پنجمین کنفرانس سیستمهای فازی ایران
هفدهم الی نوزدهم شهریورماه ۱۳۸۳

مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی تخصیص کامیون‌ها در معادن روباز

سید کاظم اورعی[۱]، بهاره عاصی[۲]، اعظم‌دخت صفی صمغ‌آبادی[۳]
دانشگاه تربیت مدرس
oraee@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک مدل جامع ریاضی برای مسائل حمل و نقل معادن روباز ارائه شده است که می‌تواند در زمینه برنامه‌ریزی ترابری در محیط‌های فازی به کار گرفته شود. بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل برای تخصیص سیستم باربری به بارکننده‌ها توسط برنامه‌ریزی آرمانی با محدودیت‌های فازی انجام می‌گیرد.

در این مقاله از مدل‌های فازی برای بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل معادن روباز استفاده شده است. از آنجا که تولید بارکننده، کل تولید سیستم را محدود می‌کند، برای ماکزیمم کردن تولید، تقاضای ظرفیت باربری از بارکننده‌ها باید پوشش داده شود. در بسیاری حالات از جمله خرابی بارکننده‌ها، شرایط متغیر جوی، وجود آب در جبهه‌کارهای استخراجی و غیره، امکان تعیین تابع هدف و محدودیت‌ها بصورت عبارت‌های دقیق و قطعی محدود می‌کند. بنابراین به دلیل نادقیق بودن تولید روزانه بارکننده، این پارامتر به صورت فازی در نظر گرفته شده است. از آن جا که در مدل‌های ریاضی فازی باید به نحوی مدل را قطعی نمود، که در این مقاله برای این منظور از روش α-cut استفاده شده است.

این مدل برای معدن مس سونگون ایران که یکی از غنی‌ترین معادن مس دنیا می‌باشد به عنوان مطالعه موردی به کار گرفته شده است. آزمایش مدل، افزایش تولیدی معادل ۱۵ درصد نسبت به تولید برنامه‌ریزی شده معدن به همراه داشته است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آرمانی - تحقیق در عملیات فازی – معادن روباز - نخصیص کامیون‌ها

۱- مقدمه

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 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

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس
۳- مربی آموزشی، مرکز آموزش عالی امام خمینی

حمل‌ونقل مدل‌هایی برای تخصیص بهینه 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 تصمیم-گیری مورد استفاده در معادن تغییر یافته‌اند. تنوع تجهیزات، هزینه بالای عملیات و پیشرفت تکنولوژی، لزوم استفاده از شیوه-های تصمیم‌گیری مناسب و انجام تصمیمات مستدل را برای بخش مدیریت ضروری نموده است.

۲- ضرورت استفاده ازمدل

امروزه با پیشرفت کلیه صنایع و نیاز به مواد اولیه، ضروری بنظر می‌رسد که معدنکاری 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، معدنکاری 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 معدنکاری 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 معادن، ضروری بنظر می‌رسد. این مدل‌ها با بهینه‌سازی سیستم باربری سبب افزایش بهره‌وری معادن می‌شوند.

۳- 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 جبهه‌کارهای 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 ماده‌معدنی 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 ماده‌معدنی ارسالی به سنگ‌شکن استفاده شده است.

۴- 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.

هدف این تحقیق، بهینه‌سازی چند عامل بصورت همزمان است، در اینصورت مسئله تصمیم‌گیری چندمنظوره است. بعبارت دیگر دستیابی به دو هدف ماکزیمم 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 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.

۱-۴- 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 (بارکننده‌ها) j مقاصد (سنگ‌شکن یا دامپ)

k کیفیت ماده‌معدنی موردنیاز

متغیرهای تصمیم:

X_{ij} مقدار بار تخصیص داده شده از منبع (بارکننده)i، به مقصد (سنگ‌شکن یا دامپ)j در هر شیفت

پارامترهای فنی:

