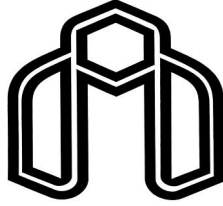


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن

بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون - شاول در معادن روباز با استفاده از

الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: معدن مس سونگون)

مسلم امیدباد

اساتید راهنما:

دکتر رضا خالوکاکائی

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد

استاد مشاور:

دکتر جواد ستاروند

بهمن ماه ۱۳۹۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مسلم امیدباد رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون - شاول در معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: معدن مس سونگون) که در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : امتیاز) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر رضا خالوکاکی	۱- استادارهنما
	استادیار	دکتر حسین میرزائی	۲- استادارهنما
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر محمد عطائی	۴- استاد ممتحن
	دانشیار	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	۵- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده

”تقدیم به پدر و مادر مهربان و عزیزم“

که وجودشان، هدایت کننده و خداکاری باشند، نردبان ترقی و پیشرفت بوده است.

نگاه خسته و مهربان شما امید را در من زنده نگه می دارد و مرا به فردایی روشن تر، سمن می سازد.

مادر خوب و پدر عزیزم؛ دستان رنج کشیده و پر درد شما را می بوسم، باشد که فرزندی قدرشناس باشم.

”تقدیم به برادر، خواهران و همه عزیزانم“

که همیشه مشوق اصلی من در ادامه راه سخت تعلیم و تربیت بودند.

شکر و قدردانی

به ثمر نشستن این تحقیق مرهون الطاف بیکران الهی است، خداوند را شاکرم که این منت را بر من نهاد.

با نهایت سپاس از راهنمایی‌ها و زحمات بی‌شائبه اساتید راهنمای ارجمندم جناب آقایان دکتر رضا خالوکاکائی و دکتر حسین میرزائی که وقت پرارزش خودشان را در طی انجام این تحقیق در اختیار اینجانب گذاشته و همواره با روی گشاده پذیرای بنده بوده‌اند.

با سپاس از همکاری صمیمانه جناب آقای مهندس باقرنژاد (مدیر امور معدن مس سونگون)، مهندس رامین بدلی، مهندس احمدیان، مهندس اسماعیلیان، مهندس محمود ساعی، مهندس دیلمقانی‌زاده، مهندس سنگراب، مهندس صوفی، مهندس نصیرنژاد، مهندس شهابی و تمام عزیزان و دوستانی که اطلاعات پرارزشی در اختیار بنده قرار داده‌اند و به نحوی در برداشت داده‌های مورد نیاز در معدن مس سونگون بنده را یاری کردند.

با سپاس از دوست عزیزم مهندس سجاد شجاع مجیدآباد که وقت پرارزش خویش را در اختیار بنده گذاشتند و مرا در انجام این تحقیق یاری کردند.

تعهد نامه

اینجانب مسلم امیدباد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون – شاول در معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: معدن مس سونگون) تحت راهنمایی دکتر رضا خالوکاکائی و دکتر حسین میرزائی نصیرآباد 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 .

امضای دانشجو

تاریخ

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

بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون - شاول در معادن روباز شامل یافتن مسیرهای بهینه برای حمل مواد، میزان حمل مواد از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری و گسیل لحظه‌ای کامیون به هر یک از نقاط بارگیری و تخلیه است، به گونه‌ای که حداکثر بهره‌وری از تجهیزات صورت گیرد. برای معادن بزرگ با چندین ایستگاه بارگیری که ممکن است بیش از یک نوع ماده معدنی استحصال شود، در شرایط واقعی مدل‌ها و محدودیت‌های تخصیص و گسیل انعطاف‌پذیر کامیون - شاول پیچیده‌تر شده، به طوری که ممکن است روش‌های تحقیق در عملیاتی از حل این مدل‌ها عاجز باشند. به همین دلیل در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از زیر شاخه‌های هوش مصنوعی که در حل مسائل بهینه‌سازی مشکل کاربرد گسترده و موفقیت‌آمیزی داشته است، برای حل مسأله تخصیص و گسیل که محدودیت‌های زیادی نیز بر مسأله حاکم است، استفاده شده است.

نگرش ویژه این تحقیق بر روی یکی از بزرگ‌ترین معادن ایران، یعنی معدن مس سونگون می‌باشد. برای این منظور با مطالعه مدل‌های مختلف ارائه شده برای تخصیص و گسیل، مدل ارائه شده توسط لی برای این معدن انتخاب شده است. این مدل کاستی‌هایی نیز داشت که در این تحقیق این کاستی‌ها برطرف شده و مدل توسعه داده شده با داده‌های برداشت شده برای یک شیفت واقعی از معدن با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل گردید. برای مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک، مدل با استفاده از نرم‌افزار LINGO نیز حل گردید. نتایج حاصل بیانگر کارایی بسیار مناسب الگوریتم ژنتیک برای حل مدل‌های تخصیص و گسیل می‌باشد به نحوی که تمام محدودیت‌های موجود در مسأله تخصیص و گسیل را نیز برآورده می‌سازد. همچنین نتایج حاصل از بکارگیری مدل تخصیص انعطاف‌پذیر توسعه داده شده لی برای معدن مس سونگون بیانگر افزایش تولید ۲۷/۵ درصد شیفت مورد نظر نسبت به روش تخصیص سنتی موجود می‌باشد.

کلمات کلیدی: تخصیص و گسیل کامیون، تخصیص انعطاف‌پذیر، الگوریتم ژنتیک، مدل لی، معدن

مس سونگون، LINGO

مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- بهینه‌سازی سیستم کامیون - شاول در معدن مس سونگون با استفاده از الگوریتم ژنتیک. اولین کنگره

جهانی مس. آبان ماه ۱۳۹۰، تهران - ایران

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۲-۱ کلیات و ضرورت بهینه‌سازی در سیستم ترابری..... ۲
- ۳-۱ بیان مسأله..... ۳
- ۴-۱ مروری بر کارهای پیشین..... ۶
- ۵-۱ اهداف پایان‌نامه..... ۸
- ۶-۱ ساختار پایان‌نامه..... ۱۰

فصل دوم: بهینه‌سازی سیستم ترابری کامیون - شاول در معادن روباز

- ۱-۲ مقدمه..... ۱۲
- ۲-۲ روش‌های تخصیص و گسیل کامیون - شاول..... ۱۲
- ۱-۲-۲ روش‌های تخصیص ثابت..... ۱۳
- ۲-۲-۲ روش‌های تخصیص انعطاف‌پذیر..... ۱۴
- ۱-۲-۲-۲ روش دستی..... ۱۵
- ۲-۲-۲-۲ روش نیمه خودکار..... ۱۶
- ۳-۲-۲-۲ روش تمام خودکار..... ۱۷
- ۳-۲ توابع هدف برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون..... ۱۹
- ۱-۳-۲ بیشینه کردن بهره‌وری کامیون..... ۲۰
- ۲-۳-۲ بیشینه کردن بهره‌وری شاول..... ۲۰
- ۳-۳-۲ کمینه کردن درجه اشباع..... ۲۱
- ۴-۳-۲ معیار اولویت..... ۲۱
- ۴-۲ مدل‌های ریاضی برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون..... ۲۱
- ۱-۴-۲ مدل ارائه شده توسط وایت و السون..... ۲۱
- ۱-۴-۲-۱ برنامه‌ریزی خطی قسمت اول (بهینه‌سازی کلی)..... ۲۲
- ۲-۴-۲-۱ برنامه‌ریزی خطی دوم، بهینه‌سازی تولید..... ۲۵
- ۳-۴-۲-۱ استفاده از برنامه‌ریزی پویا برای تخصیص کامیون‌ها..... ۲۷

- ۲-۴-۲ مدل ارائه شده توسط لی ۳۰
- ۲-۴-۲ برنامه‌ریزی حمل و نقل ۳۱
- ۲-۴-۲ روش گسیل زمان - واقعی کامیون‌ها ۳۳
- ۲-۴-۳ مدل ارائه شده توسط تمنگ ۳۴
- ۲-۴-۳ مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای تعیین نرخ تولید بهینه هر یک از مسیرها ۳۴
- ۲-۴-۳ روش گسیل زمان واقعی ۳۹
- ۲-۴-۴ مدل ارائه شده توسط چانگ ۴۴
- ۲-۴-۵ مدل ارائه شده توسط سوزا و همکارانش ۴۶
- ۲-۵ نتیجه‌گیری ۵۱

فصل سوم: روش کار الگوریتم‌های ژنتیک

- ۳-۱ مقدمه ۵۴
- ۳-۲ مبانی الگوریتم ژنتیک ۵۴
- ۳-۳ روش کار الگوریتم‌های ژنتیک ۵۷
- ۳-۳-۱ معیارهای انتخاب جمعیت جدید ۵۹
- ۳-۳-۱-۱ انتخاب چرخ گردان ۶۰
- ۳-۳-۲ انتخاب قطعی ۶۱
- ۳-۳-۳ انتخاب مسابقه‌ای ۶۲
- ۳-۳-۴ انتخاب مسابقه‌ای احتمالی ۶۲
- ۳-۳-۵ انتخاب براساس رتبه‌بندی خطی ۶۳
- ۳-۳-۶ انتخاب نخبه‌گرا ۶۳
- ۳-۳-۲ جفت‌سازی ۶۳
- ۳-۳-۳ تبادله ژنی ۶۴
- ۳-۳-۳-۱ تبادله ژنی یک نقطه‌ای ۶۴
- ۳-۳-۳-۲ تبادله ژنی چند نقطه‌ای ۶۵
- ۳-۳-۴ جهش ۶۶
- ۳-۳-۵ معیارهای توقف در الگوریتم ژنتیک ۶۷
- ۳-۴ کاربرد الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مسائل مهندسی معدن ۶۷

۵-۳ نتیجه‌گیری ۶۸

فصل چهارم: مدل‌سازی تابع هدف تخصیص و گسیل

۱-۴ مقدمه ۷۰

۲-۴ مدل انتخاب شده برای تخصیص و گسیل کامیون در معدن مس سونگون ۷۰

۳-۴ مدل توسعه یافته لی برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف ۷۲

۴-۴ مدل‌سازی کروموزوم برای معادن با یک نوع از ظرفیت کامیون ۷۷

۵-۴ مدل‌سازی کروموزوم برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های متفاوت ۸۲

۶-۴ جمعیت اولیه ۸۵

۷-۴ تابع برازندگی ۸۵

۸-۴ نحوه تأثیر محدودیت‌های اعمال شده در مسأله و تابع برازش اصلاح شده ۸۶

۹-۴ تبادل ژنی کردن کروموزوم‌ها ۸۹

۱۰-۴ جهش ۸۹

۱۱-۴ اتمام بهینه‌سازی ۹۳

۱۲-۴ نتیجه‌گیری ۹۳

فصل پنجم: بهینه‌سازی تخصیص و گسیل در معدن مس سونگون

۱-۵ مقدمه ۹۵

۲-۵ معرفی معدن مس سونگون ۹۵

۳-۵ سیستم ترابری معدن مس سونگون ۹۸

۴-۵ برداشت داده‌های عملیاتی مورد نیاز در حل مدل ۹۹

۵-۵ حل مدل تخصیص و گسیل در معدن مس سونگون ۱۰۴

۱-۵-۵ تحلیل پارامترهای الگوریتم ژنتیک ۱۰۶

۲-۵-۵ نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۱۱۰

۳-۵-۵ ارزیابی نتایج حاصل از حل مدل با الگوریتم ژنتیک ۱۱۲

۴-۵-۵ مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و LINGO ۱۱۵

۶-۵ ارزیابی بکارگیری مدل توسعه داده شده لی برای معدن مس سونگون ۱۱۹

۷-۵ نتیجه‌گیری ۱۲۱

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۲۳.....	۱-۶ نتیجه‌گیری
۱۲۷.....	۲-۶ پیشنهادات
۱۲۹.....	فهرست منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ نمونه شماتیک از نقشه استقرار تجهیزات بارگیری در معدن روباز..... ۵
- شکل ۱-۲ مثالی از عملیات معدن کاری برای یک معدن فرضی آهن..... ۴۶
- شکل ۱-۳ ساختار کلی الگوریتم ژنتیک..... ۵۶
- شکل ۲-۳ مراحل کار در الگوریتم ژنتیک..... ۵۹
- شکل ۳-۳ چرخ گردان جمعیت اولیه با چهار کروموزوم..... ۶۱
- شکل ۴-۳ تبادل ژنی یک نقطه‌ای..... ۶۵
- شکل ۵-۳ تبادل ژنی دو نقطه‌ای..... ۶۵
- شکل ۶-۳ تبادل ژنی سه نقطه‌ای..... ۶۵
- شکل ۷-۳ عملگر جهش..... ۶۶
- شکل ۱-۴ نمایی شماتیک از معدن فرضی به همراه مسیرهای ممکن در شبکه ترابری..... ۷۹
- شکل ۲-۴ کروموزوم مدل شده برای معدن فرضی با یک نوع کامیون..... ۸۱
- شکل ۳-۴ نمایی شماتیک از یک معدن فرضی با ۲ ایستگاه بارگیری و ۲ نقطه تخلیه با دو نوع کامیون متفاوت..... ۸۳
- شکل ۴-۴ کروموزوم مدل شده برای معدن فرضی با ۲ نوع کامیون متفاوت..... ۸۵
- شکل ۵-۴ تبادل ژنی دو نقطه‌ای..... ۸۹
- شکل ۶-۴ اعمال جهش یکنواخت..... ۹۰
- شکل ۷-۴ فضای جواب مسأله و نحوه عملکرد عملگر جهش یکنواخت..... ۹۰
- شکل ۸-۴ عملگر جهش تطبیقی (جهت‌دار)..... ۹۱
- شکل ۹-۴ نحوه اعمال عملگر جهش به روش تطبیقی جهت‌دار..... ۹۲
- شکل ۱-۵ نمایی از معدن مس سونگون..... ۹۶
- شکل ۲-۵ موقعیت معدن مس سونگون بر روی نقشه راه‌های ایران..... ۹۷
- شکل ۳-۵ بارگیری و حمل توسط بیل مکانیکی و دامپ‌تراک ۱۰۰ تنی..... ۹۸
- شکل ۴-۵ مسیرهای ممکن ترابری در معدن مس سونگون..... ۱۰۵
- شکل ۵-۵ تحلیل پارامتری نسبت به احتمال تبادل ژنی..... ۱۰۸
- شکل ۶-۵ تحلیل پارامتری نسبت به اندازه جمعیت..... ۱۰۹
- شکل ۷-۵ نحوه ارضای محدودیت‌ها..... ۱۱۲
- شکل ۸-۵ نمایی از پنجره برنامه‌نویسی نرم‌افزار LINGO..... ۱۱۳

- شکل ۹-۵ نمایی از پنجره خروجی نرم‌افزار LINGO..... ۱۱۴
- شکل ۱۰-۵ مقایسه تولید هر یک از ایستگاه‌های بارگیری مدل با LINGO و الگوریتم ژنتیک..... ۱۱۷
- شکل ۱۱-۵ مقایسه ماده معدنی و باطله حاصل شده از حل مدل ۱۱۸
- شکل ۱۲-۵ مسیرهای بهینه ترابری در معدن مس سونگون..... ۱۲۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: نتیجه حاصل از کاربرد تخصیص و گسیل در معادن دنیا..... ۱۹
- جدول ۲-۲ پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل ارائه شده توسط سوزا و همکارانش..... ۴۹
- جدول ۱-۴ پارامترها و متغیرهای استفاده شده در مدل توسعه داده شده لی..... ۷۶
- جدول ۵-۱ پارامترهای فنی طراحی در معدن مس سونگون سال ۱۳۸۷..... ۹۷
- جدول ۲-۵ مشخصات عملیاتی ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی در شیفت مورد نظر..... ۹۹
- جدول ۳-۵ مشخصات عملیاتی ایستگاه‌های بارگیری باطله در شیفت مورد نظر..... ۹۹
- جدول ۴-۵ فاصله هر یک از ایستگاه‌های بارگیری از نقاط تخلیه بر حسب متر..... ۱۰۰
- جدول ۵-۵ متوسط زمان رفت کامیون‌های ۳۲ تنی از نقاط بارگیری به نقاط تخلیه بر حسب دقیقه..... ۱۰۱
- جدول ۶-۵ متوسط زمان رفت کامیون‌های ۱۰۰ تنی از نقاط بارگیری به نقاط تخلیه بر حسب دقیقه..... ۱۰۱
- جدول ۷-۵ متوسط زمان برگشت کامیون‌های ۳۲ تنی از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری بر حسب دقیقه..... ۱۰۲
- جدول ۸-۵ متوسط زمان برگشت کامیون‌های ۱۰۰ تنی از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری بر حسب دقیقه..... ۱۰۲
- جدول ۹-۵ مشخصات عملیاتی کامیون‌های فعال در هنگام اجرای مدل..... ۱۰۲
- جدول ۱۰-۵ متوسط زمان بارگیری و انتظار برای بارگیری در هر ایستگاه بر حسب دقیقه..... ۱۰۳
- جدول ۱۱-۵ متوسط زمان تخلیه هر یک از انواع کامیون‌ها در هر یک از دامپ بر حسب دقیقه..... ۱۰۳
- جدول ۱۲-۵ نتایج حاصل از تحلیل پارامتری نسبت به تبادلی ژنی..... ۱۰۸
- جدول ۱۳-۵ نرخ تردد کامیون در مسیر رفت از ایستگاه‌های بارگیری به نقاط تخلیه..... ۱۱۰
- جدول ۱۴-۵ نرخ گسیل کامیون در مسیر برگشت از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری..... ۱۱۱
- جدول ۱۵-۵ نرخ تردد کامیون در مسیر رفت از ایستگاه‌های بارگیری به نقاط تخلیه با استفاده از حل مدل با نرم‌افزار LINGO..... ۱۱۵
- جدول ۱۶-۵ نرخ گسیل کامیون از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری با استفاده از حل مدل با نرم‌افزار LINGO..... ۱۱۶

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

بهینه‌سازی در سیستم بارگیری و باربری در عملیات استخراج معادن سطحی به دلیل بالا بودن هزینه‌های مربوط به بخش بارگیری و باربری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این فصل به بیان کلیاتی در مورد اهمیت بهینه‌سازی در عملیات بارگیری و باربری، بیان مسأله موضوع مورد مطالعه و اهدافی که در این تحقیق دنبال می‌شود پرداخته شده است.

۲-۱ کلیات و ضرورت بهینه‌سازی در سیستم ترابری

با توجه به مزایای معدنکاری سطحی از قبیل ایمنی بالا، تولید بالا، ضایعات کم ماده معدنی و امکان استخراج ماده معدنی با عیارهای پایین این روش استخراجی، روش غالب در سرتاسر جهان است [۱]. از میان روش‌های استخراج سطحی مهمترین و پیچیده‌ترین آنها روش استخراج روباز^۱ می‌باشد. اهمیت این روش استخراجی از آنجا ناشی می‌شود که بیش از ۷۰ درصد ذخایر معدنی با این روش بهره‌برداری می‌شود [۲].

چرخه تولید در روش استخراج روباز شامل حفاری، انفجار، بارگیری و باربری است. هدف دو فعالیت اول خرد کردن سنگ و دو مرحله بعد، انتقال و جابجایی مواد خرد شده می‌باشد که عملیات بارگیری و باربری ۵۰ تا ۶۰ درصد کل هزینه‌های معدنکاری را به خود اختصاص می‌دهند [۳]، بنابراین بهینه‌سازی در مقوله ترابری در معادن روباز بسیار ضروری است، چرا که اندکی بهبود در عملکرد ماشین‌آلات باعث می‌شود که هزینه‌های مربوط به استخراج به شدت کاهش یابد.

با وجود پیشرفت‌هایی که در توسعه سنگ‌شکنی در پیت و نوار نقاله صورت گرفته است، همچنان ترابری با کامیون - شاول به دلیل انعطاف‌پذیری بالای این سیستم به صورت گسترده در سیستم حمل و

^۱ open pit mining

نقل معادن روباز استفاده می‌شود. با وجود تمایل گسترده به استفاده از کامیون - شاول در سیستم حمل و نقل معادن روباز، این سیستم بسیار گرانبها بوده و بخاطر هزینه‌های عملیاتی بالای این سیستم‌ها، تلاش‌های زیادی جهت بهبود عملکرد ماشین‌آلات صورت گرفته است. اولین تلاش‌ها به دهه ۱۹۶۰ باز می‌گردد که با افزایش حجم تجهیزات سعی در کاهش هزینه‌های مربوط به ماشین‌آلات برآمدند [۴].

با کاهش عیار مواد معدنی و عمیق شدن پیت معدن و در نتیجه افزایش فاصله حمل، جهت حفظ رقابت در بازارهای معدنی بیش از پیش به کاهش هزینه‌های حمل و نقل نیاز می‌باشد. با ورود کامپیوتر به صنعت معدنکاری، توجه ویژه به هر چه بهتر کردن افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها با استفاده بهینه از تجهیزات حمل و نقل شد. اواخر دهه ۱۹۷۰ دست اندرکاران معادن و محققان بر روی روش‌های بهینه کردن بهره‌وری از طریق استفاده از کامپیوتر برای تخصیص کامیون‌ها متمرکز شدند. بر این اساس سیستم‌های تخصیص و گسیل که با عنوان سیستم‌های دیسپچینگ مطرح هستند شکل گرفتند. مزیت اصلی استفاده از سیستم‌های تخصیص و گسیل، افزایش قابل توجه بهره‌وری با تجهیزات موجود و کاهش تجهیزات مورد نیاز برای میزان مشخصی از تولید می‌باشد. از دیگر مزایای این سیستم‌ها می‌توان به بهینه کردن مسیر کامیون‌ها، کنترل بهتر اختلاط مواد معدنی و کاهش زمان بیکاری تجهیزات اشاره کرد [۵].

۳-۱ بیان مسأله

حمل و نقل با کامیون - شاول یک سیستم پیچیده ماشینی - انسانی در معادن روباز است. ماهیت

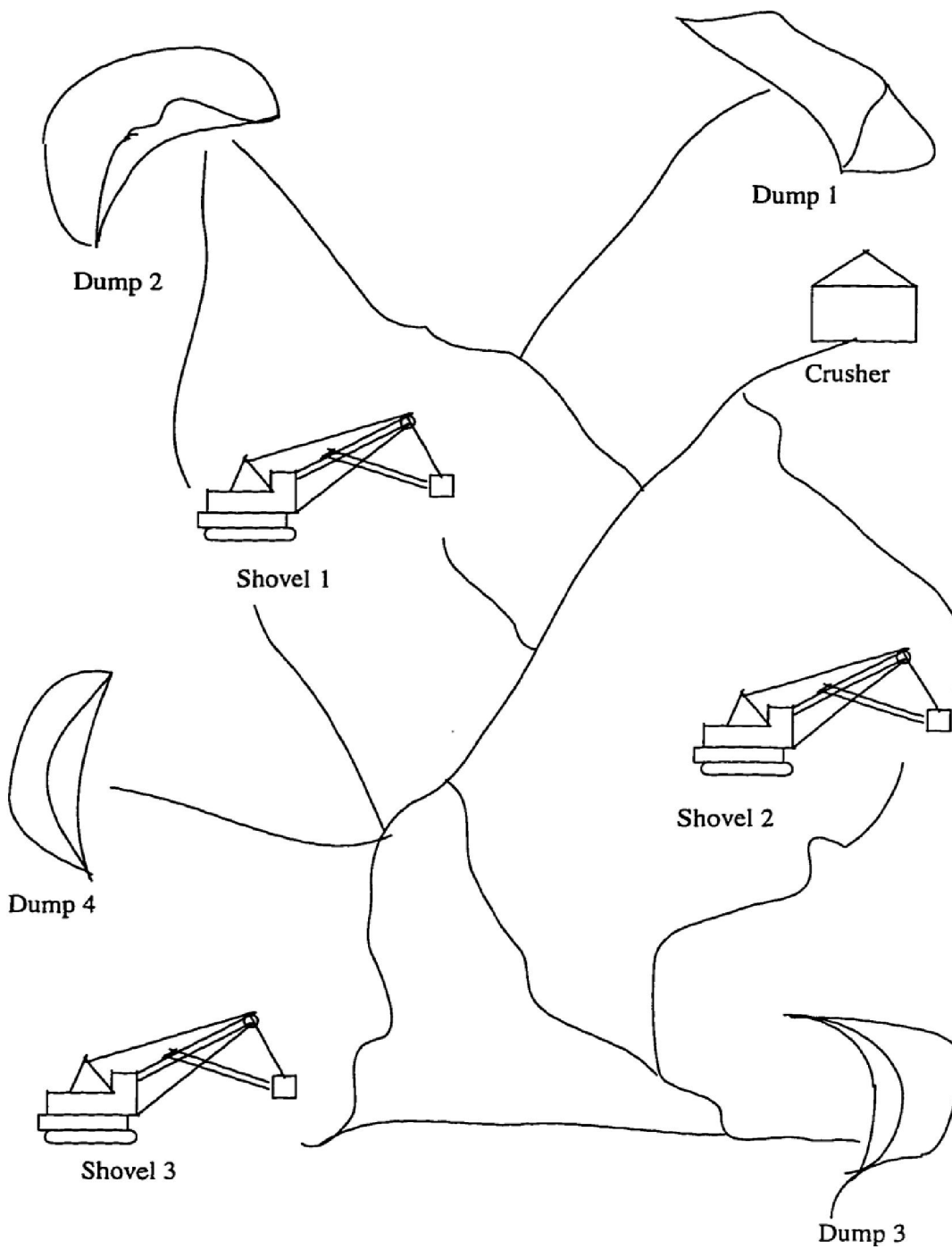
پیچیده حمل و نقل با کامیون - شاول به دلایل زیر می‌باشد [۵]:

- توپوگرافی ناهمگون معدن همراه با شبکه پیچیده از مسیر حمل و نقل بین ایستگاه‌های بارگیری و مقاصد تخلیه

- عدم پایداری وضعیت عملیاتی تجهیزات بارگیری و باربری از قبیل خرابی

- محدودیت ظرفیت سنگ‌شکن و همچنین دامپ‌های باطله

- تغییرات فضایی عیارهای ماده معدنی در محل یک شاول و همچنین تغییرات در عیار ماده معدنی از شاولی به شاول دیگر
 - محدودیت‌های فنی و اقتصادی طراحی پیت که ملزم می‌کند به ازای یک تن ماده معدنی چه مقدار باطله بایستی برداشت شود.
 - اهداف کیفیتی و تولیدی مدیریت معدن نیز بر روی سیستم حمل و نقل تأثیر بسزایی دارد و بر پیچیدگی این سیستم می‌افزاید.
- در این حالت تصمیم‌گیری نسبت به مسیر حرکت و استفاده مؤثر از تجهیزات بسیار ضروری به نظر می‌رسد و مسؤولین معدن با تصمیم‌گیری‌های که بایستی مطابق با اهداف برنامه‌ریزی تولید در جهت حداکثر کردن تولید، کاهش هزینه‌ها و کنترل کیفیت مواد معدنی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسأله باشد روبرو می‌شوند. همان طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است در یک معدن روباز باید تعدادی کامیون که ممکن است ظرفیت‌های متفاوت داشته باشند از ایستگاه‌های بارگیری باطله و یا ماده معدنی که ممکن است توان تولید متفاوت و عیار متفاوت داشته باشند، بارگیری کرده و در دامپ‌ها (سنگ شکن یا دامپ باطله) تخلیه کنند.
- حال مسأله‌ای که در این میان مطرح می‌شود این است که:
- چه میزان ماده معدنی و باطله از هر کدام از شاول‌ها به هر یک از مکان‌های تخلیه و از چه مسیری بایستی حمل شود تا تولید حداکثر شده و کیفیت ماده معدنی در حد تعیین شده حفظ شود؟
 - هر کدام از کامیون‌ها بعد از تخلیه در سنگ‌شکن یا دامپ باطله جهت حفظ اهداف تولید به کدام یک از شاول‌ها تخصیص داده شود؟ به گونه‌ای که نه شاولی برای بارگیری کامیون منتظر بماند و نه کامیونی در پای شاول منتظر باشد.
 - چه تغییراتی هنگام خرابی تجهیزات بارگیری و باربری روی می‌دهد.



شکل ۱-۱ نمونه شماتیک از نقشه استقرار تجهیزات بارگیری در معدن روباز [۵]

پاسخ به سؤالات فوق نیازمند بهینه‌سازی در سیستم حمل و نقل می‌باشد. بهینه‌سازی در این سیستم شامل یافتن مسیرهای بهینه و نرخ جریان مواد یا کامیون در این مسیرها می‌باشد که با بکارگیری مدل‌های بهینه‌سازی که در قالب مدل‌های ریاضی ارائه شده‌اند صورت می‌گیرد.

۴-۱ مروری بر کارهای پیشین

اساس سیستم‌های تخصیص و گسیل موجود، عمدتاً مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی می‌باشد. سیستم‌های تخصیص و گسیل بر این اساس عموماً دو قسمت اصلی دارند. قسمت اول معمولاً بر اساس اهداف برنامه‌ریزی کوتاه مدت می‌باشد و قسمت دوم برای کاربرد قسمت اول به هنگام گسیل لحظه‌ای^۱ استفاده می‌شود [۵].

تاکنون چندین مدل برای تخصیص کامیون‌ها ارائه شده است. مدل ارائه شده توسط وایت و السون^۲ در سال ۱۹۸۶ اساس سیستم‌های تخصیص و گسیل انعطاف‌پذیر می‌باشد که در بیشتر معادن بزرگ دنیا این مدل بکار گرفته شده است. این مدل یک تخصیص و گسیل دوگامه می‌باشد که در مرحله اول با استفاده از یک برنامه‌ریزی خطی و در مرحله دوم با استفاده از برنامه‌ریزی پویا با هدف مینیمم کردن هزینه‌ها، پیشینه کردن تولید و تامین نیاز کارخانه فرآوری کار تخصیص و گسیل را انجام می‌دهد. از مزایای این مدل می‌توان به بهینه‌سازی چند عامل به طور همزمان اشاره کرد [۶]. آلبروند و سومیس^۳ در سال ۱۹۸۷ برای بهینه‌سازی حمل و نقل مدلی ارائه دادند که هدف آن کمینه کردن اختلاف زمان انتظار بین کامیون و شاول می‌باشد [۷]. اسگرو^۴ و همکارانش در سال ۱۹۸۹ یک سیستم خودکاری برای کنترل

¹ Real time

² White and Olson

³ Elbrond and Soumis

⁴ Sgurev.

گسیل کامیون‌ها در معادن روباز تعریف کردند که این سیستم تریسی^۱ نام گرفت و جهت بهبود شاخص‌های فنی - اقتصادی فرآیند بارگیری و تخلیه طراحی شده است در این سیستم افزایش تولید ناشی از عملیات، با بهبود کنترل فرآیند بارگیری و باربری حاصل می‌شود [۸]. لی^۲ در سال ۱۹۹۰ مدلی ارائه داد که برای بهینه‌سازی حمل و نقل در این مدل از مفهوم مینیمم کردن کل کار انجام شده استفاده کرد [۹]. تمنگ^۳ در سال ۱۹۹۷ برای حل مسأله تخصیص کامیون از مدل برنامه‌ریزی آرمانی و برای گسیل زمان واقعی از مدل ترابری و کمینه کردن زمان انتظار شاول‌ها و کامیون‌ها استفاده کرد [۵]. چانگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با هدف کمینه کردن منابع کامیونی مدلی را برای بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل ارائه دادند [۱۰]. در مدل ارائه شده توسط سوزا^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با هدف تعیین نرخ استخراج مناسب در هر پیت و برآورده ساختن نیاز کارخانه فرآوری و کمینه کردن تعداد کامیون مورد نیاز، به بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل پرداخته‌اند [۱۱].

بسته به ترکیب فیزیکی معدن و اهدافی که در آن دنبال می‌شود می‌تواند یکی از این مدل‌ها و یا ترکیبی از آن‌ها بکار گرفته شود. مثلاً برای معادنی که کنترل شدید به روی عیار ارسالی مواد معدنی به کارخانه فرآوری وجود دارد مدل تمنگ به دلیل تلاش در حفظ عیار در مناسب‌ترین حد می‌تواند گزینه مناسبی باشد، ولی با این حال بایستی همه اهداف دیگر نیز مورد بررسی قرار گیرد. مدل‌های ارائه شده ملزم به رعایت یکسری محدودیت‌ها می‌باشند که بیشتر این محدودیت‌ها برای این مدل‌ها یکسان است. محدودیت‌های برآورده ساختن حداقل تولید، محدودیت‌های مربوط به حداکثر تولید هر یک از

¹ TRASY

² Li

³ Temeng

⁴ Chung

⁵ Souza

ایستگاه‌های بارگیری، حفظ عیار و ... نمونه‌ای از این محدودیت‌ها می‌باشند. ولی بسته به تابع هدف بیان شده برای هر مدل، کارآیی آن‌ها متفاوت خواهد بود.

۱-۵ اهداف پایان‌نامه

مسئله تخصیص و گسیل کامیون با توجه به محدودیت‌هایی که در قسمت ۱-۳ مطرح گردید از مسائل پیچیده در معادن روباز محسوب می‌شود و همواره این خواسته مدیران یک معدن است که سیستم تخصیصی که استفاده عملی و حداکثری از تجهیزات را ممکن سازد، در دسترس باشد. هر معدنی که از کامیون در سیستم ترابری خود استفاده می‌کند، یک سیستم تخصیص دارد؛ چرا که در آن قبلاً تعیین می‌کنند که کامیون کجا برود و سپس بارگیری نمایند که ممکن است این سیستم به صورت یک سیستم رسمی در معدن راه اندازی شده باشد و یا ممکن است سیستم خاصی برای تخصیص و گسیل در معدن موجود نباشد. بنابراین این حقیقت وجود دارد که تخصیص کامیون در اکثر معادن وجود دارد، ولی این که، این تخصیص بهترین تخصیص است یا نه، نیاز به در نظر گرفتن مقدمات لازم برای تخصیص مناسب می‌باشد. مقدمه اصلی تخصیص، مدل برنامه‌ریزی ریاضی آن می‌باشد که هسته اصلی بهینه‌سازی تخصیص را تشکیل می‌دهد. بنابراین تخصیص کامیون‌ها تنها زمانی مناسب عمل می‌کند که مقدمه اصلی تخصیص به خوبی تعریف شده باشد و این مدل به خوبی محدودیت‌ها را لحاظ کرده باشد. برای حل این مدل‌ها نیز نیاز به یک روش حل می‌باشد [۱۲].

این ضرب‌المثل که مسائل پیچیده راه‌حل‌های ساده‌تری دارند در مورد مدل‌های مربوط به تخصیص کامیون - شاول در معادن کاربرد ندارد [۱۲]. معادن کوچک با یک نوع ماده معدنی و با تعداد اندکی ایستگاه بارگیری و نقاط تخلیه، نیاز به مدل‌های ریاضی ساده‌تر و در نتیجه روش حل ساده‌تری خواهند داشت، ولی برای معادن بزرگ با چندین ایستگاه بارگیری که ممکن است بیش از یک نوع ماده معدنی استحصال شود محدودیت‌ها پیچیده‌تر شده و در نتیجه مدل ریاضی پیچیده خواهد بود. چرا که مرحله

حمل و بارگیری معدن که یک مرحله گسسته می‌باشد بایستی خوراک مورد نیاز سنگ‌شکن‌ها را بطور پیوسته با میزان عیار تعیین شده به گونه‌ای فراهم سازد که سایر محدودیت‌های فنی و اقتصادی و مدیریتی نیز برآورده شود. این مدل‌ها نیاز به روش حل پیچیده دارند و در بیشتر موارد با پیچیده شدن مدل، روش‌های کلاسیک مثل روش‌های تحقیق در عملیاتی کارآیی خود را برای حل از دست می‌دهند. از این رو از روش دیگر مثل روش‌های ابتکاری که لزوماً هم ضمانت نمی‌کنند که جواب بهینه را به دست می‌دهند استفاده می‌کنند [۱۳]. در این پایان‌نامه از روش‌های الگوریتم ژنتیک که از زیر شاخه‌های هوش مصنوعی^۱ و یکی از روش‌های نوین بهینه‌سازی است برای حل مسأله تخصیص و گسیل استفاده شده است. روش‌های الگوریتم ژنتیک از مراحل بهینه‌سازی و تکامل در طبیعت الهام گرفته شده است و در سال‌های اخیر برای حل مسائل بهینه‌سازی کاربردهای خوبی نشان داده‌اند.

هدف از انجام این تحقیق این است که برای حل مسأله تخصیص و گسیل کامیون - شاول که محدودیت‌های زیادی نیز بر مسأله حاکم است از الگوریتم ژنتیک استفاده شود. هدف بعدی در این پایان‌نامه این است که با مطالعه مدل‌های مختلف ارائه شده برای مسأله تخصیص و گسیل کامیون - شاول در معادن روباز یک مدل جامع و در عین حال کاربردی برای معادن روباز ایران و خصوصاً مناسب با وضعیت معدن مس سونگون انتخاب شده و در صورت لزوم این مدل توسعه داده شود. سپس مدل انتخاب شده با داده‌های برداشت شده از معدن مس سونگون با الگوریتم ژنتیک مدل‌سازی شده تا ضمن حل مسأله تخصیص و گسیل در معدن مس سونگون و یافتن مسیرهای بهینه برای حمل مواد در این معدن، توانایی الگوریتم ژنتیک در حل مسأله تخصیص و گسیل ارزیابی شود. برای ارزیابی نتایج حاصل شده از الگوریتم ژنتیک، مدل انتخاب شده با روش دیگری نیز مقایسه می‌شود.

^۱ Artificial Intelligence

۱-۶ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در شش فصل تدوین شده است.

فصل اول: در این فصل اهداف تحقیق و مقدمه‌ای بر کارهای انجام شده بیان شده است.

فصل دوم: در این فصل مبانی تخصیص و گسیل کامیون - شاول بیان شده است. در قسمت اول از

این فصل انواع روش‌های تخصیص و گسیل کامیون - شاول در معادن روباز ذکر شده است و در قسمت

دوم مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط وایت و السون، لی، تمنگ، چانگ و سوزا بیان شده است.

فصل سوم: در این فصل به معرفی الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است.

فصل چهارم: در این فصل با انتخاب مدل لی و توسعه این مدل برای معادن با کامیون‌های با

ظرفیت‌های مختلف، به بیان نحوه مدل‌سازی کروموزوم مدل انتخاب شده برای حل مدل با الگوریتم

ژنتیک پرداخته شده است.

فصل پنجم: شامل ارزیابی مدل انتخاب شده با استفاده از اطلاعات معدن مس سونگون و بهینه‌سازی

تخصیص و گسیل کامیون در این معدن می‌باشد. برای حل مدل در این فصل ابتدا از الگوریتم ژنتیک

استفاده شده است و سپس برای ارزیابی نتایج حاصل، مدل انتخاب شده با نرم‌افزار LINGO نیز حل

گردیده است و نتایج حاصل مقایسه شده است.

