

# کاربردهای تحقیق در عملیات در بهینه سازی عملیات بارگیری و حمل در معادن روباز

محمدتقی فاطمی قمی

استادیار دانشکده مهندسی صنایع  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سیدحمید سکاکی

دانشجوی دکتری مهندسی صنایع  
دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده:

استفاده از فنون تحقیق در عملیات و برنامه ریزی ریاضی و احتمالی، منجر به نگرش واقع بینانه به مسائل حمل و بارگیری در معادن خواهد شد که خود افزایش بهره وری را در پی خواهد داشت. در این مقاله ابتدا با استفاده از تئوری صف، مبنائی ترین و ساده ترین حالت حمل و بارگیری در معادن تجزیه و تحلیل خواهد شد و براساس آن و به کمک برنامه ریزی بویا تخصیص امکانات حمل در معادن بزرگتر و با چند ایستگاه بارگیری صورت خواهد پذیرفت. سپس الگوریتم های ابتکاری مساله کیفیت را نیز در معادن مزبور تحت کنترل در می آورد. استفاده از مجموعه دیدگاه های فوق در کنار بهره جویی از بقیه فنون تحقیق در عملیات، طرحی نوین در سیستم حمل و بارگیری در معادن را تحت عنوان تخصیص انتطاف پذیر عرضه خواهند نمود که کاربرد آن در معادن بسیار بزرگ خواهد بود.

## Application of O.R. in optimization of open pit mine loading and transportation

*M.T. Fatemi Ghomi, Ph.D.*

*Indus. Eng. Dept.  
Amirkabir Univ. of Tech.*

*S.H. Sakkaki, Postgraduate Student*

*Indus. Eng. Dept.  
Tarbiat Modarres Univ.*

### Abstract:

*By using operations research methodologies, stochastic and mathematical programming we can have a real view to mining transportation problems which of course has direct effect on system productivity.*

*In this paper first the most basic and simple situation of mining transportation- mine with only one facework- is analysed with queueing theory. Based on this analysis and the help of dynamic programming approach, the trucks are allocated in the mines which are larger and have more than one facework. By applying heuristic algorithms the quality in such mines is controlled during the transportation. Then through these methods and some other operations research models, a new method is designed to allocate tracks in the very large-scale mine which is named flexible dispatching.*

## بارگیری در معادن روباز

زمین شناسان توانسته اند با تلاش خود پراکندگی مواد و عناصر شیمیایی - معدنی در روی کره زمین را در قالب شاخه های این دانش همچون ژئوشیمی و ژئوفیزیک شناسائی کنند. در پی آن مهندسين اکتشاف معدن مطالعات آنها را دنبال می نمایند تا کلیه اطلاعات لازمه در جهت طراحی و استخراج معدن را در مراحل اکتشاف مقدماتی و تفصیلی به دست آورند.

بر اساس اطلاعات اکتشافی حاصله و ملاحظه پارامترهای اقتصادی، معدن بصورت زیر زمینی یا روباز تحت طراحی و بهره برداری قرار خواهد گرفت. طراحی معدن خصوصاً بصورت روباز که در این مقاله مساله حمل و بارگیری در آن مورد بررسی قرار گرفته، بسیار پیچیده و مشکل است و در واقع یکی از هنرهای مهندسين استخراج معدن می باشد، چرا که ساختاری پویا و در حال حرکت تدریجی را طراحی می کنند.

برای دسترسی به ماده معدنی، باطله روی آن جابجا می شود. باطله برداری معدن که گاهی تا پایان دوره استخراج ادامه پیدا می کند، حین طراحی معدن برنامه ریزی شده است. همچنین پس از آن بر اساس طراحیهای انجام شده، با کمک عملیات حفاری و آتشیاری، به ماده معدنی و باطله قابلیت بارگیری و حمل به محل مصرف یادپوی باطله داده می شود.

حمل و جابجایی مواد معدنی با روشها و گونه های مختلفی قابل انجام است، اما متداولترین آنها در معادن روباز، بارگیری توسط لودر یا شاول و حمل بوسیله کامیونهای با ظرفیت بسیار بالا می باشد. بطور کلی این فعالیت نقش عمده ای را در کل هزینه های عملیاتی استخراج و تولید در معادن دارد که لازم است همیشه تحت کنترل قرار گیرد و البته مطالب این مقاله نیز در راستای همین هدف می باشد. معمولاً بستگی به وسعت و سطح هر منطقه معدنی، میزان ماده معدنی مورد نیاز براساس برنامه ریزیهای تولید، حجم ماشین آلات تحت اختیار و بالاخره ضرورتهای کنترل کیفی بر مواد حین استخراج، یکی از چهار حالت زیر در معادن روبازی که عملیات حل توسط کامیون و بارگیری با کمک لودر یا شاول صورت می گیرد، پدید خواهد آمد.

۱-۲ - سطح منطقه معدنی بسیار کوچک است و میزان ماده معدنی مورد نیاز در واحد زمان (ظرفیت تولید) در سطح

ذخائر معدنی تنها منابع انرژی و مواد اولیه هستند که در طول زندگانی بشر در روی کره زمین تنها یک و فقط یک بار در اختیار بشر قرار می گیرند و پس از تمام شدن، تشکیل مجدد آنها در طول زندگانی بشر بر روی زمین امکان پذیر نیست. بعنوان مثال از جمله شرایط تشکیل یک کانسار سرب، میلیونها سال وقت و زمان است در حالیکه سایر منابع و مواد اولیه همچون، چوب و جنگلها، آب و مراتع طبیعی و غیره، در صورت پایان یافتن و تمام شدن، در دوران عمر یک نسل بشر و یا حداکثر پس از چند صد سال، قابل احیاء و تجدید هستند.

