مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی به منظور بهینه‌سازی کارایی سیستم حمل معادن روباز

دکتر سید کاظم اورعی[i]؛ دکتر مرتضی احمدی[ii]؛ مهندس بهاره عاصی[iii]

چکیده

بارگیری و حمل، حدود ۵۰ درصد هزینه‌های یک معدن روباز را به خود اختصاص می‌دهند؛ بنابراین کاهش درصد کمی از این هزینه‌ها، صرفه‌جویی قابل توجهی را در مجموع هزینه‌ها به همراه خواهد داشت. برای تحقق این هدف، سیستم‌های مدیریت حمل‌و نقل در معادن روباز توسعه داده شدند.

مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، مدلی جامع برای مسائل حمل‌ونقل معادن روباز است که می‌تواند برای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در محیط‌های فازی بکار گرفته شود. در این مدل، بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل برای تخصیص سیستم باربری به بارکننده‌ها به وسیله برنامه‌ریزی آرمانی با محدودیت‌های فازی انجام شده است. به دلیل این که تولید روزانه بارکننده‌ها ثابت نیست، پارامترهای مؤثر به صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند. مدل فازی با استفاده از روش α-cut قطعی‌سازی شده است.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، تخصیص کامیون، تحقیق در عملیات، برنامه‌ریزی آرمانی، منطق فازی، معادن روباز

Fuzzy Goal Programming Model for Optimization of Transportation System in Opencast Mines

Prof. K. Oraee; Dr. M. Ahmadi; Eng. B.Asi

ABSTRACT

Ore loading and transport can constitute some 50% of the total operating costs in a typical opencast mine. Any small reduction in these components can therefore result in substantial savings in the total cost. In this paper, a mathematical model is introduced that aims to optimize equipment allocation in opencast mines. In this model, optimization of loading and transport machinery is carried out using goal programming with Fuzzy constraints. Since in a typical mine the output of any loader can be variable, Fuzzy values have hence been used for all variables. The devised model has been tested in Sarcheshmeh and Songun copper mines of Iran. Both mines are amongst the largest operations in the world. The flexible allocation system, prescribed by the model, resulted in 15% increase in the mine output, as opposed to the rigid method of equipment allocation.

KEYWORDS

Optimization, Truck allocation, Operations research, Goal programming, Fuzzy logics, Opencast mines

[ii] استاد دانشگاه استرلینگ انگلستان: Sko1@stir.ac.uk

[ii] عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس: Moahmadi@modares.ac.ir

[iii] کارشناس ارشد معدن دانشگاه تربیت مدرس: Basi@yahoo.com

۱- مقدمه

مدل‌های بهینه‌سازی از دوران انقلاب صنعتی همواره مورد توجه ریاضی‌دانان بوده است.از اواسط دهه ۱۹۸۰ تخصیص بهینه کامیون‌ها، به عنوان یک امر مهم برای افزایش تولید و کاهش هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های بارگیری و باربری معادن روباز مورد توجه قرار گرفت. چندین مدل برای تخصیص کامیون‌ها ارائه شده که بکارگیری این سیستم‌ها در معادن باعث افزایش ۵ تا ۱۲ درصدی میزان تولید در معادن شد. توپوز و لو[۱] [۱] با استفاده از تئوری صف، وایت و السون[۲] [۲] با بکارگیری برنامه‌ریزی خطی و تمنگ، اتونیه و فرندوی[۳] [۳] با استفاده از مدل حمل‌ونقل، مدل‌هایی برای تخصیص بهینه کامیون‌ها ارائه دادند. ایراد مهمی که در تمام این مدل‌ها وجود دارد این است که همه آنها تنها یک تابع هدف را تأمین می‌کنند. چنانچه برای بهینه‌سازی سیستم باربری بیش از یک هدف مورد نظر مدیریت معدن باشد، کارایی مدل‌ها کاهش می‌یابد.

۲- ضرورت استفاده ازمدل

مدل‌های بهی‌نه‌سازی علاوه بر اینکه فرآیند تولید را از نظر فنی به سطح بالاتری ارتقا می‌دهند، در بهبود مسائل اقتصادی نیز مؤثرند. از آنجا که هزینه‌های بخش بارگیری و حمل در معادن روباز بخش عمده‌ای از هزینه‌های معدنکاری را در بر می‌گیرند، کاهش درصد کمی از این هزینه‌ها باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در کل عملیات خواهد شد؛ بنابراین ساختن مدل‌هایی برای استفاده حداکثر از تجهیزات و نیز کاهش هزینه‌های عملیاتی معادن، ضروری به نظر می‌رسد. این مدل‌ها با بهینه‌سازی سیستم باربری، سبب افزایش بهره‌وری در معادن می‌شوند.

۳- اهداف مدل

مهم‌ترین هدف در هر معدن، افزایش سوددهی است و یکی از عواملی که سوددهی با آن ارتباط مستقیم دارد، میزان تولید معدن است. البته این در صورتی است که تجهیزاتی به سیستم اضافه نشود و افزایش تولید با بهینه‌سازی تجهیزات و امکانات موجود صورت گیرد؛ بنابراین اولین هدف در این مدل بیشینه کردن تولید است که در این صورت با استفاده از اصل اقتصاد وسعت٤، هر گاه تولید اضافه شود، قیمت تمام شده هر واحد تولید کاهش می‌یابد.

از آنجا که مواد معدنی ارسالی به سنگ‌شکن از جبهه‌کارهای مختلف با نسبت‌های خاص برداشت می‌شود، این مواد باید به گونه‌ای ترکیب شوند که پس از اختلاط، عیار موردنیاز کارخانه فرآوری با کمترین اختلاف از حد تأمین گردد؛ بنابراین هدف دوم، کنترل کیفیت ماده‌معدنی ارسالی به کارخانه فرآوری است.