فصل ششم: نتایج حاصل شده در این پایان نامه و پیشنهاداتی در رابطه با این موضوع در فصل ششم

آورده شده است.

فصل دوم

بهینه‌سازی سیستم ترابری کامیون - شاول

در معادن روباز

۱-۲ مقدمه

در استخراج معادن روباز تخصیص و گسیل بهینه کامیون - شاول از عوامل اصلی در کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌باشد. با توجه به این که درصد اندکی بهبود در فرآیند بارگیری و باربری، معادل با سودآوری کلان و کاهش چشمگیر در هزینه‌های مربوط به حمل و نقل می‌باشد، لذا بهره‌گیری از سیستم‌های تخصیص و گسیل بهینه برای معادن بزرگ بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در واقع هدف بهینه‌سازی سیستم ترابری کامیون - شاول، توزیع مناسب کامیون‌های موجود بین شاول‌هاست به گونه‌ای که کم‌ترین زمان بیکاری کامیون و شاول صورت گیرد. در این فصل به معرفی هر یک از شیوه‌های تخصیص و گسیل کامیون و مبانی و مدل‌های ریاضی ارائه شده برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل پرداخته شده است.

۲-۲ روش‌های تخصیص و گسیل کامیون - شاول

روش‌های تخصیص کامیون به شاول به دو دسته تخصیص ثابت و تخصیص انعطاف پذیر تقسیم می‌شوند. روش‌های تخصیص انعطاف پذیر نیز به دو دسته، دستی و کامپیوتری دسته بندی می‌شوند که روش‌های کامپیوتری خود به دو دسته نیمه خودکار و تمام خودکار تقسیم می‌شود [۸]. هدف هر یک از این شیوه‌های تخصیص افزایش سودمندی^۱ معادن با استفاده مؤثر از تجهیزات بارگیری و باربری می‌باشد [۱۳]. تخصیص مناسب معدن را به سمت استفاده حداکثری از تجهیزات سوق داده و در مقابل تخصیص ضعیف باعث می‌شود که تجهیزات به صورت کارآمد عمل نکنند [۱۲]. در زیر به تشریح هر یک از این روش‌ها پرداخته شده است.

^۱ Productivity

۲-۲-۱ روش‌های تخصیص ثابت

در این روش یک کامیون به یک شاول خاص تعلق داشته و تا آخر شیفت با آن کار می‌کند. تعداد کامیون برای هر شاول ثابت و مشخص بوده و در طول شیفت تغییری نمی‌کند. هر کامیون اجازه بارگیری از یک شاول خاص را دارد و با توجه به بار خود که یا باطله است یا ماده معدنی به محل تخلیه مناسب (سنگ‌شکن، انباشتگاه ماده معدنی، انباشتگاه باطله) ارسال می‌شود. مکانیزم عمل به این ترتیب است که در شروع شیفت، کامیون‌ها به سمت بارکننده‌ها حرکت کرده و در صف قرار می‌گیرند. هر کدام به نوبت شروع به بارگیری کرده و با توجه به نوع بار (ماده معدنی یا باطله) به سمت سنگ‌شکن یا دامپ باطله حرکت می‌کنند. در آنجا کامیون‌ها برای تخلیه در صف قرار می‌گیرند و بعد از تخلیه همان مسیر را بر می‌گردند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که روش تخصیص ثابت یک روش استاتیکی برای تخصیص کامیون‌ها می‌باشد و تا زمانی که برنامه تخصیص تغییر نیابد ادامه خواهد داشت. در این حالت تعداد کامیون‌های تخصیص داده شده به هر یک از ایستگاه‌های بارگیری به طول و ویژگی مسیر حمل از ایستگاه‌های بارگیری تا نقاط تخلیه، میزان تولید، اولویت هر یک از ایستگاه‌های بارگیری، ظرفیت حمل هر یک از کامیون‌ها و هم‌چنین زمان انتظار کامیون در ایستگاه بارگیری بستگی دارد [۸].

در شروع هر شیفت تعیین دقیق تعداد کامیون‌های تخصیص داده شده به هر یک از ایستگاه‌های بارگیری بسیار دشوار می‌باشد چرا که تعداد کامیون‌های تخصیص داده شده بایستی به گونه‌ای باشد که یک حالت پایدار ترافیکی بین ایستگاه‌های بارگیری و نقاط تخلیه به وجود آید. تعداد زیاد کامیون‌ها موجب ایجاد صف در هر یک از ایستگاه‌های بارگیری و تعداد کم کامیون‌ها موجب طولانی شدن زمان بیکاری هر یک از شاول‌ها می‌گردد و این عوامل سبب می‌شود که مجموعه کامیون - شاول به طور مؤثر عمل نکنند. در صورت خرابی هر یک از کامیون‌ها و یا تجهیزات بارگیری در طول شیفت بایستی توزیع مجدد صورت گیرد و این عمل کارایی سیستم را در بیشتر موارد با مشکل مواجه می‌کند. به دلیل ماهیت

احتمالی عملیات حمل و نقل و وقوع از کار افتادگی تصادفی تجهیزات سبب ایجاد صف در یک ایستگاه بارگیری و یا بیکاری شاول در ایستگاه بارگیری می‌شود که این موارد را می‌توان از معایب این سیستم‌ها برشمرد. البته از دیدی دیگر، درک آسان و صریح این سیستم‌ها برای کنترل و گزارش‌دهی از فرآیند بارگیری و باربری را می‌توان یکی از مزایای این سیستم‌ها بیان کرد [۸]. با توجه به معایب بیان شده، این روش تخصیص و گسیل دیگر برای معادن بزرگ کارایی ندارد و در معادن بزرگ بیشتر از روش‌های تخصیص انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود به همین دلیل در اینجا تنها به روش‌های تخصیص انعطاف‌پذیر پرداخته شده است. شرح کاملی از انواع روش‌های تخصیص ثابت در منابع [۱۴] و [۱۵] انجام شده است.

۲-۲-۲ روش‌های تخصیص انعطاف‌پذیر

با توجه به معایب و کاستی‌های روش‌های تخصیص ثابت، این روش‌ها نمی‌توانند برای معادن بزرگ با سیستم مدار باز که در آن هر کامیون ممکن است از یک شاول یا گروهی از شاول‌ها بارگیری کند کارایی داشته باشند [۸]. برای این معادن از روش‌های تخصیص انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. در روش تخصیص انعطاف‌پذیر هر کامیون به یک شاول خاص تخصیص داده نمی‌شود، بلکه در مسیرهای مختلف رفت و آمد می‌کنند. شرایطی که ایجاب می‌کند از تخصیص انعطاف‌پذیر استفاده شود عبارتند از [۱۵]:

- هرگاه خصلت احتمالی و تصادفی بودن عملیات معدنی آنقدر زیاد باشد که فرض ثابت بودن پارامترهای مدل برنامه‌ریزی و تخصیص ثابت غیر معقول باشد.
- پیچیدگی ذخایر معدنی از نظر زمین‌شناسی
- در مرز مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی
- تنوع مواد معدنی در سنگ استخراجی
- پراگندگی زیاد مشخصه‌های کیفی مواد معدنی در سینه‌کارهای استخراجی
- کنترل مشخصه‌های کیفی مواد معدنی به صورت دقیق در کارخانه فرآوری

- پیچیدگی محدودیت‌های هندسی معدن
- وجود چند خط تولید با کیفیت‌های مشخص در کارخانه فرآوری
- ایجاد ترافیک در مسیرها

در شرایط فوق، سیستم برنامه ریزی و تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها مورد نیاز است که در زیر به شرح روش‌های تخصیص انعطاف‌پذیر پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱ روش دستی

سیستم تخصیص و گسیل دستی شکل اولیه تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها می‌باشد. کامیون‌ها در شروع شیفت به شاول‌ها بر اساس نیاز تولید، محل شاول‌ها و تعداد کامیون‌های در دسترس تخصیص داده می‌شوند. قاعده مورد استفاده در این روش نیز بر اساس روش تخصیص ثابت می‌باشد، با این تفاوت که در صورت خرابی شاول، توزیع مجدد صورت نمی‌گیرد. در این سیستم بیشتر تصمیم‌گیری‌ها بر اساس قضاوت‌های دیسپچر^۱ که در مناسب‌ترین نقطه در معدن قرار گرفته و وضعیت معدن را در هر لحظه مشاهده می‌کند صورت می‌گیرد. بوگت^۲ در سال ۱۹۶۴ استفاده از سیستم رادیویی دوطرفه بین دیسپچر و راننده‌های کامیون را در این سیستم‌ها بکار برد[۴]. مولر^۳ در سال ۱۹۷۷ یک سیستم ساده تابلو دیسپچینگ^۴ را در این سیستم‌ها بکار برد که به عنوان یک تحلیلگر الکترونیکی استفاده می‌شدند. هدف این تابلوها کمک به دیسپچر جهت ثبت وضعیت و محل تجهیزات و کمک به دیسپچر به هنگام فرآیند تصمیم‌گیری می‌باشد. تصمیم‌گیری برای تخصیص بعد از این که کامیون بار خود را از در محل دامپ تخلیه نمود از طریق ارتباط راننده با دیسپچر صورت می‌گیرد. سپس دیسپچر برای این که تخصیص

¹ Dispatcher

² Bogert

³ Mueller

⁴ Board Dispatching

بهتری انجام دهد اطلاعات موجود در تابلو تخصیص و گسیل را با تجهیزات موجود در پیت تطبیق می‌دهد و کار تخصیص را انجام می‌دهد. این روش برای معادن کوچک با حداکثر ۱۰ کامیون توصیه می‌شود [۱۳]. در این روش دیسپچر مجبور است که بر اساس قضاوت‌های شخصی و تجربه خود جهت تصمیم‌گیری در پیت استفاده کند که این از مهمترین معایب این روش می‌باشد و همچنین زمان بر بودن تخصیص را می‌توان از معایب دیگر این روش بیان نمود. از مزایای این روش نیز می‌توان به هزینه کم سرمایه‌گذاری و افزایش تولید نسبت به روش‌های تخصیص ثابت را نام برد.

۲-۲-۲-۲ روش نیمه خودکار

این شیوه شکل متوسط سیستم‌های تخصیص و گسیل انعطاف‌پذیر می‌باشد که شامل یک کامپیوتر برنامه‌ریزی شده جهت کمک به دیسپچر از طریق نمایش اطلاعات و یا پیشنهاد تخصیص مناسب کامیون در فرآیند تصمیم‌گیری می‌باشد. این روش از این جهت تخصیص نیمه خودکار نامیده می‌شود که انتقال اطلاعات از کامپیوتر به راننده کامیون از طریق دخالت نیروی انسانی (دیسپچر) انجام می‌گیرد. دیسپچر این اطلاعات و یا تخصیص پیشنهاد شده را با موقعیت واقعی تجهیزات در معدن تطبیق داده و یک تصمیم مستقل اتخاذ می‌کند که ممکن است مطابق با تخصیص پیشنهاد شده از طریق کامپیوتر باشد و ممکن است منطبق بر آن نباشد. سپس دیسپچر اطلاعات را از طریق بی‌سیم به راننده منتقل می‌کند [۴]. مزیت اصلی این روش ثبت سریع وقایع، گزارش‌دهی از تولید و کاهش زمان انتظار تجهیزات می‌باشد. با استفاده از این روش حداکثر تولید قابل دسترس از طریق تابع هدف بکار برده شده در برنامه‌ریزی کامپیوتر حاصل می‌شود. این روش برای معادن متوسط با تعداد کامیون‌های در حدود ۲۰ دستگاه قابل کاربرد می‌باشد. هادسون و بارکر^۱ در سال ۱۹۸۵ نحوه پیاده‌سازی و کاربرد روش نیمه خودکار را بیان

^۱ Hodson and Barker

کرده‌اند و روش تخصیص و گسیل دستی را که فقط ذخیره اطلاعات را انجام می‌داد تا مرحله‌ای که

کامپیوتر تخصیص بهینه را پیشنهاد دهد توسعه دادند. مزایای روش نیمه خودکار عبارتند از [۱۳]:

- کنترل کامیون در طول مسیر بدلیل ارتباط دوطرفه بین راننده و دیسپچر
 - افزایش تولید در این روش نسبت به روش دستی
 - کم بودن زمان تلف شده نسبت به روش‌های دستی و تخصیص ثابت
- از معایب این روش نیز می‌توان به بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به روش دستی و دخالت نیروی انسانی را در تخصیص نام برد.

۲-۲-۳ روش تمام خودکار

در دو روش دستی و نیمه خودکار به دلیل دخالت نیروی انسانی در ذخیره و انتقال حجم عظیمی از اطلاعات نیاز به زمان زیادی برای تخصیص می‌باشد که هدف اصلی در روش تخصیص تمام خودکار محدود کردن دخالت نیروی انسانی در ذخیره و انتقال اطلاعات و انجام این کار به وسیله کامپیوتر و در نتیجه کاهش زمان انتقال اطلاعات به راننده کامیون می‌باشد که این یکی از دلایل توسعه روش‌های تمام خودکار می‌باشد. روش تمام خودکار کامپیوتر را قادر می‌سازد که تصمیم‌های ضروری برای تخصیص کامیون را بدون دخالت دیسپچر انجام دهد. موقعیت کامیون‌ها در هر لحظه توسط یک سنسور^۱ به کامپیوتر ارسال می‌شود. تخصیص مناسب برای کامیون بعد از تخلیه مواد در دامپ‌ها به طور مستقیم به کامیون ارسال می‌شود و از طریق مونتوری که در کابین نصب شده برای راننده قابل مشاهده است. در برخی از سیستم‌های توزیع و تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها یک ترمینال مرکزی بین مسیر مبدا و مقصد کامیون‌ها وجود دارد. هر کامیون بارگیری شده باید قبل از رسیدن به منطقه تخلیه، از کانال ترمینال

^۱ Sensor

مرکزی عبور کند. ترمینال مرکزی، یک ایستگاه کنترل است که بر اساس سیستم خاصی، کامیون را هدایت می‌کند که بار خود را در یکی از نقاط تخلیه باطله یا ورودی یکی از خطوط تولید کارخانه کانه‌ارایی تخلیه نماید. هم چنین، یک کامیون پس از تخلیه بار خود قبل از اینکه به سوی ایستگاه بارگیری حرکت کند، باید وارد ترمینال مرکزی شود. این وظیفه سیستم کامپیوتری مستقر در ترمینال مرکزی است که راننده کامیون را به یکی از ایستگاه‌های بارگیری هدایت نماید. در معادن بزرگ با وسعت چندین کیلومتر مربع، بجای یک ترمینال مرکزی ممکن است چندین ترمینال در محدوده معدن ایجاد گردد. این ترمینال‌ها علاوه بر آنکه در تماس دائم و لحظه‌ای هستند، از یک سیستم واحد برای تخصیص و ارسال کامیون‌ها استفاده می‌نمایند [۱۳].

در سال ۱۹۸۰ هایم باخ^۱ یک سیستم تخصیص و گسیل خودکار را مطرح کرد که دیسپچ^۲ نامیده شد. بعدها این نرم‌افزار تجاری شد، که هدف آن ماکزیمم کردن بهره‌وری با تجهیزات موجود و یا رسیدن به تولید مطلوب با حداقل تجهیزات می‌باشد. تخصیص کامیون‌ها برای رسیدن به هر کدام از این اهداف یک عمل پویا بوده که نیازمند مونی‌تورینگ پیوسته مسیرهای حمل و نقل، وضعیت و مکان شاول‌ها و کامیون‌ها برای تعیین بهترین تخصیص می‌باشد. این سیستم یکی از موفق‌ترین و قدرتمندترین سیستم‌ها بوده و در چندین معدن در سرتاسر دنیا بکار گرفته شده است. مزایای این روش عبارتند از [۱۳]:

- افزایش تولید نسبت به سایر روش‌ها
- کنترل سیستم حمل و نقل در طول مسیر
- کاهش اتلاف وقت
- سرعت بالای انتقال اطلاعات
- راندمان بالای سیستم

¹ Himebaugh

² Dispatch

تنها عیب این روش، هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه می‌باشد. در جدول (۱-۲) میزان افزایش سود ناشی از کاربرد این روش در چندین معدن در دنیا بیان شده است.

جدول ۱-۲: نتیجه حاصل از کاربرد تخصیص و گسیل انعطاف‌پذیر در معادن دنیا [۱۶]

ردیف	نام معدن	محل	نوع ماده معدنی	میزان افزایش سود
۱	IOC	Newfoundland	آهن	٪۲۳
۲	Palabora	South Africa	مس	٪۷
۳	El Cerrejon	Colombia	زغال	٪۱۳
۴	Empire	Michigan	آهن	٪۱۰
۵	Bong Mine	Liberia	آهن	٪۱۰
۶	Barrick	Nevada	طلا	٪۱۵
۷	Baugainville	PNG	مس	٪۱۳
۸	LTV Steel Mining	Minnesota	آهن	٪۱۰
۹	Chinoe Mine	New Mexico	مس	٪۱۳
۱۰	Morenci Mining	Arizona	مس	٪۱۰
۱۱	PD, Tyrone	New Mexico	مس	٪۱۱
۱۲	Quintette Coal	British Colombia	زغال	٪۱۰

۲-۳ توابع هدف برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون

سیستم تخصیص و گسیل در اکثر معادن به صورت یک فرآیند چند مرحله‌ای جامع به کار گرفته می‌شود که در مرحله اول تخصیص بهینه کامیون‌ها بین ماشین‌آلات بارگیری و محل‌های تخلیه تعیین و در مرحله دوم گسیل زمان واقعی کامیون‌ها انجام می‌گیرد که ممکن است با دخالت و یا بدون دخالت مسؤل دیسپچری باشد. در عمل محدودیت و قیود اصلی در تخصیص بهینه کامیون‌ها، تأمین تولید پایدار و قابل قبولی از کانسنگ با حداکثر کارایی ممکن ماشین‌آلات است [۱۵]. در مرحله اول با هدف ماکزیمم کردن سود ناشی از عملیات یک نرخ تردد از کامیون یا نرخ میزان حمل از مواد از ایستگاه‌های بارگیری به هر یک از نقاط تخلیه و همچنین از نقاط تخلیه به هر یک از ایستگاه‌های بارگیری تعیین می‌شود. تابع

هدف ماکزیمم کردن سود ناشی از عملیات ممکن است به اشکال گوناگون ظاهر شود؛ که می‌توان به مواردی از قبیل کاهش هزینه‌ها برای یک تولید مشخص یا افزایش تولید با تجهیزات موجود اشاره کرد. بعد از یافتن نرخ بهینه تردد کامیون در مرحله اول، گسیل لحظه‌ای کامیون‌ها بعد از تخلیه و یا بارگیری به نحوی صورت می‌گیرد که نرخ‌های بهینه تردد بدست آمده در مرحله اول در هر یک از مسیرها تأمین شود. توابع هدف برای بهینه‌سازی سیستم کامیون - شاول در مرحله گسیل لحظه‌ای عمدتاً به چهار دسته پیشینه کردن بهره‌وری کامیون، پیشینه کردن بهره‌وری شاول، کمینه کردن درجه اشباع مسیرها و معیار اولویت تقسیم‌بندی می‌شود [۱۶]. در زیر به تشریح هر یک از این موارد پرداخته شده است.

۲-۳-۱ پیشینه کردن بهره‌وری کامیون

با توجه به این که کامیون‌ها فقط زمانی که بار حمل می‌کنند دارای بازدهی است. بنابراین برای افزایش بهره‌وری کامیون‌ها بایستی کامیون‌ها بعد از خالی کردن بار به ایستگاه بارگیری بروند که در کمترین زمان ممکن بارگیری شوند (به سمت نزدیک‌ترین شاول که بیکار است بروند) [۱۲].

۲-۳-۲ پیشینه کردن بهره‌وری شاول

برای دستیابی به تابع هدف مذکور به جای کاهش زمان انتظار کامیون، زمان انتظار بارکننده را به حداقل می‌رسانند. به عبارت دیگر باید زمان بیکاری بارکننده حداقل شود. با توجه به این نکته که دستگاه‌های بارگیری زمانی که عمل بارگیری انجام می‌دهند دارای بهره‌وری می‌باشند، بنابراین برای افزایش بهره‌وری بارکننده، کامیون به سمت ایستگاه بارگیری که بیکار است یا به زودی بیکار می‌شود می‌رود [۱۲] البته می‌توان با افزایش کامیون در سیستم ترابری نیز بهره‌وری را بالا برد ولی ممکن است به دلیل ازدیاد بیش از حد، صف در ایستگاه‌های بارگیری ایجاد شود که این عامل خود باعث پایین آمدن بهره‌وری شود.

۲-۳-۳ کمینه کردن درجه اشباع

نسبت کامیون‌های موجود در یک مسیر به ترافیک نرمال آن مسیر، درجه اشباع گفته می‌شود. هنگامی که یک کامیون خالی به ترمینال مرکزی می‌رسد، درجه اشباع کلیه مسیرها (مسیرهایی که از ترمینال فوق به ایستگاه‌های بارگیری منتهی می‌شود) محاسبه می‌شود. سپس مسیری که کمترین درجه اشباع را دارد انتخاب شده و کامیون به ایستگاه بارگیری مربوط به آن مسیر هدایت می‌شود [۱۲].

۲-۳-۴ معیار اولویت

بر اساس نیازهای سیستم کانه‌آرایی و تعادل خط تولید، معیار اولویت هر یک از ایستگاه‌های بارگیری محاسبه می‌شود. سپس تخصیص کامیون‌ها به ایستگاه‌های با درجه اولویت بالاتر انجام می‌گیرد. این مورد بیشتر برای معادنی که چندین نوع ماده معدنی تولید می‌کند می‌تواند کاربرد داشته باشد. بر این اساس تولید هر کدام از مواد معدنی اولویت بندی شده و هر کدام از مواد تولیدی اولویت بالاتری در معدن برای تولید داشته باشد، به ایستگاه بارگیری که این نوع ماده معدنی را تولید می‌کند گسیل می‌شود [۱۲].

۲-۴ مدل‌های ریاضی برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون

۲-۴-۱ مدل ارائه شده توسط وایت و السون

این مدل در سال ۱۹۸۶ توسط وایت و السون ارائه شده و در معدن تیرون^۱ اجرا شده است. با توجه به این مدل، هدف اولیه تخصیص انعطاف‌پذیر بیشینه کردن تولید، کمینه کردن جابجایی مجدد، تامین نیاز کارخانه و یا رسیدن به ترکیبی از این اهداف می‌باشد. البته کمینه کردن جابجایی مجدد زمانی مطرح می‌شود که انباره ذخیره مواد معدنی در فاصله دوری از سنگ‌شکن ایجاد شده باشد و هدف این باشد که

^۱ Tyron

بیشتر مواد مورد نیاز سنگ‌شکن از خود سینه‌کارهای استخراجی به آن فرستاده شود تا این که مواد وارد انبار ذخیره شده و از آنجا به سنگ‌شکن فرستاده شود. این سیستم در مواردی که نتواند به تمام اهداف فوق دست یابد (برای مثال وقتی که موجودی انبار ذخیره کافی نبوده یا شاول در وضعیت نامناسبی کار کند)، به دیسپچر اطلاع داده می‌شود. این الگوریتم تولید را بیشنه کرده و جابجایی مجدد را کمینه می‌سازد و با توجه به محدودیت‌های موجود، نیاز کارخانه را تامین می‌نماید [۶]. این مدل از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول با استفاده از برنامه‌ریزی خطی نرخ تولید بهینه هر کدام از شاول‌ها محاسبه شده و در قسمت دوم گسیل زمان واقعی با استفاده از نرخ‌های به دست آمده در قسمت اول صورت می‌گیرد. قسمت اول این مدل خود از دو قسمت تشکیل شده است. در مرحله اول بهینه‌سازی کلی صورت می‌گیرد و در مرحله دوم ماکزیمم‌سازی تولید با هدف مینیمم کردن تعداد کامیون‌های مورد نیاز برای پوشش دادن تولید شاول‌ها صورت می‌گیرد.

۲-۴-۱-۱ برنامه‌ریزی خطی قسمت اول (بهینه‌سازی کلی)

در این قسمت بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن تابع هزینه ظاهری کل برای رسیدن به خوراک مورد نیاز کارخانه، کمینه کردن جابجایی مجدد و اختلاط مناسب انجام شده است. تابع هزینه ظاهری کل از چند تابع هزینه ظاهری جزئی تشکیل شده است. در رابطه (۱-۲) تابع هدف مدل نشان داده شده است [۶].

$$C = \sum_{i=1}^{i=N_m} (C_m \times Q_i) + C_p \times \left(P_t - \sum_{i=1}^{i=N_m+N_s} Q_i \right) + \sum_{i=1}^{N_s} (C_s \times Q_i) \quad (1-2)$$

$$+ \sum_{i=1}^{N_m+N_s} \sum_{j=1}^{N_q} (L_j \times C_q \times X_{ij} \times Q_i)$$

که در این رابطه:

C: تابعی شبه هزینه و بدون بعد می‌باشد. تابع C بایستی بر اساس هزینه‌های جاری در معدن محاسبه شود ولی از آنجا که محاسبه این هزینه به صورت دقیق دشوار می‌باشد برای همین منظور مواردی که در ارتباط با هزینه‌ها می‌باشد در نظر گرفته شده است و تابع به صورت شبه هزینه بیان می‌شود.

N_m : تعداد شاول‌های موجود در سینه کارها

C_m : شبه هزینه حمل مواد معدن بر حسب ساعت بر متر مکعب

Q_i : نرخ حمل مواد از مبدا i ، بر حسب متر مکعب بر ساعت (که باید تعیین گردد)

N_s : تعداد شاول‌های موجود در انبار ذخیره

C_s : شبه هزینه برای جابجایی مواد انبار ذخیره (ساعت بر متر مکعب)

N_q : تعداد محدودیت‌های کیفی مواد

L_j : جهت دهنده کیفیت (برای حد پایین کیفیت محصول ۱ و برای حد بالای آن، ۱- است)

C_q : شبه هزینه برای کیفیت مواد ارسالی به سنگ‌شکن، بر حسب ساعت بر متر مکعب

X_{ij} : ژامین فاکتور کیفیت در آمین شاول

C_p : شبه هزینه دادن خوراک کمتر به کارخانه، بر حسب ساعت بر متر مکعب

P_t : نرخ خوراک موردنظر کارخانه بر حسب متر مکعب بر ساعت

و $C_m < C_q < C_s < C_p$ و C یک تابع اختیاری هست.

کمینه کردن تابع هدف (۱-۲) منجر به کمینه کردن جابجایی مجدد و تامین خوراک کارخانه و عملکرد با حدود اختلاط تعیین شده را با در نظر گرفتن یکسری محدودیت‌ها بدست می‌دهد که محدودیت‌ها به صورت زیر تعریف شده‌اند [۶].

- محدودیت نرخ بارگیری شاول و منفی نبودن آن

$$0 \leq Q_i \leq R_i \quad (2-2)$$

که در آن:

R_i نرخ بارگیری شاول نام بر حسب متر مکعب بر ساعت است.

این معادله ما را مطمئن می‌سازد که جریان کلی از هر مبدا (معدن یا انبار ذخیره)، از حداکثر تولید شاول تجاوز نمی‌کند.

- محدودیت نرخ خوراک کارخانه

$$P_t \geq \sum_{i=1}^{N_m+N_s} Q_i \quad (3-2)$$

رابطه (3-2) ما را مطمئن می‌سازد که جریان کل ورودی به کارخانه از ظرفیت آن تجاوز نمی‌کند.

- محدودیت ژامین کیفیت

$$X_j L \leq X_j A + \sum_{i=1}^{i=N_m+N_s} (X_{ij} - X_j A) \times Q_i \times \frac{T_c}{M_c SG} \leq X_j U \quad (4-2)$$

محدودیت (4-2) بیان می‌دارد که کیفیت موادی که به کارخانه فرستاده می‌شود بین حدهای بالا و

پایین تعیین شده می‌باشد.

که در این رابطه:

M_c : میانگین وزن مواد در زمان مونیتور کردن بر حسب کیلوگرم

SG : وزن مخصوص

T_c : فاصله زمانی کنترل پایگاه، بر حسب ساعت

$X_j L$: حد پایین برای فاکتور کیفیت j

$X_j A$: مقدار متوسط فاکتور کیفیت j

$X_j U$: حد بالا برای فاکتور کیفیت z

۲-۴-۱-۲ برنامه‌ریزی خطی دوم، بهینه‌سازی تولید

در قسمت دوم مدل برنامه‌ریزی خطی، تولید معدن به وسیله کمینه‌کردن ظرفیت ترابری مورد نیاز برای پوشش دادن شاول‌های معدن، بیشینه می‌شود. جواب این قسمت بردار ترابری معدن $[P]$ را به دست می‌دهد. در مواردی که $P_j > Q_i$ باشد، اضافی تولید معدن به انبارهای ذخیره مناسب فرستاده می‌شود. قسمت‌های اول و دوم به طور نسبتاً ضعیفی به هم مربوط می‌شوند و در لحظه وقوع اتفاقات اساسی از قبیل خرابی شاول به ترتیب حل می‌شوند. تابع هدف این بخش به صورت رابطه (۲-۵) می‌باشد. یعنی بیشینه کردن تولید به وسیله کمینه‌کردن حجم ترابری لازم معدن (V) می‌باشد [۶].

$$V = \sum_{i=1}^{N_p} (P_i \times T_i) + \sum_{j=1}^{N_d} (P_j \times D_j) + N_e \times T_s \quad (۲-۵)$$

که در این رابطه:

V : ظرفیت حمل و نقل کل معدن

N_p : تعداد مسیرهای حمل و نقل ممکن

P_i : نرخ حمل و نقل مسیر i ، بر حسب متر مکعب بر ساعت (که باید تعیین گردد).

T_i : زمان حمل و نقل از طریق مسیر i ، بر حسب ساعت

N_d : تعداد دامپ‌ها برای تخلیه مواد

P_j : نرخ حمل و نقل خالص ورودی به دامپ j ، بر حسب متر مکعب بر ساعت

D_j : متوسط زمان تخلیه در دامپ j ، بر حسب ساعت

N_e : تعداد شاول‌های عملیاتی

T_s : اندازه متوسط کامیون‌ها، بر حسب متر مکعب

قسمت اول سمت راست رابطه (۲-۵)، مربوط به ظرفیت ترابری P_i بر حسب متر مکعب بر ساعت در طول مسیرهای ممکن (در مسیر بین ایستگاه‌های بارگیری و نقاط تخلیه) می‌باشد که کامیون می‌تواند حرکت کند. قسمت دوم برای ظرفیت ترابری P_j بر حسب متر مکعب بر ساعت می‌باشد که در هنگام تخلیه صرف می‌شود. قسمت سوم نیز برای ظرفیت ترابری کامیون‌هایی که از شاول‌ها بارگیری می‌شوند به شمار می‌رود. اندیس‌های i و j اختیاری هستند و برای تشخیص بین نرخ‌های باربری برای هر مسیر ورودی و خروجی (P_i در قسمت اول) و مسیرهای فقط ورودی به دامپ‌ها (P_j در قسمت دوم) به کار می‌روند و V ترابری کل مورد نیاز می‌باشد نه تولید خالص معدن. محدودیت‌های این قسمت به صورت زیر می‌باشد [۶].

- پیوستگی در هر گره:

$$\sum_{k=1}^{N_{P_i}} P_k - \sum_{k=1}^{N_{P_o}} P_{k'} = 0 \quad (۲-۶)$$

که در این رابطه:

N_{P_i} : تعداد مسیرهای ورودی به هر گره j

N_{P_o} : تعداد مسیرهای خروجی از هر گره j

P_k : ترابری مسیر ورودی، m^3/hr

$P_{k'}$: ترابری مسیر خروجی، m^3/hr

این محدودیت ما را مطمئن می‌سازد که جریان خروجی و ورودی در هر شاول و هر دامپ با هم

مساویند.

- محدودیت مربوط به میزان تولید شاول در هر گره

$$R_j = \sum_{k=1}^{N_{p_o}} P_{k'} \quad (7-2)$$

که در آن R_j حداکثر نرخ تولید در گره j می‌باشد.

معادله (7-2) ما را مطمئن می‌سازد که اگر تعداد کافی کامیون در دسترس باشد جواب به دست آمده تمام شاول‌ها را پوشش می‌دهد.

- محدودیت اختلاط در معدن

$$P_j = Q_i \quad (8-2)$$

محدودیت (8-2) بیان‌کننده اختلاط در معدن می‌باشد. این معادله قسمت بهینه‌سازی تولید (بردار جواب $[P]$) را با بهینه‌سازی کلی (بردار جواب $[Q]$) پیوند می‌دهد. چون باید مسیری از هر شاول که موادی از نوع نسبتاً قابل قبول برای کارخانه تولید می‌کند، به کارخانه و انبار وجود داشته باشد. این معادله به طور موثری تولید معدن را بین دو هدف مذکور تقسیم می‌کند. قابل ذکر است که هر شاول معدنی باید یک انبار ذخیره باز برای مواد تولید شده داشته باشد تا به حداکثر تولید خود برسد. اندیس‌ها اختیاری بوده و به طور ساده نشان‌دهنده مولفه‌های بردار می‌باشد [۶].

- مثبت بودن تمام نرخ‌های ترابری معدن

$$P_i \geq 0 \quad (9-2)$$

۲-۴-۱-۳ استفاده از برنامه‌ریزی پویا برای تخصیص کامیون‌ها

برنامه‌ریزی خطی که در قسمت‌های قبلی بیان شد، جوابی به صورت نرخ‌های جریان در مسیرها به دست می‌دهد. مساله‌ای که اکنون وجود دارد این است که، چگونه کامیون‌های موجود به شاول‌ها تخصیص داده شوند که نرخ جریان مطلوب برای هر مسیر تامین شود. چون هر کامیون به یک تخصیص

نیاز دارد، می‌توان به سادگی نیازمندترین شاول را پیدا کرده و تخصیص را انجام داد. این امر ممکن است در بعضی موارد به صلاح نباشد. چون ممکن است چنین شاولی از محل فعلی کامیون بسیار دور باشد و این تخصیص نرخ جریان‌های تعیین شده در برنامه‌ریزی خطی اولیه را به دست ندهد. بنابراین از برنامه‌ریزی پویا که از اصل بهینگی بالمن استفاده می‌کند، بهره گرفته می‌شود، که بیان می‌دارد: "یک سیاست بهینه یک مشخصه دارد و آن این است که، حالت اولیه و تصمیم‌گیری‌های اولیه هر آنچه که هستند، تصمیم‌گیری‌های باقی مانده بایستی یک سیاست بهینه نسبت به حالت حاصل شده از تصمیم‌گیری‌های اولیه تشکیل بدهند" [۶].

در مورد تخصیص شاول و کامیون، برنامه‌ریزی پویا چنین عمل می‌کند که تمام کامیون‌هایی را که انتظار می‌رود در آینده نزدیک متقاضی یک تخصیص باشند، به مسیرهای بهینه حاصل از قسمت قبل تخصیص می‌دهد. بنابراین این مدل دو لیست تخصیص را نگهداری می‌کند، یکی برای کامیون‌ها (بردار $[T]$) و دیگری برای مسیرها (بردار $[H]$) می‌باشد. لیست کامیون، شامل تمام کامیون‌های در حال تخلیه در دامپ و یا انبار ذخیره و یا سنگ شکن و تمام کامیون‌هایی که از شاول به محل تخلیه حرکت کرده‌اند، می‌باشد. لیست مسیر شامل کامیون‌های تخصیص داده شده برای هر یک از شاول‌های عملیاتی، زمان آخرین تخصیص کامیون به مسیر و نرخ باربری بهینه مسیرها می‌باشد [۶].

برای تخصیص N_{tk} کامیون به N_{pe} مسیر نیازمند، از یک تابع هدف S که هدف ماکزیمم سازی تابع S می‌باشد، استفاده می‌شود. برای تخصیص N_{tk} کامیون به N_{pe} مسیر بر حسب متر مکعب این تابع به شکل رابطه (۱۰-۲) می‌باشد [۶].

$$S = \sum_{j=1}^{N_{tk}} \text{Min}\{S_j: H_{imax} - H_{ij}\} \quad (10-2)$$

در این رابطه $H_{i\max}$ حداکثر تخصیص لازم برای مسیر i ام و H_{ij} تخصیص‌های باقیمانده در زمان تخصیص i امین کامیون به i امین مسیر می‌باشد. بنابراین:

$$H_{i\max} = P_i \times T_i \quad (11-2)$$

$$H_{ij} = H_{i0} - P_i \times (A_j - L_i) \quad (12-2)$$

که در روابط (11-2) و (12-2):

H_{ij} : تخصیص باقیمانده برای i امین مسیر در زمان A_j ، بر حسب متر مکعب

H_{i0} : تخصیص در زمان L_i ، بر حسب ساعت

P_i : نرخ جریان مسیر، بر حسب متر مکعب بر ساعت

A_j : زمان تخصیص مورد انتظار آینده برای i امین کامیون، بر حسب ساعت

L_i : زمان آخرین تخصیص که به مسیر i ام شده است، بر حسب ساعت

T_i : زمان مورد نیاز برای طی مسیر i ، ساعت

S_j : ظرفیت کامیون j ام، متر مکعب

حال برای تخصیص i امین کامیون به طوریکه تخصیص کل S افزایش یابد، مقدار $(H_{i\max} - H_{ij})$ باید

برای هر تخصیص کامیون بیشینه شود. بنابراین برای هر کامیون رابطه (13-2) محاسبه می‌شود:

$$H_{i\max} - H_{ij} > 0 \quad (13-2)$$

با جایگذاری معادلات (11-2) و (12-2) در نامعادله (13-2)، نامعادله (14-2) به دست می‌آید.

$$P_i \times T_i - H_{i0} + P_i \times (A_j - L_i) > 0 \quad (14-2)$$

با حل نامعادله (14-2) برای A_j بدست می‌آید:

$$A_j > L_i + (H_{i0}/P_i) - T_i \quad (15-2)$$

طرف چپ نامعادله (۱۵-۲) نشان‌دهنده زمان تخصیص مورد انتظار ژامین کامیون در تصمیم تخصیص می‌باشد و طرف راست نشان‌دهنده زمانی است که در آن ژامین مسیر نیاز به یک تخصیص دارد به طوری که وقتی شاول کار بارگیری تمام کامیون‌های قبلی را انجام دهد، کامیون مزبور به آن رسیده باشد. اگر یک کامیون قبل از این زمان به این مسیر نام تخصیص داده شود، هیچ اثری بر تابع ترابری S نخواهد داشت. بنابراین تابع هدف تخصیص X_i به صورت رابطه (۱۶-۲) تعریف شده است که طرف راست نامعادله (۱۵-۲) است. بنابراین:

$$X_i = L_i + H_{i0}/P_i - T_i \quad (16-2)$$

برای پیشینه کردن تابع تخصیص ترابری کل S، این مدل مقدار کمینه تابع هدف X_i را می‌یابد. یعنی مسیری که در نزدیک‌ترین زمان نیاز به تخصیص دارد و سپس با نزدیک‌ترین کامیون J به این مسیر مقایسه می‌کند. اگر نزدیک‌ترین کامیون به این مسیر، در ناحیه این مسیر باشد تخصیص صورت می‌گیرد و بنابراین H_{i0} برای مسیر افزایش می‌یابد و همین عمل دوباره برای مسیر $i+1$ نیز ادامه پیدا می‌کند و به این ترتیب تخصیص صورت می‌پذیرد [۶].