از این رو توجه به برنامه ریزی، بهره برداری و استفاده بهینه از منابع معدنی و افزایش بهره وری از سیستمها و عملیات معدنکاری، جایگاهی غیر قابل مقایسه با بقیه منابع طبیعی و مواد اولیه را خواهد داشت.

پژوهش در زمینه موضوعاتی چون مدلسازی، شبیه سازی، تحقیق در عملیات و بهینه سازی کاربردی در عملیات معدنکاری در کشورهای پیشرفته دنیا نیز تا حدودی جوان و امر بدیعی می باشد. با این حال محققینی چند در این زمینه مطالعات جدی را انجام داده اند که اسامی برخی از آنان بعنوان پیشگامان این امر ذکر می شود.

1. A. L. Mular
2. A. J. Lynch
3. D. W. Fuerstenau
4. L. Zhongzhou
5. E. Topuz
6. N. D. Naplatanov
7. J. G. Clevenger
8. M. J. Arnold
9. J. Wm. White

یادآور می شود که محققین ردیف ۴ به بعد در موضوع خاص این مقاله مطالعاتی انجام داده اند. در این مقاله موارد زیر را می توان به عنوان ابتکارات نوین آن انتخاب نمود:

- مطالعه موردی در یکی از معادن فعال کشور و بکارگیری روابط و محاسبات ریاضی در آن، ترسیم ۱۹ نمودار تحلیلی و گزارش نهائی از آنها.

- اصلاح و تدوین مجدد الگوریتم های ابتکاری در سیستمهای تخصیص انعطاف پذیر امکانات حمل و بارگیری

- اعمال برخی ایده های بهبود و توسعه در مدل های ریاضی که در بخش پنجم مقاله آمده است.

پایینی می باشد. چنین مواقعی فقط یک ایستگاه بارگیری در معدن طراحی می شود. لودر یا شاول در آن سینه کار استخراجی مستقر شده و تعدادی کامیون را سرویس می دهد.

۲-۲- وسعت معدن نسبتاً زیاد و میزان ذخیره معدنی در سطح بالائی می باشد. برنامه ریزی تولید نیز به گونه ای است که حجم زیادی از مواد معدنی در هر روز باید استخراج و حمل گردد. مسأله کنترل کیفی نیز مطرح نمی باشد. در این گونه حالات چند ایستگاه بارگیری یا سینه کار استخراجی در معدن طراحی می شود و چند لودر یا شاول در آن واحد مشغول بارگیری تعداد نسبتاً زیادی کامیونهای معدنی می باشند.

۲-۳- وضعیتی کاملاً مشابه حالت دوم را دارد. با این تفاوت که مسأله کنترل کیفی باید مد نظر قرار گیرد.

۲-۴- وسعت بسیار زیاد معدن از یک سو، ضرورت استخراج با ظرفیت بسیار بالا از سوئی دیگر، نیاز به کنترل کیفی بر مواد استخراج شده و بالاخره انتقال مواد از سینه کارهای معدن به جای یک، به چندین مقصد در نزدیکی معدن، ایجاب می کند که چندین لودر یا شاول در ایستگاههای استخراج و بارگیری، دهها کامیون را سرویس دهند، تا آنها نیز بتوانند حجم عظیمی از مواد معدنی را به نقاط متعدد و با کیفیت و کمیتهای متفاوت حمل کنند.

در هر حال مواد معدنی استخراج و حمل شده اکثراً قابلیت استفاده مستقیم در صنایع را ندارند. از این رو در مجاورت معادن معمولاً کارخانجات شستشو، تغلیظ و آرایش مواد معدنی بنا می شود. مهندسین معدن این فرآیند تولید را که کانه آرائی (Mineral Processing) می نامیم، معمولاً با همکاری مهندسین متالورژ انجام می دهند. ماده معدنی پس از متحمل شدن فرآیند مزبور، به گونه قابل مصرف در صنایع در می آید.

### ۳- روش منطقی و ریاضی برخورد با مسأله بارگیری و حمل در معادن روباز

همانطور که ذکر شد، در معادن رو باز یکی از مهمترین ابعاد عملیات استخراج، مسأله انتقال و حمل مواد از سینه کارها به محل مصرف و معمولاً کارخانجات فرآوری مواد معدنی می باشد. معمولاً در معادن تعداد زیادی کامیون و چندین لودر یا شاول در اختیار سرپرست معدن قرار می گیرد.

او با اعمال سیاستهای مدیریتی خود این تجهیزات و ماشین آلات را در راستای طرح جامع استخراج و به منظور بارگیری و حمل مواد معدنی بکار می گیرد. اگر چه در اکثر اوقات طول این مسیر حمل بسیار کوتاه و در حد چند صد متر تا چند کیلومتر می باشد ولی طبق محاسبات و گزارشات مالی، بطور متوسط بیش از ۵۰ درصد هزینه های عملیاتی استخراج را به خود اختصاص می دهد. به همین منظور در جهت کنترل آنها دانش تحقیق در عملیات را به کمک فرا می خوانیم تا سرپرست معدن را در تخصیص و استفاده بهینه از این منابع و امکانات تولیدی، یاری دهیم.