٤- مفاهیم مدل

از آنجا که هدف این تحقیق، بهینه‌سازی چند عامل به صورت همزمان است، مسأله تصمیم‌گیری از نوع چندمنظوره می‌باشد و یا به عبارت دیگر، دستیابی به دو هدف بیشینه کردن تولید و کنترل کیفیت موادمعدنی؛ که با یکدیگر در تناقض هستند، موردنظر است و تصمیم نهایی باید بین این دو هدف تعادل ایجاد کند. این هدف با ارائه روش برنامه‌ریزی آرمانی تأمین شده است. راهکار اساسی برنامه‌ریزی آرمانی این است که با در نظر گرفتن مقدار عددی خاصی برای هر یک از آرمان‌ها، تابع هدفی برای هر یک از آنها مشخص کرده و سپس مجموع وزنی انحراف‌ها از آرمان‌ها را به حداقل می‌رساند.

الگوریتم‌های مختلفی برای حل یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی وجود دارد. در این تحقیق از روش تابع مطلوبیت استفاده شده است. در روش تابع مطلوبیت به اهداف مختلف، بسته به میزان اهمیت آنها وزن داده می‌شود. برای تعیین این وزن‌ها (w_j) از روش[۵] AHP یا تجربه افراد خبره [۴] استفاده شده است.

۵- عدم قطعیت فازی

در صورت عدم دسترسی به اطلاعات دقیق، مدل‌های فازی و احتمالی ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی خواهند بود. مدل‌های احتمالی در وقایع تصادفی و مدل‌های فازی در صورت کافی نبودن اطلاعات، مورد استفاده قرار می‌گیرند. میکولاپولوس و پاناگیوتو[۶] [5]، مدل احتمالی تخصیص کامیون را ارائه دادند. آنها میزان تولید شاول را یک پارامتر تصادفی درنظر گرفته و برای پیش‌بینی مقادیر آن از توابع توزیع احتمالی استفاده کردند.

در تحقیق حاضر از مدل‌های فازی برای بهینه‌سازی سیستم ترابری معادن روباز استفاده شده است [۶]. از آنجا که تولید کل سیستم به تولید شاول وابسته است، برای بیشینه کردن تولید، تقاضای ظرفیت باربری از شاول‌ها باید پوشش داده شود. در بسیاری حالات امکان تعیین تابع هدف و محدودیت‌های آن به صورت عبارت‌های قطعی امکان‌پذیر نیست. برای اعمال پارامتر تولید شاول در مدل و انطباق هر چه

بیشتر آن با واقعیت، از مجموعه‌های فازی استفاده شده است. در این تحقیق، برنامه‌ریزی آرمانی با تکنیک محدودیت فازی تلفیق شده است به طوری که محدودیت‌های فازی برای به دست آوردن محدودیت‌های قطعی معادل، تغییر شکل یافته‌اند.

نظریه فازی را در سال ۱۹۶۵ لطفی‌زاده[۷] معرفی کرد. واژه فازی در لغت به معنای مبهم و نادقیق تعریف شده است. مسائلی که در آنها پارامترهای تصمیم‌گیری نادقیق هستند، معمولاً با برنامه‌ریزی فازی قابل حل هستند.

در این تحقیق، از روش برش آلفا[۸] [۶] [۷] برای حل مسأله برنامه‌ریزی آرمانی فازی استفاده شده است. در این روش، پس از تعیین برش‌های آلفا در محدودیت‌ها، اعداد فازی به فواصل قطعی تبدیل شده، سپس فواصل به دست آمده با متغیرهایی جایگزین می‌شوند. این تبدیل و جایگزینی، باعث تغییر مسأله به یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی می‌شود که برای خطی کردن آن باید از یک تبدیل مناسب استفاده کرد.

۶- مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای بهینه‌سازی کارایی سیستم حمل‌ونقل معادن روباز

مدل‌سازی به معنای تبدیل تصمیمات دنیای واقعی به مدل‌های کمی است که قابل محاسبه و تحلیل است. حل مدل و به دست آوردن جواب‌های بهینه آن چندان دشوار نیست؛ بلکه مهم‌ترین مرحله، ساختن مدل است. یک مدل ریاضی، ساختاری است که داده‌ها (متغیرهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل، محدودیت‌ها و پارامترها) را با ستاده‌ها (ارزش معیارهایی که به وسیله تابع هدف بیان شده است) مرتبط می‌سازد.

۶-۱- آرمان تولید فازی

اولین آرمان مدل، بیشینه کردن تولید سیستم است. از آنجا که تولید شاول‌ها به عواملی نظیر نوع سنگ، کیفیت خردشدگی، وجود آب در جبهه‌کارها و شرایط جوی بستگی دارد، نمی‌توان این عامل را به صورت یک پارامتر ثابت در مدل اعمال کرد؛ بنابراین، پارامتر میانگین تولید شاول به صورت یک عدد فازی مثلثی درنظر گرفته شد. رأس بالای اعداد فازی مثلثی نشان‌دهنده حالتی است که درجه عضویت ۱ در مجموعه دارد. با کاهش درجه عضویت؛ یعنی، با افزایش عدم قطعیت در مورد مقادیر این پارامترها، بازه تغییرات به صورت خطی کاهش یافته (شکل ۱) و دو رأس دیگر این مثلث کامل می‌شود. این دو رأس حد خوش‌بینانه و بدبینانه این پارامتر است. در حالتی که درجه عضویت صفر باشد، میزان عدم قطعیت زیاد است. در این حالت مدل موردنظر به یک مدل فازی تبدیل می‌شود. در این تحقیق، برای غیرفازی کردن مدل از روش برش آلفا استفاده شده است. این روش قابلیت محاسبه تابع هدف با درجه عضویت‌های مختلف را دارد. به این صورت که براساس میزان درجه عضویت پارامتر به مجموعه فازی (عدم قطعیت تصمیم‌گیرنده)، می‌توان محدوده تغییرات دقیق اهداف را محاسبه کرد. [۶]

