

## مدل ریاضی تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌های چند ظرفیتی در معادن روباز

بهاره عاصی<sup>۱</sup>، دکتر کاظم اورعی<sup>۲</sup>، دکتر مرتضی احمدی<sup>۳</sup>

### چکیده

هدف از تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها، افزایش بهره‌وری سیستم حمل و نقل است. در این مقاله مدلی جامع برای مسائل حمل و نقل معادن روباز ارائه شده که با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی، تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها را انجام می‌دهد. این مدل، راهکاری جامع برای حل مسائل حمل و نقل معادن روباز است که می‌تواند مسائلی گوناگون در زمینه برنامه‌ریزی حمل و نقل را مدل‌سازی کند. شاخص بهینه‌سازی این مدل، به حداکثر رساندن تولید و کنترل کیفیت ماده معدنی است. مدل‌ساز در صورت لزوم می‌تواند شاخص‌های دیگری را نیز به مدل اضافه کند. یکی از ویژگی‌های این مدل قابلیت استفاده در معادنی است که کارخانه فرآوری آنها چندین خط تولید دارد و هر خط تولید ماده معدنی با کیفیت خاصی را می‌پذیرد. این مدل همچنین می‌تواند در معادنی که ناوگان باربری آنها متشکل از کامیون‌هایی با ظرفیت متفاوت می‌باشد نیز مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه موردی این مقاله، معدن مس سرچشمه است. نتایج حاصل از اجرای مدل افزایش تولیدی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد را نسبت به تخصیص ثابت به‌مراه داشته است.

**واژگان کلیدی:** معادن روباز، تخصیص کامیون‌ها، برنامه‌ریزی آرمانی، تحقیق در عملیات فازی

### مقدمه

ارائه شد و بکارگیری این سیستم‌ها در معادن سبب افزایش ۵ تا ۱۲ درصدی میزان تولید شد. توپوز و لو (Topuz&Luo) [۱] با استفاده از تئوری صف، وایت و السون (White&Olson) [۲] با استفاده از برنامه‌ریزی خطی، تمنگ، اتونیه و فرندوی (Temeng&Otuonye&Frendewey) [۳] با استفاده از مدل حمل‌ونقل، مدل‌هایی برای تخصیص بهینه

مدل‌های بهینه‌سازی از دوران انقلاب صنعتی همواره مورد توجه ریاضیدانان بوده است. از اواسط دهه ۱۹۸۰ تخصیص بهینه کامیون‌ها، بعنوان یک امر مهم برای افزایش تولید و کاهش هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های بارگیری و باربری در معادن روباز مورد توجه قرار گرفت. چندین مدل برای تخصیص کامیون‌ها

۱- کارشناس ارشد مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، پست الکترونیکی Basi56@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، پست الکترونیکی Moahmadi@modares.ac.ir

۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، پست الکترونیکی Oraee@modares.ac.ir

کامیون‌ها ارائه دادند. یکی از معایبی که در تمامی این مدل‌ها مشترک بود این بود که یک تابع هدف را تأمین می‌کرد و در صورتی که در برای بهینه‌سازی سیستم باربری بیش از یک هدف مدنظر مدیریت معدن باشد کارایی مدل‌ها کاهش می‌یابد. معمولاً سیستم‌های بهینه‌سازی حمل‌ونقل معادن روباز براساس مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی عمل می‌کنند که برای تعیین طرح معدنکاری کوتاه‌مدت در راستای اهداف تولید و کنترل کیفیت، توسط مدیریت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در گذشته برای تصمیم‌گیری در معادن از روش‌های تجربی استفاده می‌شد. امروزه روش‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده در معادن تغییر یافته‌اند. تنوع تجهیزات، هزینه بالای عملیات و پیشرفت تکنولوژی، لزوم استفاده از شیوه‌های تصمیم‌گیری مناسب و انجام تصمیمات مستدل را برای بخش مدیریت ضروری نموده است.

### ضرورت استفاده از مدل

امروزه با پیشرفت کلیه صنایع و نیاز به مواد اولیه، ضروری بنظر می‌رسد که معدن کاری نیز به موازات صنایع مختلف رشد یافته و از لحاظ فنی و اقتصادی از تکنولوژی بهتری برخوردار شود. از جمله راه‌های مفید برای رسیدن به این هدف، مدل‌های بهینه‌سازی هستند. این مدل‌ها علاوه بر اینکه از لحاظ فنی، معدن کاری را به سطح بالاتری ارتقاء می‌دهند، در بهبود مسائل اقتصادی نیز دارای اهمیت می‌باشند.