اگر بخواهیم مسائل پیچیده بارگیری و حمل را به کمک فنون برنامه ریزی ریاضی و تحقیق در عملیات تحلیل کنیم، باید ابتدا از ساده ترین حالت آغاز نماییم؛ همانطور که پیچیده ترین حالت حمل و بارگیری در معادن که در سطور قبلی توضیح داده شد نیز خود قابل تجزیه به اجزاء ساده تر می باشد. حال اگر بتوانیم جزئی ترین واحدهای یک سیستم حمل و بارگیری را تحلیل کنیم، از ترکیب این حالتها ساده و ارتباط منطقی میان آنها دادن، توانائی تحلیل مسائل پیچیده را نیز به دست آورده ایم. ساده ترین و در عین حال مبنائی ترین حالت حمل و بارگیری در معادن روباز، هنگامی است که یک سینه کار یا ایستگاه بارگیری در معدن فعال است. در چنین وضعیتی باید تعدادی کامیون از این ایستگاه سرویس گیرند. هرگاه تعداد این کامیونها خیلی زیاد باشد، در اکثر اوقات انتظار آنها را در صفی در مجاورت لودر یا شاول، جهت بارگیری مشاهده خواهیم نمود. برعکس اگر تعداد آنها خیلی کم باشد، توقع این می رود که در زمانهایی، لودر یا شاول را بیکار و منتظر بازگشت و ورود کامیون به سینه کار مشاهده کنیم. برقراری تعادل میان این دو وضعیت، هدف ما می باشد که اگر معیارهای اقتصادی را نیز در آن دخالت دهیم، در واقع تعداد بهینه کامیون مورد نیاز این سیستم بارگیری و حمل را تعیین کرده ایم. از سوی دیگر، مجموعه «لودر- کامیون» تحت اختیار ما باید به گونه ای برنامه ریزی شوند که بتوانند حداقل ظرفیت تولید مورد نظر برای سیستم را تأمین کنند. با این توصیفات کاملاً روشن است که بهترین راه برای رسیدن به اهداف فوق، استفاده از مبانی تئوری صف است تا ایستگاه بارگیری را بعنوان سرویس دهنده و کامیونها را بعنوان سرویس گیرنده تشبیه نمائیم. بدین ترتیب می توان شاخصهایی چون متوسط زمان انتظار کامیونها، متوسط زمان بیکاری لودر، نرخ خروج یا

معادله برگشتی برنامه ریزی پویا خواهد بود:

$$F_k(X_k) = \text{Max} [u_k(x_k) + F_{k-1}(X_k - x_k)]$$

$$X_k = \sum_{k=1}^k x_k \leq N \quad x_k = 0, 1, 2, \dots, N$$

$$F_0(\emptyset) = \emptyset$$

حل مسأله به صورت فوق مشروط بر این است که موادی که از سینه کارهای مختلف استخراج می شوند از نظر کیفی یکسان و همگون باشند و یا اگر از تفاوت کیفی برخوردار هستند، برای مصرف کننده، امر حساس و با اهمیتی نباشد. حال اگر چنین شرطی بر عملیات معدنکاری حاکم نبود و امر کنترل کیفی در مسأله داخل شد، راه حل ارائه شده در فوق دیگر پاسخگوی نیاز سرپرست معدن در تخصیص امکانات حمل و نقل، نخواهد بود. در چنین حالتی می توان با الهام گرفتن از دیدگاههای کلی و مفاهیم برنامه ریزی پویا، الگوریتم ابتکاری (heuristic) را عرضه نمود که بر مبنای آن در چندین مرحله فرعی (بجای M مرحله اصلی) این تخصیص منابع را با حفظ پارامترها و مشخصه های کیفی مورد نظر، صورت داد.

سرپرست معدن در تخصیص لودرها و کامیونهای تحت اختیارش با پیچیدگی بیشتری روبرو خواهد بود، اگر تعداد کامیونها و لودرها بسیار زیاد گردد و شرایط معدنی مذکور در قسمت ۲-۴ برای او پدیدار گردد، در این حالت چگونه او را در برنامه ریزی و تخصیص این منابع تولیدی یاری دهیم؟ بنظر می رسد که در این برنامه ریزی بهتر باشد بجای تخصیص ثابت تعدادی کامیونها در طول یک دوره کاری، از سیستم تخصیص انعطاف پذیر آنها بهره جویم یعنی در هر بار رفت و برگشت کامیون، تجدید نظر در تخصیص و ارسال آن به نقطه مبدا یا مقصد انجام دهیم. بر همین مبنای پس از توصیف اصطلاحات متداول در این سیستم جدید که برخی معدنکاران ایران از آن به لفظ دیسپاچینگ (Dispatching) یاد می کنند، توابع هدفی بعنوان شاخص های بهره وری سیستم تعریف می شوند. با کمک گرفتن از این شاخص ها، یک مدل برنامه ریزی خطی (که بی شباهت به مدل های عمومی حمل و نقل نیست) را به منظور تعیین ملاک های اولیه در تخصیص انعطاف پذیر کامیونها، تدوین می نمایم. در نهایت از اجتماع تمامی نتایج حاصل از شرایط و حالات قبلی، در قالب دو الگوریتم ابتکاری، می توانیم در هر لحظه با تصمیم گیری جدید بر مبنای آخرین وضعیت گزارش شده