۲-۴-۲ مدل ارائه شده توسط لی

این مدل در سال ۱۹۹۰ توسط لی ارائه شده است. در رابطه با عملیات کامیون-شاول در معادن روباز سه مسئله وجود دارد که بایستی به طور سیستماتیک و دینامیکی حل شود که عبارتند از: چه مقدار باطله و ماده معدنی در امتداد یک مسیر در شبکه‌ی راه‌های حمل و نقل معدن بایستی حمل شود، به طوری که کارهای مربوط به حمل و نقل مینیمم شود. کامیون‌ها بایستی به چه صورتی عمل کنند یا به شاول‌ها تخصیص یابند که سیستم کامیون - شاول کارا و موثر واقع شود و چه تعداد کامیون مورد نیاز

می‌باشد تا تولید مناسب که هدف نهایی است ایجاد شود [۹]. برای رسیدن به این اهداف نیاز به برنامه‌ریزی حمل و نقل و گسیل لحظه‌ای می‌باشد و بر اساس برنامه‌ریزی صورت گرفته بعد از این که کامیون‌ها بار خود را خالی کردند به سمت هر یک از ایستگاه‌های بارگیری گسیل می‌شوند.

۲-۴-۱- برنامه‌ریزی حمل و نقل

برنامه‌ریزی برای حمل و نقل به این معنی می‌باشد که کامیون‌ها چگونه تخصیص داده شوند و چگونه با شاول‌ها جور شوند. در یک حمل و نقل بهینه از مواد در امتداد یک مسیر در شبکه حمل و نقل، بایستی کل کارهای حمل و نقل حداقل شود به گونه‌ای که محدودیت مربوط به نرخ باطله برداری و کیفیت ماده معدنی برآورده شود. کار حمل و نقل به معنای حاصلضرب میزان انتقال مواد در فاصله حمل تعریف می‌شود که رابطه مستقیم با هزینه‌های حمل و نقل دارد، اما ارزیابی آن خیلی آسان‌تر می‌باشد. بنابراین برای بهینه‌سازی برنامه حمل و نقل، حداقل کردن کل کارهای مربوط به حمل و نقل به جای مینیمم کردن هزینه‌ی حمل و نقل معقول‌تر است [۹].

فرض کنید که یک عملیات معدنکاری با تعدادی نقاط بارگیری و تخلیه وجود دارد که شامل شاول‌های بارگیری مواد معدنی و شاول‌های بارگیری باطله، نقاط تخلیه مواد معدنی و نقاط تخلیه باطله می‌باشد. مسأله طراحی ترابری، پیدا کردن مسیر کامیون‌ها بین نقاط بارگیری و تخلیه از طریق مسیرهای ممکن در شبکه حمل و نقل به گونه‌ای که کل کارهای مربوط به حمل و نقل مینیمم شود. تابع هدف این مدل که مینیمم کردن کل کار حمل و نقل می‌باشد به صورت رابطه (۱۷-۲) تعریف می‌شود [۹].

$$W = \sum_{i \in S_1} \sum_{j \in S_2 \cup S_3} X_{ij} (Z_1 + Z_2) \sum_{k=1}^{k_{ij}} D_{ij}^{(k)} + \sum_{i \in S_4} \sum_{j \in S_5} X_{ij} (Z_1 + Z_3) \sum_{k=1}^{k_{ij}} D_{ij}^{(k)} \quad (17-2)$$

$$+ \sum_{i \in S_2 \cup S_3 \cup S_5} \sum_{j \in S_1 \cup S_4} X_{ij} Z_1 \sum_{k=1}^{k_{ij}} D_{ij}^{(k)}$$

قسمت اول سمت راست رابطه مذکور، کار انجام شده توسط کامیون‌هایی است که به سمت مقاصد تخلیه ماده معدنی می‌روند. قسمت دوم کار انجام شده توسط کامیون‌هایی است که به سمت دامپ تخلیه باطله می‌روند و قسمت آخر مربوط به کامیون‌هایی است که از مقاصد تخلیه (سنگ‌شکن یا دامپ باطله) برمی‌گردند [۹].

در این مدل S_1, S_2, S_3, S_4 و S_5 به ترتیب نقاط بارگیری ماده معدنی، نقاط تخلیه ماده معدنی، انبار ذخیره ماده معدنی، نقاط بارگیری باطله و نقاط دفع باطله می‌باشد. X_{ij} ، جریان کامیون در امتداد مسیر i به j که عبارت است از تعداد میانگین کامیون‌های عبوری از مسیر در واحد زمان و K_{ij} تعداد مسیره‌های ممکن از نقطه بارگیری i تا j می‌باشد. $D_{ij}^{(k)}$ نیز فاکتور طول در قسمت k جاده بر روی مسیر از i تا j (که عبارت است از طول مسیر در قسمت k ام مسیر از i تا j) و Z_1, Z_2, Z_3 به ترتیب وزن خالی کامیون، حداکثر میزان حمل ماده معدنی و حداکثر میزان حمل باطله توسط کامیون‌ها می‌باشد [۹].

جریان بهینه کامیون‌ها برای هر یک از مسیره‌ها (X_{ij}^*) ، با مینیمم کردن W و با در نظر گرفتن محدودیت‌های (۲-۱۸) تا (۲-۲۱) حاصل می‌شود.

$$P_i/T \leq \sum_{j \in S_2 \cup S_3} X_{ij} Z_2 \quad \text{for } i \in S_1 \quad (2-18)$$

$$P_i/T \leq \sum_{j \in S_5} X_{ij} Z_3 \quad \text{for } i \in S_4 \quad (2-19)$$

$$\sum_{i \in S_1} \alpha_i^{(q)} \sum_{j \in S_2} X_{ij} = \alpha^{(q)} \sum_{i \in S_1} \sum_{j \in S_2} X_{ij} \quad \text{for } q = 1, 2, \dots, Q \quad (2-20)$$

$$\sum_{i \in S_j} X_{ij} = \sum_{k \in S_j} X_{jk} \quad \text{for } j = \bigcup_{i=1}^5 S_i \quad (2-21)$$

که در روابط بالا T مدت زمان برنامه‌ریزی برای موقعی است که نقاط بارگیری و تخلیه بدون تغییر نگه داشته می‌شود و P_i میزان حمل و نقل برنامه‌ریزی شده از نقطه بارگیری i می‌باشد تا در طول زمان

T به نرخ باطله‌برداری طراحی شده دست پیدا شود. Q تعداد کل شاخص‌های کیفیت ماده معدنی و $\alpha_i^{(q)}$ میزان شاخص کیفیت ماده معدنی q در نقطه بارگیری i ، $\alpha^{(q)}$ میزان مورد نیاز شاخص کیفیت ماده معدنی q در کارخانه فرآوری می‌باشد. S_j مجموعه‌ای از نقاط بارگیری و تخلیه که از مسیرهای ممکن ورودی به گره j تشکیل شده و S_j مجموعه‌ای از نقاط بارگیری و تخلیه که از مسیرهای ممکن خروجی از گره j تشکیل می‌شود [۹].

محدودیت (۲-۱۹) بیان کننده میزان مواد جابجا شده در واحد زمان می‌باشد که نبایستی کمتر از میزان برنامه‌ریزی باشد. محدودیت (۲-۲۰) بیان کننده همین موضوع برای میزان باطله جابجا شده می‌باشد. محدودیت (۲-۲۱) برای کنترل عیار مواد معدنی موردنظر کارخانه با عیار مخلوط می‌باشد و محدودیت (۲-۲۲) بیان می‌کند که تعداد کامیون‌های ورودی به هر دامپ یا سنگ شکن و یا سینه کارهای استخراجی با تعداد کامیون‌های خروجی از آن برابر است [۹].

راه‌حل به دست آمده از برنامه ریزی خطی در بالا یک نرخ جریان بهینه کامیون برای هر مسیر را بدست می‌دهد.

۲-۲-۴-۲ روش گسیل زمان - واقعی کامیون‌ها

راه‌حل به دست آمده از برنامه ریزی خطی در بالا یک نرخ جریان بهینه کامیون‌ها را برای هر مسیر بدست می‌دهد که برای مسأله گسیل کامیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور یک قاعده گسیل که انحراف حداکثر زمان گسیل بین کامیون‌ها نامیده می‌شود بیان شده است. اگر t_{ij}^* فاصله زمانی بهینه بین کامیونی که گسیل شده و کامیونی که درست بعد از آن بر روی مسیر از i تا j گسیل می‌شود باشد برای اینکه نرخ‌های بدست آمده از حل مدل در رابطه (۲-۱۷) رعایت شود بایستی به صورت زیر باشد [۹]:

$$t_{ij}^* = 1/X_{ij}^* \quad (22-2)$$

حال اگر t_{ij} فاصله زمانی واقعی بین کامیون گسیل شده و کامیونی که بعد از آن بر روی مسیر از i تا j می‌خواهد گسیل شود باشد. اختلاف بین واقعیت و فاصله زمانی بهینه به صورت فرمول (23-2) می‌باشد.

$$\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{ij}^* \quad (23-2)$$

بنابراین انحراف زمان نسبی (δ_{ij}) بین کامیون‌های در حال گسیل بر روی مسیر i تا j به صورت زیر می‌باشد.

$$\delta_{ij} = \Delta t_{ij} / t_{ij}^* \quad (24-2)$$

و در نهایت طبق رابطه (25-2) قاعده انحراف حداکثر زمان بین کامیون‌ها بیان می‌دارد که چنانچه یک کامیون خالی در نقطه i در حال گسیل به نقطه بارگیری k باشد به نقطه‌ای گسیل می‌شود که δ_{ik} آن حداکثر شود [9].

$$\delta_{ik} = \max\{\delta_{ij} | j \in S_1 \cup S_3 \cup S_4\} \quad (25-2)$$

۲-۴-۳ مدل ارائه شده توسط تمنگ

این مدل در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است. در مدل ارائه شده توسط تمنگ ابتدا بر اساس برنامه‌ریزی آرمانی نرخ‌های جریان بهینه از مواد معدنی یا باطله از هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری به هر کدام از نقاط تخلیه تعیین شده و سپس بر اساس برنامه گسیل ارائه شده گسیل لحظه‌ای صورت می‌گیرد.

۲-۴-۳-۱ مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای تعیین نرخ تولید بهینه هر یک از مسیرها

در سیستم حمل و نقل معادن روباز دو هدف اصلی ماکزیمم کردن تولید و حفظ عیار در محدوده تعیین شده همواره جلب توجه می‌کند. در بیشتر معادن این دو هدف هستند که از اهمیت ویژه‌ای

برخوردارند و از لحاظ اولویت و اهمیت نسبت به همدیگر مقایسه می‌شوند. ارجحیت این دو هدف ممکن است از معدنی به معدن دیگر متفاوت باشد. در مواردی که ماکزیمم کردن تولید از اولویت بیشتری برخوردار باشد، هر تلاشی برای تاکید بیشتر اهمیت آن، ممکن است توانایی سیستم را برای حفظ عیار در محدوده تعیین شده کاهش دهد. از طرف دیگر تاکید بیشتر بر حفظ عیار در محدوده تعیین شده ممکن است بی‌جهت تولید را کاهش دهد. یک روش منطقی برای کنترل دو هدف ماکزیمم‌سازی تولید و حفظ عیار در محدوده تعیین شده، استفاده از مدل‌هایی است که اهمیت نسبی مدل‌ها را نیز دخالت دهد [۵].

برای نیل به این هدف تمنگ از یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کرد. برنامه‌ریزی آرمانی، گسترش و تعدیل برنامه‌ریزی خطی است. با روش برنامه‌ریزی آرمانی می‌توان اهداف پیچیده یک سیستم را به طور همزمان بهینه نمود. به عبارت دیگر تکنیکی است که قابلیت حل مسائل تصمیم‌گیری با چند هدف را دارد. تابع هدف این مدل به صورت رابطه (۲-۲۶) می‌باشد که با حل این مدل با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسأله نرخ‌های جریان بهینه از مواد برای هر مسیر بدست می‌آید [۵].

$$\text{Min } z = p_1 \left(\sum_{i=1}^{l_1} d_i^- + \sum_{l_1+1}^{l_1+l_2} d_i^- \right) + p_2 \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{m_1} (C_{kj}^+ + C_{kj}^-) \quad (2-26)$$

که در این رابطه:

p_1 و p_2 فاکتورهای تقدم مدیریتی به ترتیب برای تولید و کنترل کیفیت می‌باشد. d_i^- متغیر انحراف منفی از حداکثر تولید شاول l_1 و l_2 به ترتیب تعداد شاول‌های ماده معدنی و باطله می‌باشد، n تعداد کیفیت‌های ماده معدنی و C_{kj}^+ و C_{kj}^- نیز به ترتیب متغیر انحراف مثبت و منفی از مقدار مطلوب ماده معدنی k در سنگ شکن j می‌باشد. m_1 تعداد کل سنگ‌شکن‌ها می‌باشد.

تابع هدف، تولید هر کدام از شاول‌ها را حداکثر کرده و کیفیت ماده معدنی را در محدوده تعیین شده حفظ می‌کند. حداکثر تولید شاول با مینیمم کردن انحراف از حداکثر تولید مورد انتظار شاول‌ها قابل

دستیابی است. کمترین انحراف متغیر d_i^- ، برای تولید یک شاول مشخص، شاول را جهت رسیدن به حداکثر تولید نزدیک می‌کند. اهداف کیفی ماده معدنی در کارخانه و سنگ‌شکن با مینیمم کردن میزان تولید انحراف بالا (C_{kj}^+) و انحراف پایین (C_{kj}^-) از مقدار مطلوب کیفی هر کدام از اهداف کیفیتی قابل دستیابی است. فاکتورهای اولویت مدیریتی، p_1 و p_2 ، انعطاف‌پذیری سیستم را بالا برده و اهداف مدیریتی را در معدن برآورده می‌سازد. مقادیر p_1 و p_2 اهمیت نسبی ماکزیم‌سازی تولید و حفظ عیار در محدوده تعیین شده نشان می‌دهد. به عنوان مثال اگر p_1 بزرگتر از p_2 باشد، ماکزیم‌سازی تولید نسبت به حفظ عیار از اولویت بالاتری برخوردار است [۵].

محدودیت‌های این مدل به صورت روابط (۲۷-۲) تا (۴۰-۲) می‌باشد.

- محدودیت آرمانی حداکثر تولید شاول

$$\sum_{j=1}^{m_1} x_{ij} + d_i^- = M_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l_1 \quad (27-2)$$

$$\sum_{i=m_1+1}^{m_1+m_2} x_{ij} + d_i^- = M_i \quad \text{for } i = l_1 + 1, l_1 + 2, \dots, l_1 + l_2 \quad (28-2)$$

که در این روابط:

X_{ij} : میزان ماده معدنی یا باطله که در یک شیفت از ایستگاه بارگیری i به نقطه تخلیه j فرستاده

می‌شود.

M_i : حداکثر میزان ماده تولید شده توسط شاول i در هر شیفت

m_1 و m_2 به ترتیب تعداد سنگ‌شکن‌ها و تعداد دامپ‌های باطله می‌باشد.

- محدودیت مربوط به حداقل تولید شاول

$$\sum_{j=1}^{m_1} x_{ij} \geq b_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l_1 \quad (29-2)$$

$$\sum_{j=m_1+1}^{m_1+m_2} x_{ij} \geq b_i \quad \text{for } i = l_1 + 1, l_1 + 2, \dots, l_1 + l_2 \quad (30-2)$$

b_i : حداقل میزان ماده تولید شده توسط شاول i در هر شیفت می باشد.

- محدودیت مربوط به ظرفیت هر کدام از سنگ‌شکن‌ها و دامپ‌ها

$$\sum_{i=1}^{l_1+l_2} x_{ij} \leq c_j \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m_1 + m_2 \quad (31-2)$$

c_j : حداکثر ظرفیت سنگ‌شکن یا دامپ تخلیه j در هر شیفت

- محدودیت‌های تعادل جریان ظرفیت باربری در هر نقطه مبدا و مقصد از شبکه باربری

$$\sum_{j=1}^{m_1+m_2} Y_{ji} = \sum_{j=1}^{m_1+m_2} X_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, l_1 + l_2 \quad (32-2)$$

$$\sum_{i=1}^{l_1+l_2} Y_{ji} = \sum_{i=1}^{l_1+l_2} X_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m_1 + m_2 \quad (33-2)$$

Y_{ij} : ظرفیت کامیون خالی برای ارسال از مقصد تخلیه (سنگ‌شکن/دامپ) j به شاول i در یک شیفت

- محدودیت آرمانی مربوط به کیفیت مورد نظر ماده معدنی

$$\sum_{i=1}^{l_1} X_{ij} g_{ik} + C_{kj}^- - C_{kj}^+ = Q_{kj} \sum_{i=1}^{l_1} X_{ij} \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m_1 \quad (34-2)$$

که در این رابطه:

g_{ik} : کیفیت ماده معدنی k در شاول i و Q_{kj} کیفیت مورد هدف ماده معدنی k در سنگ شکن j

می‌باشد.

- محدودیت مربوط به حدود پایین و بالای کیفیت ماده معدنی

$$C_{kj}^- \leq (Q_{kj} - L_{kj}) \sum_{i=1}^{l_1} X_{ij} \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m_1 \quad (35-2)$$

$$(u_{kj} - Q_{kj}) \sum_{i=1}^{l_1} X_{ij} \geq C_{kj}^+ \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m_1 \quad (36-2)$$

که در این روابط:

u_{kj} و L_{kj} به ترتیب حد مجاز بالا و پایین کیفیت ماده معدنی k در سنگ‌شکن j

- محدودیت مربوط به تامین باطله برداری مورد نیاز

$$r_l \leq \frac{\sum_{i=l_1+1}^{l_1+l_2} \sum_{j=m_1+1}^{m_1+m_2} X_{ij}}{\sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{m_1} X_{ij}} \quad (37-2)$$

$$\frac{\sum_{i=l_1+1}^{l_1+l_2} \sum_{j=m_1+1}^{m_1+m_2} X_{ij}}{\sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{m_1} X_{ij}} \leq r_m \quad (38-2)$$

در این رابطه r_l و r_m به ترتیب حداقل و حداکثر نرخ باطله‌برداری را نشان می‌دهد.

- محدودیت مربوط به تعداد کامیون های در دسترس

$$\sum_{i=1}^{l_1+l_2} \sum_{j=1}^{m_1+m_2} H_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^{l_1+l_2} \sum_{j=1}^{m_1+m_2} D_j X_{ij} + \sum_{j=1}^{m_1+m_2} \sum_{i=1}^{l_1+l_2} Y_{ji} R_{ji} + \sum_{i=1}^{l_1+l_2} \sum_{j=1}^{m_1+m_2} S_i Y_{ji} \leq N.T \quad (39-2)$$

که در این رابطه:

H_{ij} و D_j به ترتیب میانگین زمان رفت کامیون از شاول i به دامپ یا سنگ‌شکن j و میانگین زمان

تخلیه در دامپ یا سنگ‌شکن j در شیفیت می‌باشد.

R_{ij} و S_i به ترتیب زمان برگشت کامیون از سنگ‌شکن یا دامپ j به شاول i و میانگین زمان بارگیری

توسط شاول i در شیفیت، N تعداد کامیون‌های در دسترس در شیفیت و T میانگین بار کامیون بر حسب

تن می‌باشد.

- محدودیت مثبت بودن متغیرها

$$X_{ij}, Y_{ji}, C_{kj}^+, C_{kj}^-, d_i^- \geq 0 \quad (40-2)$$

۲-۴-۳-۲ روش گسیل زمان واقعی

بعد از تعیین نرخ جریان بهینه از مواد برای هر مسیر گسیل زمان واقعی صورت می‌گیرد در فرمول‌بندی این قسمت موارد زیر مد نظر قرار می‌گیرند [۱۷]:

- به منظور بیشینه کردن تولید، سریع‌ترین مسیرهای حمل در جواب برنامه‌ریزی آرمانی تا حد ممکن بایستی انتخاب شود و بهره‌وری کامیون و شاول باید بوسیله کمینه‌کردن زمان انتظار آنها بیشینه گردد.

- برای حفظ نسبت باطله‌برداری و کیفیت ماده معدنی در حدهای از قبل تعریف شده، بایستی نرخ تولید هر مسیر شاول از راه‌حل‌های بهینه مدل برنامه‌ریزی آرمانی تعیین شود.

- الگوریتم بایستی قادر به پاسخگویی سریع به تغییرات غیرمنتظره از قبیل خرابی شاول باشد. روش کار الگوریتم به این ترتیب است که ابتدا شاول‌های نیازمند را تعیین کرده و با توجه به تقاضای شاول‌ها و معیار تخصیص کامیون‌ها و با استفاده از مدل حمل و نقل، تخصیص کامیون‌ها را بهینه می‌کند. مراحل تخصیص کامیون‌ها به شرح زیر می‌باشد [۱۷]:

- تعیین شاول‌های نیازمند

شاول‌های نیازمند بر این اساس انتخاب می‌شوند که مسیرهای مختلف شاول ممکن است با توجه به میزان تولید بدست آمده از جواب مدل برنامه‌ریزی آرمانی دارای نیازهای متفاوتی باشند. شاول‌های نیازمند به این ترتیب تمام شاول‌های مربوط به مسیرهایی است که دارای تولید تجمعی زیر هدف می‌باشند. از سوی دیگر، شاول‌های غیرنیازمند تمام شاول‌های مربوط به مسیرهایی با تولید تجمعی بالاتر از هدف را شامل می‌شود [۱۷].

اگر T_{ij} میزان مواد بر شیفت تعیین شده بین شاول i و دامپ یا سنگ‌شکن j بر اساس جواب بهینه مدل برنامه‌ریزی آرمانی باشد و x_{ij} جریان تجمعی میزان ماده از شاول i به دامپ یا سنگ‌شکن j در هر لحظه باشد، نسبت x_{ij}/T_{ij} را در هر لحظه می‌توان به دست آورد. این مقدار را برابر R_{ij} قرار می‌دهیم:

$$R_{ij} = x_{ij}/T_{ij} \quad (۴۱-۲)$$

وقتی شیفت به پیش می‌رود این نسبت نیز افزایش یافته و به واحد نزدیکتر می‌شود. به منظور حفظ کیفیت ماده معدنی و نسبت باطله برداری، در حالت ایده‌آل تمام مقادیر R_{ij} ها در هر زمان واقعی بایستی با هم برابر باشند. این امر در عمل به دلیل ظرفیت ثابت و حرکت غیر یکنواخت کامیون‌ها در یک معدن واقعی مشکل است. حال اگر R میانگین نسبت‌های R_{ij} باشد، مقدار R در هر لحظه به عنوان نسبت هدف برای هر مسیر به کار می‌رود.

$$R = \frac{1}{nm} \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \quad (۴۲-۲)$$

انحراف d_{ij} هر مسیر شاول به صورت رابطه (۴۳-۲) تعیین می‌شود:

$$d_{ij} = R_{ij} - R \quad (۴۳-۲)$$

هر مسیر شاول با انحراف منفی، به عنوان شاول نیازمند در نظر گرفته می‌شود، و نیازمند تخصیص می‌باشد و بر عکس هر شاول با انحراف صفر و یا مثبت، نیاز به تخصیص ندارد [۱۷].

• تعیین تقاضای شاول

وقتی کامیون‌ها به شاول‌ها تخصیص داده می‌شوند تعداد کامیون‌های مربوطه برای هر مسیر نیازمند، بایستی بر اساس انحراف مسیر مربوطه تعیین گردد. ابتدا هر انحراف منفی به میزان حمل مورد نیاز تبدیل می‌شود. فرض کنید y_{ij} میزان حمل مورد نیاز برای رسیدن به هدف از شاول i به دامپ یا سنگ‌شکن j باشد در اینصورت:

$$\frac{x_{ij} + y_{ij}}{T_{ij}} = R \quad \Rightarrow \quad y_{ij} = RT_{ij} - x_{ij} \quad (44-2)$$

به منظور تعیین تعداد کامیون‌ها، میزان حمل مورد نیاز y_{ij} باید با یک ظرفیت مناسب کامیون مقایسه گردد. در مورد اندازه‌های مختلف کامیون‌ها، بایستی اندازه یکی از کامیون‌ها را به عنوان مبنا انتخاب کنید. مثلاً حالتی را فرض کنید که کامیون‌ها دو اندازه مختلف دارند ظرفیت کامیون بزرگتر یا کوچکتر یا متوسط آنها را می‌توان به عنوان ظرفیت مبنا انتخاب کرد. اندازه انتخاب شده بایستی طوری باشد که کمترین مقدار ماکزیمم انحراف میزان حمل را داشته باشد، تا انحراف از کیفیت ماده معدنی تعیین شده کمینه گردد. تحلیل‌های تمنگ نشان داده است که چنانچه نسبت ظرفیت کامیون بزرگتر به کوچکتر بین ۱ تا ۳ باشد کامیون‌های با ظرفیت بزرگتر کمترین مقدار انحراف میزان حمل را دارند.

بنابراین مقدار تقاضای هر مسیر شاول M_{ij} به صورت رابطه (۴۵-۲) می‌باشد:

$$M_{ij} = \left\lceil \frac{y_{ij}}{C_1} \right\rceil \quad (45-2)$$

که در این رابطه C_1 ظرفیت کامیون بزرگتر (در مواردی که کامیون‌ها سایزهای مختلف داشته

باشند) و $\left\lceil \frac{y_{ij}}{C_1} \right\rceil$ کوچکترین عدد صحیح بزرگتر یا مساوی با $\frac{y_{ij}}{C_1}$ است.

تقاضا برای هر شاول D_i و تقاضای کلی D به صورت (۴۶-۲) و (۴۷-۲) بدست می‌آید:

$$D_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} \quad (46-2)$$

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad (47-2)$$

بایستی این نکته را یادآور شد که تقاضای کل شاول به وسیله تعداد کامیون‌های در دسترس برای

تخصیص محدود می‌شود. تعداد کامیون‌های در دسترس ممکن است مساوی یا کمتر از تقاضای کل

شاول‌ها (D) باشد. در این حالت اولویت با شاول‌هایی است که میزان تولیدی بالایی دارند [۱۷].

- معیار تخصیص کامیون‌ها

تمام کامیون‌های که هم اکنون در دامپ یا سنگ‌شکن هستند و آن‌هایی که در مسیر شاول به دامپ یا سنگ‌شکن هستند و تخصیص داده نشده‌اند به عنوان کامیون‌های قابل قبول برای تخصیص در نظر گرفته می‌شوند. یک تخصیص وقتی انجام می‌شود که یک کامیون تخصیص داده نشده، به محوطه هر دامپ یا سنگ‌شکن برسد. وقتی که تقاضای کل شاول‌ها شناخته شد و کامیون‌های قابل تخصیص انتخاب شدند، معیار تصمیم‌گیری برای گسیل که کمترین زمان انتظار کامیون‌ها و شاول‌ها را تامین می‌کند فعال می‌شود. برای هر کامیون انتخاب شده، زمان انتظار مربوط به تخصیص کامیون k م در دامپ یا سنگ‌شکن j ، به شاول i که با W_{ik} نشان داده می‌شود، بصورت رابطه (۲-۴۸) محاسبه می‌شود [۱۷].

$$W_{ik} = L_i(N_i + E_i) - (t_k + d_j + e_j + r_{ij}) \quad (۲-۴۸)$$

که در این رابطه :

L_i : متوسط زمان بارگیری شاول i

N_i : تعداد کامیون‌هایی که در راه رفتن به شاول i می‌باشند

t_k : زمان مورد انتظار برای رفتن کامیون k به سنگ‌شکن یا دامپ j

d_j : زمان انتظار کامیون در سنگ‌شکن یا دامپ j

e_j : زمان متوسط تخلیه کامیون در دامپ یا سنگ‌شکن j

r_{ij} : زمان متوسط رفتن کامیون از سنگ‌شکن یا دامپ j به شاول i

محاسبه عبارت فوق زمان انتظار مجموعه شاول و کامیون گسیل شده به آن را نشان می‌دهد. مقادیر

منفی نشان دهنده انتظار شاول برای رسیدن کامیون و مقادیر مثبت بیانگر انتظار کامیون‌ها است.

- مدل برنامه‌ریزی گسیل کامیون‌ها

برای کمینه کردن زمان انتظار هر تخصیص، از مدل حمل و نقل استفاده شده است که موارد زیر برای وفق دادن فرآیند تخصیص کامیون‌ها با این مدل بایستی در نظر گرفته شود [۱۷]:

هر کامیون k در سیستم باربری شاول - کامیون، به عنوان یک گره عرضه با مقدار عرضه S_k در نظر گرفته می‌شود. برای هر کدام از کامیون‌هایی که برای تخصیص انتخاب شده‌اند، مقدار $S_k=1$ می‌باشد و برای تمام کامیون‌هایی که برای تخصیص انتخاب نشده‌اند، مقدار $S_k=0$ می‌باشد.

هر شاول i در سیستم باربری شاول-کامیون به عنوان یک گره تقاضا با مقدار تقاضای D_i در نظر گرفته می‌شود. برای شاول‌های نیازمند D_i مثبت بوده و برای شاول‌های غیر نیازمند مساوی صفر است.

هر گره عرضه k به تمام گره‌های تقاضای i راه دارد و بر عکس. این به این معنی است که هر کامیون می‌تواند به هر شاول تخصیص داده شود و تمام شاول‌ها برای تخصیص باز می‌باشند. این امر تمام نیازهای شبکه حمل و نقل را برآورده می‌سازد.

زمان انتظار W_{ik} به عنوان هزینه حمل از گره k به گره تقاضای i می‌باشد. چون جواب مدل برنامه‌ریزی آرمانی، سریع‌ترین مسیرها را از هر دامپ یا سنگ‌شکن به هر شاول انتخاب می‌کند، مدل حمل و نقل برای بهبود این مسیرهای بهینه فرموله می‌شود.

به منظور کمینه کردن زمان انتظار کل برای هر مجموعه تخصیص، مدل حمل و نقل به صورت رابطه (۴۹-۲) به کار برده شده است [۱۷]:

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^n W_{ik} X_{ik} \quad (49-2)$$

با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیر:

$$\sum_{i=1}^n X_{ik} \leq S_k \quad (50-2)$$

$$\sum_{k=1}^l X_{ik} \geq D_i \quad (51-2)$$

$$X_{ik} \geq 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, l \quad (52-2)$$

که در روابط بالا:

W_{ik} : زمان انتظار مربوط به تخصیص کامیون k به شاول i

X_{ik} : تخصیص کامیون k به شاول i

S_k : عرضه کامیون k

D_i : تقاضای شاول i

خرابی شاول به عنوان یکی از مهمترین مسائل در سیستم‌های ترابری معادن می‌باشد. بنابراین در مواقع خرابی شاول کلیه محاسبات و نتایج به هم خورده و اعتبار آن از بین می‌رود. در این مواقع باید مدل تخصیص مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد و بر اساس پارامترهای ورودی جدید حل شود. جواب بهینه مدل تخصیص جدید به عنوان اساس گسیل کامیون‌های بعدی به شاول‌های باقی‌مانده قرار می‌گیرد. این مسأله تا زمان فعال‌سازی مجدد شاول ادامه خواهد داشت. کامیون‌هایی که به شاول خراب تخصیص داده شده بودند، برای شاولی که دارای حداکثر تولید می‌باشد، اختصاص می‌یابند [۱۷].

۲-۴-۴ مدل ارائه شده توسط چانگ

این مدل در سال ۲۰۰۴ توسط چانگ ارائه شده است. با توجه به این که مهمترین هدف مسأله تخصیص کامیون، پشتیبانی از هدف نهایی تولید، یعنی بیشینه کردن سود ناشی از عملیات است. برای تخصیص کامیون در معادن اهداف زیادی را می‌توان تعریف کرد که این اهداف بسته به شکل، ترکیب فیزیکی معدن، شرایط عملیاتی و اهداف اقتصادی یا مدیریتی معدن متفاوت‌اند. تابع هدف این مدل به صورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$\text{MinTruck} : \sum_s \sum_d \sum_g K(g)X(s, d, g) \quad (53-2)$$

در معادلات این مدل اندیس‌های s ، d و g به ترتیب به شاول، دامپ و کامیون اشاره دارد. $X(s,d,g)$ نرخ گسیل کامیون نوع g در مسیر بین شاول s و دامپ d و $K(g)$ فاکتور هزینه است که به نوع کامیون بستگی دارد. محدودیت‌های این مدل به صورت زیر می‌باشد [۱۸]:

- محدودیت تامین کننده سطح تولید و ظرفیت انباشت مواد

$$V_0 + H[V_{Truck} - V_{Extraction}] \geq V_{Min} \quad (54-2)$$

$$V_{Truck} = \sum_s \sum_d \sum_g \frac{60}{\tau_0(s, d, g)} L_0(s, d, g) X(s, d, g) \quad (55-2)$$

$$d = \text{Waste Dumps}, \quad H \sum_s \sum_d \sum_g X_{(s,d,g)} \times V_g \geq D_w \quad (56-2)$$

- محدودیت کامیون‌های تخصیصی بر حسب توان تولید شاول:

$$\sum_d \sum_g \frac{60}{\tau_0(s, d, g)} \bar{L}_0(s, d, g) \leq C_{shovel} \quad (57-2)$$

- محدودیت حد بالای منابع کامیونی:

$$\sum_s \sum_d X(s, d, g) \leq R(g), \quad X(s, d, g) \geq 0 \quad (58-2)$$

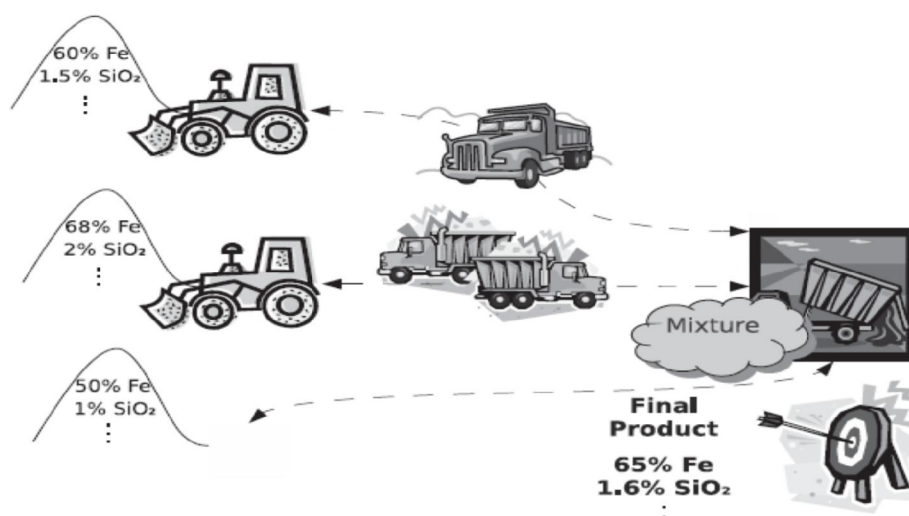
در معادلات بالا $L_0(s,d,g)$ و $\tau_0(s,d,g)$ به ترتیب ظرفیت حمل و زمان چرخه کار کامیون نوع g در مسیر بین شاول s و دامپ d است. V_0 نشان دهنده حجم اولیه مواد در انبار ذخیره مواد معدنی و V_{Truck} و $V_{Extraction}$ به ترتیب حاکی از نرخ جریان ورودی و خروجی مواد در انبار ذخیره مواد معدنی می‌باشد. V_{min} کمترین حجم موادی است که باید در ابتدای شیفت در انبار درشت وجود داشته باشد، C_{shovel} ظرفیت ساعتی شاول s و D_w نیز مقدار میزان باطله‌ای است که باید به صورت ساعتی حمل شود. R_g تعداد کامیون‌های در دسترس از نوع g و H ساعت کاری در دوره یا شیفت است [۱۸].

این مدل را چهره‌قانی و همکارانش برای معدن مس سرچشمه بکار گرفتند که نتیجه آن افزایش ۲۸/۵ درصدی میزان تولید متوسط شیفت اول نسبت به روش‌های سنتی بود [۱۹].

۲-۴-۵ مدل ارائه شده توسط سوزا و همکارانش

این مدل در سال ۲۰۱۰ ارائه شده است. در برنامه‌ریزی عملیات معادن روباز مسأله‌ای که وجود دارد این است که پله‌های باطله و پله‌های ماده معدنی وجود دارد و مواد استخراج شده با شاول، از محل این پله‌ها به وسیله کامیون به نقاط تخلیه (دامپ باطله و سنگ‌شکن) حمل می‌شود. پله‌های باطله بایستی یک نرخ معدن‌کاری تعیین شده را برآورده کنند (میزان مشخص شده باطله از این پله‌ها استخراج شود)، در حالی که برای پله‌های ماده معدنی علاوه بر برآوردن نرخ معدن‌کاری مورد انتظار، نیاز به تامین کیفیت ماده معدنی مخلوط نیز هستیم [۱۱].

در این مسئله، هدف تعیین میزان استخراج در هر پله می‌باشد، به طوری که میزان تولید مورد نظر و هدف کیفی برآورده شود و هم چنین هدف حداقل کردن تعداد کامیون‌های مورد نیاز برای فرایند تولید نیز می‌باشد. در شکل (۱-۲) فرایند تولید در این مسأله به صورت شماتیک تشریح شده است.