برای هرآرمان،معادله آرمانی به گونه‌ای است که سمت راست تعیین کننده هدف آرمان باشد. محدودیت آرمانی تولید شاول عبارت است از مقدار سنگ حمل شده از هر شاول به مقاصد مختلف با کامیون‌های متفاوت که باید از تولید آن شاول کمتر باشد. این محدودیت در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \le \tilde{O}_i \qquad i=1,2,...,n_s \qquad (۱)$$

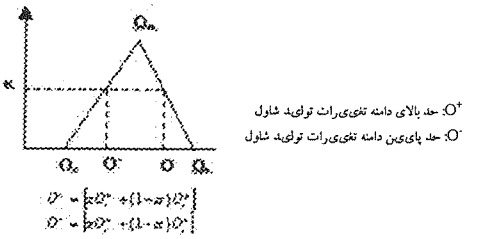
از آنجا که تولید شاول، یک عدد فازی است. پارامتر فازی مثلثی تولید شاول‌ها به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته شده است:

$$\tilde{O}_i = (O_i^p, O_i^m, O_i^o) \qquad (۲)$$

با جاگذاری عدد فازی تولید شاول‌ها، رابطه (۱) به (۳) تبدیل می‌شود:

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \le (O_i^p, O_i^m, O_i^o) \qquad i=1,2,...,n_s \qquad (۳)$$

به منظور قطعی کردن این محدودیت، با توجه به میزان عدم قطعیت از تولید شاول در شیفت، مقادیر مختلفی برش‌های آلفا را می‌توان رسم کرد. به ازای هر برش، حد بالا و پایین دامنه تغییرات این پارامتر مشخص می‌شود. شکل (۱) پارامتر مربوط به تولید هر شاول را که به صورت یک عدد فازی مثلثی می‌باشد، نشان می‌دهد.



شکل (۱): پارامتر فازی مثلثی تولید شاول با برش آلفا

با جاگذاری محدوده تغییرات در رابطه (۳)، رابطه (۴) حاصل می‌شود:

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \le \left[\alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p, \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o\right]$$

$$i=1,2,...,n_s \qquad (۴)$$

سپس W_i به عنوان متغیری تعریف می‌شود که در فاصله $[O^-, O^+]$ قرار دارد:

$$W_i \in \left[\alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p, \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o\right]$$

$$i = 1,2,...,n_s \qquad (۵)$$

با جاگذاری W_i در رابطه (۴)، رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\Rightarrow \sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \le W_i \qquad i = 1,2,...,n_s \qquad (۶)$$

سپس نامساوی (۶) با اضافه و کم کردن انحراف‌های مثبت و منفی از آرمان به تساوی تبدیل می‌شود. در رابطه (۷) محدودیت آرمانی تولید فازی شاول‌ها، که با روش برش آلفا قطعی شده، نشان داده شده است:

$$\begin{cases} \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \\ \sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = W_i \end{cases}$$

$$i = 1,2,...,n_s \qquad (۷)$$

روابط (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) به ترتیب محدودیت‌های آرمانی مربوط به تولید شاول‌های فعال در ماده‌معدنی پرعیار، سنگ اکسید، ماده‌معدنی کم‌عیار و باطله را نشان می‌دهند:

$$\begin{cases} \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \qquad (۸) \\ i = 1,2,...,n_{os} \qquad \sum_{h=1}^{h_n}\sum_{j=1}^{n_c} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = W_i \end{cases}$$

$$\begin{cases} (۹)\ \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \\ \sum_{h=1}^{h_n}\sum_{j=n_c+1}^{n_c+n_{xd}} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = W_i \\ i = n_{os+1},...,n_{xs}+n_{os} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \\ (۱۰) \\ \sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=n_{xd}+n_c+1}^{n_c+n_{xd}+n_{id}} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = W_i \end{cases}$$

$$i = n_{xs} + n_{os} + 1,...,n_{ls} + n_{xs} + n_{os}$$

$$\begin{cases} \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \\ (۱۱) \\ \sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=n_{id}+n_{xd}+n_c+1}^{n_d} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = W_i \end{cases}$$

$$i = n_{ls} + n_{xs} + n_{os} + 1,...,n_s$$

۶-۲- آرمان کیفیت ماده معدنی

محدودیت آرمانی کیفیت ماده‌معدنی ارسالی به سنگ‌شکن به گونه‌ای است که سمت راست آن تعیین کننده هدف آرمان است. تعیین متغیرهای انحراف مثبت و منفی (C_{kj}^-, C_{kj}^+) برای آرمان کیفیت ماده‌معدنی در معادله ضروری است. رابطه (۱۲) محدودیت آرمان کیفیت ماده معدنی را توصیف می‌کند:

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh}.G_{ik} + C_{kj}^- - C_{kj}^+ = Q_{kj}.\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh}$$
$$k = 1,2,...,n_q \qquad (۱۲)$$
$$j = 1,2,...,n_c$$

۶-۳- محدودیت‌ها

ظرفیت باربری تخصیص داده شده به هر شاول باید کمتر از حداکثر توان تولید آن شاول باشد. رابطه (۱۳) این محدودیت را نشان می‌دهد:

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \le M_i \qquad i = 1,2,...,n_s \qquad (۱۳)$$

رابطه (۱۴) این محدودیت را نشان می‌دهد که ظرفیت باربری تخصیص یافته به یک مقصد خاص کمتر از ظرفیت پذیرش آن مقصد باشد:

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=1}^{n_s} x_{ijh} \le C_j \qquad j = 1,2,...,n_d \qquad (۱۴)$$

روابط (۱۵) و (۱۶)، محدودیت مربوط به تعادل جریان باربری در هر نقطه مبدأ و مقصد از شبکه باربری را حفظ می‌کنند.

$$\sum_{j=1}^{n_d} y_{jih} = \sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh}$$
$$i = 1,2,...,n_s$$
$$h = 1,2...,n_h \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{i=1}^{n_s} x_{ijh} = \sum_{i=1}^{n_s} y_{jih}$$
$$j = 1,2,...,n_d \qquad (۱۶)$$
$$h = 1,2,...,n_h$$

رابطه (۱۷)، محدودیت مربوط به تأمین نسبت باطله‌برداری موردنیاز است:

$$R_L \le \frac{\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=n_{os}+1}^{n_s}\sum_{j=n_c+1}^{n_d} x_{ijh}}{\sum_{h-1}^{n_h}\sum_{i-1}^{n_{os}}\sum_{j-1}^{n_c} x_{ijh}} \le R_U \qquad (۱۷)$$

ازآنجا که نسبت باطله‌برداری معادل نسبت باطله به ماده معدنی است، در رابطه (۱۷)، مخرج کسر برابر است با مقدار ماده معدنی که از شاول‌های مستقر در جبهه‌کارهای ماده معدنی پرعیار(nos) به سنگ‌شکن‌های موجود (nc) با انواع مختلف کامیون‌ها حمل می‌شود. همچنین صورت کسر برابر است با مقدار سنگی که از سایر شاول‌ها به تعداد

((ns-(nos+1)) به محل دامپ‌ها((nd(nc+1)) با انواع کامیون‌ها حمل می‌شود.

باید توجه داشت که مبدأها و مقصدها باید به گونه‌ای تنظیم شوند که جبهه‌کارهای استخراجی و سنگ‌شکن به ترتیب شماره‌گذاری شوند.

رابطه (۱۸)، محدودیت کنترل‌کننده ظرفیت باربری کامیون‌ها است. به این معنی که مجموع موادی که در هر شیفت با کامیون h از هر یک از منابع به مقاصد حمل می‌شود، باید برابر ظرفیت حمل کامیون h باشد. در نهایت نشان می‌دهد مجموع تولید شاول‌ها متجاوز از کل ظرفیت باربری کامیون‌های فعال نیست:

$$\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_d} Ht_{ijh}x_{ijh} + \sum_{i=1}^{n_c}\sum_{j=1}^{n_d} D_{jh}x_{ijh} + \sum_{i=1}^{n_c}\sum_{j=1}^{n_d} SD_{jh}x_{ijh} + \sum_{j=1}^{n_d} R_{jih}y_{ijh} + \sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_d} S_{ih}y_{jih}\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_d} SS_{ih}y_{ji} \le Wt.N_h.T_h$$

$$h = 1,2,...,n_h \qquad (۱۸)$$

روابط (۱۹) و (۲۰)، محدودیت‌های حداقل تولید موردنیاز در هر شیفت را در مدل اعمال می‌کنند:

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=n_{os}+1}^{n_s}\sum_{j=n_c+1}^{n_d} x_{ijh} \ge Fwaste \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=1}^{n_{os}}\sum_{j=1}^{n_c} x_{ijh} \ge Fore \qquad (۲۰)$$

روابط (۲۱) و (۲۲)، محدودیت‌های مربوط به تأمین کیفیت ماده‌معدنی ارسالی به کارخانه فرآوری در دامنه موردنظر می‌باشند:

$$C_{kj}^{-} \le (Q_{kj} - L_{kj})\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh} \qquad k = 1,2,...,n_q \quad j = 1,2,...,n_c \qquad (۲۱)$$

$$C_{kj}^{+} \le (U_{kj} - Q_{kj})\sum_{h=1}^{n_h}\sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh} \qquad k = 1,2,...,n_q \quad j = 1,2,...,n_c \qquad (۲۲)$$

۶-٤- تابع هدف

تابع هدف مدل، حداقل کردن انحراف از آرمان‌های تولید و کیفیت است. برای تعیین تابع هدف، انحراف‌هایی حداقل می‌شوند که نامطلوب باشند. در مورد اولین هدف؛ که بیشینه کردن تولید معدن است، انحراف مثبت از هدف نامطلوب نیست؛ یعنی، هرچه تولید معدن از آرمان موردنظر بیشتر باشد، مطلوب‌تر است. بنابراین در مورد آرمان بیشینه کردن تولید فقط انحراف‌های منفی حداقل می‌شوند. در مورد آرمان دوم؛ که کنترل کیفیت سنگ ارسالی به سنگ‌شکن است، تنظیم عیار موردنیاز کارخانه فرآوری مدنظر است. بنابراین مجموع انحراف‌های مثبت و منفی باید کمینه شود. رابطه (۲۳) شکل کلی تابع هدف مدل را نشان می‌دهد که هر آرمان بسته به میزان اهمیت آن در سیستم، ضریب وزنی (W1, W2) مخصوص به خود را داراست:

$$MinZ = W_1\left(h_1(d^-)\right) + W_2\left(h_2(c^-, c^+)\right) \qquad (۲۳)$$

از آنجا که آرمان‌های تولید و کیفیت ماده‌معدنی دارای دو مقیاس متفاوت (تناژ و عیار) هستند و تغییرات در هر یک از آنها معیار دیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به منظور قابل مقایسه شدن آرمان‌ها، باید آنها را بی‌مقیاس کرد. در این تحقیق، روش تخصیص فاصله اقلیدسی با استفاده از نرم[۹] [۸]، برای بی‌مقیاس کردن تابع هدف مدل استفاده شده است. رابطه (۲۴) شکل دقیق تابع هدف را نشان می‌دهد:

$$MinZ = W_1\left(\sum_{i=1}^{n_c}\frac{d_i^-}{\|d_i\|}\right) + W_2\left(\sum_{k=1}^{n_q}\sum_{j=1}^{n_c}\frac{c_{kj}^+ + c_{kj}^-}{\|C_{kj}\|}\right) \qquad (۲۴)$$

$$\|d_i\| = \left[\sum_{j=1}^{n_d}(a_{ijh})^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad i = 1,2,...,n_s \quad h = 1,2,...,n_h$$

$$\|C_{kj}\| = \left[\sum_{i=1}^{n_{os}}(G_{ik} - Q_{kj})^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad k = 1,2,...,n_q \quad j = 1,2,...,n_c$$

$\|C_{kj}^{'}\|$: نرم بردار انحراف از آرمان کیفیت

$\|d_i\|$: نرم بردار انحراف از آرمان تولید

a_{ijh}: ضرایب متغیرهای تصمیم در محدودیت‌های آرمانی

با استفاده از آلفاهای مختلف و تخصیص وزن‌های متنوع به توابع هدف، روند تغییر مقادیر توابع هدف قابل بررسی است. این امر، عامل مهمی در تخصیص بهینه ناوگان باربری است.

۷- بهینه‌سازی ترابری معدن مس سونگون

اولین مطالعه موردی این مدل، معدن مس سونگون است. کانسار مس پورفیری سونگون در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. ذخیره این کانسار بیش از ۷۰۰ میلیون تن تخمین زده شده است. روش استخراج این معدن به صورت روباز است و برای بارگیری و حمل مواد از سیستم شاول- کامیون استفاده می‌شود. در طرح اولیه، کل تولید روزانه در دو شیفت استخراجی ۷۰،۰۰۰ تن است. ماشین‌آلات موردنیاز برای استخراج در سال اول بهره‌برداری ۱۴ کامیون ۱۳۶ تنی و ۳ شاول ۱۴ مترمکعبی محاسبه شده است.

۷-۱- تعیین اعتبار مدل در معدن مس سونگون

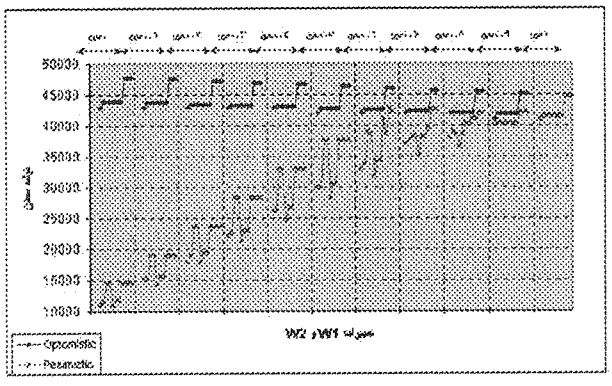
مدل بهینه‌سازی سیستم ترابری چندین بار برای شرایط مختلف استخراج در معدن مس سونگون آزمایش شد. نتایج حاصل از اجرای مدل در آزمایش‌های مختلف با برنامه‌ریزی تولید معدن، در جدول (۱) نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که در همه آزمایش‌ها، با تأمین عیار موردنیاز سنگ‌شکن، تولید حاصل از اجرای مدل بیش از تولید برنامه‌ریزی شده معدن است.

جدول (۱): مقایسه نتایج حاصل از مدل با برنامه‌ریزی دستی

آزمایش	تولید برنامه‌ریزی شده (تن)	تولید مدل (تن)	افزایش تولید (٪)	عیار موردنیاز (٪)	عیار مدل (٪)
۱	۳۵،۰۰۰	٤۱،٥۷۱	۱۸/۷۷	۰/٦۸-۰/۷۸	۰/۷۳
۲	۳۵،۰۰۰	٤۰،٦۰۰	۱٦	۰/٦۸-۰/۷۸	۰/۷۳
۳	۳۵،۰۰۰	٤۰،۰۰۰	۱٤/۲۹	۰/٦۸-۰/۷۸	۰/۷۷
٤	۳۵،۰۰۰	۳۸،۹۰٤	۱۱/۱٥	۰/٦۸-۰/۷۸	۰/۷۳
٥	۳۵،۰۰۰	٤۰،۰۰۰	۱٤/۲۹	۰/٦۸-۰/۷۸	۰/۷٤٥

۷-۲- تحلیل پارامترهای فازی تولید شاول

میزان تجربه، شناخت سیستم، آشنایی با زمین‌شناسی منطقه، وضعیت آب معدن و عوامل دیگر به تصمیم‌گیرنده کمک خواهد کرد تا میزان تولید شاول را با یک ضریب اطمینان تخمین بزند. این ضریب همان درجه عضویت α در مدل فازی است. شکل (۴) میزان تولید سیستم با درجه عضویت‌های مختلف براساس ضرایب وزنی متفاوت، آرمان‌های مدل را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، هر چه میزان عدم قطعیت تصمیم‌گیرنده در مورد پارامتر تولید شاول بیشتر باشد (آلفا به صفر نزدیک‌تر باشد)، دامنه جواب مدل گسترده‌تر و تصمیم‌گیری با ریسک بیشتری همراه است. از طرف دیگر هر چقدر پارامتر موردنظر دقیق‌تر و درجه عضویت به عدد یک نزدیک‌تر باشد، ریسک تصمیم‌گیری کمتر و بنابراین جواب مدل دقیق‌تر خواهد بود.