ارسال کامیونها (ظرفیت سیستم بارگیری و حمل) و ... را تعیین کرد. به کمک این شاخص ها و انجام یک سلسله محاسبات ریاضی دیگر می توان رابطه ریاضی را بدست آورد که براساس آن تعداد کامیون مورد نیاز برای یک سیستم حمل و بارگیری با ظرفیت مشخص را بدست آورد و سرانجام با داخل نمودن پارامترهای اقتصادی و ضرائب هزینه، به کمک یک مدل برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح و با محدودیت، تعداد بهینه کامیونها را نیز تعیین کرد. بدین گونه یک ایستگاه بارگیری و حمل بطور کامل برای تجزیه و تحلیل و تصمیم گیری در مورد تعیین تعداد کامیون مورد نیاز و بهینه آماده گشته است. سرپرست معدن با کمک روابط ریاضی و محاسبات گفته شده، می تواند هر ایستگاه بارگیری (سینه کار استخراجی) را از نظر هزینه و ظرفیت حمل و بارگیری، در شرایط مختلف، تحت کنترل خود درآورد. اما اگر معدن چند ایستگاه بارگیری یا سینه کار استخراجی فعال داشت و در عین حال سرپرست معدن نیز مجاز بود که ماشین آلات تحت اختیار خود را از سینه کاری به سینه کار دیگر جابجا کند، چگونه او را در تخصیص این امکانات یاری دهیم؟ در این حالت ابتدا تک تک ایستگاههای بارگیری را که در آنها لودر یا شاول مستقر شده است، بصورت مجزا و براساس آنچه ذکر شد، مورد مطالعه قرار می دهیم. طبعاً نتایج حاصله از این مطالعه در جداول لازمه ثبت خواهد شد. حال چگونه این اطلاعات را به هم ارتباط دهیم تا از ترکیب آنها مجموعه معدن از نظر برنامه ریزی و تخصیص امکانات حمل و بارگیری تحت کنترل درآید؟ در واقع می خواهیم تعدادی کامیون (N) تحت اختیار سرپرست معدن را به چند ایستگاه بارگیری یا لودر (M) به گونه ای تخصیص دهیم که در مجموع میزان ماده معدنی حمل شده حداکثر گردد. بدیهی است که می توان هر ایستگاه بارگیری را یک مرحله تصمیم گیری تلقی کرد، در نتیجه به تعداد لودرها (M) مرحله تصمیم گیری داریم. حال روشن می شود که با بهره گیری از مفاهیم برنامه ریزی پویا، مسأله حل شدنی است.

$$\text{Max} \sum_{k=1}^M u_k(x_k)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^M x_k = N$$

$$x_k \in I \quad \text{and} \quad \text{Nonnegative}$$

$$\theta_0 = F/q \quad (2)$$

نرخ سرویس لودر با توجه به زمان مانور و بارگیری:

$$\mu = 1/(t_l + t_m) \quad (3)$$

نرخ ورود کامیون با توجه به سیکل کار و تعداد آنها:

$$\theta = N/(t_w + T) \quad (4)$$

تخمین متوسط زمان انتظار کامیون با توجه به سیستم صف مفروض:

$$t_w = \theta(1 + \mu^2\sigma^2) / [2\mu(\mu - \theta)] \quad (5)$$

محاسبه تعداد کامیونها برحسب سازه پارامترها:

$$N = \theta T + \theta^2(1 + \mu^2\sigma^2) / [2\mu(\mu - \theta)] \quad (6)$$

رابطه (۶) از جمع دو رابطه (۴) و (۵) و حذف  $t_w$  از آنها بوجود آمده است. حال با استفاده از این رابطه می توان براساس نرخ ارسال کامیون مورد نیاز (رابطه ۲)، تعداد کامیون مورد نیاز سیستم را تعیین نمود.

ب. محاسبه تعداد بهینه کامیونها

این امر با بهره گیری از یک سیستم آنالیز هزینه بشرح زیر انجام خواهد شد.

تابع هزینه عملیاتی یک لودر یا شاول و  $N$  کامیون.

$$TC = C_s + N * C_l \quad (7)$$

تابع هزینه برحسب  $\beta$  (نسبت هزینه کامیون به لودر):

$$TC = C_s(1 + \beta * N) \quad (8)$$

تابع هزینه در واحد زمان برای هر بار کامیون:

$$C = C_s(1 + \beta * N) / \theta \quad (9)$$

از سیستم حمل و بارگیری، سرپرست معدن را به تخصیص بهینه کامیونها نزدیک سازیم. الگوریتمها با توجه به ضرورت وجود چند ایستگاه بارگیری و چندین نقطه تخلیه (مصرف) تدوین شده اند. همچنین مخلوط و هموزن سازی مواد، کنترل و بالانس فاکتورهای کمی و کیفی تولید، از دیگر مبانی مورد توجه در الگوریتمهای فوق بوده اند. درجه اشباع مسیر ترافیکی کامیونها بعنوان یکی از محدودیت های مهم در تدوین الگوریتمها دخالت داشته است.

از آنجا که تشریح کامل این مباحث در مختصر صفحات موجود نمی گنجد و بعلاوه علیرغم پیچیدگی، تمامی آنها بر مبنای ساده ترین حالت عملیات بارگیری و حمل یعنی معدن با یک سینه کار فعال بنا شده است، لذا تنها به توضیح بیشتر این حالت معدنکاری اکتفا می کنیم و علاقمندان را به مطالعه مرجع ۱ راهنمایی و توصیه می کنیم.