از آنجا که هزینه‌های بخش بارگیری و حمل در معادن روباز بیش از ۵۰ درصد هزینه‌های معدن کاری را به خود اختصاص می‌دهند، کاهش درصد کمی از این هزینه‌ها باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در عملیات خواهد شد. بنابراین ساختن مدل‌هایی برای استفاده بهینه از تجهیزات و کاهش هزینه‌های عملیاتی معدن، ضروری بنظر می‌رسد. این مدل‌ها با بهینه‌سازی سیستم باربری سبب افزایش بهره‌وری معدن می‌شوند.

### اهداف مدل

مهمترین هدف در هر معدن، افزایش سوددهی می‌باشد و یکی از عواملی که ارتباط مستقیم با سود

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.

از آنجا که مواد معدنی ارسالی به سنگ‌شکن از جبهه کارهای مختلف برداشت شده و کیفیت سنگ در هر کدام از این جبهه‌کارها متفاوت است، بنابراین مواد باید به نسبت‌های خاصی از هر جبهه کار برداشت شوند بطوری که پس از مخلوط شدن، کیفیت موردنیاز سنگ‌شکن با کمترین اختلاف تأمین گردد. بنابراین هدف دوم کنترل کیفیت ماده معدنی ارسالی به سنگ‌شکن می‌باشد و منظور از آن، فراهم ساختن عیار موردنیاز سنگ‌شکن با حداقل انحراف از مقدار تعیین شده است.

به این ترتیب برای انطباق هر چه بیشتر مدل با واقعیت از دو تابع هدف بیشینه کردن میزان تولید و کنترل کیفیت ماده معدنی ارسالی به سنگ‌شکن استفاده شده است.

### مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی بهینه‌سازی سیستم حمل‌ونقل معادن روباز

با پیچیده شدن محیط تصمیم‌گیری، رسیدن به اهداف موردنظر مشکل می‌شود. بنابراین روش‌هایی برای دستیابی به اهداف موردنظر ابداع شده است. محققین مدل‌هایی را بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل معادن ارائه داده‌اند اما تا سال ۱۹۹۷ در تمامی مدل‌ها، بهینه‌سازی یک تابع هدف موردنظر بود. مسائلی نظیر ماکزیمم کردن سود، مینیمم کردن هزینه و حداقل نمودن مسافت مثال‌هایی از این نوعند که با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی قابل حل می‌باشند. از نقایص این روش رسیدن به یک هدف است بعبارت دیگر بدون توجه به شرایط مسئله (از لحاظ اهدافی که اولویت کمتری دارند)، فقط یک هدف بهینه تأمین می‌شود. میکولاپولوس و پاناگیوتو (Micholapoulos & Panagioutou) در سال ۲۰۰۱ [۴]، مدلی احتمالی برای تخصیص کامیون‌ها ارائه دادند. آنها

تولید بارکننده را یک پارامتر تصادفی در نظر گرفته و برای پیش‌بینی مقادیر آن از توابع توزیع احتمالی استفاده نموده‌اند. در این مقاله از مدل‌های قطعی برای بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل معادن روباز استفاده شده است.

هدف این تحقیق، بهینه‌سازی چند عامل بصورت همزمان است، در اینصورت مسئله تصمیم‌گیری چندمنظوره است. عبارت دیگر دستیابی به دو هدف ماکزیمم کردن تولید و کنترل کیفیت مواد معدنی که با یکدیگر در تناقض هستند، مورد نظر است و تصمیم‌نهایی باید بین این دو هدف تعادل ایجاد کند. این مسأله با ارائه روش برنامه‌ریزی آرمانی تا حدی تأمین شده است. برنامه‌ریزی آرمانی قادر است اهداف متعددی را به ترتیب اولویت‌های آنان در تصمیم‌گیری بهینه وارد کند.

### معرفی متغیرها و پارامترهای مدل بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل معادن روباز

در ادامه به معرفی مجموعه‌ها، متغیرهای تصمیم، پارامترهای فنی، فازی، تکمیلی و متغیرهای کمکی پرداخته شده است. مجموعه‌ها:

$i$  منابع (شاول‌ها)

$j$  مقاصد (سنگ‌شکن/دامپ)

$k$  کیفیت ماده معدنی موردنیاز

$h$  نوع کامیون

متغیرهای تصمیم:

$X_{ijh}$  مقدار بار تخصیص داده شده از منبع (شاول)  $i$ ، به مقصد (سنگ‌شکن/دامپ)  $j$ ، توسط کامیون  $h$  در هر شیفت