شکل ۱-۲ مثالی از عملیات معدن‌کاری برای یک معدن فرضی آهن [۱۱]

مدل ریاضی این بخش، یک مدل جدید برنامه‌ریزی آمیخته با عدد صحیح براساس برنامه‌ریزی آرمانی برای حل برنامه‌ریزی عملیات معدن کاری روباز می‌باشد. هدف، مینیمم کردن انحراف از اهداف تولید و کیفیت و کاهش تعداد کامیون مورد نیاز برای انجام عملیات می‌باشد. تابع هدف این مدل به صورت رابطه (۶۰-۲) می‌باشد [۱۱]:

$$\min \sum_{j \in P} \lambda_j^- d_j^- + \sum_{j \in P} \lambda_j^+ d_j^+ + \alpha^- D_o^- + \alpha^+ D_o^+ + \beta^- D_w^- + \beta^+ D_w^+ + \sum_{l \in T} \omega_l U_l \quad (۶۰-۲)$$

محدودیت‌های این مدل نیز به صورت روابط (۶۱-۲) تا (۸۵-۲) می‌باشد.

$$\sum_{i \in O} (P_{ij} - P_{uj}) x_i \leq 0 \quad \forall j \in P \quad (۶۱-۲)$$

$$\sum_{i \in O} (P_{ij} - P_{lj}) x_i \geq 0 \quad \forall j \in P \quad (۶۲-۲)$$

$$\sum_{i \in O} (P_{ij} - P_{rj}) x_i + d_j^- - d_j^+ = 0 \quad \forall j \in P \quad (۶۳-۲)$$

$$\sum_{i \in O} x_i \leq O_u \quad (۶۴-۲)$$

$$\sum_{i \in O} x_i \geq O_l \quad (۶۵-۲)$$

$$\sum_{i \in O} x_i + D_o^- - D_o^+ = O_r \quad (۶۶-۲)$$

$$\sum_{i \in W} x_i \leq W_u \quad (۶۷-۲)$$

$$\sum_{i \in W} x_i \geq W_l \quad (۶۸-۲)$$

$$\sum_{i \in W} x_i + D_w^- - D_w^+ = W_r \quad (۶۹-۲)$$

$$x_i \leq Qu_i, \quad \forall i \in F \quad (۷۰-۲)$$

$$x_i \geq 0, \quad \forall i \in F \quad (71-2)$$

$$x_i \geq 0, \quad \forall i \in F \quad (72-2)$$

$$D_0^-, D_0^+ \geq 0 \quad (73-2)$$

$$D_w^-, D_w^+ \geq 0 \quad (74-2)$$

$$\sum_{k \in S} y_{ik} \leq 1, \quad \forall i \in F \quad (75-2)$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1, \quad \forall k \in S \quad (76-2)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in F, \forall k \in S \quad (77-2)$$

$$x_i - \sum_{k \in S} S u_k y_{ik} \leq 0, \quad \forall i \in F \quad (78-2)$$

$$x_i - \sum_{k \in S} S l_k y_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in F \quad (79-2)$$

$$n_{il} c t_{il} - 60 \sum_{k \in S, g_{lk}=1} y_{ik} \leq 0, \quad \forall i \in F, \forall l \in T \quad (80-2)$$

$$x_i - \sum_{l \in T} n_{il} c a p_l = 0, \quad \forall i \in F \quad (81-2)$$

$$\frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} c t_{il} \leq T x_l, \quad \forall l \in T \quad (82-2)$$

$$U_l - \frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} c t_{il} \geq 0, \quad \forall i \in F \quad (83-2)$$

$$n_{il} \in Z^+ \forall i \in F, \forall l \in T \quad (84-2)$$

$$U_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in T$$

(۸۵-۲)

پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در این مدل به صورت جدول (۲-۲) می‌باشند.

جدول ۲-۲ پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل ارائه شده توسط Souza و همکارانش

معرفی پارامترها	پارامتر	ردیف	معرفی پارامترها	پارامتر	ردیف
میزان جریمه برای انحراف مثبت از پارامتر کنترلی z در مخلوط	λ_j^+	۱۶	مجموع پله‌های ماده معدنی	O	۱
میزان جریمه برای انحراف منفی پارامتر کنترلی z در مخلوط	λ_j^-	۱۷	مجموع پله‌های باطله	w	۲
متغیر مورد استفاده برای آمین کامیون	ω_i	۱۸	مجموع پله‌های باطله و ماده معدنی	F	۳
حداکثر نرخ استخراج پله i (ton/hour)	Qu_i	۱۹	مجموع پارامترهای کنترلی آنالیز شده در ماده معدنی	P	۴
حداکثر بازدهی کامیون i (%)	Tx_i	۲۰	مجموع شاول‌ها	S	۵
حداقل بهره‌وری شاول k (ton/hour)	Sl_k	۲۱	مجموع کامیون‌های فعال	T	۶
حداکثر بهره‌وری شاول k (ton/hour)	Su_k	۲۲	نرخ استخراج مطلوب برای ماده معدنی (ton/hr)	O_r	۷
ظرفیت کامیون i (ton)	cap_i	۲۳	حداقل نرخ استخراج برای ماده معدنی (ton/hr)	O_l	۸
مجموع زمان سیکل کامیون i در پله i (min)	ct_{i1}	۲۴	ماکزیمم نرخ استخراج برای ماده معدنی (ton/hour)	O_u	۹
۱ است اگر کامیون i با شاول k سازگار است، در غیر این صورت ۰ است.	glk	۲۵	نرخ استخراج مطلوب برای باطله (ton/hr)	W_r	۱۰
نرخ استخراج پله i (ton/hour)	x_i	۲۶	حداقل نرخ استخراج برای باطله (ton/hour)	W_l	۱۱
۱ است اگر شاول k در پله i کار کند، در غیر این صورت ۰	y_{ik}	۲۷	حداکثر نرخ استخراج برای باطله (ton/hour)	W_u	۱۲
تعداد دفعاتی که کامیون i به پله i می‌رود.	n_{i1}	۲۸	میزان جریمه برای انحراف منفی از تولید ماده معدنی	α^-	۱۳
انحراف منفی از میزان تولید مطلوب ماده معدنی (ton/hour)	D_0^-	۲۹	میزان جریمه برای انحراف مثبت از تولید ماده معدنی	α^+	۱۴
انحراف مثبت از میزان تولید مطلوب ماده معدنی (ton/hour)	D_0^+	۳۰	میزان جریمه برای انحراف منفی از تولید باطله	β^-	۱۵

ادامه جدول ۲-۲

انحراف منفی از میزان تولید مطلوب سنگ باطله (ton/hour)	D_w^-	۳۶	میزان جریمه برای انحراف مثبت از تولید باطله	β^+	۳۱
انحراف مثبت از میزان تولید مطلوب سنگ باطله (ton/hour)	D_w^+	۳۷	درصد پارامتر کنترلی ز در پله i (%)	P_{ij}	۳۲
انحراف منفی از پارامتر کنترلی ز در مخلوط (ton/hour)	d_j^-	۳۸	درصد مطلوب برای پارامتر کنترلی ز در مخلوط (%)	P_{rj}	۳۳
انحراف مثبت از پارامتر کنترلی ز در مخلوط (ton/hour)	d_j^+	۳۹	حداقل درصد مجاز برای پارامتر کنترلی ز در مخلوط (%)	P_{lj}	۳۴
است اگر کامیون l ام مورد استفاده قرار گیرد در غیر این صورت *	U_l	۴۰	حداکثر درصد مجاز پارامتر کنترلی ز در مخلوط (%)	P_{uj}	۳۵

تابع هدف (۲-۶۰)، به دنبال مینیمم کردن اختلاف در رابطه با انحراف از اهداف تولید ماده معدنی، تولید باطله و اهداف کیفی مخلوط همراه با کاهش تعداد کامیون‌های مورد استفاده می‌باشد. محدودیت‌های (۲-۶۱) تا (۲-۷۴) در جهت اهداف مخلوط می‌باشد. محدودیت‌های (۲-۶۱) و (۲-۶۲) ملزم می‌کند که حد بالا و پایین پارامترهای کنترلی در مخلوط (مواد معدنی در مخلوط) بایستی در محدوده تعیین شده باشد. محدودیت (۲-۶۳) همراه با تابع هدف، جهت رسیدن به درصد مطلوب و مورد نظر برای پارامترهای کنترلی در مخلوط می‌باشد. محدودیت (۲-۶۴) و (۲-۶۵) محدودیت حداقل و حداکثر تولید ماده معدنی در نظر گرفته شده را تضمین می‌کند. محدودیت (۲-۶۷) و (۲-۶۸) مدل نیز به همین ترتیب، برای تضمین تولید باطله در محدوده تعیین شده می‌باشد. محدودیت (۲-۶۶) و (۲-۶۹) نیز به ترتیب برای رسیدن به تولید مطلوب و مورد نظر از ماده معدنی و سنگ باطله می‌باشد، در حالی که محدودیت (۲-۷۰) بیان می‌دارد که نرخ استخراج برای هر پله بایستی کمتر از ماکزیمم نرخ استخراج که برای آن پله در نظر گرفته شده است، باشد [۱۱].

محدودیت‌های دیگر که مکمل مدل هستند، به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول به تخصیص شاول‌ها و میزان بهره‌وری جهت توجیه اقتصادی استفاده از آنها مربوط می‌شود و دسته دوم به تخصیص کامیون‌ها برای حمل مواد در معدن مربوط می‌شود.

برای دسته اول از محدودیت‌ها، رابطه (۷۵-۲) بیان می‌کند که به هر پله حداکثر یک شاول می‌تواند تخصیص پیدا کند، در حالی که محدودیت (۷۶-۲) بیان می‌کند که هر شاول حداکثر می‌تواند به یک پله اختصاص پیدا کند. محدودیت (۷۷-۲) بیان می‌کند که متغیرهای y_{ik} دوتایی هستند، یعنی یا ۰ است یا ۱. هر کدام از محدودیت‌های (۷۸-۲) و (۷۹-۲) به ترتیب حداکثر و حداقل میزان استخراج تعریف شده به وسیله شاول k اختصاص داده شده به پیت i را محدود می‌کند [۱۱].

در دسته دوم از محدودیت‌ها، رابطه (۸۰-۲) بیان می‌دارد که کامیون‌ها فقط به سمت شاولی که با آن سازگار هستند بایستی بروند. محدودیت (۸۱-۲) این مطلب را بیان می‌دارد که میزان تولید هر کدام از پله‌ها برابر با مجموع تولید کامیون‌های تخصیص داده شده به آن پله می‌باشد. محدودیت (۸۲-۲) بیان کننده حداکثر بازدهی هر کدام از کامیون‌ها در هر ساعت می‌باشد. محدودیت (۸۳-۲) همراه با تابع هدف، ملزم می‌کند که تعداد کامیون‌های مورد استفاده بایستی در حد مطلوب باشد. محدودیت (۸۴-۲) بیان کننده عدد صحیح و مثبت بودن تعداد دفعات رفت و برگشت یک کامیون به یک پله می‌باشد. محدودیت (۸۵-۲) بیان می‌دارد که متغیرهای U_1 دوتایی هستند [۱۱].

۵-۲ نتیجه‌گیری

روش تخصیص ثابت به دلیل معایبی که دارد برای معادن بزرگ نمی‌تواند مؤثر واقع شود و امروزه در معادن بزرگ دنیا از روش‌های تخصیص انعطاف‌پذیر در سیستم ترابری خود برای تخصیص و گسیل بهینه بهره می‌برند. بر اساس آن چه ذکر شد می‌توان نتیجه گرفت که هر سیستم تخصیص و گسیل انعطاف‌پذیر، از لحاظ سخت‌افزاری دارای سه زیر مجموعه زیر می‌باشد:

- سیستمی برای جمع‌آوری اطلاعات
- سیستمی برای ارسال تصمیمات اتخاذ شده به راننده‌های کامیون
- یک مجموعه کنترلی که در هر لحظه موقعیت و وضعیت تجهیزات را کنترل می‌کند

بسته به این که از تخصیص تمام خودکار یا نیمه خودکار استفاده می‌شود، این سیستم‌ها نیز متفاوت خواهد بود. برای اتخاذ تصمیم مناسب و انتقال آن به راننده کامیون بهینه‌سازی در سیستم ترابری کامیون - شاول صورت می‌گیرد و در واقع بهینه‌سازی شامل یافتن مسیرهای بهینه جهت حمل مواد و میزان حمل مواد از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری در طول این مسیرها می‌باشد به گونه‌ای که میزان تولید با تجهیزات موجود حداکثر شده و ماده معدنی با کیفیت مورد نظر حاصل شود. بهینه‌سازی از دو قسمت تشکیل شده است؛ در قسمت اول بهینه‌سازی تولید و در قسمت دوم با استفاده از جواب به دست آمده از قسمت اول کار گسیل لحظه‌ای برای رسیدن به حداکثر بهره‌وری ماشین‌آلات صورت می‌گیرد. برای رسیدن به این اهداف چندین مدل ریاضی ارائه شده است که هدف این مدل‌ها در نهایت افزایش سود حاصل از عملیات می‌باشد، ولی بازدهی این مدل‌ها بسته به شکل تابع هدف و محدودیت‌های مسأله متفاوت خواهد بود. برای هر معدن بسته به شرایط معدن، شرایط عملیاتی و اهداف مدیریتی یکی از این مدل‌ها یا ترکیبی از این‌ها مدل‌ها می‌تواند به کار گرفته شود به طوری که مدل انتخاب شده باید منطبق بر شرایط واقعی که در معدن حاکم است، باشد. این که چه میزان از اهداف مدل انتخاب شده کاملاً در معدن محقق می‌شود، بستگی به سیستم‌های گسیل سخت افزاری به کار گرفته شده در معدن دارد.

فصل سوم

روش کار الگوریتم‌های ژنتیک

۱-۳ مقدمه

مسائل زیادی وجود دارند که به خاطر پیچیدگی و ماهیت منحصر به فرد خود، روش‌های کلاسیک از حل آن‌ها عاجز هستند و برای حل این مسائل الگوریتم‌های سریعی وجود ندارند. بسیاری از این مسائل، مسائل بهینه‌سازی هستند که مکرراً در عمل به وجود می‌آیند. مسائل حمل و نقل، برنامه‌ریزی تولید و ... از جمله این مسائل هستند. از سال ۱۹۶۰ تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا با تقلید از طبیعت و پدیده‌های طبیعی، الگوریتم‌های توانمندی برای حل مسائل بهینه‌سازی مشکل توسعه یابد. یک نمونه از این نوع الگوریتم‌ها، ”روش‌های برنامه‌ریزی تکاملی“^۱ هستند. معروف‌ترین و مهم‌ترین روش برنامه‌ریزی تکاملی، الگوریتم‌های ژنتیک هستند. الگوریتم‌های ژنتیک الگوریتم‌های تصادفی هستند که با تقلید از طبیعت و پدیده‌های طبیعی: ”وراثت ژنتیکی“ و ”قانون تنازع بقا داروین“ به جستجوی راه‌حل بهینه می‌پردازند. در این فصل به تشریح مبانی، نحوه عملکرد و طرز کار الگوریتم‌های ژنتیک پرداخته شده است.

۲-۳ مبانی الگوریتم ژنتیک

اصول الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۶۲ توسط جان هلند^۲، همکاران و دانشجویان در دانشگاه میشیگان آمریکا ارائه شد. جان هلند کتاب خود را تحت عنوان ”سازش در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی“ در سال ۱۹۷۵ منتشر نمود که در حال حاضر می‌توان آن را مرجع اصلی در مبحث الگوریتم ژنتیک دانست. پس از آن مقاله‌ها و بحث‌های فراوانی در مورد اعتبار و کارایی این الگوریتم در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ارائه شد، که تمامی آنها مبین توانایی این روش در حل مسائل گوناگون بهینه‌سازی می‌باشد الگوریتمی که جان هلند ارائه نمود توسط گلدبرگ^۳ به عنوان الگوریتم ژنتیک ساده معرفی شد. [۲۰].

¹ Evolution Programs

² John Holland

³ Goldberg

روش‌های الگوریتم ژنتیک در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌یابی از نقاط قوت خاصی برخوردارند که می‌توان به مطالب زیر اشاره نمود [۲۱]:

- الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از نقاط کار می‌کند و نه یک نقطه منفرد. نکته دیگر این که، این ویژگی باعث می‌شود الگوریتم ژنتیک در توابعی که دارای چند نقطه بهینه محلی باشند به طور موازی از نقاط بهینه عبور کند و احتمال این که در دام یک نقطه بهینه محلی گیر بیفتد، بسیار کم است.
- در الگوریتم ژنتیک نیازی نیست که فضای جستجو پیوسته باشد.
- الگوریتم خیلی ساده است و فقط تابع هدف را لازم دارد.
- قوانین احتمال را به کار می‌برد و نه قوانین معین و دقیق را.

در الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی با طول ثابت یا متغیر، کدگذاری می‌شود که در موجودات زنده آنها را کروموزم^۱ یا فرد^۲ می‌نامند. هر متغیر طراحی از چند حرف (در حالت دودویی^۳ چند بیت) تشکیل شده که آنرا ژن^۴ و مقدار هر ژن را الل^۵ می‌گویند. به عنوان مثال اگر مسأله‌ای دارای چهار متغیر طراحی باشد، و هر متغیر دارای هشت بیت، در آن صورت هر کروموزم چهار ژن و در مجموع ۳۲ بیت خواهد داشت. به عبارتی هر رشته بیانگر یک نقطه در فضای جستجو است. به مجموعه‌ای از یک پارامتر که توسط یک کروموزم نشان داده می‌شود ژنوتایپ^۶ و به مقدار رمزگشایی شده آن فنوتایپ^۷ گفته می‌شود. الگوریتم ژنتیک فرایندی تکراری است که هر تکرار را یک نسل و مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را جمعیت می‌نامند [۲۰].

¹ Chromosome

² Individual

³ Binary

⁴ Gen

⁵ Allele

⁶ Genotype

⁷ Phenotype

الگوریتم‌های ژنتیک با نگهداری جمعیتی از راه‌حل‌های پتانسیل، در چندین جهت به جستجو می‌پردازند و اطلاعات را تقویت کرده و بین این جهت‌ها تبادل برقرار می‌کند. جمعیت تحت یک تکامل شبیه‌سازی شده قرار می‌گیرد: در هر نسلی راه‌حل‌های نسبتاً خوب تولید می‌شوند و راه‌حل‌های نسبتاً بد می‌میرند. برای تمایز قائل شدن بین راه‌حل‌های متفاوت از یک تابع ارزیابی استفاده می‌شود.

ساختار الگوریتم ژنتیک ساده با ساختار هر برنامه تکاملی یکسان است. ساختار کلی الگوریتم ژنتیک

در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.

```

procedure genetic algorithm
begin
  t ← 0
  initialize P(t)
  evaluate P(t)
  while (not termination-condition) do
    begin
      t ← t + 1
      select P(t) from P(t-1)
      alter P(t)
      evaluate P(t)
    end
  end
end

```

شکل ۳-۱ ساختار کلی الگوریتم ژنتیک [۲۲]

با توجه به شکل بالا در تکرار t ، الگوریتم ژنتیک جمعیتی از راه‌حل‌های پتانسیل (کروموزوم‌ها) $P(t) = \{X_1^t, \dots, X_n^t\}$ را نگهداری می‌کند. هر کروموزوم X_i^t برای اندازه‌گیری برازندگی آن ارزیابی می‌شود. با توجه به برازندگی کروموزوم‌ها از جمعیت موجود، جمعیت جدید انتخاب می‌شود. بعضی از اعضای این جمعیت جدید برای تشکیل راه‌حل‌های جدید، به وسیله عملگرهای "تبادل ژنی" و "جهش" بطور تصادفی تغییر می‌کنند. عملگر تبادل ژنی برای تشکیل دو فرزند جدید، بخش‌هایی از دو کروموزوم والدین را تعویض می‌کند. هدف از بکارگیری عملگر تبادل ژنی این است که اطلاعات بین راه‌حل‌های پتانسیل

مبادله شوند. عملگر جهش نیز بطور تصادفی یک یا چند تا از ژن‌های کروموزوم انتخاب شده را تغییر می‌دهد. هدف از بکارگیری عمل جهش این است که برخی از تغییرات اضافی در جمعیت بوجود آید [۲۳].

با توجه به مطالب ذکر شده، الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم تصادفی است که به صورت هدف‌دار به جستجو می‌پردازد. اساساً عملگرهای ژنتیکی جستجوی کور انجام می‌دهند. ولی مکانیسم انتخاب راه‌حل‌ها برای جمعیت جدید به گونه‌ای است که جستجوی ژنتیکی را به سوی ناحیه مطلوبی از فضای جستجو هدایت می‌کند.

۳-۳ روش کار الگوریتم‌های ژنتیک

برای آشنایی بیشتر با طرز کار الگوریتم‌های ژنتیک، روش کار این الگوریتم برای یک مسأله بهینه‌سازی پارامتری بحث می‌شود. ابتدا بدون این که از کلیت روش کاسته شود، فقط مسائل بیشینه‌سازی را در نظر گرفته می‌شود. البته اگر مسأله بهینه‌سازی، کمینه‌سازی تابع f باشد، می‌توان معادل با بیشینه‌سازی تابع g که $g = M - f$ ، در نظر گرفت که M یک عدد مثبت بزرگ می‌باشد. بنابراین

$$\min f(x) = \max (g(x)) = \max \{ M - f(x) \}$$

حال فرض کنید هدف بیشینه‌سازی تابعی از k متغیر، $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ با دقت لازمه شش رقم بعد از

اعشار برای مقادیر متغیرها می‌باشد و فرض کنید هر متغیر x_i می‌تواند مقادیر دامنه D_i را اختیار کند:

$$D_i = [a_i, b_i] \subseteq \mathbb{R}, f(x_1, x_2, \dots, x_k) > 0 \text{ for all } x_i \in D_i$$

واضح است که برای رسیدن به چنین دقتی بایستی هر دامنه D_i به $(b_i - a_i) \times 10^6$ بازه مساوی تقسیم

شود. اگر m_i کوچکترین عدد صحیحی باشد که در رابطه $(b_i - a_i) \times 10^6 \leq 2^{m_i}$ برقرار باشد، با ارائه هر متغیر

x_i به صورت رشته دودوئی به طول m_i ، دقت لازمه تامین می‌شود. بنابراین هر کروموزوم (به عنوان یک

راه‌حل پتانسیل) به وسیله یک رشته دودویی به طول m بیان می‌شود که m در رابطه (۱-۳) بیان شده است.

$$m = \sum_{i=1}^k m_i \quad (1-3)$$

اولین گروه از متغیرها (x_1) به طول m_1 بیت مقداری از بازه $[a_1, b_1]$ را ترسیم می‌کند، گروه بعدی (x_2) به تعداد m_2 بیت مقداری از بازه $[a_2, b_2]$ را نشان می‌دهد و به همین ترتیب آخرین گروه (x_k) به تعداد m_k بیت مقداری از بازه $[a_k, b_k]$ را نشان می‌دهد. برای برگرداندن رشته دودویی هر گروه به مقدار واقعی از رابطه (۲-۳) استفاده می‌شود.

$$x_i = a_i + decimal(1001 \dots 0011_2) \times (b_i - a_i) / (2^{m_i} - 1) \quad (2-3)$$

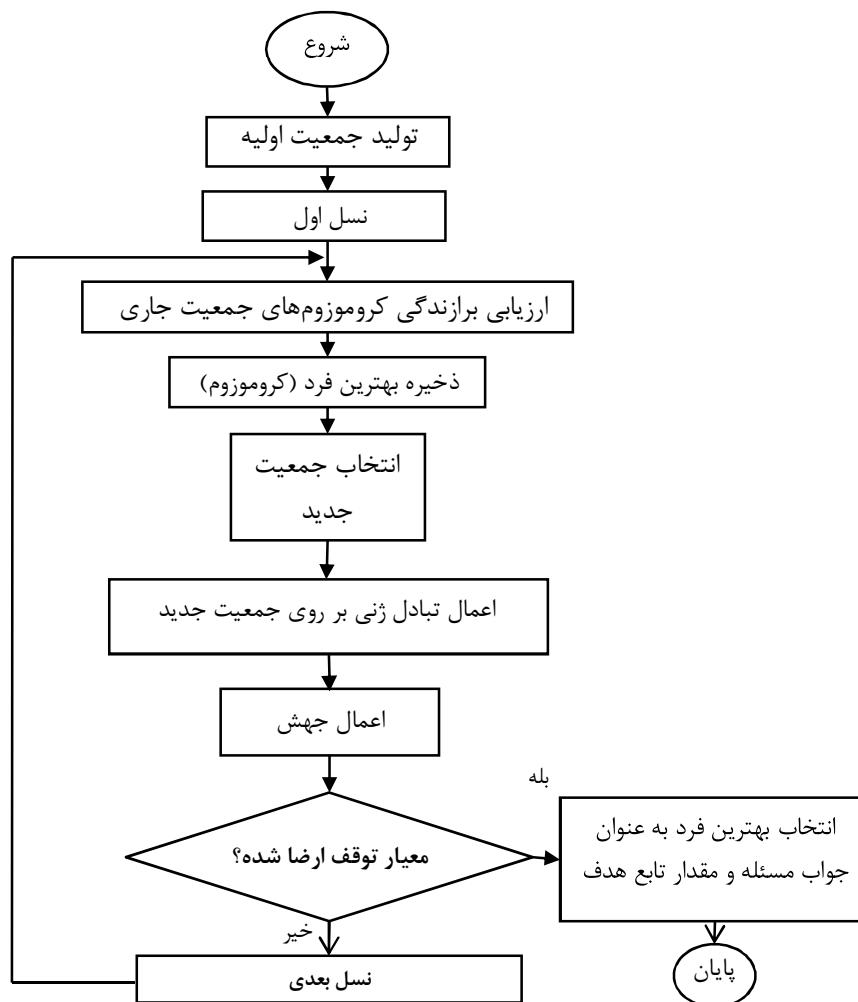
که $decimal(string)$ مقدار رشته دودویی را به مبنای ۱۰ تبدیل می‌کند.

برای ایجاد جمعیت اولیه، می‌توان به سادگی به تعداد مشخصی (pop_size) کروموزوم به شکل بیت بطور تصادفی تولید کرد. اگر چنانچه اطلاعی از نحوه توزیع جواب مسئله در دست باشد، می‌توان از این اطلاعات در تولید راه‌حل‌های پتانسیل اولیه استفاده کرد.

بقیه الگوریتم ساده بوده و در هر نسل، هر یک از کروموزوم‌ها (با استفاده از ضابطه تابع f) ارزیابی می‌شود و بهترین کروموزوم که بیشترین مقدار را دارا می‌باشد به عنوان بهترین کروموزوم نسل جاری ذخیره می‌شود. با توجه به توزیع احتمال مقادیر برازندگی، جمعیت جدید انتخاب می‌شود و کروموزوم‌های جمعیت جدید به وسیله عملگرهای تبادل ژنی و جهش تغییر می‌یابد و کروموزوم‌های جدید انتخاب شده و جایگزین کروموزوم‌های قبلی می‌شود. بعد از چند نسل، الگوریتم با توجه به نوع معیار توقف و برآورده شدن آن، متوقف می‌شود.

با توجه به مطالبی که بیان شد می‌توان مراحل کار الگوریتم ژنتیک را به طور خلاصه به صورت

الگوریتم شکل (۲-۳) نشان داد.



شکل ۲-۳ مراحل کار در الگوریتم ژنتیک [۲۰]

۳-۳-۱ معیارهای انتخاب جمعیت جدید

این عملگر مشابه انتخاب طبیعی داروین بوده و به جواب‌های بهتر شانس بیشتر و به جواب‌های بدتر شانس کمتری برای بقا در نسل بعد می‌دهد. پس از تعیین برازندگی هر کروموزوم، انتخاب کروموزوم‌های برازنده جهت تولید مثل و ایجاد نسل‌های بعدی صورت می‌گیرد. عملگر انتخاب به روش‌های گوناگون

انجام می‌پذیرد که عبارتند از انتخاب چرخ گردان^۱، انتخاب قطعی^۲، تصادفی باقیمانده^۳، تصادفی باقیمانده بدون جایگزینی^۴، تصادفی باقیمانده با جایگزین^۵، مسابقه‌ای^۶، مسابقه‌ای احتمالی^۷، رتبه‌بندی^۸ و نخبه‌گرا^۹ انجام می‌شود [۲۴]. در این قسمت چند نمونه از این روش‌ها شرح داده شده‌اند.

۳-۱-۱-۳ انتخاب چرخ گردان

در این روش ابتدا یک چرخ گردان به ترتیب زیر ساخته می‌شود.

- مقادیر برازندگی برای هر یک از کروموزوم‌های جمعیت جاری ($eval(v_i)$) تعیین می‌شود.

- برازندگی کل جمعیت را به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \sum_{i=1}^{pop_size} eval(v_i) \quad (۳-۳)$$

- احتمال انتخاب p_i برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود:

$$p_i = eval(v_i) / F \quad (۴-۳)$$

- احتمال تجمعی q_i برای هر کروموزوم به ترتیب زیر تعیین می‌شود:

$$q_i = \sum_{j=1}^i p_j \quad (۵-۳)$$

بعد از ساخته شدن چرخ رولت، به تعداد اندازه جمعیت از این چرخ استفاده شده و هر دفعه به

ترتیب زیر، یک کروموزوم برای جمعیت جدید انتخاب می‌شود:

¹ Roulette Wheel selection

² Deterministic Selection

³ Stochastic Remainder Sampling

⁴ Remainder Stochastic without Replacement

⁵ Remainder Stochastic with Replacement

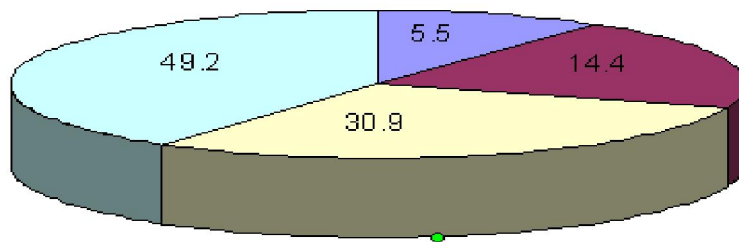
⁶ Tournament Selection

⁷ Probabilistic Tournament Selection

⁸ Ranking Selection

⁹ Elitist Selection

- یک عدد اعشاری تصادفی r از بازه $[0,1]$ تولید می‌شود.
 - اگر $r < q_1$ باشد، اولین کروموزوم (v_1) انتخاب می‌شود؛ در غیر این صورت آمین کروموزوم ($2 \leq i \leq \text{pop_size}$) طوری انتخاب می‌شود که $q_{i-1} < r < q_i$ باشد.
 - واضح است که بعضی از کروموزوم‌ها بیش از یک بار انتخاب می‌شوند. بهترین کروموزوم‌ها چند بار کپی می‌شوند، کروموزوم‌های متوسط باقی می‌مانند و کروموزوم‌های بد می‌میرند [۲۲].
- در شکل زیر یک نمونه از تقسیمات چرخ‌گردان برای چهار کروموزوم فرضی نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ چرخ گردان جمعیت اولیه با چهار کروموزوم

۳-۱-۲ انتخاب قطعی

در این روش که با نام انتخاب متناسب نیز شناخته می‌شود، هر کروموزوم با توجه به نسبت برازندگی خود به مجموع برازندگی تمام کروموزوم‌های نسل خود، چند کپی از خود را جهت ایجاد نسل آینده تولید می‌کند. به این ترتیب هر کروموزوم به تعداد $ncopy$ نماینده را به حوضچه آمیزش خواهد فرستاد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$ncopy_i = \text{int} \left(\frac{eval(v_i)}{\sum_{i=1}^{pop_size} eval(v_i)} pop_size \right) \quad (۶-۳)$$

که pop_size اندازه جمعیت و $eval(v_i)$ برازندگی کروموزوم i ام و $ncopy_i$ تکرار کپی‌های کروموزوم i ام می‌باشد. int نشانگر جزء صحیح می‌باشد.

رابطه (۳-۶) را می‌توان به صورت زیر نیز بیان نمود:

$$ncopy_i = int\left(\frac{eval(v_i)}{f_{ave}}\right) \quad (۷-۳)$$

که f_{avg} برآزندگی متوسط جامعه بوده و برابر است با :

$$f_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{pop_size} eval(v_i)}{pop_size} \quad (۸-۳)$$

با توجه به اینکه تعداد کروموزم‌های موجود در حوضچه آمیزش باید برابر اندازه جمعیت باشد، بنابراین اگر تعداد کروموزم فرستاده شده به حوضچه از قسمت بالا، کمتر از اندازه جمعیت باشد، در این صورت کروموزم‌ها را براساس مقدار عددی $\frac{eval(v_i)}{f_{avg}}$ مرتب کرده و به ترتیب از بزرگ‌ترین مقدار به سمت کم‌ترین مقدار تا کامل شدن تعداد کروموزم‌ها در حوضچه آمیزش به حوضچه فرستاده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود در این روش تصادف هیچ نقشی ندارد و به همین علت به این روش، انتخاب قطعی گفته می‌شود [۲۴].

۳-۳-۱-۳ انتخاب مسابقه‌ای

در این روش، n نفر از افراد جمعیت با روش چرخ‌گردان و یا بطور تصادفی تعیین شده و برآزنده‌ترین آنها برای تولید نسل بعد انتخاب می‌شود (کپی می‌شود). این عملیات به تعداد اندازه جمعیت صورت می‌گیرد. عدد n حداقل برابر دو بوده که در این حالت انتخاب مسابقه‌ای دودویی نامیده می‌شود. با افزایش n ، شانس انتخاب افراد دارای برآزندگی کمتر کاهش یافته و شانس افراد برآزنده‌تر بیشتر می‌شود.

۳-۳-۱-۴ انتخاب مسابقه‌ای احتمالی

این روش تعمیمی از روش انتخاب مسابقه‌ای است. در این روش دو فرد به طور تصادفی انتخاب شده و بهترین آن‌ها با احتمال ثابت p انتخاب می‌شود که $0 < p < 1$ می‌باشد.

۳-۱-۵ انتخاب براساس رتبه‌بندی خطی

در این روش ابتدا افراد بر اساس برازندگی‌شان رتبه‌بندی می‌شوند. کروموزوم‌هایی که برازندگی بالاتری دارند در رتبه بالاتر قرار دارند. سپس افراد با یک احتمالی که تناسب خطی با رتبه افراد در جمعیت دارد انتخاب می‌شوند.

۳-۱-۶ انتخاب نخبه‌گرا

در الگوریتم وراثتی ساده، هر نسل بطور کامل جانشین نسل قبل شده و هیچ فردی از یک نسل به نسل بعد انتقال نمی‌یابد. یکی از پیشنهادهایی که برای بهتر کردن عملکرد الگوریتم ارائه شده انتقال بدون تغییر بخشی از یک نسل به نسل بعد است. این رفتار در جانداران تکامل یافته طبیعی نیز وجود داشته، و در هر نسل، گروه‌های سنی مختلفی به چشم می‌خورد. اما در جانوران پست‌تر نظیر حشرات، نسل قبل جای خود را کاملاً به نسل جدید می‌دهد. انتقال نسل را می‌توان بطور تصادفی و یا غیرتصادفی انجام داد. در روش غیرتصادفی، افرادی که بایستی منتقل شوند بصورت غیرتصادفی انتخاب شده و تعدادی از افراد نخبه هر نسل، به نسل بعد منتقل می‌شوند، بقیه جمعیت به کمک عملگرهای ژنتیکی نظیر انتخاب، تبادل ژنی و جهش تولید می‌شوند. این روش انتخاب را اصطلاحاً انتخاب نخبه‌گرا می‌نامند. در پایین‌ترین حد، تنها یک فرد از یک نسل به نسل بعد منتقل شده و در بالاترین حد فقط یک فرد جدید در هر نسل تولید شده و بقیه از نسل قبل منتقل می‌شوند.

۳-۲ جفت‌سازی^۱

پس از فرستاده شدن کروموزوم‌های منتخب به استخر آمیزش، کروموزوم‌های موجود در استخر که تعدادشان برابر اندازه جمعیت و زوج می‌باشد، به صورت کاملاً تصادفی دو به دو با هم جفت می‌شوند.

^۱ Mating

بنابراین اگر $N_{\text{pop-size}}$ اندازه جمعیت باشد، در این مرحله دارای $N_{\text{pop-size}}/2$ جفت کروموزوم موجود می‌باشد. این جفت‌ها آماده عمل تبادل ژنی و جهش و سپس تولید نسل بعد می‌باشند [۲۰].

۳-۳-۳ تبادل ژنی^۱

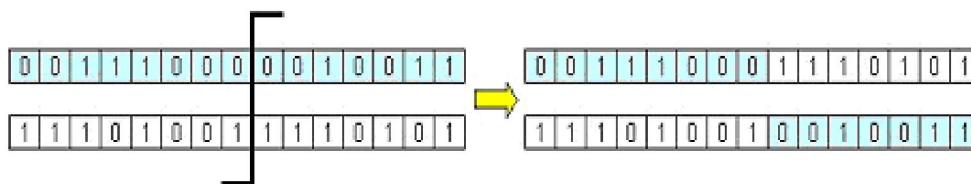
با توجه به مطالبی که ذکر شد می‌توان دریافت که تا قبل از مرحله تبادل ژنی، هیچ‌گونه تغییری در ساختار کروموزوم‌های اولیه صورت نگرفته است. اگر در الگوریتم ژنتیک فقط به عملگر انتخاب بسنده شود، هیچ‌گاه جوابی بهتر از پاسخ اولین نسل حاصل نمی‌شود. به همین دلیل باید عملگری وجود داشته باشد که کروموزوم‌های جدیدی را تولید کند که در بیشتر مواقع نسبت به کروموزوم‌های قبلی دارای ارزش بیشتری می‌باشند. این عملگر، تبادل ژنی است. عملگر تبادل ژنی را می‌توان مهم‌ترین عملگر الگوریتم ژنتیک دانست که در آن قسمتی از اطلاعات، بین رشته‌های والد که قبلاً با یکدیگر جفت شده‌اند به صورت تصادفی مبادله می‌شود که می‌تواند به صورت یک نقطه‌ای یا چند نقطه‌ای صورت گیرد [۲۰].

۳-۳-۳-۱ تبادل ژنی یک نقطه‌ای

جان هلند در الگوریتم ژنتیک ساده از نوعی تبادل ژنی که به تبادل ژنی یک نقطه‌ای معروف است استفاده کرد. در این روش ابتدا عددی تصادفی صحیح مثل z در بازه $(1, l_{ch}-1)$ تولید می‌شود که l_{ch} طول کروموزوم می‌باشد. سپس اطلاعات بین کروموزوم‌های والد از بیت شماره $z+1$ تا l_{ch} جابجا می‌گردد و در اثر این جابجایی اطلاعات، فرزندان (کروموزوم‌های جدید) به وجود می‌آیند. در الگوریتم ژنتیک عملگر تبادل ژنی با احتمالی برابر P_c رخ می‌دهد. به این ترتیب که برای هر کروموزوم عددی در بازه $(0, 1)$ ایجاد می‌شود. اگر این عدد کوچکتر از P_c باشد این کروموزوم برای تبادل ژنی شدن انتخاب می‌شود و در غیر

^۱ Crossover

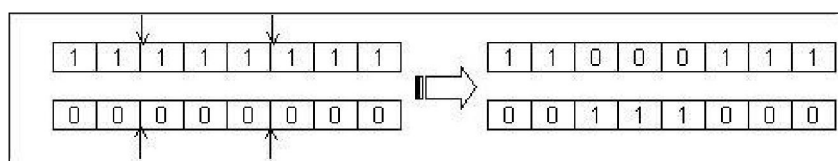
اینصورت والدین بدون هیچ عملی به مرحله بعدی راه می‌یابند. در شکل (۳-۴) نحوه عمل عملگر تبادل ژنی یک نقطه‌ای بر روی یکی از جفت کروموزم‌ها نشان داده شده است.



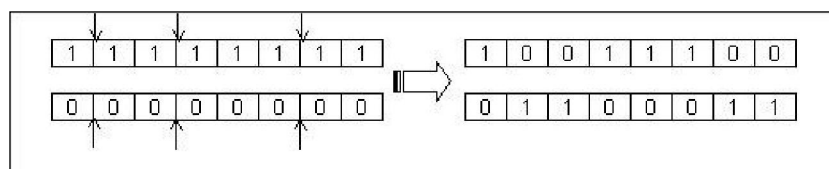
شکل ۳-۴ تبادل ژنی یک نقطه‌ای

۳-۳-۲ تبادل ژنی چند نقطه‌ای

این روش در سال ۱۹۷۵ توسط دی جانگ پیشنهاد شد. تبادل ژنی n نقطه‌ای، حالت توسعه یافته‌ای از تبادل ژنی یک نقطه‌ای است. در این روش، n نقطه به طور تصادفی در بازه $(1, l_{ch}-1)$ انتخاب می‌شوند. بنابراین هر کروموزم به $n+1$ قسمت می‌شود. حال این قسمت‌ها به طور یک درمیان بین والدین جابجا می‌شود. از مهم‌ترین روش‌های مربوط به این دسته تبادل ژنی ۲ نقطه‌ای و تبادل ژنی ۳ نقطه‌ای است. شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶) این پیوند را نشان می‌دهد [۲۰].