#### ۴ - تجزیه و تحلیل و برنامه ریزی عملیات بارگیری و حمل در معادن رو باز با يك سینه کار استخراجی فعال

توصیف این گونه معادن در سطور قبلی شرح داده شد. همچنین عنوان شد که در تحلیل آن از مبانی ثوری صف کمک گرفته، ایستگاه بارگیری را بعنوان سرویس دهنده و کامیونها را سرویس گیرنده تصور می کنیم. البته عملیات بارگیری و حمل در چنین معادنی با یک سیستم صف چهار مرحله ای بهتر قابل تشبیه می باشد که بخاطر ساده سازی مسأله، آنها را در این مقاله به کمک صف یک مرحله ای مورد بررسی قرار می دهیم. البته فرض ما این است که سیستم صف  $M/G/1$  باشد. محاسبات لازمه برای این بررسی را در دو بخش انجام می دهیم:

الف - محاسبه تعداد کامیونهای مورد نیاز سیستم

روابط ریاضی این محاسبات بشرح زیر است. یاد آور می شود که تعریف مشروح پارامترهای مورد استفاده در این فرمولها و روابط در مرجع ۱ آورده شده است.

محاسبه نرخ تولید، حاصل تقسیم میزان تولید برنامه ریزی شده بر واحد زمان تحت اختیار:

$$F = A_0 / T_p \quad (1)$$

نرخ ارسال کامیون براساس نرخ تولید و ظرفیت صندوق کامیون:

جایگزینی رابطه (۶) در رابطه (۹):

$$C = [1/\theta + \beta T + \beta(1 + \mu^2 \sigma^2) / (2\mu(\mu/\theta - 1))] C \quad (10)$$

مشتق گیری از رابطه (۱۰)، بر حسب  $\theta$ :

$$(\mu/\theta - 1)^2 = 0.5\beta(1 + \mu^2 \sigma^2) \quad (11)$$

حل معادله رابطه (۱۱) و محاسبه  $\theta^*$ :

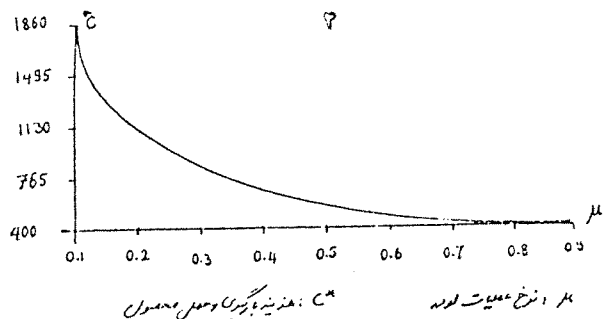
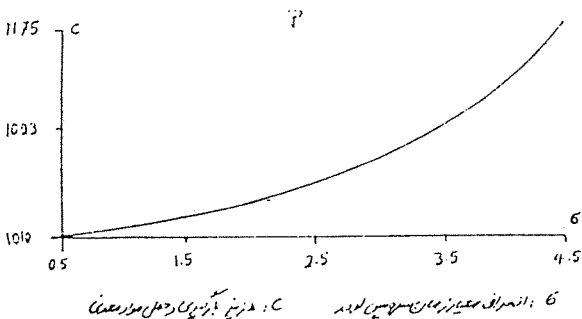
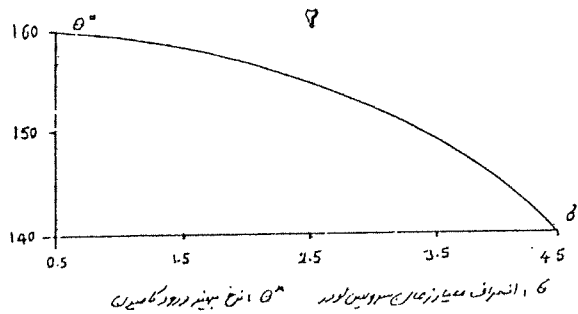
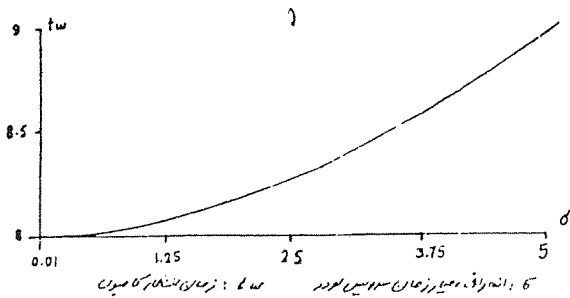
$$\theta^* = \mu / [1 + \sqrt{0.5\beta(1 + \mu^2 \sigma^2)}] \quad (12)$$

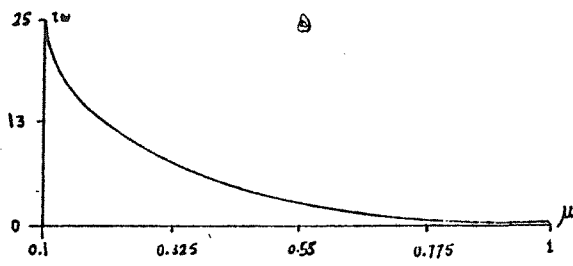
حال اگر مقدار  $\theta^*$  را در رابطه (۶) قرار دهیم،  $N^*$  یا تعداد بهینه کامیونهای این سیستم بدست خواهد آمد. به منظور روشن شدن ارزش و کارایی کاربرد تکنیک فوق در محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز، پس از جمع آوری اطلاعات لازمه از معدن سنگ آهک کارخانه سیمان آبیگ، با استفاده از روابط فوق مسأله مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن با نتیجه حاصله از حل مسأله به روش سنتی و متداول در معادن (در محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز) مورد مقایسه قرار گرفته است.