شکل (۴): تغییرات تولید معدن با ضرایب وزنی مختلف به ازای تغییر آلفا

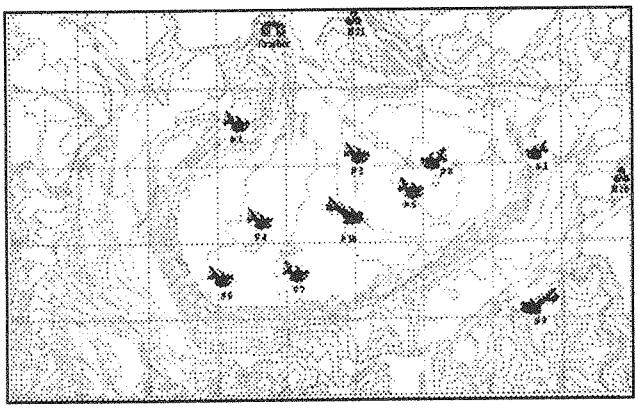
۸- بهینه‌سازی ترابری معدن مس سرچشمه

معدن مس سرچشمه به عنوان دومین مطالعه موردی مدل انتخاب شد. در این معدن نیز برای بارگیری و حمل مواد از سیستم شاول و کامیون استفاده می‌شود. سیستم ترابری این معدن شامل ۱۰ شاول و ۵۲ کامیون است. جدول (۲) نوع، ظرفیت و مشخصات شاول‌ها و کامیون‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۲): ماشین‌آلات فعال در معدن مس سرچشمه

شرح	نوع	تعداد	ظرفیت	واحد
شاول	P&H (1900 AL)	۸	۹	مترمکعب
	P&H (2100 XP)	۲	۱٥/۳	
کامیون	Wabco	۳۲	۱۲۰	تن
	Dresser	۲۰	۱۲۰	

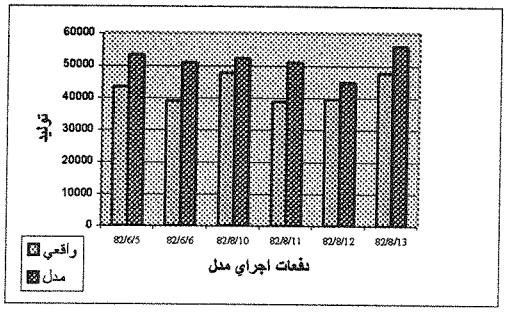
چنان که در جدول (۲) مشاهده می‌شود ظرفیت کامیون‌ها ۱۲۰ تن است. عمر ۳۲ کامیون Wabco؛ به ۲۸ سال [۹] رسیده است. این کامیون‌ها توانایی حمل بار با ظرفیت کامل را نداشته و بیش از ۹۰ تن بار در آن‌ها بارگیری نمی‌شود، تعداد ۲۰ کامیون Dresser نیز در معدن وجود دارد که در حدود ۱۲ سال [۹] کار کرده‌اند. حداکثر باری که این کامیون‌ها می‌توانند حمل کنند ۱۱۰ تن است. بنابراین سیستم باربری معدن مس سرچشمه به صورت دو نوع کامیون ۹۰ و ۱۱۰ تنی در نظر گرفته شده است. این مدل چندین بار در معدن مس سرچشمه آزمایش شد. در این تحقیق به محاسبه و تحلیل یکی از این آزمایش‌ها پرداخته شده و در نهایت افزایش ناشی از اجرای مدل و تولید واقعی معدن با یکدیگر مقایسه می‌شود. شکل (۵) نمای کلی معدن مس سرچشمه و موقعیت شاول‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نمای کلی معدن مس سرچشمه

۸-۱- حل مدل معدن مس سرچشمه

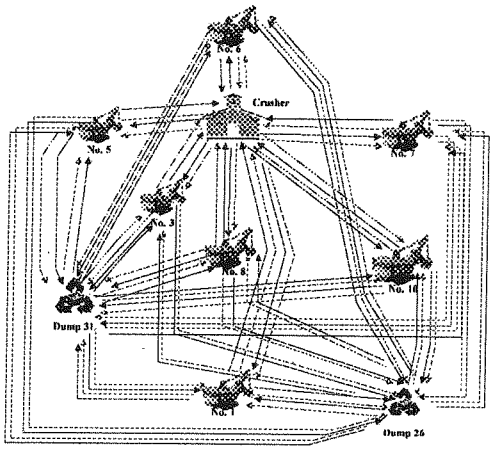
شکل (۶) میزان تولید حاصل از مدل را به همراه تولید واقعی معدن در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که تولید واقعی با توجه به تعداد ماشین‌آلات فعال، با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی محاسبه می‌شود، اما با توجه به اینکه روش‌های برنامه‌ریزی خطی تنها یک تابع هدف را پوشش می‌دهد و در این معدن تأمین عیار موردنیاز کارخانه فرآوری از اهمیت بالایی برخوردار است، نتایج بدست آمده از برنامه‌ریزی خطی، با سعی و خطا به منظور تأمین عیار، تغییر داده می‌شود. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که تخصیص کامیون‌ها با توجه به خروجی مدل بیش از تولید واقعی معدن است که با روش برنامه‌ریزی خطی (تخصیص ثابت) محاسبه شده است.