شکل ۳-۵- تبادل ژنی دو نقطه‌ای [۲۰]



شکل ۳-۶- تبادل ژنی سه نقطه‌ای [۲۰]

۳-۳-۴ جهش^۱

زمانی که جمعیت در الگوریتم ژنتیک کوچک باشد احتمال دارد که یک بیت مشخص در تمام افراد جامعه دارای مقدار یکسانی (مانند ۱) باشد، در این صورت اگر تنها از عملگر تبادل ژنی استفاده گردد این بیت هیچ‌گاه مقدار مخالف صفر را نخواهد پذیرفت، در صورتی که ممکن است بیت با مقدار صفر دارای ارزش بیشتری باشد. از طرفی با وجود این که عملگر تبادل ژنی، عملگر قدرتمندی جهت جستجو می‌باشد ولی در بعضی مواقع با انتقال بیت‌های با ارزش به افراد ضعیف باعث از بین رفتن این بیت‌ها می‌گردد. در این صورت وجود عملگر جهش می‌تواند سودمند باشد. جهش همانند عملگر تبادل ژنی عملگری تصادفی است که با احتمال بسیار کوچک در حدود 0.001 تا 0.01 بر روی بیت‌ها عمل می‌نماید. به این ترتیب که اگر مقدار بیت برابر ۱ باشد تبدیل به صفر خواهد شد و بالعکس [۲۵]. برای این کار به تعداد بیت‌های کروموزوم عدد تصادفی در بازه (۰، ۱) انتخاب می‌شود اگر این عدد تصادفی کوچکتر از احتمال جهش باشد بیت مورد نظر تغییر می‌کند در غیر این صورت تغییری در بیت ایجاد نمی‌شود [۲۲].

با دقت در سیستم عملکرد جهش، این احتمال وجود دارد که جهش باعث تبدیل یک بیت خوب به یک بیت نامطلوب گردد. با این وجود با توجه به تنوع بیشتر و کشف نقاط جدید در فضای پاسخ، تجربیات نشان داده است که در اکثر حالات وجود این عملگر در کنار عملگرهای انتخاب و تبادل ژنی مفید می‌باشد. شکل ۳-۷ نحوه عمل این عملگر را نشان می‌دهد.

before mutation	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0
				↓							
after mutation	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	

شکل ۳-۷ عملگر جهش [۲۰]

^۱ Mutation

به عنوان مثال اگر احتمال جهش برابر $0/01$ باشد، در صورتی که اندازه جمعیت 50 و طول هر کروموزوم 20 بیت باشد در این صورت انتظار می‌رود تعداد بیت‌هایی که بایستی عملگر جهش بر روی آنها عمل کند برابر است با [۲۲]:

$$0/01 \times 50 \times 20 = 10$$

پس از اعمال جهش کروموزم‌های جدید (فرزندان) جانشین نسل پیشین (والدین) می‌شوند و به این ترتیب الگوریتم برای تکرار بعدی آماده است.

۳-۳-۵ معیارهای توقف در الگوریتم ژنتیک

شرایط مختلفی را می‌توان برای کنترل همگرایی الگوریتم مورد استفاده قرار داد. ساده‌ترین روش آن است که برای حداکثر تعداد تکرار نسل‌ها مقداری در نظر گرفته شود. روش بعدی، شرط همگرایی الگوریتم می‌باشد که یکنواختی بین اعضای جمعیت است. به این ترتیب که هر گاه مقدار برازندگی بهترین فرد جمعیت نسبت به مقدار برازندگی میانگین کل جمعیت از نسبت مشخصی کمتر شود، همگرایی صورت گرفته است. روش سوم شرط همگرایی، تکرار بهترین فرد جمعیت در چند نسل پیاپی می‌باشد. پس از رسیدن الگوریتم به هر یک از این سه شرط، فرایند متوقف خواهد شد [۲۰].

۳-۴ کاربرد الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مسائل مهندسی معدن

در سال‌های اخیر برای حل مسائل بهینه‌سازی در حوزه مهندسی معدن و مکانیک سنگ، الگوریتم ژنتیک کاربردهای موفقیت آمیزی داشته است که از جمله این تحقیقات می‌توان به مدل‌سازی عیارهای حد بهینه برای ذخایر چند فلزی با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی [۲۶]، بهینه‌سازی و طراحی سه بعدی معادن روباز با استفاده از الگوریتم عصبی - ژنتیک [۲۷]، طراحی و برنامه ریزی معادن روباز با الگوریتم ژنتیک [۲۸]، بهینه کردن کارگاه‌ها و تجهیزات آماده‌سازی زغال [۲۹]، قابلیت اطمینان مبتنی بر بهینه‌سازی سیستم تولیدی معدن با استفاده از الگوریتم ژنتیک [۳۰]، شناسایی ویژگی‌های دینامیکی

سنگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک [۳۱] و بهینه‌سازی شبکه تهویه در معدن به کمک الگوریتم ژنتیک هیبریدی [۳۲] اشاره کرد.

۳-۵ نتیجه‌گیری

با توجه به مطالبی که بیان گردید می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم‌های توانمندی هستند که می‌توان برای حل انواع مسائل بهینه‌سازی بکار گرفت. برای حل مسائل فقط تابع هدف را لازم دارد و نیازی به اطلاعات بیشتر در مورد تابع هدف (خطی یا غیر خطی بودن تابع هدف و ...) نمی‌باشد. حل مسائل با استفاده از این الگوریتم نیازمند مدل‌سازی مناسب کروموزوم برای مسأله می‌باشد. هر کروموزوم به صورت رشته‌ای در نظر گرفته می‌شود که شامل همه ژن‌ها (متغیرهای طراحی) می‌باشد. دو عملگر تبادل ژنی و جهش مهم‌ترین نقش را در الگوریتم ژنتیک دارا می‌باشند که باعث ایجاد تنوع در جمعیت اولیه شده و در نتیجه احتمال رسیدن به جواب بهینه را افزایش می‌دهند.

فصل چهارم

مدل سازی تابع هدف مسأله تخصیص و گسیل کامیون با استفاده از

الگوریتم ژنتیک

۴-۱ مقدمه

برای حل مسائل با استفاده از الگوریتم ژنتیک لازم است که ابتدا کروموزوم مناسب برای مسأله مدل شده و تابع برازش متناسب با آن انتخاب شود. در این فصل از بین مدل‌های بیان شده در فصل دوم، مدل مناسب با وضعیت عملیاتی معدن مس سونگون انتخاب شده و نحوه مدل کردن کروموزوم و حل مسأله تخصیص و گسیل کامیون - شاول با استفاده از الگوریتم ژنتیک بیان می‌شود. از آنجا که مدل انتخاب شده کاستی‌هایی نیز دارد، این کاستی‌ها نیز در اینجا برطرف گردیده و سپس نحوه مدل‌سازی کروموزوم برای مدل توسعه یافته و چگونگی اعمال محدودیت‌های مسأله بیان می‌شود.

۴-۲ مدل انتخاب شده برای تخصیص و گسیل کامیون در معدن مس سونگون

با توجه به نیازهای هر معدن و شرایطی که در آن معدن حاکم است، مدل مناسب را می‌توان برای معدن انتخاب کرد. در اینجا نیز مدل تخصیص و گسیل، متناسب با نیازهای عملیاتی و شرایط حاکم بر معدن مس سونگون انتخاب شده است. در معدن مس سونگون به دلیل وجود دایک‌های متعدد که در بین مواد معدنی نفوذ کرده است؛ امکان استفاده از ماشین‌آلات بارگیری با توان تولید بالا از قبیل شاول به دلیل انعطاف‌پذیری کم این ماشین‌آلات به هنگام مواجهه با مواد باطله‌ای که در داخل مواد معدنی نفوذ کرده است میسر نمی‌باشد. به همین دلیل در این معدن از ماشین‌آلات بارگیری با توان تولید کم ولی با انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به شاول استفاده می‌شود. این ماشین‌آلات بیشتر لودر و بیل‌های مکانیکی می‌باشند. به دلیل تولید کم این ماشین‌آلات در این معدن مجبور هستند که تعداد ایستگاه‌های بارگیری را برای بالا بردن تولید خود افزایش دهند. افزایش تعداد ایستگاه‌های بارگیری، منجر به افزایش تعداد کامیون‌ها خواهد شد. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که در زمینه استفاده از کامیون‌ها بهینه‌سازی صورت گیرد تا با استفاده حداکثری از آن‌ها، با حداقل تعداد کامیون بتوان به تولید مورد نظر دست یافت.

کامیون‌های معدنی حجم بزرگی از سرمایه‌گذاری یک معدن را به خود اختصاص می‌دهند و افزایش بیش از حد کامیون‌ها باعث پایین آمدن سوددهی می‌شود. بنابراین تابع هدف انتخاب شده به گونه‌ای می‌باشد که تعداد کامیون‌های مورد نیاز را برای عملیات استخراج به حداقل برساند. از بین مدل‌های ارائه شده برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون - شاول که در فصل دوم بیان شدند، در این تحقیق از مدل لی استفاده شده است. تابع هدف مدل ارائه شده توسط لی به صورت کمینه کردن کل کار انجام شده می‌باشد و از آنجا که کار انجام شده به معنای حاصل ضرب میزان مواد جابجا شده در فاصله حمل می‌باشد و با توجه به ثابت بودن نسبی مسیرها در واقع کمینه شدن کار انجام شده به معنای کمینه شدن میزان مواد جابجا شده توسط کامیون‌ها می‌باشد. میزان مواد جابجا شده نیز ارتباط مستقیم با تعداد کامیون‌ها دارد و در واقع کمینه شدن تابع هدف به معنای کمینه شدن تعداد کامیون‌ها برای یک میزان از تولید مشخص می‌باشد که منطبق بر نیازهای معدن مس سونگون می‌باشد.

برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون در معادن روباز بندرت از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. کارهایی که در زمینه تخصیص و گسیل کامیون با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است یا جزئیات این منابع در دسترس نیست که می‌توان به منبع [۳۳] اشاره کرد و یا به گونه‌ای ناقص با مسأله برخورد شده است. مثلاً در منبع [۳۴] هی^۱ و همکارانش مطالبی در مورد بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون با استفاده از الگوریتم ژنتیک بیان کردند که متأسفانه علیرغم وجود محدودیت‌های زیاد در مسأله تخصیص و گسیل کامیون، مطالبی راجع به نحوه تأثیر دادن و مدل‌سازی این محدودیت‌ها بیان نشده است. با توجه به ماهیت پیچیده این مسائل و توانایی الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل پیچیده، در این تحقیق سعی شده است که از این الگوریتم برای حل این مسائل استفاده شود.

¹He

قبل از بیان نحوه حل و مدل‌سازی تابع هدف با استفاده از الگوریتم ژنتیک لازم است بیان شود که تابع هدف مدل ارائه شده توسط لی برای معادنی که از کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف در شبکه حمل و نقل خود استفاده می‌کند نمی‌تواند کاربرد داشته باشد. به همین دلیل این مدل در این تحقیق توسعه داده شده است و کاستی‌های این مدل برطرف شده است. در ادامه مدل توسعه یافته لی برای کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف بیان شده است.

۳-۴ مدل توسعه یافته لی برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف

مدل ارائه شده توسط لی، که بر اساس مینیمم کردن کل کارهای انجام شده ارائه شده است تنها برای معادنی که از یک نوع کامیون در سامانه ترابری خود استفاده می‌کند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که در معدن مس سونگون که این مدل بر پایه وضعیت عملیاتی حاکم در آن معدن انتخاب شده است، از کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف استفاده می‌شود. بنابراین لازم است که تابع هدف انتخاب شده به گونه‌ای باشد که برای کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف قابل کاربرد باشد. هم‌چنین در مدل ارائه شده توسط لی کاستی‌هایی دیگری به خاطر لحاظ نکردن بعضی محدودیت‌ها وجود دارد که سبب می‌شود جواب حاصل شده از حل مدل، نرخ‌های بهینه را برای هر مسیر به دست ندهد. محدودیت‌هایی که در این مدل لحاظ نشده است را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

- عدم توجه به حداقل و حداکثر تولید ایستگاه‌های بارگیری. بدون در نظر گرفتن حداکثر تولید یک ایستگاه بارگیری نمی‌توان جواب قابل قبول برای نرخ‌های تردد در مسیرها به دست آورد؛ چرا که ممکن است نرخ تردد حاصل شده از حل مدل از یک ایستگاه بارگیری به سمت نقاط تخلیه بیشتر از تولید ایستگاه بارگیری باشد که نمی‌تواند یک جواب منطقی باشد. بنابراین بایستی این محدودیت نیز در مدل لحاظ شود. هم‌چنین بدون در نظر گرفتن حداقل تولید یک ایستگاه بارگیری نیز ممکن است جواب مناسب برای مدل حاصل نشود؛ چرا که ممکن است نرخ تردد حاصل شده از یک ایستگاه

بارگیری به نقاط تخلیه برابر صفر حاصل شود، یعنی از نقطه مورد نظر اصلاً کامیونی بارگیری نشود. در حالی که لازم است برای این که استفاده از بارکننده توجیه اقتصادی داشته باشد حداقل تولید را در داشته باشند.

- عدم توجه به تعداد کامیون‌های در دسترس: مهم‌ترین محدودیتی که در مدل لی لحاظ نشده است تعداد کامیون‌های فعال در معدن است. چرا که مشخص نشده است، با چه تعداد کامیون بایستی تولید مورد نظر حاصل شود. ممکن است نرخ‌های به دست آمده برای مسیرهای مختلف به گونه‌ای باشد که مجموع نرخ‌های تردد بیشتر از تعداد کامیون‌های فعال در معدن باشد که باعث می‌شود یک جواب بهینه برای مدل حاصل نشود.
- در نظر نگرفتن حد بالا و پایین برای عیار مورد نیاز کارخانه کانه‌آرایی: در بیشتر موارد برای انعطاف‌پذیری بیشتر سیستم، برای خوراک ورودی به کارخانه فراوری یک بازه عیاری در نظر می‌گیرند نه یک عیار معین را.

بنابراین برای برطرف کردن کاستی‌های فوق‌الذکر مدل ارائه شده توسط لی به صورت زیر توسعه

یافته است.

$$W = \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{j=1}^{m_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} (Z_{1p} + Z_{2p}) \sum_{k=1}^{k_{ij}} D_{ij}^{(k)} + \sum_{i=1+s_1}^{s_2+s_1} \sum_{j=m_1+1}^{m_1+m_2} \sum_{p=1}^h X_{ijp} (Z_{1p} + Z_{3p}) \sum_{k=1}^{k_{ij}} D_{ij}^{(k)} + \sum_{j=1}^{m_1+m_2} \sum_{i=1}^{s_1+s_2} \sum_{p=1}^h R_{jip} Z_{1p} \sum_{k=1}^{k_{ji}} D_{ji}^{(k)} \quad (1-4)$$

متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل توسعه یافته به ترتیب، نرخ تردد کامیون نوع p از ایستگاه‌های

بارگیری به مقاصد تخلیه (X_{ijp}) و نرخ گسیل از نقاط تخلیه به هر یک از سینه‌کارها (R_{jip}) در واحد زمان می‌باشد.

با توجه به کاستی‌هایی که به لحاظ اعمال نکردن برخی محدودیت‌ها در مدل لی اشاره شد، برای مدل توسعه یافته این کاستی‌ها برطرف شدند و این محدودیت‌ها برای مدل توسعه داده شده در این تحقیق اعمال شدند. با کامل کردن محدودیت‌های موجود در مسأله، محدودیت‌های مدل توسعه یافته لی به صورت روابط (۲-۴) تا (۱۳-۴) می‌باشند.

- محدودیت مربوط به میزان مواد برنامه‌ریزی شده برای تولید. به این معنا که در هر شیفت معمولاً بایستی حداقل یک میزان باطله و ماده معدنی برنامه‌ریزی شده برای تولید حاصل شود.

$$T \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{j=1}^{m_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} Z_{2p} \geq P_{sc_o} \quad (۲-۴)$$

$$T \sum_{i=1+s_1}^{s_1+s_2} \sum_{j=1+m_1}^{m_1+m_2} \sum_{p=1}^h X_{ijp} Z_{3p} \geq P_{sc_w} \quad (۳-۴)$$

- دومین محدودیت این مدل حداکثر تولید هر یک از ایستگاه‌های بارگیری می‌باشد. به این معنا که میزان موادی که از یک نقطه بارگیری به نقاط تخلیه فرستاده می‌شود بایستی از حداکثر تولید ایستگاه بارگیری کمتر باشد که این مطلب هم برای نقاط بارگیری ماده معدنی و هم برای نقاط بارگیری باطله بایستی صادق باشد.

$$\sum_{j=1}^{m_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} Z_{2p} \leq P_{u_i} \quad for \ i = 1, 2, \dots, s_1 \quad (۴-۴)$$

$$\sum_{j=1+m_1}^{m_1+m_2} \sum_{p=1}^h X_{ijp} Z_{3p} \leq P_{u_i} \quad for \ i = s_1 + 1, 2, \dots, s_1 + s_2 \quad (۵-۴)$$

- برای این که استفاده از بارکننده‌ها توجیه اقتصادی داشته باشد بایستی در هر شیفت تولید حداقلی را داشته باشند. برای این منظور بایستی میزان مواد حمل شده از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری به هر یک از نقاط تخلیه از حداقل تولید آن بارکننده کمتر نباشد.

$$T \sum_{j=1}^{m_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{2p} \geq Pl_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, s_1 \quad (4-4)$$

$$T \sum_{j=1}^{m_1+m_2} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{3p} \geq Pl_i \quad \text{for } i = s_1 + 1, 2, \dots, s_1 + s_2 \quad (5-4)$$

- محدودیت مربوط به ظرفیت پذیرش هر کدام از سنگ شکنها و نقاط تخلیه

$$T \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{2p} \leq C_j \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m_1 \quad (6-4)$$

$$T \sum_{i=1+s_1}^{s_2+s_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{3p} \leq C_j \quad \text{for } j = 1 + m_1, 2, \dots, m_2 + m_1 \quad (7-4)$$

- محدودیت تعادل جریان ظرفیت باربری در هر نقطه مبدا و مقصد از شبکه باربری: به این معنا که تعداد کامیون‌هایی که وارد یک نقطه تخلیه یا یک نقطه بارگیری می‌شوند بایستی با تعداد کامیون‌های خروجی از آن برابر باشد.

$$\sum_{j=1}^{m_1+m_2} R_{jip} = \sum_{j=1}^{m_1+m_2} X_{ijp} \quad i = 1, 2, \dots, s_1 + s_2 \quad \text{for } p = 1, 2, \dots, h \quad (8-4)$$

$$\sum_{i=1}^{s_1+s_2} X_{ijp} = \sum_{i=1}^{s_1+s_2} R_{jip} \quad j = 1, 2, \dots, m_1 + m_2, \quad \text{for } p = 1, 2, \dots, h \quad (9-4)$$

- عیار موادی که وارد کارخانه فراوری می‌شود در نهایت بایستی در بازه تعریف شده برای کارخانه فراوری باشد.

$$\sum_{i=1}^{s_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{2p} \alpha_i^q \leq \alpha_u^q \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{2p} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m_1, \quad (10-4)$$

$$q = 1, 2, \dots, Q$$

$$\sum_{i=1}^{s_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{2p} \alpha_i^q \geq \alpha_i^q \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{p=1}^h X_{ijp} z_{2p} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m_1, \quad (11-4)$$

$$q = 1, 2, \dots, Q$$

- محدودیت مربوط به کامیون‌های در دسترس: به این معنا که میزان مواد جابجا شده نمی‌تواند از حداکثر ظرفیت کامیون‌ها تجاوز کند.

$$\sum_{i=1}^{s_1+s_2} \sum_{j=1}^{m_1+m_2} X_{ijp} (t_{ijp} + tw_j + td_{jp}) + \sum_{j=1}^{m_1+m_2} \sum_{i=1}^{s_1+s_2} R_{jip} (t_{jip} + tl_{ip} + ts_i) \leq N_p \quad p = 1, 2, \dots, h \quad (12-4)$$

- محدودیت مثبت بودن تخصیص‌ها

$$X_{ijp}, R_{jip} \geq 0 \quad (13-4)$$

پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در این مدل به صورت جدول (۴-۱) می‌باشند.

جدول ۴-۱ پارامترها و متغیرهای استفاده شده در مدل توسعه داده شده لی

شماره ردیف	پارامتر	معرفی پارامتر	شماره ردیف	پارامتر	معرفی پارامتر
۱	S_1	تعداد ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی	۸	pcs_0	حداقل ماده معدنی که در شیفت بایستی تولید شود.
۲	S_2	تعداد ایستگاه‌های بارگیری باطله	۹	pcs_w	حداقل باطله‌ای که در شیفت بایستی تولید شود.
۳	m_1	تعداد سنگ‌شکن‌ها	۱۰	N_p	تعداد کامیون‌های در دسترس از نوع p
۴	m_2	تعداد دامپ‌های باطله	۱۱	R_{jip}	نرخ کامیون از نوع p از نقطه تخلیه j به ایستگاه بارگیری i
۵	$\alpha_i^{(q)}$	کیفیت مشخصه q ماده معدنی در نقطه بارگیری i	۱۲	$D_{ij}^{(k)}$	فاکتور طول قسمت k مسیر از ایستگاه بارگیری i به نقطه تخلیه j
۶	$\alpha_i^{(q)}$	حداقل کیفیت مورد نیاز مشخصه q ماده معدنی در کارخانه فرآوری	۱۳	$D_{ji}^{(k)}$	فاکتور طول قسمت k مسیر از نقطه تخلیه j به ایستگاه بارگیری i
۷	$\alpha_u^{(q)}$	حداکثر کیفیت مورد نیاز مشخصه q ماده معدنی در کارخانه فرآوری	۱۴	Z_{ip}	وزن خالی کامیون از نوع p

ادامه جدول ۱-۴

میزان ماده معدنی که کامیون نوع p می‌تواند حمل کند (ton)	Z_{2p}	۲۳	نرخ کامیون از نوع p از ایستگاه بارگیری i به نقطه تخلیه j	X_{ijp}	۱۵
زمان بارگیری کامیون p در ایستگاه بارگیری i	tl_{ijp}	۲۴	تعداد مشخصه‌های کیفی ماده معدنی	Q	۱۶
زمان تخلیه کامیون نوع p در دامپ j	td_{jip}	۲۵	ساعت کاری در شیفت	T	۱۷
میانگین زمان انتظار کامیون در ایستگاه بارگیری i	ts_i	۲۶	حداقل تولید ایستگاه بارگیری i	Pl_i	۱۸
میانگین زمان انتظار کامیون در نقطه تخلیه j	tw_j	۲۷	حداکثر تولید ایستگاه بارگیری i	Pu_i	۱۹
زمان حمل بار کامیون نوع p از ایستگاه بارگیری i به نقطه تخلیه j	t_{ijp}	۲۸	تعداد مسیرهای ممکن از ایستگاه بارگیری i به نقطه تخلیه j	k_{ij}	۲۰
زمان برگشت کامیون نوع p از نقطه تخلیه j به ایستگاه بارگیری i	t_{jip}	۲۹	تعداد مسیرهای ممکن از نقطه تخلیه j به ایستگاه بارگیری i	k_{ji}	۲۱
			حداکثر ظرفیت پذیرش دامپ j	C_j	۲۲

در ادامه نحوه مدل‌سازی کروموزوم برای مدل توسعه یافته لی بیان شده است.

۴-۴ مدل‌سازی کروموزوم برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های یکسان

برای حل مدل تخصیص و گسیل، بایستی راه‌حل‌های پتانسیل که کروموزوم‌های مسأله می‌باشند به درستی مدل شوند. بایستی به این نکته توجه داشت که مدل‌سازی و کدگذاری کروموزوم می‌تواند به دو صورت دودویی و حقیقی انجام گیرد.

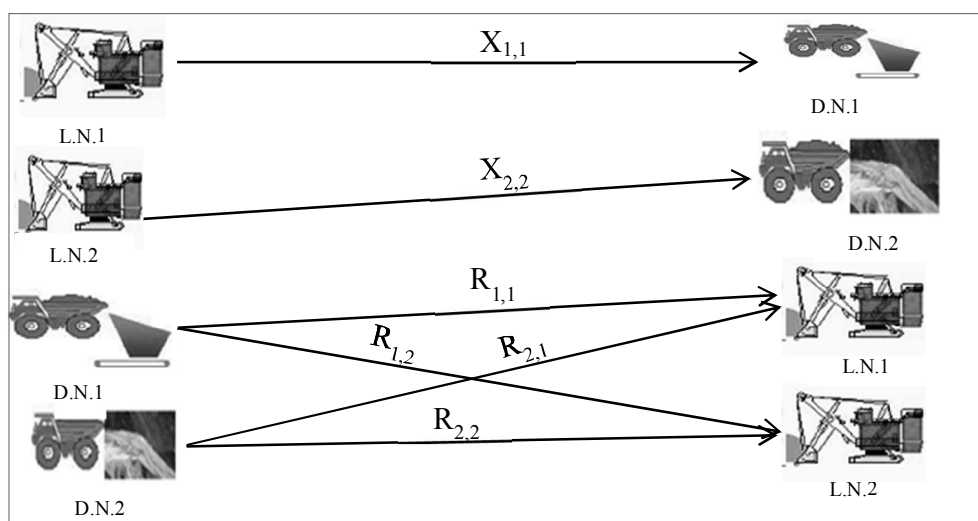
در حالت دودویی همان‌طور که در فصل سوم بیان شد هر کروموزوم به صورت رشته‌ای در نظر گرفته می‌شود که شامل همه متغیرهای طراحی (ژن‌ها) می‌باشد. هر ژن نیز به صورت رشته‌ای از اعداد صفر و یک که بیت نامیده می‌شود کدگذاری می‌شود. تعداد بیت‌های هر ژن بستگی به دقت مسأله دارد، بنابراین در حالت کدگذاری دودویی هر کروموزوم به صورت یک رشته دودویی به طول مجموع تعداد بیت‌های ژن‌ها مدل می‌شود.

در حالت کد گذاری مقداری هر کروموزوم به صورت یک آرایه یک بعدی به طول تعداد متغیرها در نظر گرفته می‌شود که هر عضو آرایه متناسب با یک متغیر طراحی بوده و دارای مقداری حقیقی در بازه تعریف شده برای متغیر مورد نظر می‌باشد. در اینجا کروموزوم مسأله به صورت کدگذاری مقداری مدل‌سازی شده است.

برای مدل‌سازی کروموزوم بایستی مسیرهای ممکن در شبکه حمل و نقل معدن به درستی ارزیابی شود. مسیرهای ممکن مسیریابی است که امکان حرکت کامیون در آن مسیرها وجود دارد. برای کامیونی که از ایستگاه بارگیری باطله بارگیری کرده مسیر رفت به سنگ‌شکن یک مسیر ناممکن برای آن می‌باشد و همچنین کامیونی که از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی بارگیری کرده مسیر رفت به دامپ‌های تخلیه یک مسیر ناممکن برای این کامیون می‌باشد. با توجه به این که در یک تخصیص انعطاف‌پذیر، کامیون‌ها می‌توانند در برگشت به هر یک از نقاط بارگیری گسیل شوند بنابراین هر مسیر خروجی از نقاط تخلیه می‌تواند به عنوان یک مسیر ممکن در شبکه حمل و نقل معدن مطرح شود، بنابراین کروموزوم مدل شده برای این مسأله به صورت یک آرایه یک بعدی در نظر گرفته می‌شود که هر عضو آرایه متناظر با یک مسیر رفت یا برگشت در شبکه ترابری معدن می‌باشد و با توجه به حداقل و حداکثر نرخ تردد مسیر مورد نظر، دارای مقداری حقیقی در این بازه می‌باشد. بنابراین تعداد عضوهای آرایه برابر با مجموع مسیرهای ممکن از ایستگاه‌های بارگیری به نقاط تخلیه و از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری می‌باشد. عضوهای ابتدائی آرایه متناظر با مسیرهای رفت از نقاط بارگیری به نقاط تخلیه و عضوهای بعدی متناظر با مسیرهای برگشت از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری در نظر گرفته شده است.

برای درک بهتر مسأله در حالت ساده، معدنی را فرض کنید که شامل ۲ ایستگاه بارگیری و ۲ نقطه تخلیه می‌باشد و فرض کنید ایستگاه بارگیری اول برای برداشت ماده معدنی و ایستگاه بارگیری دوم برای برداشت باطله به کار گرفته شود و نقطه تخلیه اول سنگ‌شکن و نقطه تخلیه دوم دامپ باطله می‌باشد. با

توجه به این که نقطه بارگیری اول ماده معدنی برداشت می‌کند؛ بنابراین کامیون‌هایی که از این نقطه بارگیری می‌کنند بایستی بار خود را در سنگ‌شکن تخلیه نمایند، یعنی برای این مسیر تنها یک نرخ تردد $(X_{1,1})$ بایستی تعیین گردد. نقطه دوم نیز باطله برداشت می‌کند و کامیون‌هایی که از این نقطه بارگیری می‌کنند به سمت دامپ باطله می‌روند، یعنی برای این مسیر نیز تنها یک نرخ تردد $(X_{2,2})$ بایستی مشخص شود. بعد از تخلیه مواد، کامیون‌ها می‌توانند به هر یک از مقاصد بارگیری گسیل شوند، پس کامیونی که بار خود را در هر کدام از نقاط تخلیه خالی کرده دو مسیر را برای برگشت پیشرو دارد؛ مسیر منتهی به ایستگاه بارگیری اول و مسیر منتهی به ایستگاه بارگیری دوم. بنابراین برای نقطه تخلیه اول بایستی متغیرهای $R_{1,1}$ و $R_{1,2}$ و برای نقطه تخلیه دوم متغیرهای $R_{2,1}$ و $R_{2,2}$ مدل‌سازی شوند. نمایی از این معدن به همراه تمام متغیرها به صورت شماتیک در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ نمایی شماتیک از معدن فرضی مذکور به همراه مسیرهای ممکن در شبکه ترابری

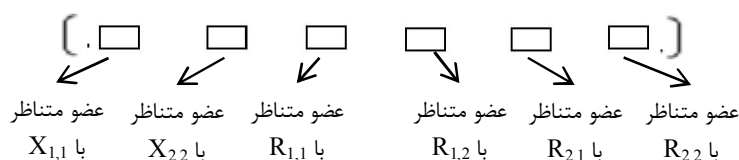
در مسائل تخصیص و گسیل محدودیتی که برای تک تک نرخ‌های تردد در مسیرهای گوناگون بیان می‌شود فقط به صورت مثبت بودن این نرخ‌ها بیان می‌شود و هیچ محدودیتی برای حداکثر نرخ تردد در مسیرها بیان نمی‌شود. در حالی که لازم است برای حل با الگوریتم ژنتیک برای این نرخ‌ها، حد بالایی در

نظر گرفته شود تا فضای جستجوی مسأله را تا حد ممکن کوچک‌تر کند. ولی باید دقت کرد که جواب مسأله خارج از محدوده انتخاب شده نباشد.

روشی که برای تعیین حداکثر نرخ تردد کامیون در مسیرهای گوناگون بکار گرفته شده است، استفاده از حداکثر تولید هر یک از ایستگاه‌های بارگیری می‌باشد. به این ترتیب که اگر حداکثر تولید ایستگاه بارگیری λ_m در واحد زمان T_i تن (باطله یا ماده معدنی) و ظرفیت حمل کامیون‌ها P تن باشد، در آن صورت حاصل T_i/P برای مسیر رفت از ایستگاه بارگیری λ_m به عنوان حداکثر نرخ تردد در واحد زمان تلقی می‌شود، چرا که تعداد کامیون‌هایی که از این ایستگاه بارگیری خارج می‌شوند نمی‌تواند بیشتر از تولید ایستگاه‌های بارگیری مورد نظر باشد. همچنین برای مسیرهای برگشت از نقاط تخلیه و منتهی به ایستگاه بارگیری λ_m ، حاصل T_i/P نیز می‌تواند به عنوان حداکثر نرخ تردد در واحد زمان برای این مسیرها تلقی شود. چرا که اگر بیشتر از این مقدار در نظر گرفته شود عملاً صف کامیون در ایستگاه بارگیری ایجاد می‌شود. البته نرخ‌های تردد در مسیرها ممکن است خیلی کمتر از این مقدار باشد، چرا که این نرخ‌ها برای حالتی می‌باشد که کل کامیون‌ها به یک ایستگاه بارگیری یا به یک نقطه تخلیه اختصاص داده شوند. ولی چون اطلاعات دیگری در این گونه مسائل برای محدود کردن جواب مسأله موجود نمی‌باشد این مقادیر به عنوان حداکثر نرخ تردد در مسیرها در نظر گرفته می‌شود. البته این مقادیر نباید از تعداد کل کامیون‌های فعال موجود بیشتر باشد و در صورتی که مقداری بیش از تعداد کامیون‌های موجود به دست آمد تعداد کامیون‌های فعال به عنوان حداکثر نرخ تردد برای مسیرهای ممکن که از آن ایستگاه بارگیری خارج و یا از نقاط تخلیه وارد آن ایستگاه بارگیری می‌شوند، در نظر گرفته می‌شود.

کروموزومی که برای مثال بالا مدل‌سازی می‌شود باید شامل همه نرخ‌های تردد در مسیرهای ممکن در شبکه حمل و نقل معدن باشد. این کروموزوم به صورت آرایه‌ای در نظر گرفته می‌شود که شامل شش عضو است (شش مسیر ممکن در شبکه حمل و نقل این معدن فرضی موجود است). عضوهای این آرایه به

این ترتیب مدل سازی می‌شوند که، برای نرخ‌های تردد در مسیرهای رفت، ابتدا مسیرهای ممکن که از ایستگاه بارگیری اول خارج می‌شوند عضوهای اولیه آرایه را به خود اختصاص می‌دهند و به ترتیب عضوهای بعدی آرایه برای مسیرهای ممکن که از ایستگاه بارگیری دوم خارج می‌شوند و به همین ترتیب تا در نظر گرفتن مسیرهای ممکن از هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری ادامه می‌یابد. بعد از مشخص کردن عضوهای متناظر با نرخ‌های تردد در مسیرهای رفت، ژن‌های متناظر با نرخ‌های تردد در مسیرهای برگشت نیز در آرایه مشخص می‌شود. به این ترتیب که عضوهای بعدی آرایه به ترتیب متناظر با نرخ‌های تردد از مسیرهای خروجی ممکن از نقطه تخلیه ۱ و سپس نقطه تخلیه ۲ و به همین ترتیب تا در نظر گرفتن نرخ‌های تردد از مسیرهای ممکن خروجی از هر کدام از نقاط تخلیه ادامه می‌یابد. برای مسأله بالا با ۲ ایستگاه بارگیری و ۲ نقطه تخلیه این مطلب در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



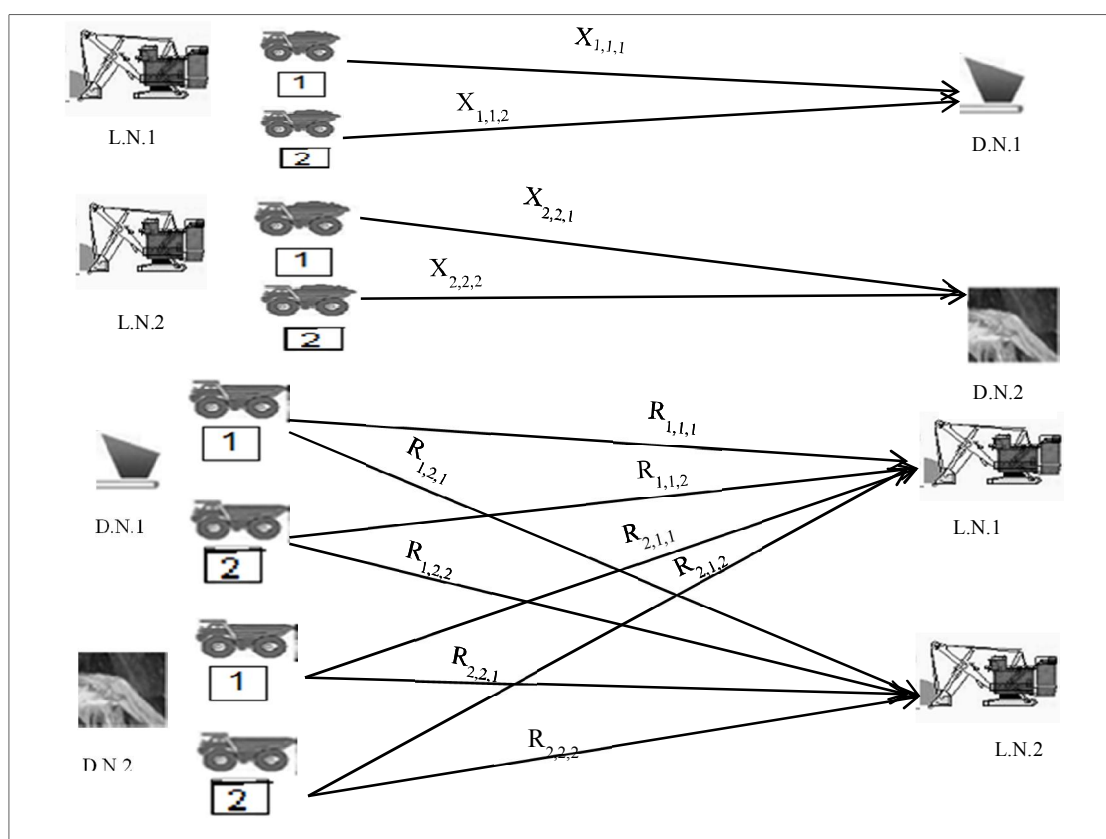
شکل ۴-۲ کروموزوم مدل شده برای معدن فرضی با یک نوع کامیون

با این توضیح برای معدنی که شامل n_1 ایستگاه بارگیری ماده معدنی و n_2 ایستگاه بارگیری باطله بوده و شامل m_1 نقطه تخلیه ماده معدنی و m_2 نقطه تخلیه باطله می‌باشد و یک نوع کامیون در شبکه ترابری معدن موجود است، کروموزوم مدل شده آرایه‌ای شامل $n_1 \times m_1 + n_2 \times m_2 + (m_1 + m_2) \times (n_1 + n_2)$ عضو خواهد بود که $n_1 \times m_1 + n_2 \times m_2$ عضو اولیه متناظر با نرخ‌های تردد در مسیرهای رفت از ایستگاه بارگیری به نقاط تخلیه و $(m_1 + m_2) \times (n_1 + n_2)$ عضو بعدی آرایه متناظر با نرخ‌های تردد از مسیرهای برگشت از نقاط تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری می‌باشد. در ادامه نحوه مدل سازی کروموزوم برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های ذکر شده است.