هزینه حمل و بارگیری	نرخ تولید حاصل	تعداد کامیون مورد نیاز	
۱۰۷۷ ریال	۱۱۲۳ تن	۲	روش سنتی
۱۰۱۳ ریال	۱۳۶۵ تن	۳	روش مبتنی بر تحقیق در عملیات

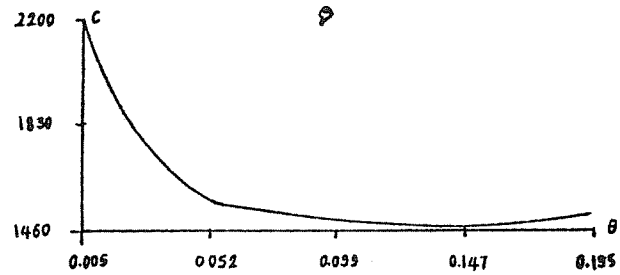
در جدول فوق مشاهده می کنیم روش مبتنی بر تحقیق در عملیات، یک کامیون بیشتر از روش سنتی را پیشنهاد می کند اما در عمل موجب ۷ درصد کاهش هزینه برای هر واحد به علاوه ۱۷ درصد افزایش نرخ تولید شده است! چرا با زیاد شدن تعداد کامیونهای سیستم که ظاهراً باعث افزایش هزینه های عملیاتی خواهد بود، هزینه ها ۷ درصد کاهش یافته است؟ اگر در جستجوی پاسخ این سؤال باشیم باید مروری بر پارامترها و متغیرهای سیستم نموده، با تجزیه تحلیل آنها علت را دریابیم. این کار به صورت مفصل در مرجع ۱ طی عرضه چندین نمودار صورت پذیرفته است. به منظور اختصار، گزیده ای از نمودارهای فوق را به همراه خلاصه ای از نتایج یاد آور می شویم.

لازم به ذکر است که این نمودارها براساس اطلاعات بدست آمده از معدن فوق الذکر ترسیم شده است. همچنین **حین محاسبات جهت ترسیم هر یک از آنها، مابقی متغیرهای مدل ثابت فرض شده اند.**

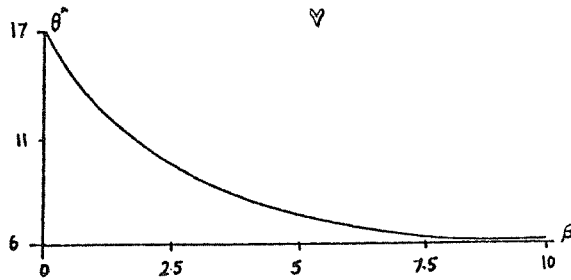




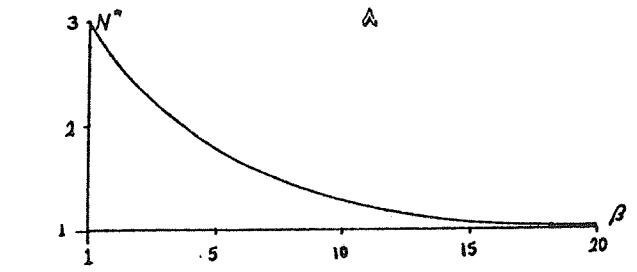
۶: نرخ معیبات لودر،  $\sigma$ : زمان انتشار کامیون



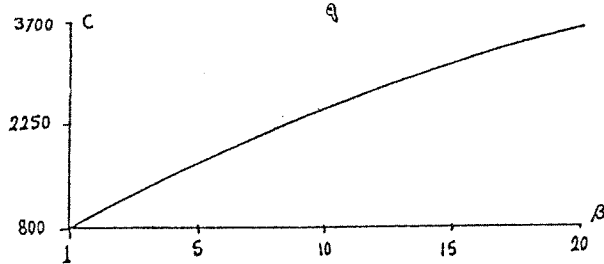
۷: نرخ لودر کامیون،  $C$ : هزینه بارگیری و حمل بار معدن



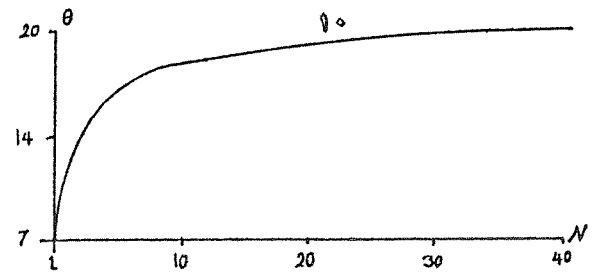
۸: نسبت هزینه بارگیری کامیون به لودر،  $C$ : نرخ پمپ آب کامیون



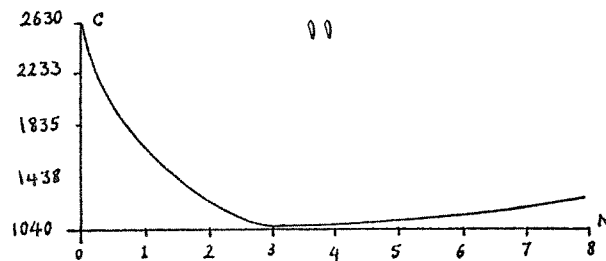
۹: نسبت هزینه بارگیری کامیون به لودر،  $N$ : تعداد کامیونهای تخصیص داده شده به بارگیری