پارامترهای فنی:

$N_s$  تعداد کل شاول‌ها

$N_{os}$  تعداد شاول‌های برداشت‌کننده ماده معدنی پرعیار

$N_{xs}$  تعداد شاول‌های برداشت‌کننده اکسید

$N_{ls}$  تعداد شاول‌های برداشت‌کننده ماده معدنی کم‌عیار

$N_d$  تعداد مقاصد

$N_c$  تعداد سنگ‌شکن‌ها

$N_{xd}$  تعداد دامپ‌های اکسید

$N_{ld}$  تعداد دامپ‌های کم‌عیار

$N_q$  تعداد کیفیت‌های ماده معدنی

$nh$  تعداد انواع کامیون‌ها

$M_i$  ماکزیمم توان تولید شاول  $i$  در ساعت

$C_j$  ماکزیمم ظرفیت قابل دسترس سنگ‌شکن/دامپ  $j$  در ساعت

$RI$  حد پایین تعیین شده نسبت باطله‌برداری

$Ru$  حد بالای تعیین شده نسبت باطله‌برداری

$Ht_{ijh}$  میانگین زمان سفر از شاول  $i$  به سنگ‌شکن/دامپ  $j$  توسط کامیون  $h$

$D_{jh}$  میانگین زمان تخلیه در سنگ‌شکن/دامپ  $j$  توسط کامیون  $h$

$SD_{jh}$  میانگین زمان انتظار تخلیه در سنگ‌شکن/دامپ  $j$  توسط کامیون  $h$

$R_{jih}$  میانگین زمان سفر از سنگ‌شکن/دامپ  $j$  به شاول  $i$  توسط کامیون  $h$

$S_{ih}$  میانگین زمان بارگیری شاول  $i$  توسط کامیون  $h$   
 $SS_{ih}$  میانگین زمان انتظار بارگیری شاول  $i$  توسط کامیون  $h$

$N_h$  تعداد کامیون‌های فعال نوع  $h$

$T_h$  میانگین ظرفیت وزنی کامیون نوع  $h$

$G_{ik}$  کیفیت ماده معدنی  $k$  در شاول  $i$

$Q_{kj}$  کیفیت آرمانی ماده معدنی  $k$  در سنگ‌شکن  $j$

$L_{kj}$  حداقل کیفیت مجاز ماده معدنی  $k$  در سنگ‌شکن  $j$

$U_{kj}$  حداکثر کیفیت مجاز ماده معدنی  $k$  در سنگ‌شکن  $j$   
 $Wt$  ساعات مفید کاری در هر شیفت

$Fore$  حداقل تولید موردنیاز ماده معدنی در ساعت

$Fwaste$  حداقل تولید موردنیاز باطله در ساعت

$N_{tx_{ijh}}$  تعداد سیکل‌های کامیون نوع  $h$  تخصیص داده شده از شاول  $i$  به سنگ‌شکن/دامپ  $j$

$N_{ty_{ijh}}$  تعداد سیکل‌های کامیون نوع  $h$  تخصیص داده شده از سنگ‌شکن/دامپ  $j$  به شاول  $i$

$O_i$  تولید شاول  $i$  در ساعت

پارامترهای تکمیلی:

روابط (۳)، (۴)، (۵) و (۶) بترتیب محدودیت‌های آرمانی مربوط به تولید بارکننده‌های ماده معدنی، اکسید، ماده معدنی کم‌عیار و باطله را نشان می‌دهند.

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{n_c} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = O_i \quad i = 1, 2, \dots, n_{os} \quad (۳)$$

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{j=n_c+1}^{n_c+n_{sd}} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = O_i \quad i = n_{os}+1, \dots, n_{xs} + n_{os} \quad (۴)$$

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{j=n_{sd}+n_c+1}^{n_c+n_{sd}+n_{ld}} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = O_i \quad i = n_{xs} + n_{os} + 1, \dots, n_{ls} + n_{xs} + n_{os} \quad (۵)$$

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{j=n_{ld}+n_{sd}+n_c+1}^{n_d} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = O_i \quad i = n_{ls} + n_{xs} + n_{os} + 1, \dots, n_s \quad (۶)$$

### آرمان کیفیت ماده معدنی

محدودیت آرمانی کیفیت ماده معدنی ارسالی به سنگ‌شکن بگونه‌ای است که سمت راست آن تعیین کننده هدف آرمان می‌باشد. تعیین متغیرهای انحراف مثبت و منفی ( $C_{kj}^-, C_{kj}^+$ ) برای آرمان کیفیت ماده معدنی در معادله مربوط ضروری است. محدودیت (۷) آرمان کیفیت ماده معدنی را توصیف می‌کند.