ns تعداد کل بارکننده‌ها

nos تعداد بارکننده‌های برداشت‌کننده ماده معدنی

nxs تعداد بارکننده‌های برداشت‌کننده اکسید

nls تعداد بارکننده‌های برداشت‌کننده ماده معدنی کم‌عیار

nd تعداد مقاصد

nc تعداد سنگ‌شکن‌ها

nxd تعداد دامپ‌های اکسید

nld تعداد دامپ‌های کم‌عیار

nq تعداد کیفیت های ماده معدنی

M_i ماکزیمم توان تولید بارکننده i در ساعت

C_j ماکزیمم ظرفیت قابل دسترس سنگ‌شکن یا دامپ j در ساعت

Rl حد پایین تعیین شده نسبت باطله‌برداری

Ru حد بالای تعیین شده نسبت باطله‌برداری

Ht_{ij} میانگین زمان سفر از منبع i به مقصد j

D_j میانگین زمان تخلیه در مقصد j

SD_j میانگین زمان انتظار برای تخلیه در مقصد j

R_{ji} میانگین زمان سفر از سنگ‌شکن یا دامپ j به بارکننده i

S_i میانگین زمان بارگیری در بارکننده I

SS_{ih} میانگین زمان انتظار برای بارگیری در بارکننده i

N تعداد کامیون‌های فعال

T میانگین ظرفیت وزنی کامیون

G_{ik} کیفیت ماده معدنی k در بارکننده i

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

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

U_{kj} حداکثر کیفیت ماده معدنی k در سنگ‌شکن j

Wt ساعات مفید کاری در هر شیفت

O_i^p حد بدبینانه تولید بارکننده i در ساعت

O_i^m میانگین تولید بارکننده i در ساعت

O_i^o حد خوشبینانه تولید بارکننده i در ساعت

$Fore$ حداقل تولید موردنیاز ماده‌معدنی در ساعت

$Fwaste$ حداقل تولید موردنیاز باطله در شیفت

پارامتر فازی

$\widetilde{O}_i$ تولید بارکننده i در ساعت

پارامترهای تکمیلی

W_1 فاکتور حق تقدم آرمان تولید

W_2 فاکتور حق تقدم آرمان کیفیت

α سطح اطمینانی که توسط تصمیم‌گیرنده معین می‌شود.

متغیرهای کمکی

d_i^+ متغیر انحراف مثبت برای بارکننده iام

d_i^- متغیر انحراف منفی برای بارکننده iام

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

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

y_{ji} ظرفیت کامیون خالی برای تخصیص از مقصد j به منبع i در هر شیفت

برای تمام متغیرها شرط غیرمنفی بودن برقرار است.

$$x_{ij}, y_{ji}, d_i^{+}, d_i^{-}, c_{kj}^{+}, c_{kj}^{-} \geq 0$$

۴-۲- عدم قطعیت فازی

هرچه اطلاعات مورد استفاده در مدل دقیق‌تر باشند، نتایج بدست آمده تطابق بیشتری با واقعیت داشته و دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی‌شده، امکان‌پذیرتر خواهد بود. 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 (Micholapoulos & Panagiotou) در سال ۲۰۰۱[۴]، مدلی احتمالی برای تخصیص کامیون‌ها ارائه دادند. آنها تولید بارکننده را یک پارامتر تصادفی درنظر گرفته و برای پیش‌بینی مقادیر آن از توابع توزیع احتمالی استفاده نموده‌اند.

در این مقاله از مدل‌های فازی برای بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل معادن روباز استفاده شده است. استفاده از منطق فازی به دو علت صورت گرفته است که عبارتند از:

- از آنجا که تولید بارکننده، کل تولید سیستم را محدود می‌کند، برای ماکزیمم کردن تولید، تقاضای ظرفیت باربری از بارکننده‌ها باید پوشش داده شود. در بسیاری حالات از جمله خرابی بارکننده‌ها، شرایط متغیر جوی، وجود آب در جبهه-کارهای استخراجی و غیره، امکان تعیین تابع هدف و محدودیت‌ها بصورت عبارت‌های دقیق و قطعی محدود می‌کند.
- در این تحقیق بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل معدن مس سونگون مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که این معدن تاکنون به بهره‌برداری نرسیده، اطلاعات دقیق در مورد پارامتر مربوط به تولید بارکننده‌ها وجود ندارد. بنابراین از مجموعه‌های فازی برای هر چه کاربردی‌تر شدن مدل در شرایط مختلف استفاده شده است.

برای اعمال پارامتر تولید بارکننده در مدل و تطبیق هر چه بیشتر آن با واقعیت، از مجموعه‌های فازی استفاده شده است. در این تحقیق برنامه‌ریزی آرمانی با تکنیک محدودیت فازی تلفیق شده است، بطوریکه محدودیت‌های فازی برای بدست آوردن محدودیت‌های قطعی معادل تغییر شکل یافته‌اند. در روش فازی هر چه اطلاعات پارامترها نامشخص‌تر و دامنه تغییرات آنها گسترده‌تر باشد، دامنه تغییر توابع هدف نیز گسترده‌تر بوده و تصمیم‌گیری همراه با پیچیدگی و ریسک بیشتری خواهد بود.

۴-۳- آرمان تولید فازی

اولین آرمان مدل، بیشینه کردن تولید سیستم است. ماکزیمم کردن تولید با توان تولید بارکننده‌ها ارتباط مستقیم دارد. از آنجا که توان تولید بارکننده‌ها به عواملی نظیر نوع سنگ، کیفیت خردشدگی، وجود آب در جبهه‌کارها و شرایط جوی بستگی دارد، نمی‌توان این عامل را بصورت یک پارامتر دقیق در مدل اعمال نمود. بنابراین پارامترهای مربوط به میانگین تولید بارکننده‌ها بصورت یک عدد فازی مثلثی درنظر گرفته شده‌اند.

