت باطله	۵
۹ (دلار بر تن)	هزینه فرآوری کانسنگ	۶
۷۰۰۰ (دلار بر تن)	قیمت ماده معدنی	۷

برای تعیین فازهای استخراجی روی این سه مقطع (مدل دو بعدی) ابتدا محدوده بهینه نهایی به روش برنامه‌ریزی پویا بدست آمده است. در مقطع نخست ۶۵۶ بلوک، در مقطع دوم ۶۷۲ بلوک و در مقطع سوم ۷۴۲ بلوک در محدوده بهینه نهایی واقع شده است. سپس برنامه‌ریزی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی انجام گرفته است. همچنین برای این مقاطع به ترتیب ۸، ۷ و ۸ فاز استخراجی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر طول هر فاز استخراجی در این مقاطع عبارت است از ۸۲، ۸۴ و ۱۰۶ بلوک. در این مثال تنها دو محدودیت شیب (زاویه ۴۵ درجه) و ظرفیت استخراج (به طول تعداد بلوک‌های یاد شده) لحاظ شده است. برای این مثال اندازه جمعیت ۵۰ بردار، ثابت کراس‌اور ۰/۱، فاکتور مقیاس جهش ۰/۵ و تعداد تکرارها ۱۰ تکرار (به عنوان شرط خاتمه) در نظر گرفته شده است. در جدول ۴-۳۳ و ۴-۳۴، ۴-۳۵ و ۴-۳۶ به ترتیب برای مقطع نخست تا مقطع سوم تعداد اجرای الگوریتم و زمان سپری شدن هر اجرا نشان داده شده است.

جدول ۴-۳۳: تعداد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی و سپری شدن زمان هر اجرا برای مقطع نخست.

شماره فاز استخراجی	اجرا	زمان اجرا (ثانیه)	تعداد عضو با مقدار صفر
۱	نخست	۲/۳۷	-
	دوم	-	۱۲
۲	نخست	-	-
	دوم	۲/۰۲	۴
۳	نخست	۶/۶۱	-
	دوم	۱/۸۹	-
	سوم	۱/۶۳	۶
۴	نخست	۵/۴۵	-
	دوم	۱/۸۹	۹
۵	نخست	۲/۰۰	-
	دوم	۱/۸۶	-

جدول ۴-۳۴: ادامه جدول ۳۳.

۶	نخست	۲/۰۲	-
	دوم	۰/۷۰	-
	سوم	۰/۶۴	۳۰
۷	نخست	۱/۷۶	-
	دوم	۱/۹۷	-
	سوم	۱/۶۷	-

جدول ۴-۳۵: تعداد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی و سپری شدن زمان هر اجرا برای مقطع دوم.

شماره فاز استخراجی	اجرا	زمان اجرا (ثانیه)	تعداد عضو با مقدار صفر
۱	نخست	۲۰/۲۸	-
	دوم	۲/۰۵	۱۱
۲	نخست	۲/۰۳	-
	دوم	۱/۹	۴
۳	نخست	۷/۲۹	-
	دوم	۱/۹۷	-
	سوم	۱/۸۷	۱
۴	نخست	۲/۲۷	-
	دوم	۱/۸۰	۷
۵	نخست	۱/۹۰	-
	دوم	۱/۹۶	۵
۶	نخست	۱/۸۸	-
	دوم	۵/۷۷	-
	سوم	۱/۸۱	۲۰
۷	نخست	۲/۱۲	-
	دوم	۱/۷۶	-
	سوم	۱/۷۶	۳۰

جدول ۴-۳۶: تعداد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی و سپری شدن زمان هر اجرا برای مقطع سوم.