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh} \cdot G_{ik} + C_{kj}^- - C_{kj}^+ = Q_{kj} \cdot \sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh} \quad k = 1, 2, \dots, n_q \quad (۷)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_c$$

### محدودیت‌ها

ظرفیت باربری تخصیص داده شده به هر بارکننده باید کمتر از ماکزیمم توان تولید آن بارکننده باشد. این محدودیت نیز با شرط تعیین شده در رابطه (۸) اعمال شده است.

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \leq M_i \quad i = 1, 2, \dots, n_s \quad (۸)$$

محدودیت (۹) اطمینان می‌دهد که ظرفیت باربری تخصیص یافته به یک مقصد خاص کمتر از ظرفیت آن مقصد می‌باشد.

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_s} x_{ijh} \leq C_j \quad j = 1, 2, \dots, n_d \quad (۹)$$

$W_1$  فاکتور حق تقدم آرمان تولید

$W_2$  فاکتور حق تقدم آرمان کیفیت

$\alpha$  سطح اطمینان تصمیم‌گیرنده از تولید شاول

متغیرهای کمکی:

$d_i^+$  متغیر انحراف مثبت شاول نام

$d_i^-$  متغیر انحراف منفی شاول نام

$C_{kj}^+$  متغیر انحراف مثبت کیفیت ماده معدنی  $k$  در سنگ‌شکن  $j$

$C_{kj}^-$  متغیر انحراف منفی کیفیت ماده معدنی  $k$  در سنگ‌شکن  $j$

$y_{jih}$  ظرفیت کامیون خالی تخصیص از سنگ‌شکن/دامپ  $j$  به شاول  $i$  توسط کامیون  $h$  در هر شیفت

برای تمام متغیرها شرط غیرمنفی بودن برقرار است.

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

### آرمان تولید معدن

اولین آرمان مدل، بیشینه کردن تولید سیستم است. ماکزیمم کردن تولید با توان تولید بارکننده‌ها ارتباط مستقیم دارد. برای هر آرمان معادله آرمانی بگونه‌ای است که سمت راست تعیین کننده هدف آرمان می‌باشد. محدودیت آرمانی تولید بارکننده عبارت است از مقدار سنگ حمل شده از هر بارکننده به مقاصد مختلف که از میانگین تولید آن بارکننده کمتر باشد. این محدودیت در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \leq O_i \quad i = 1, 2, \dots, n_s \quad (۱)$$

سپس نامساوی (۱)، با اضافه کردن انحراف مثبت و

کم نمودن انحراف منفی از آرمان به تساوی تبدیل می‌شود. محدودیت موجود در رابطه (۲) شکل کلی محدودیت آرمانی ماکزیمم کردن تولید بارکننده‌ها نشان داده شده است.

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} + d_i^- - d_i^+ = O_i \quad i = 1, 2, \dots, n_s \quad (۲)$$

$$C_{kj}^- \leq (Q_{kj} - L_{kj}) \sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh} \quad k=1,2,\dots,n_q \quad j=1,2,\dots,n_c \quad (16)$$

$$C_{kj}^+ \leq (U_{kj} - Q_{kj}) \sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ijh} \quad k=1,2,\dots,n_q \quad j=1,2,\dots,n_c \quad (17)$$

### تابع هدف

تابع هدف مدل، حداقل کردن انحراف از آرمان‌های تولید و کیفیت است. برای تعیین تابع هدف، انحراف‌هایی حداقل می‌شوند که نامطلوب باشند. بعنوان مثال در مورد اولین هدف که بیشینه کردن تولید معدن می‌باشد، انحراف مثبت از هدف نامطلوب نمی‌باشد. بنابراین در مورد آرمان بیشینه کردن تولید فقط انحراف‌های منفی حداقل می‌شوند. در مورد آرمان دوم که کنترل کیفیت سنگ ارسالی به سنگ‌شکن است، هدف تنظیم عیار سنگ ارسالی با همان مشخصات تعریف شده، می‌باشد. بنابراین مجموع انحراف‌های مثبت و منفی باید کمینه گردند. رابطه (۱۸) نمایانگر شکل کلی تابع هدف مدل می‌باشد که هر هدف بسته به میزان اهمیتش در سیستم ضریب وزنی مخصوص بخود را داراست.