۴-۵ مدل‌سازی کروموزوم برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های متفاوت

در این حالت نیز ابتدا کلیه مسیرهای ممکن در شبکه حمل و نقل معدن ارزیابی می‌شود. همان طور که بیان شد مسیرهای ممکن، مسیرهایی هستند که امکان حرکت کامیون در آن‌ها وجود دارد. با توجه به این که کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف استفاده می‌شود، باید سازگاری انواع کامیون‌ها با هر یک از ایستگاه‌های بارگیری بررسی شود. کامیونی که با یک ایستگاه بارگیری ناسازگار باشد به سمت آن ایستگاه بارگیری گسیل نمی‌شوند. این ناسازگاری عمدتاً از لحاظ ناهمگونی در میزان تولید ایستگاه بارگیری با ظرفیت کامیون ناشی می‌شود. مثلاً در معدن مس سونگون برای بارگیری کامیون‌های ۱۰۰ تنی لودرهای با ظرفیت‌های کوچک مانند لودر نوع ۴۷۰ کوماتسو که برای بارگیری کامیون‌های ۳۲ تنی مناسب است، استفاده نمی‌شود و بنابراین نرخ تردد از این ایستگاه بارگیری به سمت نقاط تخلیه و یا از نقاط تخلیه به سمت این ایستگاه بارگیری از نوع کامیون مورد نظر صفر در نظر گرفته می‌شود و نیازی به مدل‌سازی این نرخ‌ها نیست. بعد از ارزیابی شبکه حمل و نقل و بررسی سازگاری کامیون‌ها با ایستگاه‌های بارگیری کروموزوم مسأله مدل‌سازی می‌شود. کروموزوم این مسأله به صورت آرایه‌ای یک بعدی متشکل از n عضو در نظر گرفته می‌شود که هر عضو آن متناظر با یک نرخ تردد هر یک از انواع کامیون‌ها در مسیرهای مختلف رفت و برگشت می‌باشد. برای این کروموزوم عضوهای اولیه آرایه متناظر با مسیرهای رفت و عضوهای بعدی متناظر با مسیرهای برگشت در شبکه حمل و نقل معدن می‌باشد. برای درک بهتر کروموزوم مدل شده برای این مسأله در حالت ساده معدن فرضی را که در قسمت قبل بیان شد در نظر بگیرید و فرض کنید که در این معدن از دو نوع کامیون با ظرفیت‌های مختلف جهت حمل مواد استفاده می‌شود. کامیون نوع اول دارای ظرفیت p_1 بوده و کامیون نوع دوم دارای ظرفیت p_2 می‌باشد. با توجه به این که ایستگاه بارگیری اول ماده معدنی برداشت می‌کند بنابراین برای این مسیر بایستی به ترتیب دو نرخ تردد، یکی برای کامیون نوع اول $(X_{1,1,1})$ و دیگری برای کامیون نوع دوم $(X_{1,1,2})$ در مسیر از ایستگاه

بارگیری اول تا سنگ‌شکن مدل‌سازی شود. برای ایستگاه بارگیری باطله نیز بایستی دو نرخ تردد مدل‌سازی شود یکی برای نرخ تردد کامیون نوع اول از ایستگاه بارگیری دوم تا دامپ باطله ($X_{2,2,1}$) و دیگری برای کامیون نوع دوم ($X_{2,2,2}$) می‌باشد. در این مثال فرض بر این است که همه کامیون‌ها با ایستگاه‌های بارگیری سازگار هستند. برای مسیرهای برگشت نیز با توجه به این که هر نوع از کامیون‌ها در برگشت می‌توانند به همه ایستگاه‌های بارگیری گسیل شوند برای هر کدام از نقاط تخلیه تا هر یک از ایستگاه‌های بارگیری نیز بایستی ۴ نرخ تردد مدل‌سازی شود. نمایی از این معدن فرضی به همراه تمام متغیرها در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

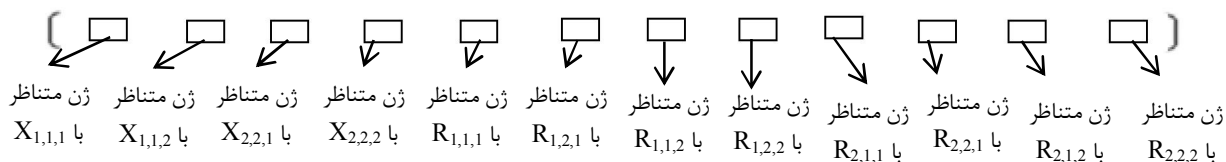


شکل ۳-۴ نمایی شماتیک از یک معدن فرضی با ۲ ایستگاه بارگیری و ۲ نقطه تخلیه با دو نوع کامیون متفاوت

اگر حداکثر و حداقل تولید ایستگاه بارگیری λ در واحد زمان به ترتیب T_i و L_i تن باشد و ظرفیت کامیون نوع اول p_1 تن و نوع دوم p_2 تن باشد؛ در آن صورت $(T_i-L_i)/p_1$ و $(T_i-L_i)/p_2$ به ترتیب حداکثر نرخ تردد کامیون نوع اول و نوع دوم در مسیر بین ایستگاه بارگیری λ و نقاط تخلیه بوده و همچنین برای نرخ‌های تردد در مسیرهای برگشت از نقاط تخلیه و منتهی به ایستگاه بارگیری λ این مقادیر نیز به ترتیب به عنوان حداکثر نرخ تردد کامیون نوع اول و کامیون نوع دوم در واحد زمان تلقی می‌شود. با این توصیف هر کروموزوم به صورت آرایه‌ای در نظر گرفته می‌شود که شامل تمام نرخ‌های تردد باشد.

بعد از تعیین حداکثر مقدار برای هر کدام از نرخ‌ها، λ ‌های اختصاص داده شده به هر متغیر نیز مشخص می‌شود. عضوهای اولیه کروموزوم را λ ‌های متناظر با نرخ‌های تردد از مسیر رفت و عضوهای بعدی را λ ‌های متناظر با نرخ‌های گسیل از مسیر برگشت تشکیل می‌دهند. برای نرخ‌های تردد در مسیرهای رفت، ابتدا λ ‌های متناظر با مسیرهای ممکن که از ایستگاه بارگیری اول توسط کامیون‌های نوع اول خارج می‌شوند؛ اولین عضو آرایه را به خود اختصاص می‌دهد و سپس λ متناظر با کامیون نوع دوم برای ایستگاه بارگیری اول عضو بعدی را شامل می‌شود و به همین ترتیب نرخ‌های تردد که از ایستگاه بارگیری دوم خارج می‌شوند عضوهای بعدی آرایه را به خود اختصاص می‌دهند و این روند تا در نظر گرفتن کامل ایستگاه‌های بارگیری ادامه می‌یابد. بعد از اختصاص تعداد مشخصی از عضوهای اولیه آرایه برای نرخ‌های تردد در مسیرهای رفت، درایه‌های متناظر با مسیرهای برگشت نیز در آرایه تعریف شده، مشخص می‌شوند. به این ترتیب عضوهای بعدی آرایه را به ترتیب λ ‌های متناظر با نرخ‌های تردد از مسیرهای خروجی ممکن از نقطه تخلیه ۱ توسط کامیون نوع اول و سپس λ ‌های متناظر با کامیون نوع دوم برای نقطه تخلیه ۱ شامل می‌شود. بعد از اتمام متغیرهای مربوط به نقطه تخلیه ۱ همین روند برای مدل‌سازی نرخ‌های تردد که از نقطه تخلیه ۲ گسیل شده است ادامه می‌یابد. برای مدل توسعه یافته لی با

۲ ایستگاه بارگیری و ۲ نقطه تخلیه با دو نوع کامیون متفاوت کروموزوم مدل شده در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.



۴-۶ جمعیت اولیه

بعد از مدل سازی کروموزوم به عنوان راه حل پتانسیل برای مسأله تخصیص و گسیل کامیون - شاول، باید تعداد اندازه جمعیت برای مسأله مشخص شود. هر جمعیت مجموعه ای از راه حل های پتانسیل می باشد. معمولاً انتخاب جمعیت بزرگتر شانس یافتن جواب بهینه را افزایش داده ولی باعث طولانی تر شدن محاسبات خواهد شد. در مسأله تخصیص و گسیل به دلیل وجود محدودیت ها و متغیرهای زیاد در مسأله، امکان این که کروموزوم های تولید شده در فضای جواب قرار داشته باشند کاهش می یابد و بنابراین باید تعداد جمعیت بیشتری برای مسأله انتخاب شود. این جمعیت به طور تصادفی انتخاب می شود.

۴-۷ تابع برازندگی^۱

یکی از پارامترهای تعیین کننده و اساسی در الگوریتم ژنتیک تعریف تابع برازش مناسب برای مسأله می باشد. در تابع لی و تابع توسعه یافته لی، برازندگی هر کروموزوم به عنوان کار انجام شده به ازای راه حل پتانسیل متناظر با آن در نظر گرفته می شود.

^۱ Fitness function

۴-۸ نحوه تأثیر محدودیت‌های اعمال شده در مسأله و تابع برازش اصلاح شده

همان طور که اشاره شد در مسأله تخصیص و گسیل کامیون - شاول انواع محدودیت‌ها وجود دارد و در واقع مهم‌ترین هدف تخصیص و گسیل کامیون - شاول مینیمم کردن تابع هدف همراه با ارضای محدودیت‌ها می‌باشد. یک روش عمومی و جامع برای اعمال محدودیت‌ها در مسائل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، استفاده از تابع پنالتی^۱ می‌باشد که راه‌حل‌های غیرممکن (راه‌حل‌هایی که محدودیت را رعایت نمی‌کنند) را با کاهش مقدار برازندگی آن‌ها متناسب با میزان انحراف محدودیت، جریمه می‌کند تا احتمال انتخاب این کروموزوم در نسل بعدی کاهش یابد [۳۵]. کروموزومی که به صورت تصادفی تولید شده است، برای تک تک محدودیت‌ها بررسی می‌شود که کروموزوم مورد نظر محدودیت‌ها را نقض می‌کند؟ اگر نقض محدودیت صورت گیرد، از برازندگی آن به عنوان جریمه کاسته می‌شود. تابع پنالتی به شکل پاداش نیز می‌تواند ظاهر شود به این صورت که برای کروموزوم‌هایی که محدودیت‌ها را رعایت می‌کنند به عنوان پاداش، مقداری به برازندگی آن‌ها اضافه می‌شود.

برای تابع پنالتی تعریف‌های متنوعی وجود دارد. در این پایان‌نامه از تعریف ارائه شده توسط راجیو و

کریشنامورتی استفاده شده است که به صورت رابطه (۴-۱۴) می‌باشد [۳۶].

$$f_{penalty} = f(x) \times k \times c \quad (4-14)$$

که در رابطه فوق $f_{penalty}$ تابع جریمه، k عدد ثابت که برابر با ۱۰ پیشنهاد شده است. $f(x)$ تابع برازش

می‌باشد و c به صورت رابطه (۴-۱۵) تعریف شده است.

$$c = \sum_{q=1}^Q \max[0, g_q(x)] \quad (4-15)$$

^۱ Penalty function

با توجه به این که در تابع پنالتی معرفی شده توسط راجیو و کریشنامورتی تمام محدودیت‌ها به صورت کوچک‌تر مساوی با صفر می‌باشند ($g_q(x) \leq 0, q=1,2,\dots,Q$)، در رابطه (۴-۱۵) مقدار عددی سمت چپ محدودیت‌های اعمال شده در مسأله به ازای کروموزوم مورد نظر می‌باشد. اگر $g_q(x)$ به ازای کروموزوم مورد نظر بزرگ‌تر از صفر باشد در این صورت محدودیت مورد نظر نقض گردیده و طبق رابطه (۴-۱۴) و (۴-۱۵) کروموزوم جریمه می‌گردد و از برازندگی آن بسته به میزان نقض محدودیت‌ها کاسته می‌شود. در روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۵)، Q تعداد کل محدودیت‌های حاکم بر مسأله می‌باشد. با توجه به این که طبق تابع جریمه معرفی شده توسط راجیو و کریشنامورتی بایستی همه محدودیت‌ها به صورت کوچک‌تر مساوی با صفر باشند، در حالی که در مسأله تخصیص و گسیل تعدادی از محدودیت‌ها به صورت مساوی می‌باشد؛ مثلاً بایستی مجموع تعداد کامیون‌های ورودی از ایستگاه‌های بارگیری به یک نقطه تخلیه برابر با مجموع تعداد کامیون‌های گسیل شده از آن نقطه تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری باشد. برای این منظور لازم است همه محدودیت‌های موجود در مسأله تخصیص و گسیل به شکل کوچک‌تر مساوی، بازنویسی شوند که در اینجا شرط‌های مساوی به صورت $|g_i(x)| - \varepsilon \leq 0$ به شرط‌های نامساوی تبدیل شده است، که ε یک مقدار مثبت کوچک بوده و $g_i(x)$ محدودیت‌هایی است که مساوی با صفر می‌باشند.

با توجه به محدودیت‌های موجود در مسأله، تابع برازش در واقع تنها مینیمم شدن کل کار انجام شده نمی‌باشد؛ بلکه مینیمم شدن کل کار انجام شده تحت شرایط اعمال شده در مسأله می‌باشد. بنابراین تابع برازش متناظر با مسأله مورد نظر به صورت زیر اصلاح می‌گردد.

$$\Phi(x) = f(x) + f_{penalty} \quad (۴-۱۶)$$

در رابطه فوق $f(x)$ و $\varphi(x)$ به ترتیب مقادیر تابع برازش اولیه و تابع برازش اصلاح شده و f_{penalty} تابع جریمه می‌باشد. بایستی توجه کرد که الگوریتم ژنتیک در فرم بیشینه‌سازی توسعه یافته است و تابع برازش آن معمولاً از نوع ماکزیمم‌سازی می‌باشد و چون در اینجا هدف پیدا کردن نرخ‌های تردد برای هر مسیر به گونه‌ای است که کل کار انجام شده مینیمم شود مسأله از نوع مینیمم‌سازی است و لازم است با انجام تمهیداتی مسأله به فرم بیشینه‌سازی تبدیل شود. برای این منظور تابع برازشی که توسط راجیو و کریشنامورتی در مقاله خود پیشنهاد دادند استفاده شده است. تابع پیشنهاد شده به صورت رابطه (۴-۱۷) می‌باشد [۳۶].

$$F = [\varphi_{\max}(x) + \varphi_{\min}(x)] - \varphi(x) \quad (۴-۱۷)$$

در رابطه (۴-۱۷) F برازندگی به ازای کروموزوم مورد نظر بوده و $\varphi(x)$ مطابق رابطه (۴-۱۶) تعریف شده است. $\varphi_{\max}(x)$ و $\varphi_{\min}(x)$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار تابع برازش اصلاح شده بر طبق رابطه (۴-۱۶) در نسل جاری می‌باشد. طبق رابطه بالا کروموزومی با کمترین مقدار کار انجام شده و کمترین انحراف از محدودیت‌ها بیشترین مقدار برازندگی را دارا می‌باشد.

بعد از تعیین برازندگی هر کدام از کروموزوم‌ها، بهترین کروموزوم که دارای کمترین کار انجام شده می‌باشد و محدودیت‌های آن کمترین میزان انحراف از حدود تعیین شده را دارا می‌باشند، انتخاب شده و به عنوان بهترین کروموزوم نسل جاری ذخیره می‌شود. سپس انتخاب جمعیت جدید برای نسل بعدی صورت می‌گیرد. برای انتخاب جمعیت جدید در این پایان‌نامه از روش چرخ رولت که یکی از روش‌های مرسوم در انتخاب می‌باشد و به تفصیل در فصل سوم شرح داده شده، استفاده شده است. سپس عملگرهای تبادلی و جهش بر روی جمعیت انتخاب شده به صورتی که در ادامه بیان می‌شود اعمال شده‌اند.

۹-۴ تبادل ژنی کردن کروموزومها

در این پایان نامه از تبادل ژنی ۲ نقطه که در فصل سوم بیان گردید استفاده شده است. به این ترتیب که به صورت تصادفی دو کروموزوم از جمعیت انتخاب شده و عدد تصادفی در بازه (۰،۱) تولید می شود. اگر عدد تصادفی تولید شده کمتر از احتمال تبادل ژنی باشد دو کروموزوم برای تبادل ژنی شدن انتخاب می شوند و دو عدد تصادفی صحیح در بازه $(1, l_{ch}-1)$ تولید می شود (l_{ch} طول کروموزوم می باشد)، سپس بین دو عدد انتخاب شده ژنهای کروموزومها باهم تعویض می شوند. فرض کنید دو کروموزوم $P1$ و $P2$ به صورت تصادفی برای کراس اور انتخاب شده اند دو عدد صحیح به صورت تصادفی انتخاب شده و بین این دو عدد، ژنهای دو کروموزوم با هم مبادله می شوند. مطابق شکل (۴-۵) بعد از تبادل ژنی دو فرزند $C1$ و $C2$ جایگزین دو کروموزوم والد می شوند.

P1	2	2.3	0.3	0.95	1	3	4.2	5.3	3.3
P2	1.5	3	3.3	4	3.3	1	2.2	3.2	0.4
C1	2	2.3	3.3	4	3.3	3	4.2	5.3	3.3
C2	1.5	3	0.3	0.95	1	1	2.2	3.2	0.4

شکل ۴-۵ تبادل ژنی دو نقطه ای

۱۰-۴ جهش

با توجه به محدودیت های زیاد در این مسأله استفاده از شیوه های جهش سنتی مانند جهش یکنواخت که در فصل سوم بیان گردید ممکن است باعث گردد که مسأله به سمت واگرایی پیش رود و رسیدن به همگرایی مطلوب برای مسائل با محدودیت ها و متغیرهای زیاد با این نوع شیوه از جهش به جمعیت اولیه خیلی بالا و تعداد تکرارهای زیادی نیاز دارد که باعث می شود زمان زیادی برای حل مسأله صرف شود. برای بیان نحوه واگرایی مسأله با استفاده از این شیوه جهش فرض کنید که مطابق شکل (۴-۴)

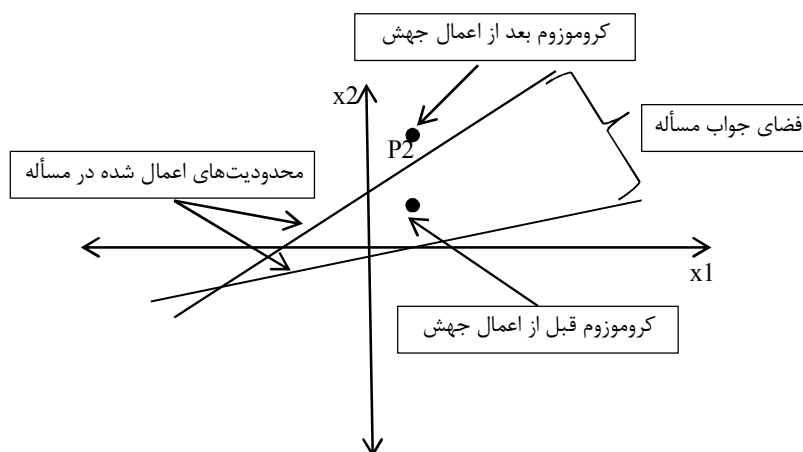
۶) از جهش یکنواخت استفاده شده است. برای اعمال جهش در این روش یک عدد تصادفی از بازه $(0, 1)$ تولید می‌شود، اگر این عدد کوچکتر از احتمال جهش باشد ژن مورد نظر تحت عملگر جهش قرار می‌گیرد و به طور تصادفی عددی در بازه تعریف شده برای ژن مورد نظر تولید شده و جایگزین ژن قبلی می‌شود، در غیر این صورت تغییری در آن صورت نمی‌گیرد. فرض کنید که اولین ژن کروموزوم P1 تحت عملگر جهش قرار گرفته و کروموزوم P2 را تولید کرده است. کروموزوم قبل از جهش و بعد از جهش در شکل زیر نشان داده شده است.

کروموزوم قبل از اعمال جهش	-2.5	4	1.2	8.4	9.5
کروموزوم بعد از اعمال جهش	3	4	1.2	8.4	-6

شکل ۴-۶ اعمال جهش یکنواخت

حال محدودیت‌های مسأله اگر رسم شود به وضوح مشخص خواهد شد که در این مورد جهش باعث

بدتر شدن جواب مسأله گردیده است. منطقه جواب مسأله در شکل (۴-۷) نشان داده شده است.

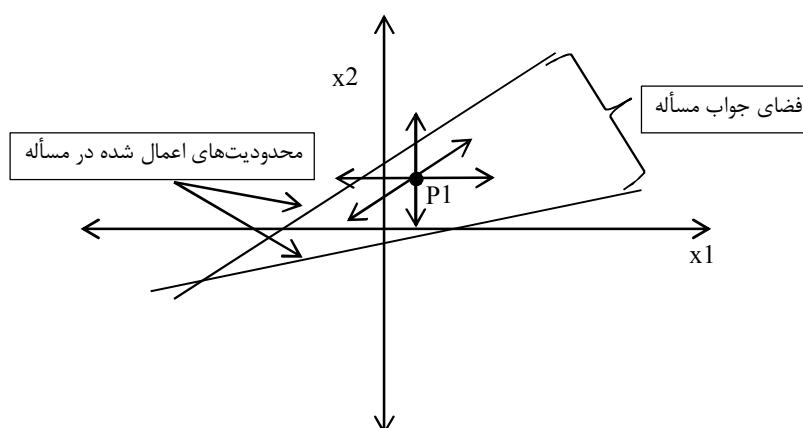


شکل ۴-۷ فضای جواب مسأله و نحوه عملکرد عملگر جهش یکنواخت [۳۷]

همان طور که از شکل (۴-۷) مشخص است، قبل از اعمال جهش کروموزوم P1 در محدوده جواب

می‌باشد، ولی بعد از اعمال جهش از فضای جواب خارج شده است. این نوع از شیوه‌های جهش برای

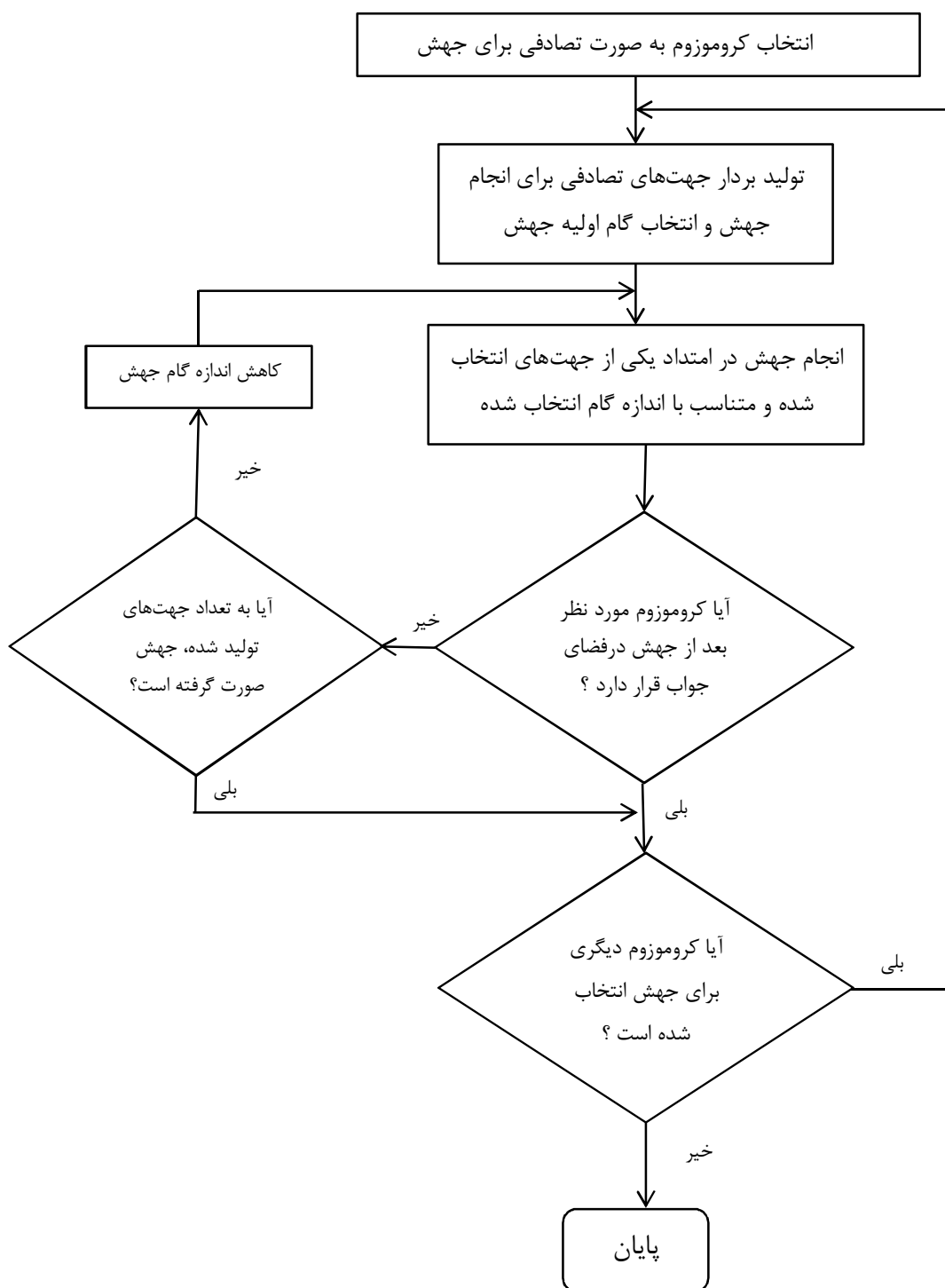
مسائلی که محدودیت‌های زیادی دارند نمی‌تواند کارائی مناسب داشته باشد، چرا که ممکن است از طریق اعمال تبادل ژنی و جهش کروموزومی که در فضای جواب قرار دارد به کروموزومی تبدیل شود که خارج از فضای جواب بوده و همگرایی روش را پایین آورد [۳۷]. به همین دلیل در این تحقیق از جهش تطبیقی جهت‌دار^۱ استفاده شده است. با این روش احتمال این که کروموزومی که در فضای جواب قرار دارد بعد از اعمال جهش تطبیقی جهت‌دار به خارج از محدوده جواب انتقال یابد به شدت کاهش می‌یابد. به همین دلیل همگرایی این روش خیلی بالا می‌باشد. نحوه اعمال عملگر جهش تطبیقی جهت‌دار در شکل (۴-۸) نشان داده شده است [۳۷].



شکل ۴-۸ عملگر جهش تطبیقی (جهت‌دار) [۳۷]

روند کار این نوع از جهش به صورت نمودار در شکل (۴-۹) نشان داده شده است.

^۱ Adaptive Mutation (Direction)



شکل ۴-۹ نحوه اعمال عملگر جهش به روش تطبیقی جهت‌دار [۳۷]

۴-۱۱ اتمام بهینه‌سازی

برای اتمام بهینه‌سازی در این تحقیق از دو معیار استفاده شده است. اگر بهینه‌سازی به تعداد مشخصی نسل بدون بهبود بهترین کروموزوم ادامه یابد، متوقف می‌شود. این تعداد به نوع مسأله و شخص بهینه‌ساز بستگی دارد. هر چه مسأله پیچیده‌تر باشد معمولاً این تعداد بیشتر می‌شود. همچنین برای حداکثر تعداد تکرار نسل‌ها مقداری در نظر گرفته شده است و به محض رسیدن الگوریتم به این تعداد نسل بهینه‌سازی به اتمام می‌رسد.

۴-۱۲ نتیجه‌گیری

در این فصل از بین مدل‌های ارائه شده در فصل دوم برای تخصیص و گسیل کامیون در معادن روباز، مدل لی با توجه به وضعیت عملیاتی معدن مس سونگون برای این معدن مناسب ارزیابی شد و کروموزوم مناسب برای تابع هدف ارائه شده توسط لی مدل شد. با توجه به این که این مدل کاستی‌هایی داشت مدل توسعه یافت و نحوه مدل‌سازی کروموزوم برای مدل توسعه یافته نیز شرح داده شد. هر کروموزوم به صورت آرایه‌ای یک بعدی با n عضو، که هر عضو آن متناظر با نرخ تردد هر یک از انواع کامیون‌ها در یک مسیر رفت یا برگشت می‌باشد در نظر گرفته شده است. برای تاثیر دادن محدودیت‌های مسأله از تابع جریمه در این تحقیق استفاده می‌شود که بسته به میزان نقض محدودیت توسط کروموزوم مورد نظر، از برآزندگی آن کاسته می‌شود. همچنین به دلیل محدودیت‌های زیاد در مسأله، روش جهش سنتی مثل روش جهش یکنواخت برای مسأله تخصیص و گسیل مناسب عمل نمی‌کند و به همین دلیل از روش جهش تطبیقی جهت‌دار که باعث همگرایی بیشتر می‌شود استفاده شده است.

فصل پنجم

بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون در معدن مس سونگون

۵-۱ مقدمه

معدن مس سونگون یکی از معادن بزرگ کشور است. همان طور که در فصل چهارم بیان گردید، با توجه به شرایط عملیاتی که در معدن مس سونگون حاکم است، بهینه‌سازی در شبکه حمل و نقل معدن را امری ضروری کرده است. در فصل چهارم مدل لی برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف توسعه داده شد. در این فصل مدل توسعه داده شده با داده‌های برداشت شده از معدن مس سونگون برای یک شیفت واقعی از این معدن با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است، تا ضمن تعیین نرخ‌های تردد بهینه در هر یک از مسیرها و ارزیابی کارایی این مدل برای معدن مس سونگون، توانایی الگوریتم ژنتیک در حل مسائل تخصیص و گسیل بررسی شود. برای ارزیابی نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، این مدل با استفاده از نرم‌افزار LINGO نیز حل شده است و نتایج حاصل با نتایج حاصل شده از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است.

۵-۲ معرفی معدن مس سونگون

کانسار مس سونگون در استان آذربایجان شرقی، شمال شرقی تبریز، شمال غربی اهر، شمال ورزقان و در همسایگی جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان واقع شده است. مختصات جغرافیایی منطقه، ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. کانسار مس سونگون در یک منطقه کوهستانی، با ارتفاع متوسط ۲۰۰۰ متر بالای سطح دریا و در بخشی از رشته کوه‌های قره داغ قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع محدوده معدن از سطح دریا ۲۷۰۰ متر می‌باشد. در سال ۱۳۷۸ شرکت اولنگ با همکاری شرکت Rio Tinto مطالعات تکمیلی معدن را انجام داد. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعات ذخیره قطعی قابل استخراج معدن در حدود ۳۸۸ میلیون تن با عیار متوسط ۰/۶۱ درصد مس

(تا تراز ۱۶۰۰) می‌باشد. نمایی از معدن مس سونگون و موقعیت معدن در استان آذربایجان شرقی به ترتیب در شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۱-۵ نمایی از معدن مس سونگون

با توجه به مورفولوژی منطقه، تیپ ذخیره (پورفیری)، مشکلات عدیده زیرزمینی و همچنین نزدیکی ماده معدنی به سطح و امکان استحصال بخش عظیمی از کانسار به روش روباز، معدن مس سونگون بصورت روباز استخراج می‌شود که اهم پارامترهای فنی و اقتصادی در جدول (۱-۵) بیان شده است.



شکل ۵-۲ موقعیت معدن مس سونگون بر روی نقشه راه‌های ایران

جدول ۵-۱ پارامترهای فنی طراحی در معدن مس سونگون سال ۱۳۸۷

۶۸ درجه	شیب سینه کار پله های استخراجی	
۳۰ متر	عرض جاده های ارتباطی	
۸ تا ۱۰ درصد	شیب جاده های ارتباطی	
۹۵ درصد	بازیابی استخراج	
۵ درصد	اختلاط باطله و ماده معدنی	
$NX=176$ $NY=164$ $NZ=104$	ابعاد مدل	مشخصات مدل بلوکی
۴۳۶۹۴۸	تعداد بلوک	
$25 \times 25 \times 12/5$ مترمکعب	ابعاد هر بلوک	
۳۰ تا ۴۰ درجه	شیب کاواک نهایی	
۸۱ درصد	بازیابی کلی مس	
۰/۷ درصد	متوسط عیار خوراک کارخانه	
۳۰ درصد	عیار کنسانتره	
۷ میلیون تن برای ۵ سال اول و ۱۴ میلیون تن برای سال‌های بعد	نرخ تولید	
۳۶۵ روز	تعداد روزهای کاری معدن	
۳ شیفت	تعداد شیفت‌های کاری معدن	

۳-۵ سیستم ترابری معدن مس سونگون

پس از عملیات انفجار چال‌ها، بارگیری آنها عمدتاً توسط لودر، بیل مکانیکی و در مواردی نیز توسط شاول انجام می‌گیرد که شاول‌های موجود بیشتر برای بارگیری باطله استفاده می‌شود. بلدوزر نیز برای تمیز کردن اطراف شاول و سطح پله‌ها و دامپ‌ها استفاده می‌شود. مواد استخراجی توسط کامیون‌های ۳۲ و ۱۰۰ تنی به سنگ شکن یا دامپ‌های باطله حمل می‌شود.

در ناوگان حمل مواد در کل به تعداد ۴ دستگاه شاول، ۷ دستگاه بیل مکانیکی و ۱۸ دستگاه لودر در عملیات بارگیری، ۲۰ دستگاه دامپ‌تراک ۱۰۰ تنی و ۳۴ دستگاه دامپ‌تراک ۳۲ تنی در عملیات حمل سنگ فعالیت دارند. در شکل (۳-۵) عملیات بارگیری و حمل توسط بیل مکانیکی و دامپ‌تراک ۱۰۰ تنی دیده می‌شود.



شکل ۳-۵ بارگیری و حمل توسط بیل مکانیکی و دامپ‌تراک ۱۰۰ تنی

۴-۵ برداشت داده‌های عملیاتی مورد نیاز در حل مدل

پارامترها و داده‌های مورد نیاز برای حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک را می‌توان به دو دسته، داده‌های عملیاتی مدل و پارامترهای الگوریتم ژنتیک تقسیم‌بندی کرد. داده‌های عملیاتی که مربوط به ایستگاه‌های بارگیری، وضعیت ماشین‌آلات بارگیری و باربری، زمان‌های رفت و برگشت به نقاط تخلیه و ... می‌باشد، با مراجعه به معدن برداشت شدند. پس از برداشت داده‌های مورد نیاز، این مدل برای یک شیفت واقعی از معدن حل شد. برای شیفت مزبور که مربوط به تاریخ ۹۰/۶/۲۶ می‌باشد، ۹ ایستگاه بارگیری فعال بودند که ۴ ایستگاه بارگیری برای برداشت ماده معدنی و ۵ ایستگاه برای باطله مورد استفاده قرار می‌گرفت. مشخصات هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی و باطله به ترتیب در جدول (۵-۲) و (۵-۳) بیان شده است.

جدول ۲-۵ مشخصات عملیاتی ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی در شیفت مورد نظر

شماره ایستگاه بارگیری	۱	۲	۳	۴
تراز پله	۱۹۱۲/۵	۱۹۵۰	۱۹۶۲/۵	۲۱۰۰
مدل دستگاه بارگیری	KOM-600A	KOM-600A	NEWHOLLAND-270	KOM-600A, KOMPC-800
حد بالای تولید (ton/hr)	۶۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
حد پایین تولید (ton/hr)	۳۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۵۰۰
عیار هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی (%)	۱/۴۲	۰/۷۴	۰/۹۲	۰/۳۹

جدول ۳-۵ مشخصات عملیاتی ایستگاه‌های بارگیری باطله در شیفت مورد نظر

شماره ایستگاه بارگیری	۵	۶	۷	۸	۹
تراز	۱۹۳۷/۵	۲۲۳۷/۵	۲۲۶۲/۵	۲۲۸۷/۵	۲۳۱۲/۵
نوع دستگاه بارگیری	KOMPC-800	CAT-988B	CAT-988B	CAT-988B	KOMPC-1250, CAT-988B
حد بالای تولید (ton/hr)	۷۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۱۷۰۰
حد پایین تولید (ton/hr)	۵۰۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۱۰۰۰

البته ذکر این نکته لازم است که اطلاعات مربوط به حداکثر و حداقل تولید هر یک از ایستگاه‌های بارگیری، مربوط به میانگین حداکثر و حداقل تولید این نوع از ماشین‌آلات در معدن مس سونگون می‌باشد.

از دیگر داده‌های عملیاتی مورد نیاز برای حل مدل، فاصله هر یک از ایستگاه‌های بارگیری از هر کدام از نقاط تخلیه می‌باشد. با توجه به این که مختصات نقاط بارگیری و تخلیه برای تاریخ مورد نظر در روی نقشه توپوگرافی معدن موجود بود و همچنین راه‌های دسترسی بین ایستگاه‌های بارگیری و نقاط تخلیه بر روی نقشه توپوگرافی دقیقاً مشخص شده بود، این فاصله‌ها از روی نقشه توپوگرافی وضعیت فعلی معدن استخراج شدند. برای شیفت مورد نظر سه دامپ باطله فعال بودند و مواد باطله‌ای که از ایستگاه‌های بارگیری باطله حمل می‌شدند در این دامپ‌ها تخلیه می‌شدند. فاصله هر یک از ایستگاه‌های بارگیری از نقاط تخلیه به شرح جدول (۴-۵) بیان شده‌اند.

جدول ۴-۵ فاصله هر یک از ایستگاه‌های بارگیری از نقاط تخلیه بر حسب متر

شماره ایستگاه بارگیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۱۷۰۴	۱۳۰۷	۱۴۰۵	۲۱۲۰	۱۵۱۴	۴۸۵۰	۵۲۴۴	۶۳۴۷	۷۰۶۱
دامپ ۱۹۵۰	۱۲۰۰	۷۸۱	۱۰۸۱	۳۶۵۰	۹۲۹	۶۲۴۸	۶۷۰۲	۷۷۳۳	۸۴۵۷
دامپ ۲۲۵۰	۷۲۰۸	۶۸۰۸	۶۹۰۶	۴۵۳۰	۷۰۱۵	۱۷۰۰	۲۰۶۰	۲۸۷۰	۳۵۶۰
دامپ ۲۲۷۵	۸۵۹۵	۸۱۹۳	۸۲۹۱	۴۶۹۳	۸۴۰۰	۴۰۸۲	۲۲۵۰	۱۴۸۰	۱۸۲۰

زمان رفت و برگشت کامیون‌ها بین نقاط بارگیری و تخلیه از دیگر داده‌های عملیاتی می‌باشد که در حل مدل مورد نیاز است. با توجه به این که نوعی تخصیص ثابت در معدن سونگون حاکم است؛ بنابراین در همه مسیرهای ممکن رفت و آمد صورت نمی‌گیرد. به عنوان مثال کامیونی که بار خود را در نقطه تخلیه ماده معدنی خالی می‌کند به ایستگاه‌های بارگیری باطله تخصیص داده نمی‌شود، در حالی که از نقطه نظر تخصیص انعطاف‌پذیر کامیونی که بار خود را در سنگ‌شکن تخلیه می‌کند می‌تواند به نقاط

بارگیری باطله نیز تخصیص داده شود و با توجه به این نکته نیاز بود در همه مسیرهای ممکن زمان‌سنجی صورت گیرد. به همین منظور ابتدا بین ایستگاه‌های بارگیری و نقاط تخلیه که کامیون‌ها در آن‌ها رفت و آمد داشتند زمان‌های رفت و برگشت به طور مستقیم در چند روز متوالی برداشت شدند و برای مسیرهای دیگر که کامیونی در آن مسیر تردد نداشت از سرعت میانگین کامیون‌ها استفاده شده و با توجه به فاصله‌های این ایستگاه‌های بارگیری از نقاط تخلیه زمان‌های رفت و برگشت برای این مسیرها محاسبه شد. زمان‌های رفت و برگشت بین مسیرهای ممکن در جداول (۵-۵)، (۵-۶)، (۵-۷) و (۵-۸) برای انواع کامیون‌ها بیان شده است.