شکل (۶): مقایسه تولید حاصل از مدل با تولید معدن مس سرچشمه

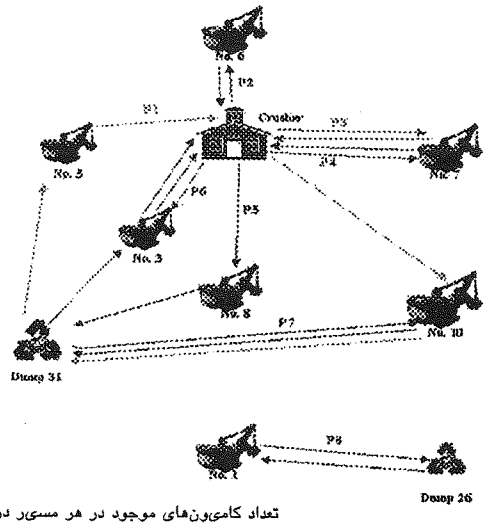
۸-۲- مسیرهای ترابری معدن مس سرچشمه

مسیرهای ممکن برای تخصیص کامیون‌ها در معدن مس سرچشمه مطابق شکل (۷) است.



شکل (۷): مسیرهای ممکن باربری در معدن مس سرچشمه

پس از اجرای مدل، مسیرهای بهینه برای رفت و برگشت کامیون‌ها به منظور تحقق اهداف معدن به دست آمد. در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با توجه به تعداد کامیون‌های فعال در چرخه‌های P1، P2، P3، P4، P5، P6، P7 و P8، مسیر شاول ۱۰ به دامپ ۳۱ (P8+P7) با نرخ عبور ۰/۳۰ پررفت وآمدترین مسیر است، به طوری که در هر ۳/۳ دقیقه یک کامیون از این جاده عبور می‌کند.

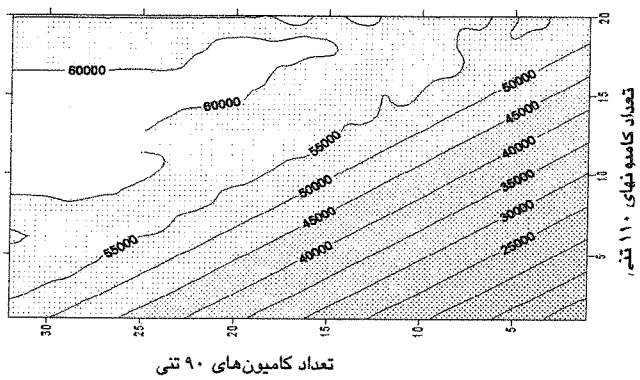


تعداد کامیون‌های موجود در هر مسیر در یک شیفت:
P1=47, P2=64, P3=10, P4=27

شکل (۸): مسیرهای بهینه باربری در معدن مس سرچشمه

۸-۳- تأثیر ترکیب‌های مختلف کامیون‌ها بر میزان تولید معدن مس سرچشمه

در معدن مس سونگون، عملیات استخراج فقط با یک نوع کامیون انجام می‌شود؛ بنابراین توانایی بهینه‌سازی مدل در معادنی که ناوگان باربری آنها از چندین نوع کامیون تشکیل شده است، امکان‌پذیر نیست؛ اما سیستم باربری معدن مس سرچشمه با توجه به توان و عمر کامیون‌های موجود، به دو ناوگان ۱۱۰ و ۹۰ تنی تقسیم شد. شکل (۹) تأثیر ترکیب‌های مختلف کامیون‌ها را در تولید معدن نشان می‌دهد.



شکل (۹): پیش‌بینی تولید معدن مس سرچشمه براساس تعداد کامیون‌ها

۹- تحلیل حساسیت

در بسیاری از مسائل، ممکن است مقادیر پارامترهای یک مدل تغییر کند. اگر یک پارامتر عوض شود، معمولاً با وجود تحلیل حساسیت قبلی، حل مجدد مسأله لازم نخواهد بود. حل

مجدد مسائل ساده ممکن است دشوار نباشد؛ اما حل دوباره مدل بهینه‌سازی سیستم حمل‌ونقل معادن روباز؛ که صدها متغیر و محدودیت در آن وجود دارد، مستلزم وقت و هزینه زیادی است. بنابراین تحلیل حساسیت، تحلیل‌گر را قادر می‌سازد که بجز حل مسأله با استفاده از پارامترهای اصلی، چگونگی تأثیر تغییر پارامترها در جواب بهینه را مشخص کند.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت انجام شده بر تولید حاصل از مدل نشان داد که پارامترهای ساعات کاری در شیفت، ظرفیت، تعداد و زمان سفر کامیون‌ها بیشترین تأثیر را بر تولید دارند.

مقایسه انجام شده برای تعیین پارامترهای مؤثر بر عیار موردنیاز کارخانه فرآوری، نشان داد که دو عامل تعداد کامیون‌ها و میزان خطا در تخمین عیار جبهه‌کارها، بیشترین تأثیر را بر عیار سنگ ارسالی به کارخانه فرآوری دارند.

۱۰- نتیجه

مهم‌ترین ویژگی مدل بهینه‌سازی کارایی ناوگان ترابری معادن روباز، کاربرد آن در شرایطی است که پارامترهای طراحی ثابت و دقیق نیستند. تولید شاول به صورت یک عدد فازی درنظر گرفته شد و برای غیرفازی کردن مدل، از برش α استفاده شد. با استفاده از این روش مشخص شد که هر چه میزان عدم قطعیت تصمیم‌گیرنده در تخمین تولید شاول بیشتر باشد، دامنه جواب مدل گسترده‌تر و تصمیم‌گیری با ریسک بیشتری همراه است. از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی میزان تولید با توجه به تعداد کامیون‌های فعال در معدن استفاده کرد.

از ویژگی‌های دیگر مدل، قابلیت بهینه‌سازی سیستم ترابری معادنی است که بیش از یک نوع کامیون در ناوگان باربری آنها وجود دارد. مدل مذکور در معادنی که کارخانه فرآوری آنها بیش از یک خط تولید دارد نیز قابل استفاده است. از توانایی‌های دیگر مدل، مواقعی است که شاول در مرز بین دو نوع سنگ مختلف قرار دارد. در این حالت مدل طوری برنامه‌ریزی می‌کند که شاول از هر دو نوع سنگ برداشت کند.