$$MinZ = W_1(h_1(d^-)) + W_2(h_2(c^-, c^+)) \quad (19)$$

از آنجا که آرمان‌های تولید و کیفیت ماده معدنی دارای دو مقیاس متفاوت (تناژ و عیار) می‌باشند، یکی دیگری را تحت تأثیر قرار داده و جواب دقیقی برای مدل حاصل نمی‌شود. بمنظور قابل مقایسه شدن مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری باید از بی‌مقیاس کردن استفاده نمود. در این مدل، روش تخصیص فاصله اقلیدسی با استفاده از نرم [۶]، برای بی‌مقیاس کردن تابع هدف مدل مورد استفاده قرار گرفته است. رابطه (۲۰) شکل دقیق تابع هدف را نشان می‌دهد.

$$MinZ = W_1 \left( \sum_{i=1}^{n_c} \frac{d_i^-}{\|d_i\|} \right) + W_2 \left( \sum_{k=1}^{n_q} \sum_{j=1}^{n_c} \frac{c_{kj}^+ + c_{kj}^-}{\|c_{kj}\|} \right) \quad (20)$$

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

محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) مدل، تعادل جریان ظرفیت باربری در هر نقطه مبدأ و مقصد از شبکه باربری را حفظ می‌کنند.

$$\sum_{j=1}^{n_d} y_{jih} = \sum_{j=1}^{n_d} x_{ijh} \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,n_s \\ h=1,2,\dots,n_h \end{matrix} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n_s} x_{ijh} = \sum_{i=1}^{n_s} y_{jih} \quad \begin{matrix} j=1,2,\dots,n_d \\ h=1,2,\dots,n_h \end{matrix} \quad (11)$$

محدودیت (۱۲) برای رسیدن به نسبت باطله‌برداری موردنیاز تعریف شده است.

$$R_L \leq \frac{\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=n_{os}+1}^{n_s} \sum_{j=n_c+1}^{n_d} x_{ijh}}{\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_{os}} \sum_{j=1}^{n_c} x_{ijh}} \leq R_U \quad (12)$$

باید توجه داشت که مبادی و مقاصد بگونه‌ای تنظیم شوند که منابع ماده معدنی و سنگ‌شکن بترتیب شماره‌گذاری شده‌اند.

محدودیت (۱۳) کنترل‌کننده ظرفیت باربری کامیون‌ها است، به این معنی که مجموع کل موادی که در شیفت توسط کامیون‌ها از هر یک از منابع به مقاصد حمل می‌شود باید برابر ظرفیت حمل کامیون‌ها باشد. در نهایت اطمینان حاصل کند که کل تولید بارکننده متجاوز از مقدار تولید کامیون‌های قابل دسترس نمی‌باشد.

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

$$h = 1, 2, \dots, n_h \quad (13)$$

روابط (۱۴) و (۱۵) حداقل تولید موردنیاز در شیفت را در مدل اعمال می‌کند.

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=n_{os}+1}^{n_s} \sum_{j=n_c+1}^{n_d} x_{ijh} \geq Fwaste \quad (14)$$

$$\sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_{os}} \sum_{j=1}^{n_c} x_{ijh} \geq Fore \quad (15)$$

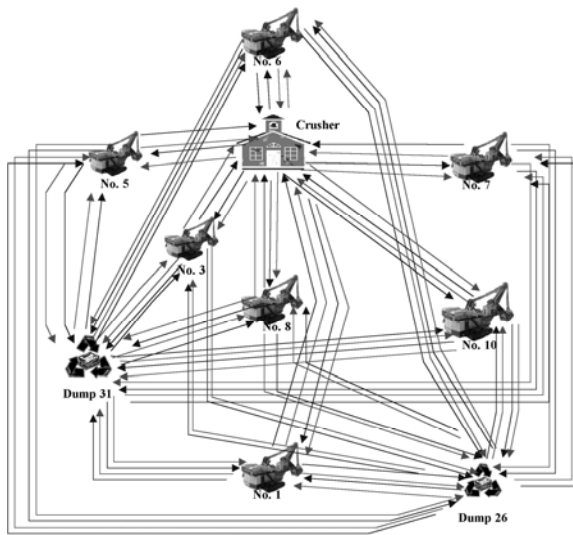
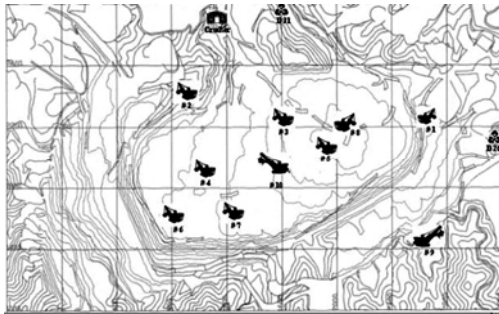
محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) انحراف کیفیت ماده معدنی ارسالی به سنگ‌شکن را در بازه تعریف شده مقادیر قابل قبول محدود می‌کند.