۱۰: نسبت هزینه بارگیری کامیون به لودر،  $C$ : هزینه بارگیری و حمل معدن



۱۱: نرخ لودر کامیون،  $N$ : تعداد کامیون



۱۲: هزینه بارگیری و حمل بار معدن،  $N$ : تعداد کامیون

$\sigma$  انحراف معیار زمان بارگیری کامیونها توسط ماشین بارکننده (لودر یا شاول) می باشد. تحقیقات انجام شده در معادن نشان می دهد که همبستگی شدیدی بین مقدار آن و وضعیت آتشباری در سینه کار وجود دارد. هرچه آتشباری مطلوب تر صورت گرفته باشد، مقدار  $\sigma$  کمتر است و البته

در یک سیستم حمل و بارگیری متغیرهای مستقلی که مابقی متغیرها را به تبعیت از خود در آورده اند، همان متغیرهایی هستند که ایجاد تغییر در آنها از جمله اختیارات سرپرست معدن می باشد. از میان آنها  $\sigma$ ،  $N$ ،  $\theta$  و  $\beta$  را مورد توجه قرار می دهیم.

این امر بدیهی نیز می باشد چه در اثر آتشباری مناسب، مواد بصورت هموژن و یکنواخت خرد و شکسته می شوند. نمودارهای شماره ۱، ۲ و ۳ حکایت از این می کند که علیرغم اینکه هر چه مقدار  $\sigma$  کمتر باشد، متوسط زمان انتظار کامیونها در ایستگاه بارگیری کمتر، نرخ تولید بیشتر و طبعاً هزینه بارگیری و حمل نسبی (به ازای واحد وزن) کمتر خواهد شد اما این بهبود از مقدار نسبی کمی برخوردار است. به بیانی دیگر با مطلوب تر کردن عملیات آتشباری، شاخص های بهره وری بالاتر می روند، اما به مقدار کمی!

$M$  نرخ بارگیری توسط لودر یا شاول می باشد ( $1/\mu =$  متوسط زمان بارگیری کامیون) و مقدار آن بستگی به قدرت تحرک و مانور ماشین بار کننده دارد. نمودارهای شماره ۴ و ۵ بیانگر این است که هرچه  $M$  بیشتر باشد، زمان انتظار کامیونها و هزینه نسبی عملیات کمتر خواهد شد و مقدار این کاهش بسیار زیاد می باشد. نکته جالب تر اینکه کاهش  $M$  از حدود خاصی (تقریباً ۰/۲) موجب افزایش بسیار سریع هزینه نسبی و متوسط زمان انتظار می باشد. یعنی اگر سرپرست معدن مورد مطالعه، لودری که متوسط زمان بارگیری کامیون توسط آن، بیشتر از ۴ دقیقه باشد را در سینه کار مستقر نماید، باید آمادگی مواجهه با بیکاری زیاد کامیونها و افزایش شدید هزینه ها را هم داشته باشد! در نهایت باید گفت شاخص های بهره وری حساسیت بسیار بیشتری نسبت به نوع و توانائی ماشین بار کننده دارند تا مطلوب تر کردن عملیات آتشباری.

$\theta$  نرخ ارسال کامیون می باشد که اگر در ظرفیت صندوقه آن ضرب شود، نرخ تولید سیستم را به ما می دهد. کاهش و افزایش تعداد کامیون موجود در سیستم و یا تغییر نوع ماشین بار کننده مقدار آن را تغییر خواهد داد. نمودار شماره ۶ نشان می دهد که هزینه نسبی عملیات تابع آن بوده، اما این وابستگی نقطه بهینه ای دارد. به عبارت دیگر در یک نرخ تولید خاص (بهینه)، هزینه نسبی به حداقل خود می رسد.

$\beta$  نسبت هزینه های مربوط به یک کامیون به هزینه های ماشین بار کننده در واحد زمان می باشد. نمودارهای شماره ۷، ۸ و ۹ نشان می دهد که با افزایش این نسبت نرخ تولید و تعداد کامیون بهینه سیستم کاهش و هزینه نسبی شدیداً افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر وجود فاصله اقتصادی (سرمایه گذاری ثابت و هزینه های جاری) بین کامیون و ماشین بار کننده، موجب افزایش شاخص های بهره وری

خواهد شد.  $N$  تعداد کامیون موجود در سیستم می باشد، سرپرست معدن با اضافه کردن آن، برطبق نمودار شماره ۱۰ می تواند انتظار افزایش نرخ تولید سیستم را داشته باشد اما این وابستگی خطی نبوده و مطابق نمودار، دارای مجانب می باشد. به عبارت دیگر برخلاف تصور، با افزودن تعداد کامیونها از حدی بیشتر، دیگر نرخ تولید سیستم افزایش قابل ملاحظه ای پیدا نخواهد کرد. از سوی دیگر هزینه نسبی عملیات حمل و بارگیری تابع تعداد کامیون موجود در سیستم می باشد و این تابعیت براساس نمودار شماره ۱۱ از نقطه مینیمم برخوردار است که اگر  $N$  را در آن نقطه کمتر یا بیشتر کنیم در هر دو حال هزینه ها افزایش خواهد یافت. البته این همان تعداد بهینه کامیونهاست که در معدن مورد مطالعه، عدد ۳ برای آن محاسبه و حاصل شده است.

## ۵ - ایده هایی در بهبود و توسعه مدل های ریاضی و بهینه سازی عملیات بارگیری و حمل در معادن

اگرچه مطالب این مقاله در نوع خود از ابتکار و دیدگاه های نوینی برخوردار است، اما در هر حال خالی از اشکال نبوده، نیاز به توسعه و بهبود دارد. ایده های زیر می تواند در برگیرنده این امر باشد تا آن را کاربردی کند.