جدول ۵-۵ متوسط زمان رفت کامیون‌های ۳۲ تنی از نقاط بارگیری به نقاط تخلیه بر حسب دقیقه

نقاط بارگیری	نقاط تخلیه								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۶/۸۲	۵/۲۳	۵/۶۲	۵/۷۸	--	--	--	--	--
دامپ ۱۹۵۰	--	--	--	--	۳/۷۲	۱۷/۰۴	۱۸/۲۸	۲۱/۰۹	۲۳/۰۶
دامپ ۲۲۵۰	--	--	--	--	۲۸/۰۶	۶/۸	۵/۶۲	۷/۸۳	۹/۷۱
دامپ ۲۲۷۵	--	--	--	--	۳۳/۶	۱۶/۳۳	۹	۴/۰۴	۴/۹۶

جدول ۵-۶ متوسط زمان رفت کامیون‌های ۱۰۰ تنی از نقاط بارگیری به نقاط تخلیه بر حسب دقیقه

نقاط بارگیری	نقاط تخلیه								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۷/۸۶	۶/۰۳	۶/۴۸	۶/۳۶	--	--	--	--	--
دامپ ۱۹۵۰	--	--	--	--	۴/۲۸	۱۸/۷۴	۲۰/۱۱	۲۳/۲	۲۵/۳۷
دامپ ۲۲۵۰	--	--	--	--	۳۲/۳۷	۷/۸۴	۶/۱۸	۸/۶۱	۱۰/۶۸
دامپ ۲۲۷۵	--	--	--	--	۳۸/۷۶	۱۸/۸۴	۱۰/۳۸	۴/۴۴	۵/۴۶

جدول ۵-۷ متوسط زمان برگشت کامیون‌های ۳۲ تنی از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری بر حسب دقیقه

نقاط بارگیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۴/۴۴	۳/۴۱	۳/۶۷	۵/۷۸	۳/۹۵	۱۳/۲۳	۱۴/۳	۱۷/۳۱	۱۹/۲۶
دامپ ۱۹۵۰	۳/۱۳	۲/۰۴	۳/۸۳	۹/۹۵	۲/۴۲	۱۷/۰۴	۱۸/۲۸	۲۱/۰۹	۲۳/۰۶
دامپ ۲۲۵۰	۱۸/۸	۱۷/۷۶	۱۸/۰۲	۱۱/۸۲	۱۸/۳	۴/۴۳	۵/۶۲	۷/۸۳	۹/۷۱
دامپ ۲۲۷۵	۲۲/۴۲	۲۱/۳۷	۲۱/۶۳	۱۲/۲۴	۲۱/۹۱	۱۰/۶۵	۵/۸۷	۴/۰۴	۴/۹۶

جدول ۵-۸ متوسط زمان برگشت کامیون‌های ۱۰۰ تنی از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری بر حسب دقیقه

نقاط بارگیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۴/۸۷	۳/۷۳	۴/۰۱	۶/۳۶	۴/۳۳	۱۴/۵۵	۱۵/۷۳	۱۹/۰۴	۲۱/۱۸
دامپ ۱۹۵۰	۳/۴۳	۲/۲۳	۳/۲۴	۱۰/۹۵	۲/۶۵	۱۸/۷۴	۲۰/۱۱	۲۳/۲۰	۲۵/۳۷
دامپ ۲۲۵۰	۲۰/۵۹	۱۹/۴۵	۱۹/۷۳	۱۲/۹۴	۲۰/۰۴	۴/۸۶	۶/۱۸	۸/۶۱	۱۰/۶۸
دامپ ۲۲۷۵	۲۴/۵۶	۲۳/۴۱	۲۳/۶۹	۱۳/۴۱	۲۴	۱۱/۶۶	۶/۴۳	۴/۴۴	۵/۴۶

از دیگر داده‌های مورد نیاز در حل مدل، مشخصات عملیاتی کامیون‌های فعال در شیفت مورد نظر می‌باشد. کامیون‌های مورد استفاده در معدن مس سونگون، کامیون‌های ۳۲ تنی و ۱۰۰ تنی ساخت شرکت کوماتسو می‌باشد که مشخصات این کامیون‌ها مطابق جدول (۵-۹) می‌باشد.

جدول ۵-۹ مشخصات عملیاتی کامیون‌های فعال در هنگام اجرای مدل

نوع کامیون	میزان حمل ماده معدنی (تن)	میزان حمل باطله (تن)	تعداد کامیون‌های فعال	مدل	وزن خالی کامیون (تن)
۳۲ تنی	۲۶	۲۴	۲۵	HD-325 کوماتسو	۳۳
۱۰۰ تنی	۷۲	۶۵	۱۰	HD-785 کوماتسو	۷۲

متوسط زمان بارگیری، متوسط انتظار کامیون‌ها در هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری و زمان‌های تخلیه در هر کدام از نقاط تخلیه از دیگر داده‌های مورد نیاز در حل مدل می‌باشد که این مقادیر برای انواع

کامیون‌ها زمان‌سنجی گردید. میانگین این مقادیر برای انواع کامیون‌ها به صورت جداول (۵-۱۰) و (۵-۱۱) می‌باشد.

جدول ۵-۱۰ متوسط زمان بارگیری و انتظار برای بارگیری در هر ایستگاه بر حسب دقیقه

شماره ایستگاه بارگیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متوسط زمان بارگیری کامیون‌های ۳۲ تنی	۲	۲	۲/۱۵	۱	۱/۹	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۰/۸۱
متوسط زمان بارگیری کامیون‌های ۱۰۰ تنی	۴/۲۵	۴/۲۵	۵/۳۵	۲/۱	۳/۸۳	۵	۵	۵	۱/۸
متوسط زمان انتظار کامیون در هر ایستگاه بارگیری	۰/۳۵	۱/۳	۰/۷	-	۱	-	۱	-	-

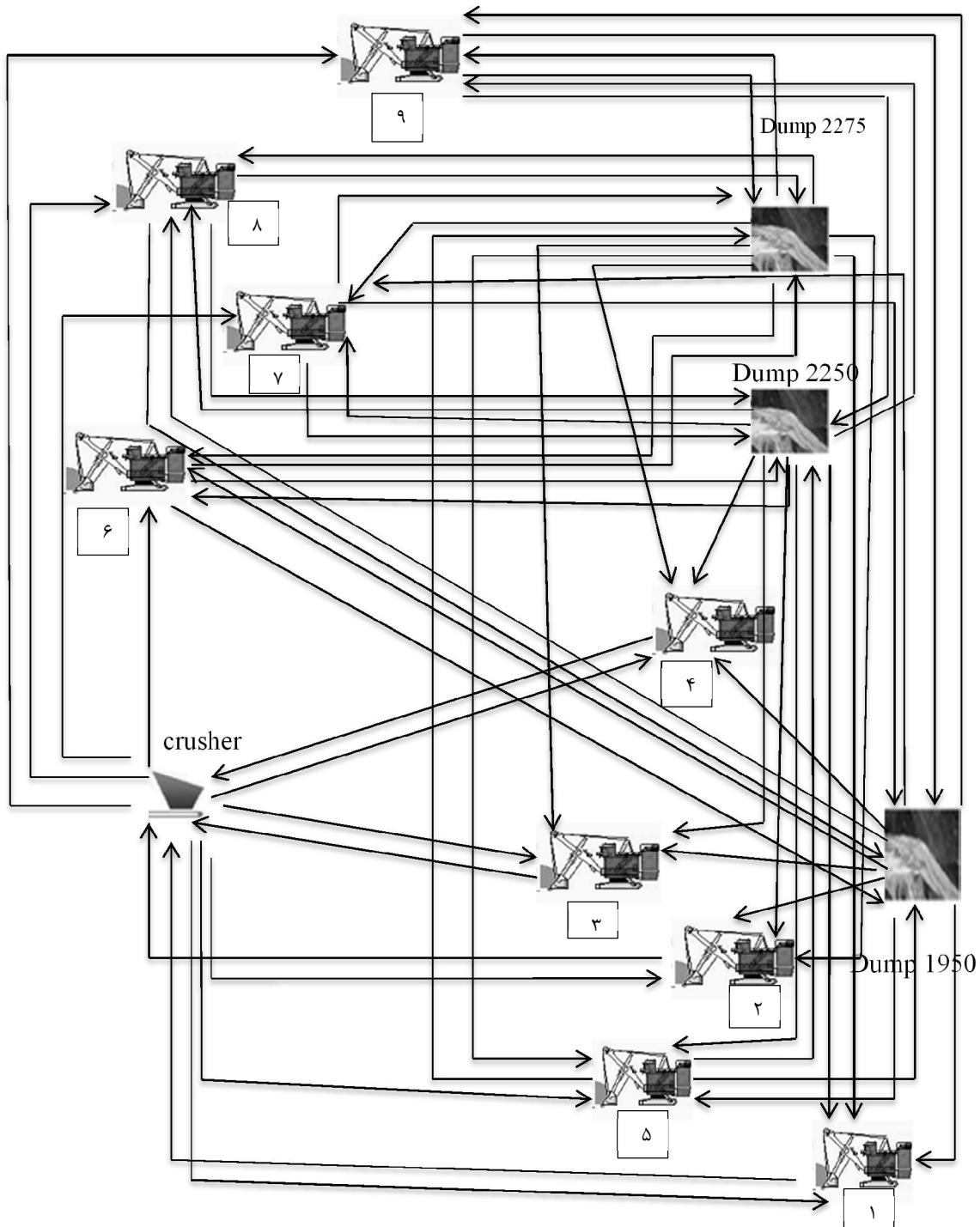
جدول ۵-۱۱ متوسط زمان تخلیه هر یک از انواع کامیون‌ها در هر یک از دامپ بر حسب دقیقه

نوع کامیون	نقاط تخلیه	۳۲ تنی	۱۰۰ تنی
سنگ‌شکن	۱/۰۸	۱/۳۳	
دامپ ۱۹۵۰	۰/۸۵	۰/۹۲	
دامپ ۲۲۵۰	۰/۸۵	۰/۹۲	
دامپ ۲۲۷۵	۰/۸۵	۰/۹۲	

در معدن سونگون عیار مواد معدنی که به سنگ‌شکن فرستاده می‌شود بایستی در بازه ۰/۶۸ درصد تا ۰/۷۸ درصد باشد. طبق برنامه‌ریزی صورت گرفته، در شیف‌ت اول به طور میانگین بایستی حداقل ۷۰۰۰ تن ماده معدنی و ۲۴۵۰۰ تن باطله برداشت شود. حداکثر ظرفیت سنگ‌شکن ۲۲۰۰ تن در ساعت و حداکثر پذیرش دامپ‌های باطله در ساعت ۱۰۰۰۰۰ تن می‌باشد. در ادامه نحوه حل مدل برای معدن سونگون با الگوریتم ژنتیک بیان شده است.

۵-۵ حل مدل تخصیص و گسیل در معدن مس سونگون

همان طور که در فصل چهارم بیان گردید برای حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک باید کروموزوم مناسب برای مسأله مدل‌سازی شود. برای مدل کردن کروموزوم بایستی مسیرهای ممکن ترابری در معدن مس سونگون به درستی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای شیفت مورد نظر در معدن مس سونگون با توجه به این که کامیون‌هایی که از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی بارگیری می‌کنند فقط مجاز به حرکت در مسیر سنگ‌شکن هستند، بنابراین از هر کدام از این ایستگاه‌ها فقط یک مسیر حرکت وجود دارد که بایستی نرخ تردد در آن برای انواع کامیون‌ها محاسبه شود. با توجه به این که هر دو نوع از کامیون‌ها با ایستگاه‌های بارگیری سازگار هستند، بنابراین برای مسیر رفت از هر کدام از این ایستگاه‌های بارگیری به سمت سنگ‌شکن بایستی دو نرخ تردد مدل‌سازی شود که نرخ تردد اول برای کامیون ۳۲ تنی و نرخ تردد دوم برای کامیون ۱۰۰ تنی می‌باشد. بنابراین در مجموع با وجود ۴ ایستگاه بارگیری ماده معدنی، برای مسیر رفت از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی هشت نرخ تردد بایستی محاسبه شود. برای مسیرهای رفت از ایستگاه‌های بارگیری باطله، با توجه به این که سه دامپ باطله برای تخلیه مواد باطله موجود است، کامیون‌هایی که از این ایستگاه‌ها بارگیری می‌کنند می‌توانند به هر کدام از نقاط تخلیه باطله حرکت کنند و با توجه به سازگاری هر یک از انواع کامیون‌ها با این ایستگاه‌های بارگیری، هر دو نوع از کامیون‌ها می‌توانند از این ایستگاه‌ها بارگیری کنند. بنابراین از هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری باطله بایستی سه نرخ تردد برای هر نوع از کامیون‌ها محاسبه شود که شامل نرخ تردد از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری باطله به دامپ‌های ۱۹۵۰، ۲۲۵۰ و ۲۲۷۵ تنی می‌باشد. بنابراین در مجموع از هر ایستگاه بارگیری باطله شش نرخ تردد بایستی مدل‌سازی شود که سه نرخ تردد برای کامیون‌های ۳۲ تنی و سه نرخ تردد برای کامیون‌های ۱۰۰ تنی می‌باشد. مسیرهای ممکن ترابری در معدن مس سونگون در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ مسیرهای ممکن ترابری در معدن مس سونگون

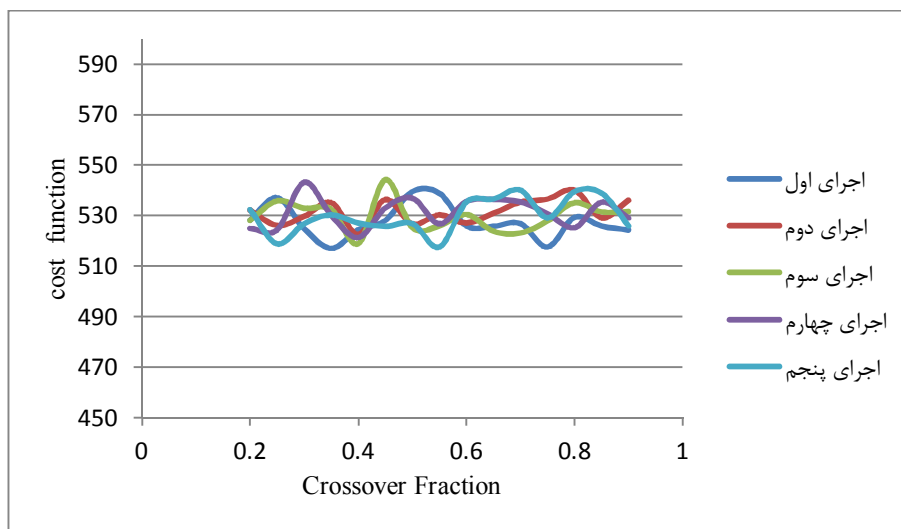
برای نرخ‌های تردد در مسیرهای برگشت از نقاط تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری، با توجه به سازگار بودن هر یک از انواع کامیون‌ها با هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری، کامیونی که بار خود را خالی کرد می‌تواند به هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری گسیل شود، بنابراین از هر کدام از نقاط تخلیه بایستی ۹ نرخ تردد برای هر کدام از انواع کامیون‌های در نظر گرفته شود؛ پس در مجموع ۱۸ نرخ تردد بایستی از هر کدام از نقاط تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری در نظر گرفته شود. با این توضیح کرموزوم مورد نظر برای حل این مدل با الگوریتم ژنتیک آرایه‌ای یک بعدی شامل ۱۱۰ ژن می‌باشد که ۳۸ ژن اول این آرایه متناظر با نرخ‌های تردد در مسیرهای رفت و ۷۲ ژن بعدی آرایه متناظر با نرخ‌های تردد در مسیرهای برگشت در نظر گرفته شده است.

بعد از مدل‌سازی کرموزوم به عنوان راه‌حل پتانسیل مسأله، فرآیند حل ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است که برای حل مدل هم به صورت مستقل کد نویسی صورت گرفت و هم ترکیبی از کد نویسی و دستورات آماده الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار MATLAB بکار گرفته شد و با توجه به این که در روش دوم جواب‌های حاصل شده جواب‌های بهتری نسبت به روش اول بودند در اینجا نیز نتایج روش دوم بیان شده است. برای این منظور تابع هدف و محدودیت‌ها در یک M-file نوشته شدند و با استفاده از دستور GA (Toolbox الگوریتم ژنتیک) در MATLAB فراخوانی شدند که نتایج حاصل از حل مدل بعد از تحلیل پارامتری الگوریتم ژنتیک بیان می‌شود. برای این که الگوریتم ژنتیک با راندمان بهتری به جستجو بپردازد باید پارامترهای الگوریتم ژنتیک به طور صحیح انتخاب شوند. برای تعیین مقادیر مناسب این پارامترها، لازم است که تحلیل پارامتری انجام شود [۲۶].

۵-۵-۱ تحلیل پارامتری الگوریتم ژنتیک

با توجه به این که در حل مدل از جهش تطبیقی جهت‌دار استفاده شده است ذکر این نکته لازم است که، وقتی از جهش تطبیقی جهت‌دار استفاده می‌شود نرخ جهش خیلی بالا انتخاب می‌شود (بر

خلاف جهش‌های رایج) و در هر نسل نسبت به نسل قبلی این نرخ به صورت تصادفی تغییر می‌کند. تعداد جهت‌هایی که جهش در آن جهت‌ها در روش جهش تطبیقی انتخاب می‌شود حداقل دو برابر تعداد متغیرها بوده و این تعداد و جهت‌ها نیز در هر نسل نسبت به نسل قبلی تغییر می‌کند [۲۰]. با توجه به این که همه این مقادیر به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، تحلیل پارامتری بر روی این نوع از جهش انجام نمی‌گیرد و پارامترهایی که تحلیل پارامتری بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد، میزان جمعیت اولیه و احتمال تبادل ژنی می‌باشند. بدین منظور در ابتدا احتمال تبادل ژنی $0/8$ و میزان جمعیت اولیه 100 عضو در نظر گرفته شده است. پس از انتخاب مقادیر اولیه برای پارامترها، هر بار یک پارامتر به صورت متغیر و پارامترهای دیگر به صورت ثابت فرض شده‌اند. محدوده تغییرات احتمال تبادل ژنی از $0/2$ تا $0/9$ با گام $0/05$ و اندازه جمعیت از 40 تا 200 عضو با گام 20 در نظر گرفته شده است. به ازای تغییر هر یک از پارامترها، 5 بار برنامه اجرا شده است آنگاه به ازای هر پارامتر، یک دیاگرام شامل 5 منحنی رسم گردید. با مشاهده دیاگرام‌ها می‌توان تا حدودی در ارتباط با هر پارامتر قضاوت کرد. با داشتن مقادیر مناسب این پارامترها می‌توان در تحلیل‌های جدید، بدون تحلیل پارامتری و با انتخاب مناسب این پارامترها به تحلیل مناسب مسأله پرداخت. برای تحلیل پارامتری نسبت به تبادل ژنی، جمعیت اولیه 100 عضو در نظر گرفته شده است و برای اتمام بهینه‌سازی، اگر به تعداد 200 نسل بدون بهبود بهترین کروموزوم بهینه‌سازی ادامه یابد برنامه به اتمام می‌رسد. نتایج این 5 اجرا به ازای مقادیر مختلف تبادل ژنی در شکل (۵-۵) رسم شده است. همان طور که از شکل (۵-۵) مشخص است به ازای مقادیر مختلف احتمال تبادل ژنی، تغییر چندانی در مقدار تابع هدف صورت نگرفته است و این نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک برای این تابع هدف و محدودیت‌های مدل‌سازی شده می‌باشد.



شکل ۵-۵ تحلیل پارامتری نسبت به احتمال تبادل ژنی

نتایج بهترین مقدار تابع هدف برای ۵ اجرای فوق به ازای تبادل ژنیهای مختلف در جدول (۵-۱۲)

بیان شده است.

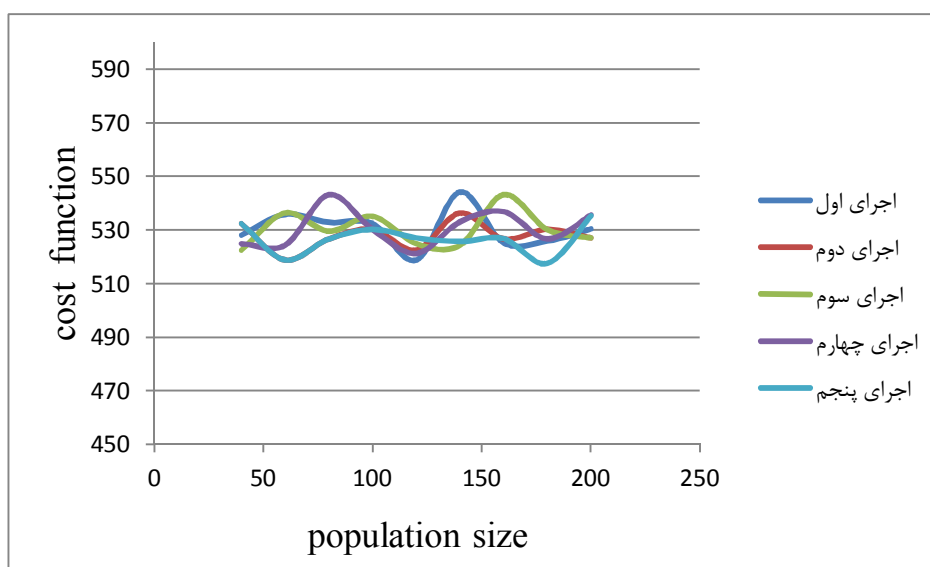
جدول ۵-۱۲ نتایج حاصل از تحلیل پارامتری نسبت به تبادل ژنی

مقدار تابع هدف (تن.کیلومتر بر دقیقه)	احتمال تبادل ژنی	ردیف	مقدار تابع هدف (تن.کیلومتر بر دقیقه)	احتمال تبادل ژنی	ردیف
۵۲۵/۹	۰/۶	۹	۵۲۴/۹	۰/۲	۱
۵۲۳/۸	۰/۶۵	۱۰	۵۱۸/۸	۰/۲۵	۲
۵۲۳/۰.۸	۰/۷	۱۱	۵۲۴/۸	۰/۳	۳
۵۱۷/۵	۰/۷۵	۱۲	۵۱۶/۹	۰/۳۵	۴
۵۲۵/۲	۰/۸	۱۳	۵۱۸/۸	۰/۴	۵
۵۲۵/۸	۰/۸۵	۱۴	۵۲۵/۷	۰/۴۵	۶
۵۲۴/۲	۰/۹	۱۵	۵۲۵/۲	۰/۵	۷
		۱۶	۵۱۷/۵	۰/۵۵	۸

برای انجام تحلیل پارامتری نسبت به اندازه جمعیت اولیه با توجه به این که تعداد محدودیت‌ها و

متغیرهای مسأله زیاد می‌باشد به همین دلیل معمولاً در اجراهای با جمعیت‌های کمتر از ۵۰ عضو احتمال

اینکه یک جواب قابل قبول برای مسأله حاصل شود به گونه‌ای که تمام محدودیت‌های مسأله رعایت شود کاهش می‌یافت. به همین منظور اندازه جمعیت اولیه بیشتر از ۵۰ عضو انتخاب شده است. برای انجام تحلیل پارامتری نسبت به اندازه جمعیت با توجه به این که احتمال تبادل ژنی تاثیر چندانی در مقدار تابع هدف ندارد به ازای یک تبادل ژنی ثابت (در اینجا ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است) اندازه جمعیت از ۴۰ عضو تا ۲۰۰ عضو با گام ۲۰ عضو در نظر گرفته شده و در هر گام برنامه ۵ بار اجرا شده است. نتایج تحلیل پارامتری نسبت به اندازه جمعیت اولیه در شکل (۵-۶) بیان شده است.



شکل ۵-۶ تحلیل پارامتری نسبت به اندازه جمعیت

همان طور که در شکل (۵-۶) نشان داده شده است معمولاً اندازه جمعیت بین ۵۰ تا ۶۰ عضو برای مدل کردن مسأله کافی می‌باشد. جمعیت‌های کمتر از این مقادیر به دلیل این که در بعضی از اجراها محدودیت‌ها به طور کامل ارضا نمی‌شدند مناسب نیستند.

۵-۵-۲ نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک

برای بهترین اجرای حاصل شده با مقدار تابع هدف ۵۱۷ واحد، نرخ تردد حاصل بر حسب تعداد کامیون بر دقیقه به ترتیب از ایستگاه‌های بارگیری به سمت نقاط تخلیه و نرخ گسیل از نقاط تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری مطابق جدول (۵-۱۳) و (۵-۱۴) می‌باشد.

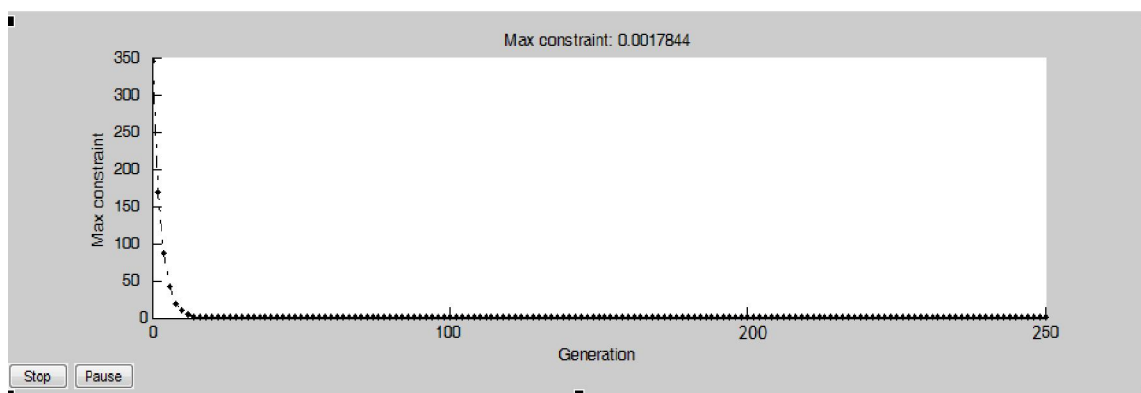
جدول ۵-۱۳ نرخ تردد کامیون در مسیر رفت از ایستگاه‌های بارگیری به نقاط تخلیه

مبدأ	مقصد	نرخ تردد کامیون‌های ۳۲ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)	نرخ تردد کامیون‌های ۱۰۰ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)
ایستگاه بارگیری ۱	سنگ شکن	۰/۱۶	۰/۰۱
ایستگاه بارگیری ۲	سنگ شکن	۰/۱۸۸	۰/۰۰۱
ایستگاه بارگیری ۳	سنگ شکن	۰/۱۶	—
ایستگاه بارگیری ۴	سنگ شکن	۰/۲۶۶	۰/۰۵۹
ایستگاه بارگیری ۵	دامپ باطله ۱۹۵۰	۰/۴۸	۰/۰۱۴
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۷۵	—	—
ایستگاه بارگیری ۶	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	۰/۴۶۷	—
	دامپ باطله ۲۲۷۵	—	—
ایستگاه بارگیری ۷	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	۰/۱۸
	دامپ باطله ۲۲۷۵	—	—
ایستگاه بارگیری ۸	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۷۵	۰/۰۲۶	۰/۱۷
ایستگاه بارگیری ۹	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۷۵	۰/۲۶	۰/۱۹

جدول ۵-۱۴ نرخ گسیل کامیون در مسیر برگشت از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری

مبدأ	مقصد	نرخ تردد کامیون‌های ۳۲ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)	نرخ تردد کامیون‌های ۱۰۰ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)
سنگ‌شکن	ایستگاه بارگیری ۱	۰/۰۳۹	۰/۰۱
	ایستگاه بارگیری ۲	۰/۱۸۸	۰/۰۰۱
	ایستگاه بارگیری ۳	۰/۱۶	—
	ایستگاه بارگیری ۴	۰/۲۶۶	۰/۰۵۹
	ایستگاه بارگیری ۵	۰/۱۲	—
	ایستگاه بارگیری ۶	—	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	—
	ایستگاه بارگیری ۸	—	—
	ایستگاه بارگیری ۹	—	—
دامپ باطله ۱۹۵۰	ایستگاه بارگیری ۱	۰/۱۲	—
	ایستگاه بارگیری ۲	—	—
	ایستگاه بارگیری ۳	—	—
	ایستگاه بارگیری ۴	—	—
	ایستگاه بارگیری ۵	۰/۳۶	۰/۰۱۴
	ایستگاه بارگیری ۶	—	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	—
	ایستگاه بارگیری ۸	—	—
	ایستگاه بارگیری ۹	—	—
دامپ باطله ۲۲۵۰	ایستگاه بارگیری ۱	—	—
	ایستگاه بارگیری ۲	—	—
	ایستگاه بارگیری ۳	—	—
	ایستگاه بارگیری ۴	—	—
	ایستگاه بارگیری ۵	—	—
	ایستگاه بارگیری ۶	۰/۴۶۷	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	۰/۱۸
	ایستگاه بارگیری ۸	—	—
	ایستگاه بارگیری ۹	—	—
دامپ باطله ۲۲۷۵	ایستگاه بارگیری ۱	—	—
	ایستگاه بارگیری ۲	—	—
	ایستگاه بارگیری ۳	—	—
	ایستگاه بارگیری ۴	—	—
	ایستگاه بارگیری ۵	—	—
	ایستگاه بارگیری ۶	—	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	—
	ایستگاه بارگیری ۸	۰/۰۲۶	۰/۱۷
	ایستگاه بارگیری ۹	۰/۲۶۲	۰/۱۹

مسیرهایی که در آن‌ها کامیون تردد ندارد با خط تیره بیان شده‌اند. نرخ‌های تردد بیان شده در جداول (۵-۱۳) و (۵-۱۴) تمامی محدودیت‌های مدل تخصیص و گسیل را نیز برآورده ساخته است. با توجه به این که برای حل مدل تمامی محدودیت‌ها به صورت کوچکتر مساوی با صفر در نظر گرفته شده‌اند. با رسم حداکثر مقدار نقض محدودیت در طی اجرای برنامه برای نسل‌های مختلف که در شکل (۵-۷) نشان داده شده است مشاهده می‌شود که برای نسل‌های اول میزان نقض محدودیت بیشتر و به تدریج برای نسل‌های بعدی که جمعیت‌های بهتری ایجاد شده است از میزان نقض محدودیت‌ها کاسته شده و در نهایت تقریباً به صفر میل می‌کند.



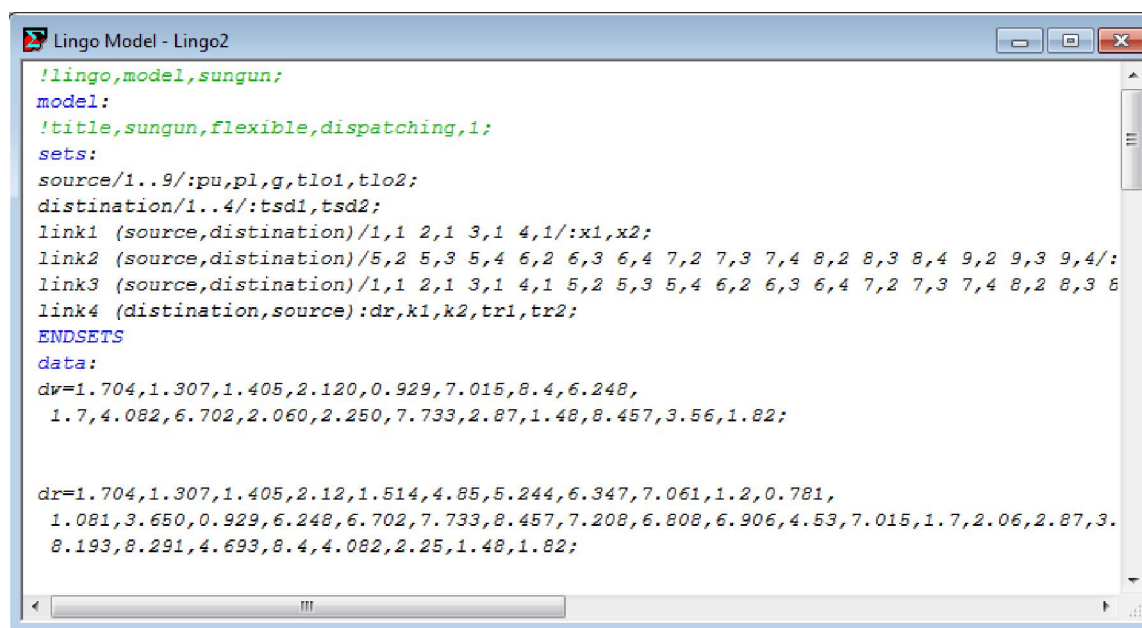
شکل ۵-۷ نحوه ارضای محدودیت‌ها

۵-۵-۳ ارزیابی نتایج حاصل از حل مدل با الگوریتم ژنتیک

برای ارزیابی نتایج حاصل، این مدل با نرم‌افزار LINGO نیز حل گردید. نرم‌افزار LINGO برنامه‌ای برای مدل‌سازی می‌باشد که ایجاد محدودیت‌ها و توابع هدف را به راحتی برای کاربر فراهم می‌سازد. این

نرم‌افزار ابتدا در سال ۱۹۸۶ توسط لینوس شریج^۱ با نام LINDO توسعه یافت و برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی، غیر خطی و عدد صحیح مورد استفاده قرار گرفت [۳۸]

وارد کردن یک مدل در LINGO، شبیه تایپ کردن در یک محیط پردازش‌گر متنی تحت ویندوز است؛ وقتی در یک مدل داده تایپ می‌شود، تقریباً باید آنچه را که به صورت دستی نوشته شده است، وارد مدل شود. کاربر می‌تواند اطلاعات ورودی خود را در پنجره داخلی که تحت عنوان Lingo Model است، وارد کند [۳۸]. نمایی از این پنجره در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.



```

!lingo,model,sungun;
model:
!title,sungun,flexible,dispatching,1;
sets:
source/1..9/:pu,pl,g,tlo1,tlo2;
distination/1..4/:tsd1,tsd2;
link1 (source,distination)/1,1 2,1 3,1 4,1/:x1,x2;
link2 (source,distination)/5,2 5,3 5,4 6,2 6,3 6,4 7,2 7,3 7,4 8,2 8,3 8,4 9,2 9,3 9,4/:
link3 (source,distination)/1,1 2,1 3,1 4,1 5,2 5,3 5,4 6,2 6,3 6,4 7,2 7,3 7,4 8,2 8,3 8,4/:
link4 (distination,source):dr,k1,k2,tr1,tr2;
ENDSETS
data:
dw=1.704,1.307,1.405,2.120,0.929,7.015,8.4,6.248,
1.7,4.082,6.702,2.060,2.250,7.733,2.87,1.48,8.457,3.56,1.82;

dr=1.704,1.307,1.405,2.12,1.514,4.85,5.244,6.347,7.061,1.2,0.781,
1.081,3.650,0.929,6.248,6.702,7.733,8.457,7.208,6.808,6.906,4.53,7.015,1.7,2.06,2.87,3.
8.193,8.291,4.693,8.4,4.082,2.25,1.48,1.82;

```

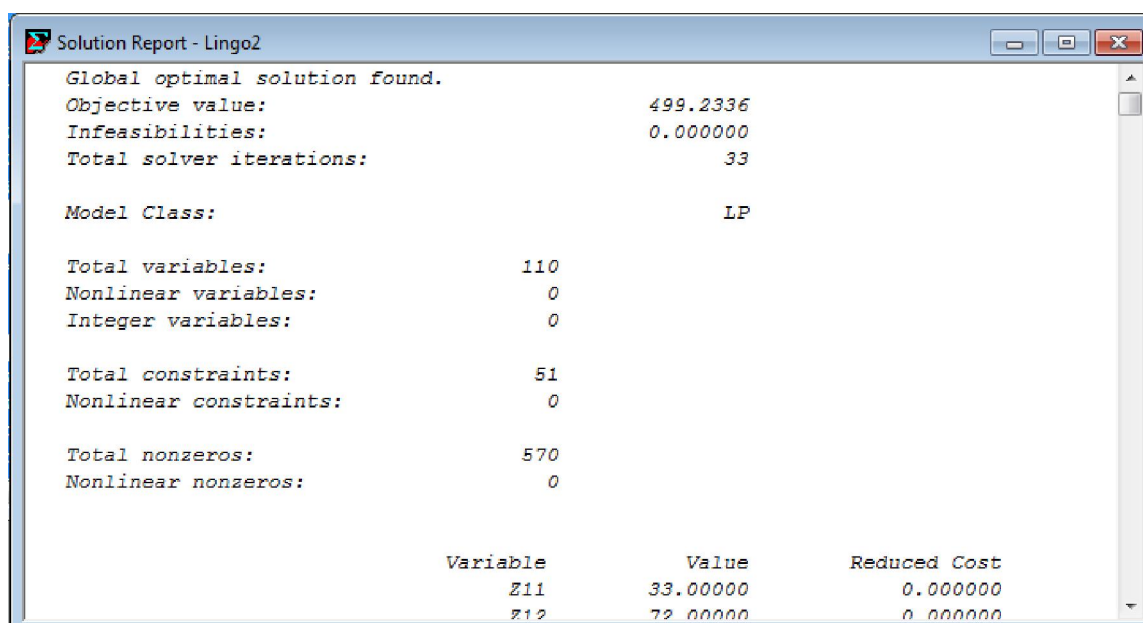
شکل ۵-۸ نمایی از پنجره برنامه‌نویسی نرم‌افزار LINGO

LINGO زبان برنامه‌نویسی خاص خود را دارد و همانند زبان‌های برنامه‌نویسی دیگر، LINGO نیز دارای اصول و قواعد نگارشی و منطقی در برنامه‌نویسی می‌باشد. عناصر مورد نیاز برای حل مدل در نرم‌افزار LINGO تابع هدف، متغیرها و محدودیت‌ها است. یک برنامه در LINGO با کلمه Model آغاز و

^۱ Linus Schrage

به کلمه End ختم می‌شود و معمولاً از چهار بخش؛ مجموعه‌ها، بخش داده‌ها، تابع هدف و بخش محدودیت‌ها تشکیل می‌شود [۳۸].