کامیون نوع اول و کامیون ۹۰ تنی کامیون دوم معرفی می‌شود. این مدل در شش روز متفاوت در معدن مس سرچشمه آزمایش شده است. در این مقاله به محاسبه و تحلیل یکی از این آزمایش‌ها پرداخته شده و در نهایت افزایش ناشی از اجرای مدل و تولید واقعی معدن مقایسه می‌شود. در شکل (۱) نمای کلی معدن مس سرچشمه و موقعیت شاول‌ها نشان داده شده است.

شکل ۱- نمای کلی معدن مس سرچشمه

### مسیرهای ترابری ممکن معدن مس سرچشمه

مسیرهای ممکن برای تخصیص کامیون‌ها در معدن مس سرچشمه مطابق شکل (۲) می‌باشد.



شکل ۲- مسیرهای ممکن باربری در معدن مس سرچشمه

همان‌طور که شکل (۲) نیز نشان می‌دهد بیش از ۸۰ مسیر برای تخصیص کامیون‌ها وجود دارد. پس از

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

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

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

$a_{ijh}$ : ضرایب متغیرهای تصمیم در محدودیت‌های آرمانی

### بهبودسازی سیستم بارگیری و حمل معدن مس

#### سرچشمه

معدن مس سرچشمه بعنوان مطالعه موردی مدل انتخاب شد. در این معدن برای بارگیری و حمل مواد از سیستم شاول- کامیون استفاده می‌شود. سیستم ترابری این معدن شامل ۱۰ شاول و ۵۲ کامیون است. نوع، ظرفیت و مشخصات شاول‌ها و کامیون‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- ماشین‌آلات فعال در معدن مس سونگون

		P&H (1900 AL)	
	/	P&H (2100 XP)	
		Wabco	
		Dresser	

چنان که در جدول (۱) مشاهده می‌شود ظرفیت کامیون‌ها ۱۲۰ تن است. عمر ۳۲ کامیون وابکو که از سال اول استخراج خریداری شده‌اند به ۲۸ سال [۷] رسیده است. این کامیون‌ها توانایی حمل بار با ظرفیت کامل را نداشته و بیش از ۹۰ تن بار در آن‌ها بارگیری نمی‌شود. ۲۰ کامیون در سر نیز (نسبت به کامیون‌های وابکو جدیدترند) حدود ۱۲ سال [۷] کار کرده‌اند. حداکثر باری که این کامیون‌ها می‌توانند حمل کنند ۱۱۰ تن می‌باشد. بنابراین برای اعمال این شرایط و تطبیق هر چه بیشتر مدل با واقعیت، سیستم باربری معدن مس سرچشمه بصورت دو نوع کامیون ۹۰ و ۱۱۰ تنی در نظر گرفته شده است. کامیون ۱۱۰ تنی،

مدل بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل چندین بار در معدن مس سرچشمه آزمایش شد. جدول (۲) نتایج حاصل از آزمایش مدل در معدن مس سرچشمه را نشان می‌دهد. با مطالعه این جدول مشاهده می‌شود که تخصیص کامیون‌ها با توجه به خروجی مدل، افزایش تولیدی معادل ۱۳ درصد نسبت به حالت واقعی

/	/	/	/		
/	/	/	/		
/	/	/	/		
/	/	/	/		
/	/	/	/		

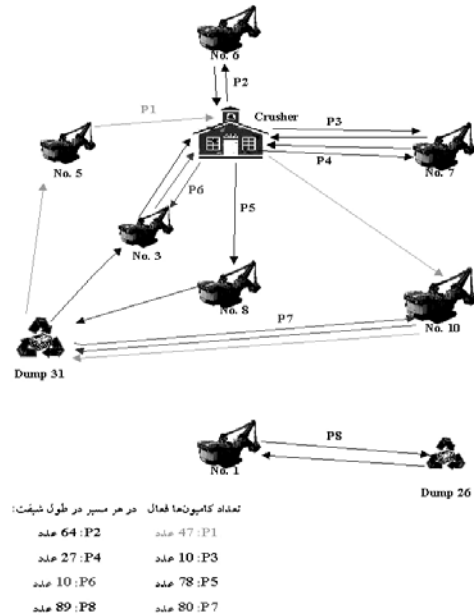
تخصیص ثابت) را دربر خواهد داشت.