شماره فاز استخراجی	اجرا	زمان اجرا (ثانیه)	تعداد عضو با مقدار صفر
۱	نخست	۳/۴۶	-
	دوم	۱/۹۳	-
	سوم	۱/۹۶	۴۰
۲	نخست	۲/۶۲	-
	دوم	۱/۹۸	-
	سوم	۱/۹۳	۱۹
۳	نخست	۷/۶۷	-
	دوم	۱/۹۱	-
	سوم	۱/۹۱	-
	چهارم	۱/۹۳	-
۴	نخست	۵/۴۶	-
	دوم	۱/۸۷	۲۴
	سوم	۱/۸۸	-
۵	نخست	۱/۸۳	-
	دوم	۱/۹۲	-
	سوم	۰/۷۶	-
۶	نخست	۱/۹۰	-
	دوم	۲/۰۰	-
	سوم	۱/۷۹	-
	چهارم	۲/۱۵	-

در جدول ۴-۳۷، ۴-۳۸ و ۴-۳۹ و ۴-۴۰ به ترتیب برای مقطع نخست تا مقطع سوم، تعداد بلوک موجود، حجم کل بلوک‌ها و مجموع ارزش اقتصادی بلوک‌ها در هر فاز نشان داده شده است. در شکل ۴-۲۹، ۴-۳۰ و

۴-۳۱ به ترتیب تعیین فاز استخراجی انجام گرفته بر روی مقطع نخست ۳۴ در ۴۸، مقطع دوم به ابعاد ۳۴ در ۴۸ و مقطع سوم به ابعاد ۳۵ در ۵۰ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن نرخ بهره‌ی ۱۵ درصد ارزش خالص فعلی برای مقطع نخست و مقطع دوم بترتیب حدوداً معادل ۲۳/۶۹، ۵۹/۳۵ و ۲۷/۴۴ میلیون دلار است.

جدول ۴-۳۷: خلاصه وضعیت مربوط به مقطع نخست.

ارزش اقتصادی	تناژ		تعداد بلوک		فاز
	باطله	کانسنگ	باطله	کانسنگ	
-۱۷۶۱۷۱۸/۷۵	۱۶۰۱۵۶۲/۵	-	۸۲	-	۱
-۱۷۶۱۷۱۸/۷۵	۱۶۰۱۵۶۲/۵	-	۸۲	-	۲
-۱۷۶۱۷۱۸/۷۵	۱۶۰۱۵۶۲/۵	-	۸۲	-	۳
-۱۷۶۱۷۱۸/۷۵	۱۶۰۱۵۶۲/۵	-	۸۲	-	۴
۲۸۸۱۶۴۲/۱۴	۱۵۰۳۹۰۶/۲۵	۹۷۶۵۶/۲۵	۷۷	۵	۵
-۱۷۶۱۷۱۸/۷۵	۱۶۰۱۵۶۲/۵	-	۸۲	-	۶
۶۷۶۹۷۱۱/۴۱	۱۴۴۵۳۱۲/۲۵	۱۵۶۲۵۰	۷۴	۸	۷
۸۰۸۶۰۸۷/۴۸	۱۴۲۵۷۸۱/۲۵	۱۷۵۷۸۱/۲۵	۷۳	۹	۸

جدول ۴-۳۸: خلاصه وضعیت مربوط به مقطع دوم.

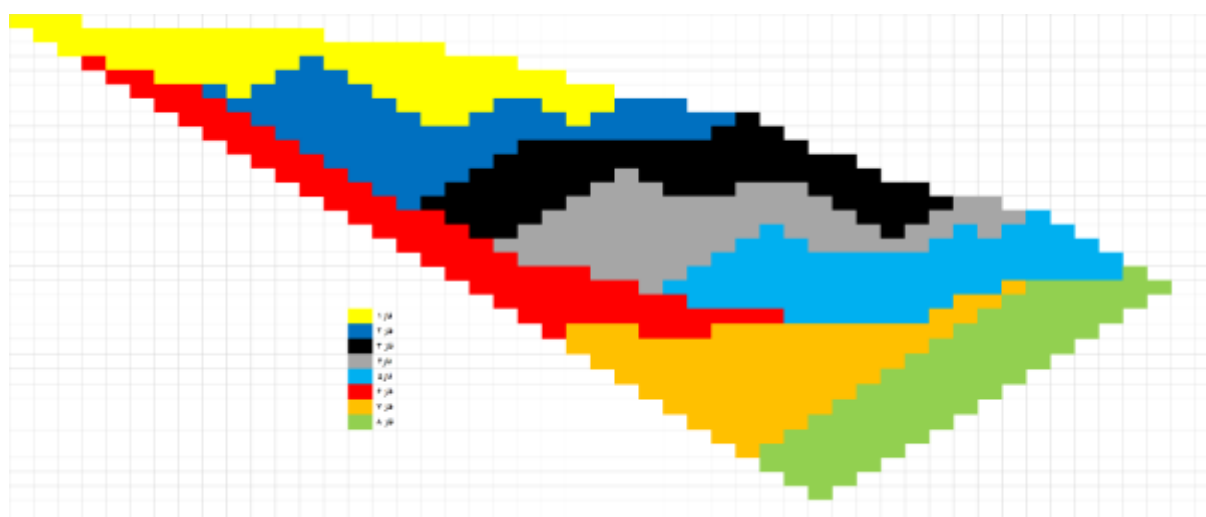
ارزش اقتصادی	تناژ		تعداد بلوک		فاز
	باطله	کانسنگ	باطله	کانسنگ	
-۱۸۰۴۶۸۷/۵	۱۶۴۰۶۲۵	-	۸۴	-	۱
-۱۸۰۴۶۸۷/۵	۱۶۴۰۶۲۵	-	۸۴	-	۲
-۱۸۰۴۶۸۷/۵	۱۶۴۰۶۲۵	-	۸۴	-	۳
-۱۸۰۴۶۸۷/۵	۱۶۴۰۶۲۵	-	۸۴	-	۴
۳۲۸۱۸۵۹/۶۳	۱۵۴۲۹۶۸/۷۵	۹۷۶۵۶/۲۵	۷۹	۵	۵