مجموعه‌ها در LINGO در واقع قالبی برای تعریف متغیرهای برنامه می‌باشند (این متغیرها می‌توانند متغیر تصمیم‌گیری و یا پارامترهای عددی مدل باشند). در LINGO دو نوع مجموعه؛ مجموعه‌های مستقل^۱ و مجموعه‌های وارث^۲ وجود دارد. مجموعه‌های مستقل برای تعریف متغیرهای آرایه‌ای یک بعدی و مجموعه‌های وارث برای تعریف آرایه‌های چند بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در خروجی نرم‌افزار LINGO مقدار تابع هدف، گزارش مقادیر کلیه پارامترها و متغیرها نشان داده می‌شود که در شکل ۵-۹ صفحه خروجی این نرم‌افزار نشان داده شده است.



The screenshot shows a window titled "Solution Report - Lingo2" with the following text:

```

Global optimal solution found.
Objective value:           499.2336
Infeasibilities:          0.000000
Total solver iterations:   33

Model Class:                LP

Total variables:           110
Nonlinear variables:       0
Integer variables:         0

Total constraints:         51
Nonlinear constraints:     0

Total nonzeros:           570
Nonlinear nonzeros:       0
  
```

Variable	Value	Reduced Cost
Z11	33.00000	0.000000
Z12	72.00000	0.000000

شکل ۵-۹ نمایی از پنجره خروجی نرم‌افزار LINGO

¹ Primitive Sets

² Derived Sets

با استفاده از حل مدل با این نرم‌افزار، مقدار بهینه تابع هدف ۴۹۹ واحد حاصل شد که نتیجه حاصل شده از الگوریتم ژنتیک با مقدار تابع هدف ۵۱۷ واحد، تقریباً خیلی نزدیک به این مقدار بهینه می‌باشد. نرخ‌های تردد حاصل شده در هر مسیر با استفاده از نرم‌افزار LINGO به ترتیب برای مسیرهای رفت و برگشت مطابق جداول (۵-۱۵) و (۵-۱۶) می‌باشد.

جدول ۵-۱۵ نرخ تردد کامیون در مسیر رفت از ایستگاه‌های بارگیری به نقاط تخلیه با استفاده از حل مدل با نرم‌افزار LINGO

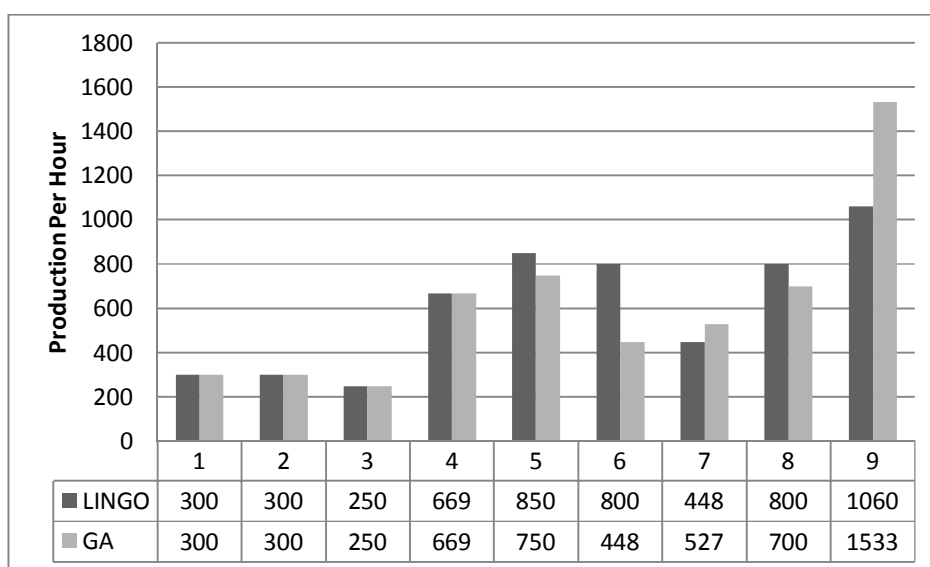
مبدأ	مقصد	نرخ تردد کامیون‌های ۳۲ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)	نرخ تردد کامیون‌های ۱۰۰ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)
ایستگاه بارگیری ۱	سنگ شکن	۰/۱۴۹	۰/۰۱۵
ایستگاه بارگیری ۲	سنگ شکن	۰/۱۹۲	—
ایستگاه بارگیری ۳	سنگ شکن	۰/۱۶	—
ایستگاه بارگیری ۴	سنگ شکن	—	۰/۱۵۵
ایستگاه بارگیری ۵	دامپ باطله ۱۹۵۰	۰/۵۹	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۷۵	—	—
ایستگاه بارگیری ۶	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	۰/۵۵۵	—
ایستگاه بارگیری ۷	دامپ باطله ۲۲۷۵	—	—
	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	۰/۱۱۵
ایستگاه بارگیری ۸	دامپ باطله ۲۲۷۵	—	—
	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	—
ایستگاه بارگیری ۹	دامپ باطله ۲۲۷۵	۰/۲	۰/۱۳
	دامپ باطله ۱۹۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۵۰	—	—
	دامپ باطله ۲۲۷۵	—	۰/۲۷۲

جدول ۵-۱۶ نرخ گسیل کامیون از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری با استفاده از حل مدل با نرم‌افزار LINGO

مبدأ	مقصد	نرخ تردد کامیون‌های ۳۲ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)	نرخ تردد کامیون‌های ۱۰۰ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)
سنگ‌شکن	ایستگاه بارگیری ۱	—	۰/۰۱۵
	ایستگاه بارگیری ۲	—	—
	ایستگاه بارگیری ۳	۰/۱۶	—
	ایستگاه بارگیری ۴	—	۰/۱۵۵
	ایستگاه بارگیری ۵	۰/۳۴	—
	ایستگاه بارگیری ۶	—	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	—
	ایستگاه بارگیری ۸	—	—
	ایستگاه بارگیری ۹	—	—
دامپ باطله ۱۹۵۰	ایستگاه بارگیری ۱	۰/۱۵	—
	ایستگاه بارگیری ۲	۰/۱۹۲	—
	ایستگاه بارگیری ۳	—	—
	ایستگاه بارگیری ۴	—	—
	ایستگاه بارگیری ۵	۰/۲۴۸	—
	ایستگاه بارگیری ۶	—	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	—
	ایستگاه بارگیری ۸	—	—
	ایستگاه بارگیری ۹	—	—
دامپ باطله ۲۲۵۰	ایستگاه بارگیری ۱	—	—
	ایستگاه بارگیری ۲	—	—
	ایستگاه بارگیری ۳	—	—
	ایستگاه بارگیری ۴	—	—
	ایستگاه بارگیری ۵	—	—
	ایستگاه بارگیری ۶	۰/۵۵۵	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	۰/۱۱۵
	ایستگاه بارگیری ۸	—	—
	ایستگاه بارگیری ۹	—	—
دامپ باطله ۲۲۷۵	ایستگاه بارگیری ۱	—	—
	ایستگاه بارگیری ۲	—	—
	ایستگاه بارگیری ۳	—	—
	ایستگاه بارگیری ۴	—	—
	ایستگاه بارگیری ۵	—	—
	ایستگاه بارگیری ۶	—	—
	ایستگاه بارگیری ۷	—	—
	ایستگاه بارگیری ۸	۰/۲	۰/۱۳
	ایستگاه بارگیری ۹	۰/۲۶۲	۰/۲۷

۴-۵-۵ مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و LINGO

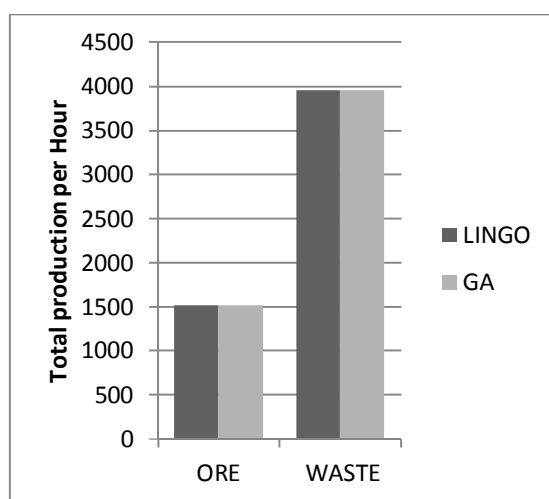
با توجه به جداول (۱۳-۵)، (۱۴-۵)، (۱۵-۵) و (۱۶-۵) مشاهده می‌شود که در بعضی از موارد اختلاف‌های فاحشی در نرخ‌های تردد حاصل شده در مسیرها برای انواع کامیون‌ها با استفاده از حل مدل با الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار LINGO وجود دارد. این تفاوت در نرخ‌های تردد حاصل شده با وجود کامیون‌های با ظرفیت‌های متفاوت و نقاط بارگیری متعدد تا حدودی قابل توجیه است. در معدن مس سونگون به دلیل این که از کامیون‌های با ظرفیت‌های متفاوت استفاده می‌شود برای هر مسیر ممکن است بکارگیری ترکیب‌های متفاوت از انواع کامیون‌ها باعث بهینه شدن تابع هدف شود. تولید حاصل از مدل برای هر یک از ایستگاه‌های بارگیری با هر دو روش برای یک ساعت از شیفت مورد نظر در معدن سونگون در شکل (۱۰-۵) مقایسه گردیده است.



شکل ۱۰-۵ مقایسه تولید هر یک از ایستگاه‌های بارگیری مدل با LINGO و الگوریتم ژنتیک

همان طور که از شکل (۱۰-۵) مشخص است با آن که نرخ‌های تردد در مسیرهای متفاوت از نقاط بارگیری ماده معدنی به سنگ‌شکن برای انواع کامیون‌ها با استفاده از دو روش متفاوت است ولی در نهایت

میزان ماده معدنی که از هر یک از ایستگاه‌های برداشت ماده معدنی حمل شده است، برای هر دو روش یکسان است و این به دلیل ترکیب‌های متفاوت از ظرفیت‌های مختلف کامیون‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد. در حالی که برای ایستگاه‌های بارگیری باطله میزان باطله حمل شده از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری باطله نیز متفاوت می‌باشد. این تفاوت نیز با توجه به ماهیت مسأله تخصیص و گسیل قابل توجیه است. برای ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی که عیارهای متفاوتی دارند، میزان ماده معدنی که حمل می‌شود در نهایت باید در بازه عیاری که توسط کارخانه فرآوری تعیین شده است باشد، در حالی که برای ایستگاه‌های بارگیری باطله محدودیتی از این لحاظ وجود ندارد. بنابراین ممکن است به ازای ترکیب‌های مختلف از میزان حمل باطله از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری باطله، مقدار بهینه برای تابع هدف حاصل شود، در حالی که این تنوع ترکیبی برای میزان ماده معدنی حمل شده از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی به دلیل محدودیت عیار نمی‌تواند اتفاق بیفتد. با توجه به نمودار شکل (۵-۱۱) آن چه که در این میان مهم است این است که، میزان تولید ماده معدنی و باطله حاصل شده از مدل برای هر دو روش یکی است و این نشان دهنده کارایی مناسب الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله تخصیص و گسیل می‌باشد.



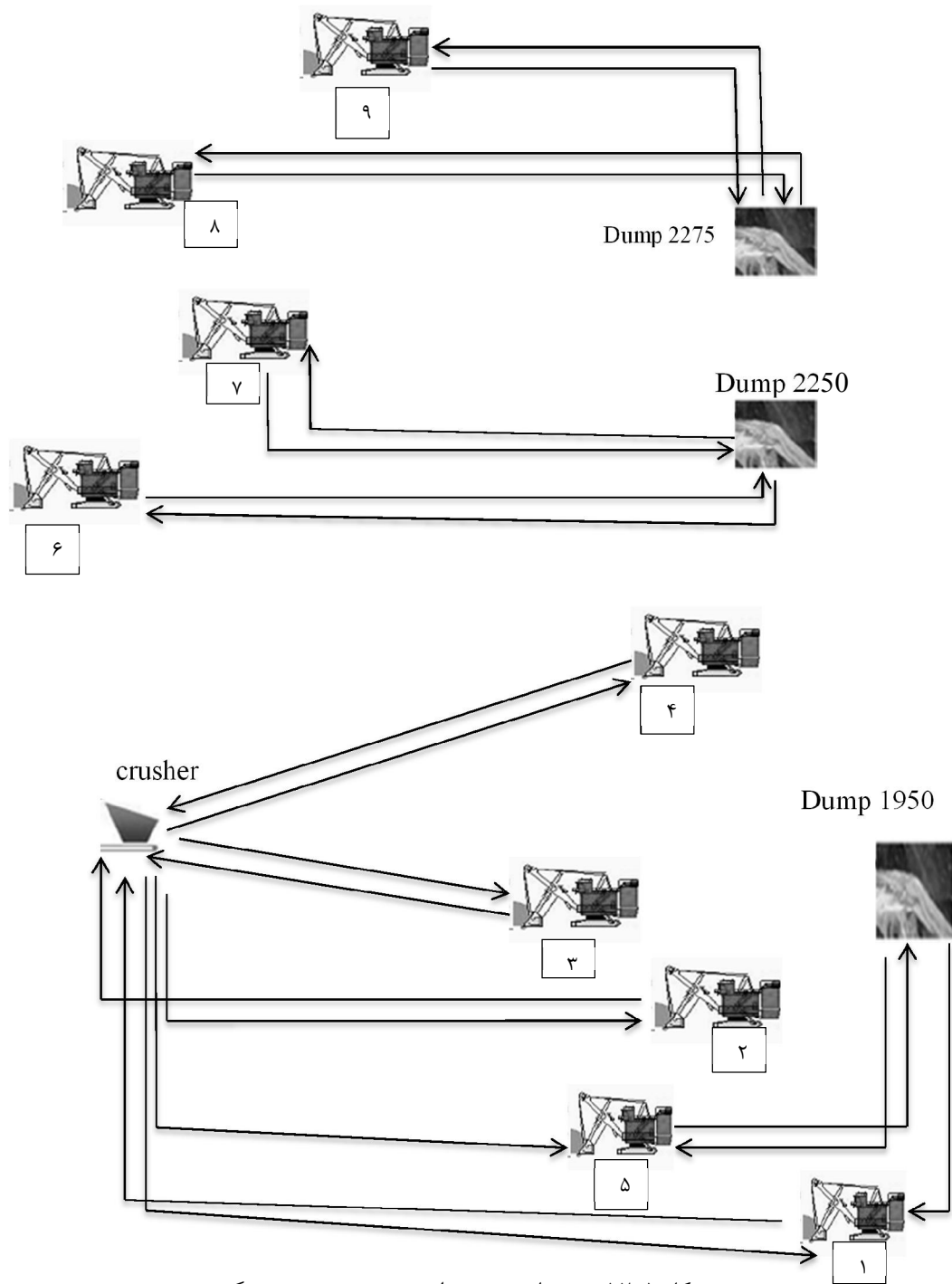
شکل ۵-۱۱ مقایسه ماده معدنی و باطله حاصل شده از حل مدل

با توجه به این که میزان ماده معدنی حمل شده از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی برای هر دو روش یکسان است، بنابراین عیار ماده معدنی که توسط این دو روش حاصل شده است نیز یکسان می‌باشد. عیار حاصل از مدل ۰/۷۵ درصد حاصل شد که مناسب‌ترین عیار برای کارخانه فرآوری می‌باشد. با توجه به این مسائل می‌توان بیان کرد که الگوریتم ژنتیک به خوبی توانسته با ارضای محدودیت‌های متعددی که در مسأله تخصیص و گسیل وجود دارد، جواب نزدیک به بهینه واقعی را نیز برای مسأله تخصیص و گسیل تعیین نماید.

۵-۶ ارزیابی بکارگیری مدل توسعه داده شده لی برای معدن مس سونگون

با مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل با تولید واقعی معدن برای شیفت مورد نظر نشان دهنده افزایش تولید معدن با استفاده از این مدل می‌باشد. میزان تولید واقعی معدن برای شیفت مورد نظر با بهره‌گیری از ۱۰ دستگاه کامیون ۱۰۰ تنی و ۲۵ دستگاه کامیون ۳۲ تنی در مجموع ۳۰۰۰۰ تن ماده معدنی و باطله می‌باشد. این در حالی است که تولید معدن برای شیفت مورد نظر با همان تعداد کامیون و شرایط عملیاتی که در جداول (۵-۲) تا (۵-۱۱) بیان شده است حدود ۳۸۳۰۰ تن ماده معدنی و باطله می‌باشد. به عبارت دیگر با استفاده از مدل تخصیص ارائه شده میزان تولید متوسط شیفت مورد نظر ۸۳۰۰ تن نسبت به حالت سنتی افزایش پیدا می‌کند که نشان دهنده ۲۷/۵ درصد افزایش توان تولید می‌باشد. بنابراین با استفاده از مدل تخصیص می‌توان با تعداد کامیون کم‌تری به تولید مورد نیاز دست پیدا کرد.

هدف اصلی توسعه مدل بهینه‌سازی سیستم تخصیص و گسیل، تعیین مسیرهای بهینه و یافتن نرخ جریان مواد (یا کامیون) از هر یک از این مسیرها می‌باشد. بعد از اجرای مدل مسیرهای بهینه رفت و برگشت برای شیفت مورد نظر در معدن مس سونگون مطابق شکل (۵-۱۲) تعیین گردید.



شکل ۵-۱۲ مسی‌های بهینه ترابری در معدن مس سونگون

۷-۵ نتیجه‌گیری

در این فصل ضمن بکارگیری مدل توسعه داده شده لی برای معدن سونگون، این مدل برای یک شیفت واقعی از معدن سونگون با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل گردید و مسیرهای بهینه رفت و برگشت و نرخ تردد انواع کامیون‌ها در هر مسیر تعیین گردید. ارزیابی نتایج حاصل از حل مدل با الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم‌افزار LINGO انجام گرفت. مقایسه نتایج حاصل از این دو روش بیانگر کارایی بسیار خوب الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله تخصیص و گسیل می‌باشد که محدودیت‌های زیادی نیز بر مسأله حاکم است و ارضای محدودیت‌های مسأله بسیار مهم و ضروری می‌باشد. همچنین برای ارزیابی نتایج حاصل از مدل تخصیص ارائه شده برای معدن مس سونگون، میزان تولید مدل با تولید واقعی معدن مقایسه گردید. نتایج مقایسه بیانگر افزایش ۲۷/۵ درصدی توان تولید مدل تخصیص ارائه شده نسبت به حالت سنتی حاکم در معدن مس سونگون می‌باشد.

فصل هشتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری

در این تحقیق با مطالعه انواع مدل‌های تخصیص و گسیل، مدل لی با توجه به شرایط حاکم در معدن مس سونگون برای تخصیص و گسیل کامیون در این معدن انتخاب شد. در معدن سونگون به دلیل وجود دایک‌های متعددی که در بین مواد معدنی نفوذ کرده است؛ امکان استفاده از ماشین‌آلات بارگیری با توان تولید بالا از قبیل شاول به دلیل انعطاف‌پذیری کم این ماشین‌آلات به هنگام مواجهه با مواد باطله‌ای که در داخل مواد معدنی نفوذ کرده است میسر نمی‌باشد. به همین دلیل در این معدن از ماشین‌آلات بارگیری با توان تولید کم ولی با انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به شاول استفاده می‌شود. این ماشین‌آلات بیشتر لودر و بیل‌های مکانیکی می‌باشند. به دلیل تولید کم این ماشین‌آلات لازم است ایستگاه‌های بارگیری برای بالا بردن تولید معدن افزایش یابد. افزایش تعداد ایستگاه‌های بارگیری، منجر به افزایش تعداد کامیون‌ها خواهد شد. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که در زمینه استفاده از کامیون‌ها بهینه‌سازی صورت گیرد تا با استفاده حداکثری از آن‌ها، با حداقل کامیون بتوان به تولید مورد نظر دست یافت. تابع هدف مدل ارائه شده توسط لی بیشترین انطباق را با شرایط حاکم در معدن مس سونگون دارا می‌باشد. با توجه به این که مدل ارائه شده توسط لی برای معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های مختلف قابل کاربرد بود؛ این مدل در این تحقیق به گونه‌ای توسعه داده شد که در معادن با کامیون‌های با ظرفیت‌های متفاوت نیز قابل کاربرد باشد. همچنین در مدل ارائه شده توسط لی بعضی محدودیت‌ها نیز لحاظ نشده بود که این کاستی‌ها نیز برطرف و تابع هدف جدید با محدودیت‌های جدید برای شرایط عملیاتی در معدن مس سونگون به گونه‌ای مناسب مدل‌سازی گردید.

برای حل مدل توسعه داده شده لی الگوریتم ژنتیک بکار گرفته شد. برای حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک ابتدا کروموزوم مناسب برای مسأله مدل گردید. هر کروموزوم به صورت آرایه‌ای یک بعدی که هر عضو آرایه متناسب با نرخ تردد هر یک از انواع کامیون‌ها در یک مسیر رفت یا برگشت در شبکه

حمل و نقل معدن در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به این که محدودیت‌های زیادی بر مسأله تخصیص و گسیل حاکم است، برای اعمال محدودیت‌های موجود در مدل، از تابع جریمه استفاده گردید. تابع جریمه ارائه شده توسط راجیو و کریشنامورتی که هر راه‌حل پتانسیل را متناسب با میزان نقض محدودیت به وسیله آن راه‌حل پتانسیل، جریمه و از برآزندگی آن می‌کاهد به عنوان تابع جریمه مناسب برای حل مدل معرفی گردید. با توجه به این که محدودیت‌های زیاد در مدل تخصیص و گسیل وجود دارد، استفاده از جهش‌های رایج مانند جهش یکنواخت مناسب نمی‌باشد و برای حل مسأله تخصیص و گسیل در این تحقیق جهش تطبیقی جهت‌دار پیشنهاد و بکار گرفته شد. دیگر نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است.

- جهش تطبیقی جهت‌دار بیشترین تأثیر را در همگرایی الگوریتم به یک جواب بهینه داشت. استفاده از سایر جهش‌ها به دلیل این که ممکن بود راه‌حل‌های پتانسیلی که در فضای جواب قرار داشته باشند را از فضای جواب خارج کند، برای این نوع از مدل‌ها مناسب ارزیابی نشد. نرخ جهش در جهش تطبیقی جهت‌دار برخلاف جهش‌های رایج بالا انتخاب می‌شود و در هر نسل این نرخ به صورت تصادفی تغییر می‌کند.
- ماهیت الگوریتم ژنتیک طوری است که تضمین نمی‌کند جواب بهینه را دقیقاً پیدا می‌کند و با توجه به این که الگوریتم ماهیت تصادفی دارد، از اجراهای مختلف آن نتایج متفاوتی بدست می‌آید. ولی با بکارگیری پارامترهای مناسب الگوریتم ژنتیک و مدل‌سازی مناسب تابع هدف و محدودیت‌ها، در این تحقیق نتایج اجراهای مختلف خیلی به هم نزدیک و نزدیک به جواب بهینه حاصل شدند.
- در این تحقیق از تبادلی ژنی دو نقطه‌ای استفاده شد. با انجام آنالیز حساسیت بر روی احتمال تبادل ژنی مشاهده شد که احتمال تبادل ژنی تأثیر چندانی در مقدار تابع هدف ندارد.

- از ویژگی‌های مدل توسعه داده شده لی می‌توان به بکارگیری آن در معادنی که کارخانه فرآوری آن‌ها چندین خط تولید را داشته باشد اشاره کرد. با توجه به این که در معدن مس سونگون کارخانه مولیبدن در حال راه‌اندازی می‌باشد؛ مدل توسعه داده شده قادر به در نظر گرفتن تنوع محصولات نیز می‌باشد به گونه‌ای که مواد معدنی ارسال شده به سنگ‌شکن در بازه عیاری تعیین شده کارخانه فرآوری باشد.
- برای ارزیابی نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از نرم‌افزار LINGO استفاده گردید. نتایج حاصل نشان داد که مقدار تابع هدف حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، خیلی نزدیک به این مقدار بهینه می‌باشد. ولی نرخ‌های تردد حاصل شده در مسیرهای مختلف برای انواع کامیون‌ها در بعضی موارد برای هر دو روش اختلاف فاحشی نشان می‌داد. برای ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی، این تفاوت به دلیل وجود کامیون‌های با ظرفیت‌های متفاوت قابل توجه می‌باشد که سبب می‌شود ترکیب‌های متفاوت از ظرفیت کامیون‌ها در مسیرهای بین ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی و نقطه تخلیه ماده معدنی باعث بهینه شدن تابع هدف شود. میزان کل ماده معدنی حمل شده از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی نشانگر این امر می‌باشد، چرا که میزان تولید هر یک از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی ناشی از حل مدل با هر دو روش LINGO و الگوریتم ژنتیک یکی می‌باشد و تفاوت در نرخ‌های تردد در این مسیرها به دلیل وجود کامیون‌های با ظرفیت‌های متفاوت می‌باشد. میزان ماده معدنی تولید شده که از حل مدل با استفاده از هر دو روش حاصل شده است یکی است. تفاوت در نرخ‌های تردد حاصل شده در مسیرهای بین ایستگاه‌های بارگیری باطله و نقاط تخلیه حاصل شده از حل مدل با دو روش، علاوه بر تنوع ظرفیت کامیون‌ها، به دلیل وجود نقاط بارگیری متعدد باطله می‌باشد که محدودیت عیاری از نظر میزان برداشت مواد در این ایستگاه‌ها، برعکس ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی وجود ندارد. بنابراین ممکن است به ازای

ترکیب‌های مختلف از میزان حمل باطله از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری باطله و ترکیب‌های مختلف از ظرفیت‌های کامیون‌ها جواب بهینه و یا خیلی نزدیک به بهینه حاصل شود که میزان کل باطله تولید شده بیانگر این امر می‌باشد و با آن که نرخ‌های تردد انواع کامیون‌ها در مسیرها و میزان حمل باطله از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری باطله متفاوت می‌باشد، ولی میزان کل باطله تولید شده برابر می‌باشد. این امر نشان‌دهنده کارآئی بسیار مناسب الگوریتم ژنتیک در حل مدل‌های تخصیص و گسیل با محدودیت‌های زیادی حاکم بر مسأله، می‌باشد.

- با بکارگیری مدل توسعه داده شده لی برای معدن مس سونگون و بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون در این معدن، تولید حاصل از مدل تخصیص انعطاف‌پذیر در معدن محاسبه و در مقایسه با تولید واقعی معدن برای یک شیفت از معدن مشخص شد که استفاده از این مدل باعث افزایش ۲۷/۵ درصدی تولید خواهد شد. محدوده تغییرات عیار سنگ ارسالی به سنگ‌شکن بین ۰/۶۸٪ تا ۰/۷۸٪ قابل نوسان است. از آنجا که این مدل قابلیت محاسبه عیار سنگ ارسالی به سنگ‌شکن را دارد، مشخص شد که با اجرای مدل بهینه‌سازی تخصیص انعطاف‌پذیر، مواد معدنی ارسالی به سنگ‌شکن دارای عیار ۰/۷۵ درصد می‌باشند که عیار مناسب برای کارخانه فرآوری می‌باشد.
- با اجرای این مدل می‌توان با تجهیزات موجود به بیشترین تولید دست یافت.
- با توجه به افزایش تولید حاصل از مدل نسبت به روش سنتی موجود، می‌توان با بکارگیری مدل تخصیص انعطاف‌پذیر، با استفاده از تعداد کامیون‌های کمتر نسبت به روش سنتی موجود به تولید برنامه‌ریزی شده رسید.
- با اجرای روزانه این مدل و در دست داشتن خروجی آن می‌توان بهترین تخصیص را انجام داد. لازم به ذکر است که با تغییر شرایط عملیاتی باید مدل مجدداً اجرا شده و مسیرهای بهینه جدید تعیین گردد.

- با توجه به این که برای حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مهم نیست که تابع هدف و محدودیت‌های آن از چه نوعی باشند؛ توانایی الگوریتم ژنتیک در حل مدل‌های غیرخطی و پیچیده برتری این الگوریتم نسبت به روش‌های تحقیق در عملیاتی می‌باشد.

۶-۲ پیشنهادات

- مدل‌هایی مانند مدل لی که بر اساس مینیمم کردن هزینه‌ها ارائه شده‌اند، به طور دقیق کل هزینه‌های ترابری در آن‌ها لحاظ نشده است، بلکه در این مدل‌ها تنها بخشی از هزینه‌ها که محاسبه آن‌ها به آسانی صورت می‌گیرد لحاظ شده است. پیشنهاد می‌شود که مدلی جامع که بر اساس کل هزینه‌های ترابری باشد ارائه گردد. در این مدل هزینه‌هایی از قبیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه سوخت، هزینه استهلاک و ... بایستی لحاظ شود. چنین مدل‌هایی قطعاً از پیچیدگی خاصی برای حل برخوردار خواهد بود. چرا که مدل‌هایی که بر اساس هزینه‌های کل ترابری ارائه می‌شود مدل‌هایی خطی نخواهند بود. برای حل این مدل‌ها با توجه به نتایج حاصل شده از الگوریتم ژنتیک در این تحقیق در برآورده ساختن محدودیت‌های مسأله، استفاده از الگوریتم ژنتیک روش مناسبی برای حل مدل می‌باشد؛ چرا که روش‌های تحقیق در عملیاتی کلاسیک نظیر برنامه‌ریزی خطی صحیح و برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح با پیچیده شدن تابع هدف از حل آن عاجز خواهند بود.
- مدل‌های تخصیص و گسیل در دو مرحله توسعه می‌یابند. مدل مورد استفاده شده در این تحقیق برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل در معدن مس سونگون مرحله اول مدل‌های تخصیص و گسیل را شامل می‌شود، که بر اساس اهداف برنامه‌ریزی کوتاه مدت، نرخ تولید بهینه در شیفت را تعیین می‌کند. در قسمت دوم که کار گسیل لحظه‌ای صورت می‌گیرد، نیاز به سیستم‌های سخت‌افزاری برای انتقال سریع اطلاعات حاصل از تخصیص مناسب به راننده کامیون می‌باشد. با توجه به مزایای سیستم‌های

گسیل لحظه‌ای و افزایش تولید ناشی از بکارگیری آن‌ها، پیشنهاد می‌شود که این سیستم در معدن راه‌اندازی شود و در این سیستم از مدل‌های گسیل لحظه‌ای ارائه شده نظیر مدل ارائه شده توسط لی بهره گرفته شود.

- از آنجا که شرایط آب و هوایی معدن مورد نظر تأثیر بسزایی بر تولید معدن دارد، می‌توان این عامل را به عنوان یک محدودیت در مدل اعمال نمود.
- برای هر چه قابل استفاده کردن مدل می‌توان نرم‌افزاری تهیه نمود که بر اساس شرایط موجود در معدن به سرعت نتایج حاصل از اجرای مدل را در اختیار مسؤلان قرار داد.

فهرست منابع

- [۱] Hartman, H.L. (2002). Introductory mining engineering. Wiley.
- [۲] اصانلو، م. (۱۳۸۴). روش های استخراج معادن سطحی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- [۳] Stephane, A. and Michel, G. (2002). Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. vol. 16, No. 1, pp.59-76 .
- [۴] Lizotte, Y. and Bonates, E. (1987). Truck and Shovel Dispatching Rules Assessment Using Simulation. Mining Science and Technology, Vol. 5, pp.45-58.
- [۵] Temeng, V. A. (1997). A computerized model truck dispatching in open pit mines. Phd Thesis. Michigan technological University.
- [۶] White, J. W. and Olson, J. P. (1986). Computer based dispatching in mines whit concurrent operating objective. Mining Engineering. pp.(1045-1054).
- [۷] Elbrond, J. and Soumis, F. (1987). Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines. International Journal of Surface Mining. Vol. 1, pp. 1-6.
- [۸] Sgurev, V., Vassilev, V., Dokev, N., Genova, K., Drangajov, S., Korsemov, C. and Atanassov, A. (1989). TRASY an automated system for real-time control of the industrial truck haulage in open-pit mines. European Journal of Operational Research. Vol.43. pp.44-52.
- [۹] Li, Z. (1990). A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining. Mining Science and Technology. Vol. 10. pp.337-340.
- [۱۰] Huu Ta, C., Kresta, J. V., Forbes, J. F. and Marquez, H. J.(2005). A stochastic optimization approach to mine truck allocation. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. Vol.19, No.3 pp.162-175.

[۱۱] Souza, M. J. F., Coelho, I. M., Ribas, S., Santos, H. G. and Merschmann, L. H. C. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 207, pp. 1041-1051

[۱۲] Hagenbuch, L. (1987). Mining truck dispatching: The basic factors involved and putting these factors into mathematical formulas (algorithms). *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 1, pp. 105-129.

[۱۳] Çetin, N. (2004). Open-Pit Truck/Shovel Haulage System Simulation. PhD Thesis, Middle East Technical University.

[۱۴] George, K. and Yegulap, M.T. (1991) An Application of Closed Queuing Theory in Truck-Shovel System. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 5, No. 1, pp. 45-53.

[۱۵] ستاروند، ج. (۱۳۷۷). کاربرد تحقیق در عملیات جهت بهینه سازی ترابری معادن روباز. سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

[۱۶] Munirathinam, M. and Yingling, J. C. (1994). A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 8, pp. 1-15.

[۱۷] Temeng, V. A., Otuonye, F. O. and Friendewey, J. O. (1997). Real-time truck dispatching using a transportation algorithm. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 11, pp. 203-207

[۱۸] Huu Ta, C. (2002). Optimal Haul Truck Allocation in the Syncrude mine. Master of Science Thesis, Edmonton, Alberta.

[۱۹] حقیر چهره‌قانی، س. خدایاری، ع.ا. حسینی، ف. (۱۳۸۶). بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون در سامانه ترابری معدن مس سرچشمه. نشریه دانشکده فنی، ش. ۴۱، ص. ۲۸۷-۲۹۶.

[۲۰] Sivanandam, S.N., Deepa, S.N. (2008). *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer.

[۲۱] Mitchell, M. (1999) *An Introduction to Genetic Algorithms*, London, England, 1999

[۲۲] Michalewicz, Z. (1995). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer.

[۲۳] میزرائی، ح. (۱۳۸۱). طراحی محدوده نهایی و برنامه ریزی تولید معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۴] Sivaraj, R. and Ravichandran, T. (2011) A Review Of Selection Methods in Genetic Algorithm. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol.3, No.5, pp.3792-3797.

[۲۵] Chipperfield, A., Fleming, P., Pohlheim, H. and Fonseca, C. (2006). *Genetic Algorithm Toolbox*.

[۲۶] عطائی، م. (۱۳۸۲). مدل سازی عیارهای حد بهینه برای ذخایر چند فلزی با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی. رساله دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

[۲۷] Eric, A. (2002). *An intelligent 3-D open pit design and optimization using machine learning: adaptive logic networks and neuro-genetic algorithms*. Ph.D. thesis, Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.

[۲۸] Denby B., S. D. (1994). Open pit design and Scheduling by use of Genetic Algorithms. *Transaction of the Institution of Mining & Metallurgy*, Vol.102, A21-A26.

[۲۹] Gupta V., M. M., Mahajan M., Biswal S.K. (2007). Genetic algorithms – A novel technique to optimize coal preparation plants. *Int. J. Miner. Process*, Vol.84, pp.133–143.

[۳۰] Kumral, M. (2005). Reliability – based optimization of a mine production system using genetic algorithms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol.18 pp.186–189.

[۳۱] Wang, C., M. G. W., Zhao J., Soh C. K. (2004). Identification Of Dynamic Rock Properties Using A Genetic Algorithm. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*, Vol.41, No.3.

[۳۲] Zhao, D. Liu, J. Pan, J., and Ma, H. (2009). Hybrid genetic algorithm for the optimization of mine ventilation network. *Journal of Coal Science & Engineering*, Vol.15, No.4 pp.389–393.

[۳۳] Alvarenga, G. B. (1997). *Optimal Dispatch of Trucks in an Iron Mine Using genetic Algorithms with Parallel Processing* (in Portuguese). Master's Thesis, UFMG, Minas Gerais, Brazil.

[۳۴] He, M. X., Wei, J. C., Lu, X. M. and Huang, B. X. (2010). The Genetic Algorithm for Truck Dispatching Problems in Surface Mine. *Information Technology Journal*, Vol.9, No.4, pp.710-714.

[۳۵] Yeniay, Ö. (2005). Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms. *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 10, No. 1, pp. 45-56.

[۳۶] Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C.S. (1990). Discrete Optimization Of Structures Using Genetic Algorithms. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol.118, No.5, pp.1233-1250.

[۳۷] Kumar. (2010). Patent genius. System and method for the use of an adaptive mutation operator in genetic algorithms. The mathworks, Inc.(Natick,MA)

[۳۸] Lingo User Guide. (2011).

[۳۹] www.komatsu.com

سایت رسمی شرکت کوماتسو

[۴۰] www.cat.com

سایت رسمی شرکت کاترپیلار

Optimization of truck-shovel dispatching system in open pit mines with the use of genetic algorithm (Case study: Sungun copper mine)

Abstract

Optimization of truck- shovel allocation in open pit mines is including finding optimal routes for the transportation of materials, carrying amount of material from any of the stations and allocation of real-time truck to each of the points of loading and unloading, so that maximum utilization of equipment to be. For large mines with several loading stations that may be more than one type of mineral extraction, models and limitations of the truck – shovel flexible allocation becomes more complicated, so that operational research techniques that may be incapable of solving these models. Therefore in this study of genetic algorithm as one of the following branches of artificial intelligence that has had wide application and successful in solving optimization problems, for solving the allocation problem is that too many restrictions, is used.

Special focus of this research on one of the largest mines in Iran that is Sungun copper mine. For this purpose, the study of various models proposed for the allocation of dispatch, the model presented by Li has been selected for this mine. This model also had shortcomings that in this study resolve these shortcomings and model developed with experimental collected data for a real shift from the sungun mine was solved using genetic algorithms. To compare the results of genetic algorithm, the model was solved using the LINGO software. The results indicate good performance of genetic algorithms to solve allocation models, so that also meets all the restrictions in the allocation model. The results of applying the flexible allocation model developed by Li for Sungun copper mine represents an increase of 27.5 percentage Shift production toward the traditional allocation method is available.

Keywords: Allocation and dispatch trucks, Flexible allocation, Genetic algorithm, Li model, Sungun copper mine, Lingo



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Optimization of truck-shovel dispatching system in open pit mines with
the use of genetic algorithm (Case study: Sungun copper mine)**

Moslemomidbad

Supervisor(s):

Dr. Reza khalokakaie

Dr. Hossein Mirzaie Nasirabad

Advisor:

Dr. Javad Sattarvand

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in
Mining engineering**

February 2012