جدول ۲- مقایسه تولید واقعی معدن مس سرچشمه با مدل بهینه‌سازی تخصیص کامیون‌ها

### تأثیر ترکیب‌های مختلف ناوگان باربری بر میزان تولید معدن مس سرچشمه

در معدن مس سرچشمه ناوگان باربری برای تطبیق بیشتر با واقعیت با توجه به توان کامیون‌ها، سیستم باربری به دو ناوگان ۱۱۰ و ۹۰ تنی تقسیم شده‌اند. شکل (۴) تأثیر ترکیب‌های مختلف کامیون‌ها را در میزان تولید معدن نشان می‌دهد. محورهای عمودی و افقی بترتیب نمایانگر تعداد کامیون‌های ۱۱۰ و ۹۰ تنی می‌باشد. با توجه به این شکل، توان تولید معدن در شیفت بیش از ۶۰۰۰۰ تن می‌باشد. از آنجا که بیش از ۱۷ عدد از ۳۲ کامیون ۹۰ تنی (کامیون‌های ۱۲۰ تنی Wabco)، غیر قابل استفاده می‌باشند، بنابراین با ماشین‌آلات موجود عملاً هیچ وقت معدن به تولید ۶۰۰۰۰ تن در شیفت نخواهد رسید.

اجرای مدل مسیرهای بهینه رفت و برگشت کامیون‌ها برای تحقق اهداف معدن، در هر افق برنامه‌ریزی بصورت شکل (۳) بدست آمده است.



شکل ۳- مسیرهای بهینه باربری معدن مس سرچشمه حاصل از اجرای مدل

هدف اصلی از توسعه مدل بهینه‌سازی سیستم ترابری، تعیین مسیرهای بهینه می‌باشد. در شکل (۳) 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 با نرخ کامیون ۰/۳۰ پر رفت‌وآمدترین مسیر می‌باشد، بطوری که در یک شیفت ۸ ساعته، ۱۲۷ کامیون در این جاده تردد خواهند کرد. عبارت دیگر در هر ۳/۳ دقیقه یک کامیون از این جاده عبور می‌کند.

### نتایج مدل بهینه‌سازی معدن مس سرچشمه

## نتیجه

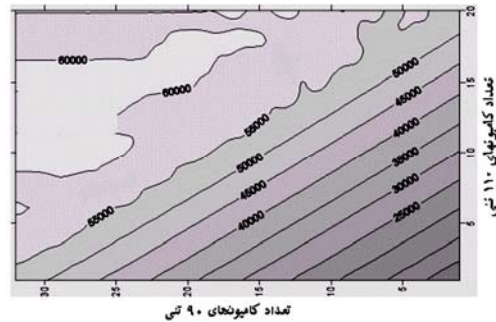
یکی از ویژگی‌های مدل قابلیت بهینه‌سازی سیستم حمل‌ونقل معادنی است که چندین نوع کامیون در ناوگان باربری آنها وجود دارد. همچنین این مدل در معادنی که کارخانه فرآوری آنها چندین خط تولید دارد نیز قابل استفاده است. عبارت دیگر قادر به ارسال مواد معدنی با عیارهای متفاوت به چندین سنگ‌شکن می‌باشد. در ضمن مدل یاد شده قابلیت بهینه‌سازی سیستمی با چهار نوع کانسنگ پرعیار، کانسنگ اکسیدی، کانسنگ کم‌عیار و باطله را دارد. از توانایی‌های دیگر مدل، مواقعی است که یک شاول در مرز بین دو نوع سنگ مختلف قرار دارد، در این حالت مدل می‌تواند طوری برنامه‌ریزی کند که شاول از هر دو نوع سنگ برداشت نماید. از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی میزان تولید با توجه به تعداد کامیون‌های فعال در معدن استفاده کرد.

این مدل در معدن مس سرچشمه مورد آزمایش قرار گرفت. تولید حاصل از مدل تخصیص انعطاف‌پذیر، محاسبه و پس از مقایسه با تولید واقعی معدن مشخص شد که استفاده از این مدل باعث افزایش ۱۳ درصدی تولید می‌شود. طبق طرح برنامه‌ریزی تولید معدن سرچشمه، محدوده تغییرات عیار سنگ ارسالی به سنگ‌شکن بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ قابل تغییر است. از آنجا که این مدل قابلیت محاسبه عیار سنگ ارسالی به سنگ‌شکن را دارد، مشخص شد که با اجرای مدل بهینه‌سازی سیستم ترابری بهترین عیار موردنیاز سنگ‌شکن (۰/۹۰ درصد) می‌باشد.