جدول ۴-۳۹: ادامه جدول ۳۸.

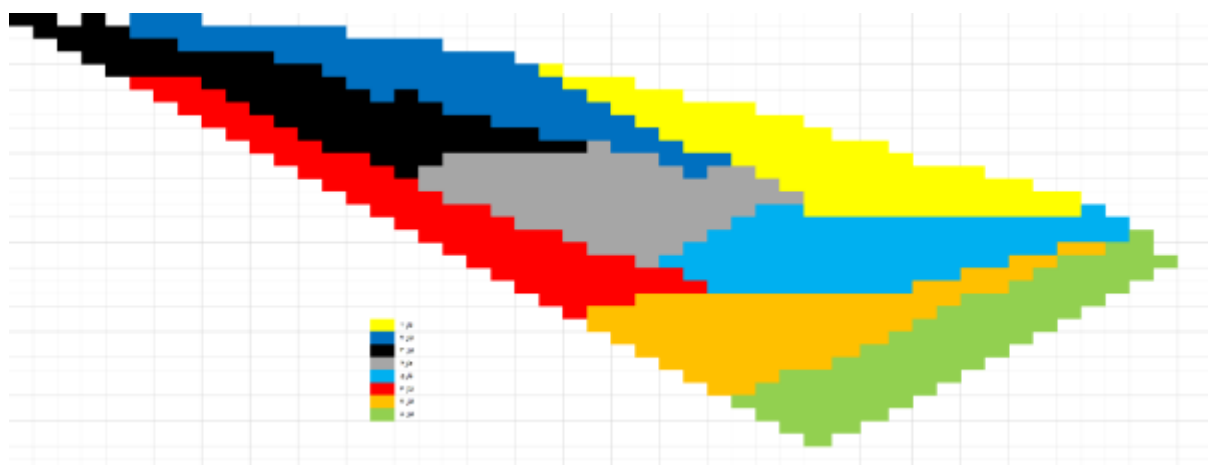
۱۸۰۴۶۸۷/۵	۱۶۴۰۶۲۵	-	۸۴	-	۶
۱۳۲۵۷۴۴۲۲/۰۸	۱۴۲۵۷۸۱/۲۵	۲۱۴۸۴۳/۷۵	۷۳	۱۱	۷
۱۶۰۶۸۲۰۷/۲۰	۱۳۲۸۱۲۵	۳۱۲۵۰۰	۶۸	۱۶	۸

جدول ۴-۴۰: خلاصه وضعیت مربوط به مقطع سوم.