این مدل در دو معدن معدن مس سونگون و مس سرچشمه آزمایش شد و عملکرد آن ارزیابی شد. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که علاوه بر تأمین عیار موردنیاز کارخانه فرآوری، تولید نیز حدود ۱۵-۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

۱۱- ضمائم

مجموعه‌ها:

i منابع (شاول‌ها)

j مقاصد (سنگ‌شکن/دامپ)

h نوع کامیون

k کیفیت ماده‌معدنی موردنیاز

متغیرهای تصمیم:

$Xijh$ مقدار بار تخصیص داده شده از منبع i به مقصد j، توسط کامیون h در شیفت

پارامترهای فنی:

Ns تعداد کل شاول‌ها

nos تعداد شاول‌های برداشت‌کننده ماده معدنی پرعیار

nls تعداد شاول‌های برداشت‌کننده ماده معدنی کم‌عیار

Nd تعداد مقاصد nc تعداد سنگ‌شکن‌ها

Nxd تعداد دامپ‌های اکسید nld تعداد دامپ‌های کم‌عیار

Nq تعداد کیفیت های ماده معدنی Cj حداکثر ظرفیت مقصد j در شیفت

nh تعداد انواع کامیون‌ها Mi حداکثر توان تولید منبع i در شیفت

Rl حد پایین تعیین شده نسبت باطله‌برداری

Ru حد بالای تعیین شده نسبت باطله‌برداری

$Htijh$ میانگین زمان سفر از مبدأ i به مقصد j با کامیون h

Djh میانگین زمان تخلیه در مقصد j با کامیون h

$SDjh$ میانگین زمان انتظار برای تخلیه در مقصد j با کامیون h

$Rjih$ میانگین زمان سفر از مقصد j به مبدأ i با کامیون h

Sih میانگین زمان بارگیری در مبدأ i با کامیون h

$SSih$ میانگین زمان انتظار بارگیری در مبدأ i با کامیون h

Nh تعداد کامیون‌های فعال نوع h Th میانگین ظرفیت کامیون نوع h

Gik کیفیت ماده معدنی k در مبدأ i Wt ساعات مفید کاری در شیفت

Qkj کیفیت آرمانی ماده معدنی k در مقصد j

Lkj حداقل کیفیت مجاز ماده معدنی k در مقصد j

Ukj حداکثر کیفیت مجاز ماده معدنی k در مقصد j

O_i^p ماکزیمم تولید مبدأ i در شیفت

O_i^m میانگین تولید مبدأ i در شیفت O_i^v حداقل تولید مبدأ i در شیفت

F_{ore} حداقل تولید موردنیاز ماده‌معدنی در شیفت

F_{waste} حداقل تولید موردنیاز باطله در شیفت

Ntx_{ijh} تعداد سیکل‌های کامیون نوع h تخصیص داده شده از مبدأ i به مقصد j

Nty_{ijh} تعداد سیکل‌های کامیون نوع h تخصیص داده شده از مقصد j به مبدأ i

پارامتر فازی:

$\tilde{O}_i$ تولید شاول i در شیفت

پارامترهای تکمیلی:

W_1 فاکتور حق تقدم آرمان تولید W_2 فاکتور حق تقدم آرمان کیفیت

α سطح اطمینان تصمیم‌گیرنده از تولید شاول

متغیرهای کمکی:

di^+ متغیر انحراف مثبت مبدأ i — di^- متغیر انحراف منفی مبدأ i

Ckj^+ متغیر انحراف مثبت کیفیت ماده معدنی k در مقصد j

Ckj^- متغیر انحراف منفی کیفیت ماده معدنی k در مقصد j

$yjih$ ظرفیت کامیون خالی تخصیص داده شده از مقصد j به مبدأ i با کامیون h در شیفت

برای تمام متغیرها شرط غیرمنفی بودن برقرار است، یعنی:

$$x_{ijh}, y_{jih}, d_i^+, d_i^-, c_{kj}^+, c_{kj}^- \geq 0$$

۱۲- مراجع

[۱] Topuz E. & Luo Z.; "*Models for allocating and dispatching trucks in surface mining operations*", 1987, Bulk Solid Handling, Vol. 7, pp 46-52

[۲] White J.W.& Olson J.P., "*Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objective*", 1986, Mining Engineering, pp 1045- 1054

[۳] Temeng & Otuonye & Frendewey, "*Real-time truck dispatching using a transportation algorithm*", 1997, IJSM, Balkema, Rotterdom, pp 203-207.

[۴] قدسی‌پور، سید حسن، «فرآیند تحلیل سلسله مراتبی»، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۱.

[۵] Micholapoulos T.N. & Panagiotou G.N., "*Truck allocation using stochastic goal programming*", 2001, MPES, pp. 965-970

[۶] عاصی، بهاره، «بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل معدن مس سونگون»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ۱۳۸۲.

[۷] Saati & Memariani & Jahanshahloo, "*Possibilistic programming with trapezoidal fuzzy numbers*", 2000, Elsevier Science, Mathematics & Computer Science, Amsterdam

[۸] اصغرپور، محمد جواد، «تصمیم‌گیری‌های چند معیاره»، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۱.

[۹] گزارش طرح استخراج معدن مس سرچشمه، مجتمع مس-سرچشمه، ۱۳۸۰.

۱۳- زیرنویسها:

۱Topuz and Luo
۲White and Olson
۳Temeng, Otuonye and Frendewey
۴Economy of scale
۵Analytic Hierarchy Process
۶Micholapoulos & Panagiotou
۷Lotfizade
۸α-Cut
۹Normalized