## مراجع

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

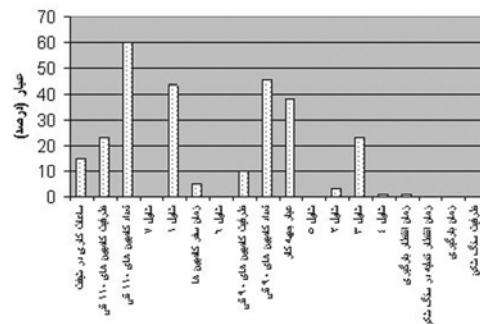
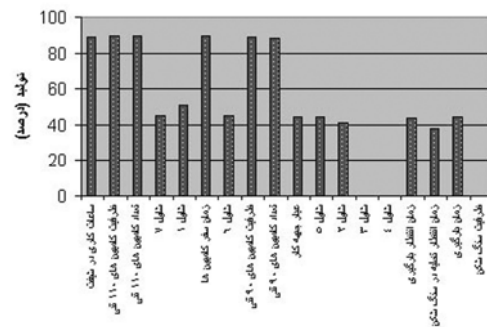
[2] White, J.W. & Olson, J.P., "Computer-based Dispatching in mines with Concurrent Operating Objective", 1986, *Mining Engineering*, pp.1045-1054.



شکل ۴- تأثیر ترکیب‌های مختلف کامیون‌ها در میزان تولید معدن

## تحلیل حساسیت

آنالیز حساسیت انجام شده بر مدل نشان داد که پارامترهای حساس بر آرمان تولید مدل (شکل ۵)، ساعات مفید کاری در شیفت، نوسان در مقدار بار داخل کامیون‌ها، تعداد و زمان سفر کامیون‌ها می‌باشند. همچنین دو عامل تعداد کامیون‌های فعال و میزان خطا در برآوردهای اکتشافی بیشترین تأثیر را بر آرمان عیار سنگ ارسالی به سنگ‌شکن (شکل ۶) خواهند داشت.



شکل ۵- پارامترهای حساس بر تولید در معدن سرچشمه

شکل ۶- مقایسه پارامترهای حساس بر عیار در معدن سرچشمه



[3] Temeng, Victor A. & Otuonye, Francis O. & Frendewey, James O, "Real-Time truck Dispatching using a transportation algorithm", 1997, IJSM, Balkema, Rotterdam, pp. 203-207.

[4] Micholapoulos T.N. & Panagiotou G.N., "Truck Allocation using Stochastic Goal Programming", 2001, MPES, pp. 965-970

[5] Saati, S., Memariani, A., Jahanshahloo, G.R., "Possibilistic Programming with Trapezoidal Fuzzy Numbers", 2000, Elsevier Science, Mathematics & Computer Science, Amsterdam

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

[۷] «گزارش طرح استخراج معدن مس سرچشمه»، مجتمع مس سرچشمه، ۱۳۸۰.

## **Mathematical model for flexible allocation of multi-capacity trucks in open pit mines**

*Bahareh Asi<sup>1</sup>, Kazem Oraee<sup>2</sup>, Morteza Ahmadi<sup>3</sup>*

### **Abstract**

The objective of flexible allocation of trucks is to increase the productivity of haulage system. In this paper, a comprehensive model is produced for the haulage system in open pit mines, which can optimize the allocation process of trucks by goal programming.

This model provides a comprehensive solution for solving haulage problems in open pit mines. The objective function of the model is maximization of productivity and control of the quality of ore sent to crushers. It is also possible for the mine design engineer to add other objectives to the model.

One of the advantages of the model is its applicability in mines whose processing plants have more than one production line and each one accepts feed with different quality. The model can also be used in especial circumstances where the haulage system of the mine is composed of trucks with different capacities.

The case study of this paper is Sarcheshmeh copper mine of Iran. The results obtained from the model, modifies the allocation system in a way that productivity of the mine would increase by 10-15%.

**Key word:** open-pit mines, truck allocation, goal programming, fuzzy logic, operational research, haulage system

*1-MSc. of Engineering Faculty, Mining Engineering Dept., Tarbiat Modarres University, E-mail: Basi56@yahoo.com*

*2-Assistant professor of Engineering Faculty, Mining Engineering Dept., Tarbiat Modarres University,  
E-mail: Oraee@modares.ac.ir*

*3- Assistant professor of Engineering Faculty, Mining Engineering Dept., Tarbiat Modarres University,  
E-mail: Moahmadi@modares.ac.ir*