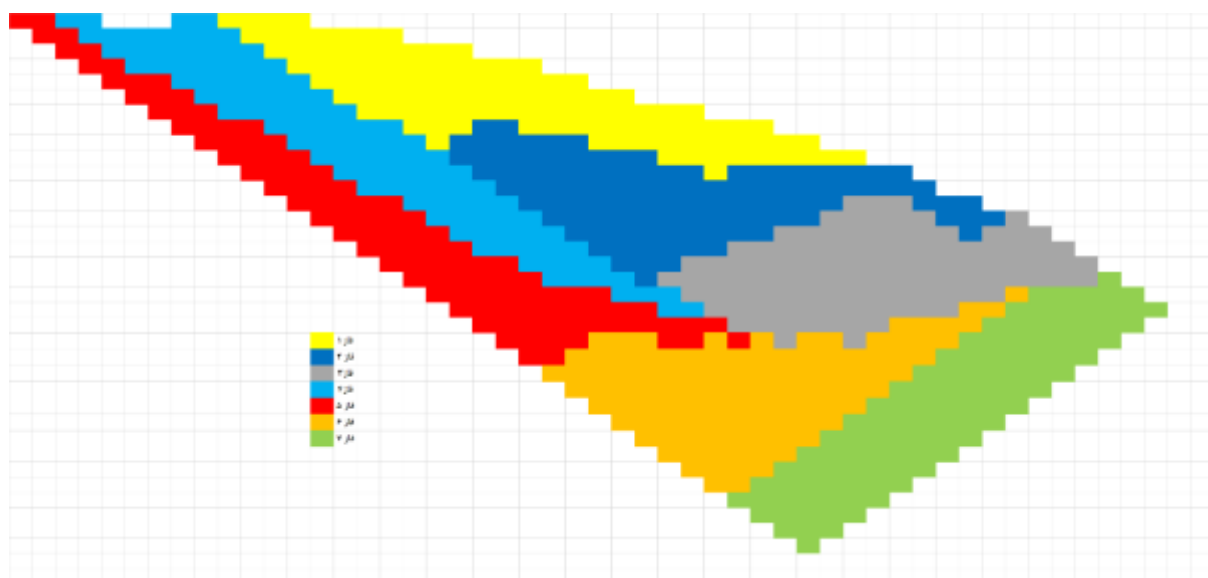
ارزش اقتصادی	تناژ		تعداد بلوک		فاز
	باطله	کانسنگ	باطله	کانسنگ	
-۲۲۷۷۳۴۳/۷۵	۲۰۷۰۳۱۲/۵	-	۱۰۶	-	۱
-۲۲۷۷۳۴۳/۷۵	۲۰۷۰۳۱۲/۵	-	۱۰۶	-	۲
۶۴۲۱۶۲۱/۰۴	۱۸۹۴۵۳۱/۲۵	۱۷۵۷۸۱/۲۵	۹۷	۹	۳
-۲۲۷۷۳۴۳/۷۵	۲۰۷۰۳۱۲/۵	-	۱۰۶	-	۴
-۲۲۷۷۳۴۳/۷۵	۲۰۷۰۳۱۲/۵	-	۱۰۶	-	۵
۲۲۱۴۰۰۳۰/۱۰	۵۱۶۷۹۶۸۷/	۳۹۰۶۲۵	۸۶	۲۰	۶
۵۲۶۲۸۲۲۹/۰۱	۱۱۳۲۸۱۲/۵	۹۳۷۵۰۰	۵۸	۴۸	۷



شکل ۴-۲۹: تعیین فاز استخراجی برای مقطع نخست در مثال مربوط به مطالعه موردی.



شکل ۴-۳۰: تعیین فاز استخراجی برای مقطع دوم در مثال مربوط به مطالعه موردی.



شکل ۴-۳۱: تعیین فاز استخراجی برای مقطع سوم در مثال مربوط به مطالعه موردی.