۱-۵-  $N$  حاصل از حل مسأله یک عدد حقیقی (REAL) است در حالیکه تعداد کامیونها، یک عدد صحیح (INTEGER) می باشد.

۲-۵-  $\theta^*$  حاصل از حل مسأله، ممکن است از  $\theta_0$  کوچکتر شود که مغایر با برنامه ریزی تولید معدن است. این امر باید در طول حل مسأله تحت کنترل قرار گیرد.

۳-۵- اگر بجای یک نوع کامیون، چند نوع و با ظرفیت های متفاوت را در اختیار داشته باشیم، روش کنونی حل مسأله قادر به پاسخگویی نخواهد بود.

۴-۵- قابلیت اعتبار سیستم (SYSTEM RELIABILITY) مدنظر نبوده است و تعداد کامیون مورد نیاز را باید با توجه به آن محاسبه و تعیین نمود.

۵-۵- سیستم صف چهار مرحله ای بصورت گویا تری واقعیت مسأله را بیان می کند، در حالی که برای ساده سازی، سیستم صف یک مرحله ای برای آن، در نظر گرفته شده است.

۶-۵- بجای مدل صف  $M/G/1$  بهتر است از مدل صف با منابع محدود، بهره جوئیم.

۷-۵- بهتر است که توأم با تعیین تعداد بهینه کامیونهای





مورد نیاز، ظرفیت بهینه آنها را نیز به سرپرست معدن توصیه نمود.

۵-۸ - با توجه به قیمت‌های مختلف و در مقابل کارآئی‌های متفاوت انواع ماشین آلات حمل و بارگیری، موضوع انتخاب بهینه نوع ماشین آلات نیز می‌توانست از جمله نتایج این مطالعه باشد که بدان توجه نشده است.

۵-۹ - در زمینه کاربرد مطالب این مقاله در سیستم‌های حمل و جابجائی مواد در معادن زیر زمینی هیچگونه اظهار نظری نشده است، درحالی که در معدن چند سینه کار فعال وجود دارد.

۵-۱۰ - ماکزیمم کردن نرخ تولید مجموع سینه کارها و

مینیمم کردن هزینه، توأمأ باید تابع هدف باشد.

۵-۱۱ - ممکن است بجای یک، چند مشخصه کیفی در هر سینه کار مدنظر باشد. از این نظر الگوی ارائه شده نیاز به توسعه و بهبود دارد.

۵-۱۲ - اختلاط بهینه مواد مستخرجه از سینه کارها، خود نیاز به یک مدل برنامه ریزی تولید دارد که باید در الگوریتم عرضه شده، داخل گردد.

لازم به ذکر است که تا کنون برای اشکالات اول، دوم، سوم، یازدهم و دوازدهم پاسخ و راه حل مناسب شناسائی شده است و مابقی نیز تحت پژوهش و مطالعه می‌باشند.

### نتیجه گیری:

در این مقاله چندین مدل بهینه سازی برای عملیات بارگیری و حمل در شرایط مختلف معادن روباز مورد بررسی و شرح قرار گرفته است. برای معادن با ظرفیت تولیدی پایین که تنها یک ایستگاه بارگیری در آنها فعال است، مؤثرترین تکنیک تحقیق در عملیات، بکارگیری تئوری صف می‌باشد تا براساس نتایج آن، تعداد بهینه کامیون‌های مورد نیاز سیستم تعیین گردند.

هر زمان که به خاطر وسعت معدن و یا نیاز به ظرفیت تولید بالاتر، عملیات بارگیری در چندین سینه کار استخراجی انجام شود، استفاده از برنامه ریزی پویا و ارائه الگوریتم‌های ابتکاری براساس آن، موفق‌ترین روش برای تخصیص کامیونها به لودرها خواهد بود.

در عملیات پیچیده معدنکاری که در آن واحد در چندین

ایستگاه استخراج و بکارگیری حجم تولید بسیار بالا مطرح بوده، در عین حال با محدودیت‌های شدید کنترل کیفی و تأمین مواد معدنی چندگانه با کیفیت و کمیت‌های متفاوت روبرو باشیم، نیاز به برنامه ریزی و تخصیص انعطاف پذیر کامیونها احساس می‌شود. تخصیص بهینه کامیونها در این شکل امری بسیار مشکل می‌باشد که با استفاده از مجموعه‌ای از تکنیک‌های تحقیق در عملیات تا حدودی آسان می‌شود.

در هر حال بکارگیری فنون تحقیق در عملیات در سیستم‌های بارگیری و حمل معادن، ۲۰ درصد افزایش تولید و ۳۵ درصد کاهش زمان توقف و انتظار (که معادل با افزایش بهره‌وری است) را گزارش نموده است.

### منابع:

3. Arnold, J.M., and White, J.W. "Computer-Based Truck Dispatching", USA, World Mining, 1984, PP.53-57.
4. Luo, Z. "Allocation and Dispatching of trucks in open-pit mine", Chinese, Nonferrous Metals, 1984.

۱. سکاکی، سید حمید، الگوهای برای بهینه سازی عملیات بارگیری و حمل در معادن روباز، سمینار کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۸.
2. Topuz, E., and Luo, Z. "Models for allocating and dispatching trucks in surface mining operations", Bulk Solids Handling, 1987, PP. 47-52.