۴-۱۳- جمع‌بندی

در این فصل بوسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی به محاسبه‌ی ارزش خالص فعلی و تعیین سکانس استخراجی روی مدل بلوکی اقتصادی که محدوده بهینه نهایی روی آن به روش ریاضی برنامه‌ریزی پویا تعیین شده، پرداخته شده است. در دو مثال مربوط به مدل بلوکی فرضی می‌توان این چنین نتیجه گرفت که کم یا زیاد بودن محدودیت‌ها تاثیری در افزایش یا کاهش ارزش خالص فعلی ندارد. پس از تحلیل حساسیت در مثال

نخست بیشترین ارزش خالص فعلی (پاسخ نهایی) $5/60$ (مربوط به فاکتور مقیاس جهش $0/6-0/2$ و $0/9-$ $0/8$) است. در مثال دوم همین مقدار مربوط به فاکتور مقیاس $0/3-0/1$ ، $0/8$ و 1 است. برای فاکتورهای ذکر شده ارزش خالص فعلی به دست آمده بوسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی مساوی با مقدار به دست آمده به روش برنامه‌ریزی پویا است. در این تحقیق افزایش یا کاهش فاکتور مقیاس تاثیری در افزایش یا کاهش ارزش خالص فعلی ندارد.

در انتهای فصل، یک مدل بلوکی واقعی برای تعیین سکانس استخراجی مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است به دلیل بررسی تک بلوک‌ها در روش برنامه‌ریزی پویا، استفاده از این روش در یک مدل بلوک واقعی بسیار زمان‌بر است به گونه‌ای که می‌توان ادعا کرد به دلیل بزرگ بودن مسئله عملاً امکان پذیر نیست و این مسئله مزیت الگوریتم تکامل تفاضلی را نسبت به روش برنامه‌ریزی پویا نشان می‌دهد. ارزش خالص فعلی محاسبه شده برای سه مقطع دو بعدی از یک مدل بلوکی سه بعدی واقعی به ترتیب حدوداً برابر $2/36$ ، $5/93$ و $27/44$ میلیون دلار است.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی تولید معدن جزو مهم‌ترین مسائل موجود در معدن‌کاری است. تاکنون روش قابل اعتمادی که مورد قبول همگان باشد برای حل این مسئله پیشنهاد نشده است تا بوسیله‌ی آن کارایی روش‌های دیگر مورد بررسی قرار گیرد. روش‌های هوش مصنوعی به دلیل بزرگ بودن مسئله برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بر بودن روش‌های ریاضی جایگزین مناسبی برای این روش‌ها هستند. روش‌های هوش مصنوعی بسیار کم هزینه هستند.

تا کنون روش‌های بسیار متنوعی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز پیشنهاد شده است. این روش‌ها بر اساس خاصیت جستجو محوری‌شان به روش‌های ریاضی، ابتکاری و هوش مصنوعی (فرا ابتکاری) تقسیم می‌شوند. لازم به ذکر است که در تعیین محدوده نهایی معادن روباز روش نظریه گراف یک روش بهینه و برای سنجش کارایی دیگر روش‌ها قابل استفاده است اما در مسئله برنامه‌ریزی تولید هیچ روش قابل قبولی نمی‌تواند نقش روش نظریه گراف را بازی کند.

الگوریتم‌های جستجوی تحلیلی با استفاده از یک تابع ریاضی هدایت می‌شوند. این الگوریتم‌ها، یافتن جواب بهینه را در صورت وجود تضمین می‌کنند. الگوریتم‌های فرا مکاشفه‌ای کل فضای جستجو را به دلیل بزرگی آن پیمایش نکرده (که به همین دلیل ناکامل و البته غیر بهینه هستند) و تنها به پیمایش بخشی از فضا که احتمال وجود یک پاسخ به اندازه کافی خوب در آن بیشتر است، اکتفا می‌کنند. الگوریتم تکامل تفاضلی جزو ساده‌ترین الگوریتم‌های تکاملی است که جمعیت محور و تصادفی است. تاکنون انواع مختلفی از الگوریتم تکامل تفاضلی از جمله تکامل تفاضلی تطبیق یافته پیشنهاد شده است که عموماً تغییر نوع آن‌ها با تغییراتی که روی جهش انجام می‌شود صورت می‌پذیرد. با توجه با سنجش کارایی انجام گرفته بر روی سه الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، این نتیجه بدست آمد که هرچند الگوریتم تکامل تفاضلی نسبت به الگوریتم ژنتیک کندتر است اما نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سریع‌تر عمل می‌کند و نسبت به دو الگوریتم دیگر ساده‌تر است.

بوسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی به محاسبه‌ی ارزش خالص فعلی و تعیین سکانس استخراجی روی مدل بلوکی اقتصادی که محدوده بهینه نهایی روی آن به روش ریاضی برنامه‌ریزی پویا تعیین شده، پرداخته شده است. در دو مثال مربوط به مدل بلوکی فرضی می‌توان این چنین نتیجه گرفت که کم یا زیاد بودن محدودیت‌ها تاثیری در افزایش یا کاهش ارزش خالص فعلی ندارد. پس از تحلیل حساسیت در مثال نخست بیشترین ارزش خالص فعلی (پاسخ نهایی) $5/60$ (مربوط به فاکتور مقیاس جهش $0/2-0/6$ و $0/8-0/9$) است. در مثال دوم، همین مقدار مربوط به فاکتور مقیاس $0/1-0/3$ ، $0/8$ و 1 است. برای فاکتورهای ذکر شده ارزش خالص فعلی به دست آمده بوسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی مساوی با مقدار به دست آمده به روش برنامه‌ریزی پویا است. در این تحقیق افزایش یا کاهش فاکتور مقیاس تاثیری در افزایش یا کاهش ارزش خالص فعلی ندارد. یک مدل بلوکی واقعی برای تعیین سکانس استخراجی مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است به دلیل بررسی تک بلوک‌ها در روش برنامه‌ریزی پویا، استفاده از این روش در یک مدل بلوک واقعی بسیار زمان‌بر است به گونه‌ای که می‌توان ادعا کرد به دلیل بزرگ بودن مسئله عملاً امکان پذیر نیست و این مسئله مزیت الگوریتم تکامل تفاضلی را نسبت به روش برنامه‌ریزی پویا نشان می‌دهد. ارزش خالص فعلی محاسبه شده برای سه مقطع دو بعدی از یک مدل بلوکی سه بعدی واقعی به ترتیب حدوداً برابر $2/36$ ، $5/93$ و $27/44$ میلیون دلار است. نتیجه‌گیری کلی این تحقیق بصورت موردی عبارت است از:

الف. روی یک مدل بلوکی دو بُعدی فرضی ارزش خالص فعلی محاسبه شده به وسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی (با تغییر فاکتورهای کنترل)، کوچکتر مساوی با ارزش خالص فعلی محاسبه شده به روش برنامه‌ریزی پویا است.

ب. مثبت بودن ارزش خالص فعلی در دو مثال نشان دهنده‌ی به صرفه بودن استخراج با تعیین فازهای استخراجی انجام گرفته شده است.

ج. با توجه به بزرگ مقیاس بودن مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز، روش برنامه‌ریزی پویا بسیار زمان‌بر خواهد بود و الگوریتم تکامل تفاضلی جایگزین مناسبی برای این روش خواهد بود.

۵-۲- پیشنهادها

باتوجه به گستردگی و بزرگ مقیاس بودن مسئله مربوط به برنامه‌ریزی تولید در معدن و استفاده از روش‌های تحقیق در عملیاتی مانند مدل ریاضی برنامه‌ریزی پویا (به دلیل نیازمندی به کار گروهی) امکان در نظر گرفتن همه‌ی شرایط برای این مسئله وجود ندارد، البته لازم به ذکر است که توانایی برنامه‌نویسی کاربر بی‌تأثیر در این مسئله نیست، به همین دلیل مواردی با هدف جامع بودن تحقیقات آینده پیشنهاد شده است که عبارتند از:

الف. برای استفاده‌ی روش مورد نظر در برنامه‌ریزی یک معدن واقعی از یک مدل بلوکی واقعی سه بعدی استفاده شود.

ب. عدم قطعیت اقتصادی و زمین شناسی روی مدل بلوکی اقتصادی لحاظ شود.

ج. از شیب متغیر بجای شیب ثابت استفاده شود.

د. محدودیت‌های مسئله برنامه‌ریزی تولید افزایش یابد. برای مثال محدودیت‌هایی نظیر، باطله‌برداری، عیار و ... به مسئله اضافه شود.

ه. با توجه به کمبود محدودیت‌های مسئله در روش برنامه‌ریزی پویا که در سال ۱۹۷۴ پیشنهاد شده است، از یک روش ریاضی دیگر که محدودیت‌های بیشتری را شامل می‌شود برای سنجش کارایی الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شود.

منابع

- صنيعی آباده، م؛ جبل عاملیان، ز، (۱۳۹۴) "الگوریتم‌های تکاملی و محاسبات زیستی" چاپ نخست، انتشارات نیاز دانش، تهران، ص ۱۰۳، ۵۰، ۴۹، ۴۸، ۴۳، ۴۲، ۴۱، ۳۶، ۳۱، ۲۲، ۲۰، ۱۸-۱۵، (۳۴۴ صفحه).
- عطایی، م؛ حسینی، م، (۱۳۹۰) "طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز" چاپ نخست، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، ص ۱۹۵، ۱۹۶، ۲۱۸ و ۲۱۹. (۳۴۰ صفحه).
- میرزائی، نصیرآباد، ح، کاکایی، رضا، ۱۳۸۴، برنامه‌ریزی معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، دومین کنفرانس معادن روباز ایران، صفحه ۶۷-۵۹.
- هاسترویلد، و؛ کوچتا، م، (۱۹۹۵) "طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز" (ترجمه مهدی یاوری شهرضا و علی اصغر خدایاری)، چاپ نخست، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران، ص ۵۳۷-۵۳۵ و ۶۵۳-۵۴۸. (۷۴۶ صفحه).
- Alba, E., and Tomassini, M. (2002). Parallelism and evolutionary algorithms. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 6, 443–462.
- Alipour, A., Khodaiari, A.A., Jafari, A., and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Production scheduling of open-pit mines using genetic algorithm a case study. *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.* 15, 176–183.
- Blum, C., Chiong, R., Clerc, M., De Jong, K., Michalewicz, Z., Neri, F., and Weise, T. (2012). Evolutionary Optimization. In *Variants of Evolutionary Algorithms for Real-World Applications*, R. Chiong, T. Weise, and Z. Michalewicz, eds. (Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg), pp. 1–29.
- Caccetta, L., and Hill, S.P. (2003). An application of branch and cut to open pit mine scheduling. *J. Glob. Optim.* 27, 349–365.
- Chen, K., Si, J., Zhou, F., Zhang, R., Shao, H., and Zhao, H. (2015). Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 25, 79–84.
- Chiong, R., Weise, T., Michalewicz, Z., (2012). *Variants of Evolutionary Algorithms for Real-World Applications* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).
- Das, S., and Suganthan, P.N. (2011). Differential Evolution A Survey of the State-of-the-Art. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 15, 4–31.
- Dehghani, H., and Shafaghi, M. (2017). Prediction of blast-induced flyrock using differential evolution algorithm. *Eng. Comput.* 33, 149–158.
- Gershon, M.E. (1983). Optimal mine production scheduling evaluation of large scale mathematical programming approaches. *Int. J. Min. Eng.* 1, 315–329.
- Khalokakaie, R. (1999) Ph.D. thesis. Computer-aided optimal open pit design with variable slope angles. University of Leeds.

- Khalokakaie, R., Dowd, P.A., and Fowell, R.J. (2000a). Lerchs–Grossmann algorithm with variable slope angles. *Min. Technol.* 109, 77–85.
- Khalokakaie, R., Dowd, P.A., and Fowell, R.J. (2000b). A Windows program for optimal open pit design with variable slope angles. *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.* 14, 261–275.
- Khan, A. (2018). Long-term production scheduling of open pit mines using particle swarm and bat algorithms under grade uncertainty. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* 118, 361–368.
- Khan, A., and Niemann-Delius, C. (2014). Production Scheduling of Open Pit Mines Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Adv. Oper. Res.* 2014, 1–9.
- Khan, A., and Niemann-Delius, C. (2015). Application of Particle Swarm Optimization to the Open Pit Mine Scheduling Problem. In *Proceedings of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining - Aachen 2014*, C. Niemann-Delius, ed. (Cham Springer International Publishing), pp. 195–212.
- Khan, A., and Niemann-Delius, C. (2018). A Differential Evolution based approach for the production scheduling of open pit mines with or without the condition of grade uncertainty. *Appl. Soft Comput.* 66, 428–437.
- Lim, S.P., and Haron, H. (2013). Performance comparison of Genetic Algorithm, Differential Evolution and Particle Swarm Optimization towards Benchmark functions. In *2013 IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, (Kuching, Malaysia IEEE), pp. 41–46.
- Matamoras, M.E.V., and Dimitrakopoulos, R. (2016). Stochastic short-term mine production schedule accounting for fleet allocation, operational considerations and blending restrictions. *Eur. J. Oper. Res.* 255, 911–921.
- Mokhtarian Asl, M., and Sattarvand, J. (2016). An imperialist competitive algorithm for solving the production scheduling problem in open pit mine. *Int J. Min. Geo-Eng.* 50, pp. 131–143.
- Qin, A.K., and Suganthan, P.N. (2005). Self-adaptive Differential Evolution Algorithm for Numerical Optimization. In *2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, (Edinburgh, Scotland, UK IEEE), pp. 1785–1791.
- Rahmanpour, M., and Osanloo, M. (2017). Application of fuzzy linear programming for short-term planning and quality control in mine complexes. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* 117, 684–694.
- Ramazan, S. (2007). The new Fundamental Tree Algorithm for production scheduling of open pit mines. *Eur. J. Oper. Res.* 177, 1153–1166.
- Ramazan, S., and Dimitrakopoulos, R. (2018). Stochastic Optimisation of Long-Term Production Scheduling for Open Pit Mines with a New Integer Programming Formulation. In *Advances in Applied Strategic Mine Planning*, R. Dimitrakopoulos, ed. (Cham Springer International Publishing), pp. 139–153.
- Ramazan, S., Dagdelen, K., and Johnson, T.B. (2005). Fundamental tree algorithm in optimising production scheduling for open pit mine design. *Min. Technol.* 114, 45–54.

Ramazan, S., Dimitrakopoulos, R. (2004). Recent applications of operations research and efficient MIP formulations in open pit mining. *SME Trans.* 316, 73–78.

Sattarvand, J., and Niemann-Delius, C. (2013). A New Metaheuristic Algorithm for Long-Term Open-Pit Production Planning / Nowy meta-heurystyczny algorytm wspomagający długoterminowe planowanie produkcji w kopalni odkrywkowej. *Arch. Min. Sci.* 58, 107–118.

Sattarvand, J., Niemann-Delius, C. (2008). Perspective of metaheuristic optimization methods in open pit production planning. *Min. Ene. Eco. Res-Inst.* 143-155.

Shishvan, M.S., and Sattarvand, J. (2015). Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization. *Eur. J. Oper. Res.* 240, 825–836.

Storn, R., and Price, K. (1997). Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J. Glob. Optim.* 11, 341–359.

Abstract

All human needs are met by the planet, and the mining and agricultural industries are two main sources of these needs. Mineral deposits are generally extracted from the earth either by underground or surface mining methods with the objective of extracting the ore at a profit. Open pit mining is one of the most-important methods of surface mining. We need to schedule for production in this method. The open pit mine production scheduling problem can be defined as specifying the sequence in which “blocks” should be removed from the mine in order to maximize the total discounted profit from the mine subject to a variety of physical and economical constraints.

One of the important challenge in mine planning problem is the selection of a method for solving this problem. Due to mine planning problem as a large scale problem, solving this problem by mathematical model is complex, Time-consuming and they are computationally high expensive. Therefore metaheuristic algorithms are suitable alternatives to mathematical models. In this research differential evolution algorithm is purposed for solving of the production scheduling problem on two models (real and unreal block model) for which the ultimate pit limit is determined by dynamic Programming method. For performance evaluation of metaheuristic algorithm, on unreal block model dynamic Programming method is used. Net Present value is computed by differential evolution algorithm for three different value of algorithm's constant. Due to inflexibility of number of blocks in dynamic Programming method method, the basis of comparison is not true. For 2-D real block model, computed NPV for three sections respectively are equal to 2.36, 5.93 and 27.44 m\$.

Keyword(s) Open Pit Mine, Production Scheduling, Optimization, Differential Evolution Algorithm, Dynamic Programming method



Sharood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation

**Open pit mine long-term production scheduling using
differential evolution algorithm**

By **Alireza Ghasemi**

Supervisor(s)

Dr. Mohammad Ataie

Dr. Reza Khalokakaie

Co. Supervisor(s)

Dr. Ramin Rafiee

June, 2021