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.

$$\sum_{j=1}^{n_d} x_{ij} \leq \widetilde{O}_i \qquad i = 1,2,...,n_s \qquad (۱)$$

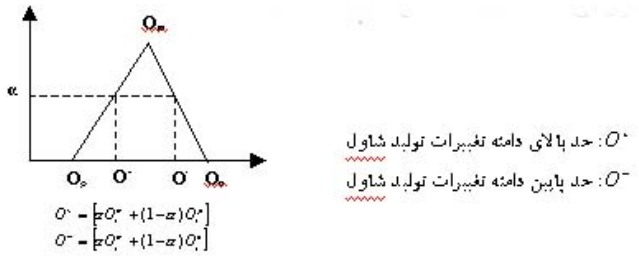
از آنجا که میانگین تولید بارکننده ، یک عدد فازی است. پارامتر فازی مثلثی تولید بارکننده‌ها بصورت رابطه (۲) در نظر گرفته شده است.

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

با جاگذاری عدد فازی تولید بارکننده‌ها، رابطه (۱) به رابطه (۳) تبدیل می‌شود.

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

در این مقاله برای تبدیل مدل فازی به مدل قطعی از روش α-cut [۵] استفاده شده است. با توجه به میزان عدم قطعیت از میزان تولید بارکننده در شیفت، برش‌های آلفا مختلفی می‌توان رسم کرد. به ازای هر برش، حد بالا و پایین دامنه تغییرات این پارامتر مشخص می‌شود. در شکل (۱) پارامتر مربوط به تولید هر بارکننده که بصورت یک عدد فازی می‌باشد با برش آلفا نشان داده شده است.



شکل ۱- پارامتر تولید هر بارکننده بصورت عدد فازی مثلثی با برش آلفا

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

$$\sum_{j=1}^{n_d} x_{ij} \le \left[\alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p, \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o\right] \qquad i = 1,2,...,n_s \qquad (۴)$$

سپس W_i بعنوان متغیری تعریف می‌شود که در فاصله $[O^-, O^+]$ قرار دارد (رابطه ۵).

$$W_i \in \left[\alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p, \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o\right] \qquad i = 1,2,...,n_s \qquad (۵)$$

با جاگذاری W_i در رابطه (۴)، رابطه (۶) بدست می‌آید.

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

سپس نامساوی (۶)، با اضافه کردن انحراف مثبت و کم نمودن انحراف منفی از آرمان به تساوی تبدیل می‌شود. محدودیت موجود در رابطه (۷) شکل کلی محدودیت آرمانی ماکزیمم کردن تولید فازی بارکننده‌ها نشان داده شده است.

$$\begin{cases} \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \\ \sum_{j=1}^{n_d} x_{ij} + d_i^- - d_i^+ = W_i \end{cases} \qquad i = 1,2,...,n_s \qquad (۷)$$

روابط (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) بترتیب محدودیت‌های آرمانی مربوط به تولید بارکننده‌های ماده‌معدنی، اکسید، ماده‌معدنی کم-عیار و باطله را نشان می‌دهند.

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

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

$$\begin{cases} \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \\ \sum_{j=n_{xd}+n_c+1}^{n_c+n_{xd}+n_{ld}} x_{ij} + d_i^- - d_i^+ = W_i \end{cases} \qquad i = n_{xs} + n_{os} + 1,...,n_{ls} + n_{xs} + n_{os} \qquad (۱۰)$$

$$\begin{cases} \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^p \le W_i \le \alpha O_i^m + (1-\alpha)O_i^o \\ \sum_{j=n_{ld}+n_{xd}+n_c+1}^{n_d} x_{ij} + d_i^- - d_i^+ = W_i \qquad i = n_{ls}+n_{xs}+n_{os}+1,...,n_s \end{cases} \tag{۱۱}$$

۴-۴- آرمان کیفیت ماده معدنی

محدودیت آرمانی کیفیت ماده‌معدنی 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 ماده‌معدنی در معادله مربوط ضروری است. محدودیت (۱۲) آرمان کیفیت ماده معدنی را توصیف می‌کند.

$$\sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ij}.G_{ik} + C_{kj}^- - C_{kj}^+ = Q_{kj}.\sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ij} \qquad \begin{matrix} k = 1,2,...,n_q \\ j = 1,2,...,n_c \end{matrix} \tag{۱۲}$$

۴-۵- 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 (۱۳) اعمال شده است.

$$\sum_{j=1}^{n_d} x_{ij} \le M_i \qquad i = 1,2,...,n_s \tag{۱۳}$$

محدودیت (۱۴) اطمینان می‌دهد که ظرفیت باربری تخصیص یافته به یک مقصد خاص کمتر از ظرفیت آن مقصد می‌باشد.

$$\sum_{i=1}^{n_c} x_{ij} \le C_j \qquad j = 1,2,...,n_d \tag{۱۴}$$

محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) مدل، تعادل جریان ظرفیت باربری در هر نقطه مبدأ و مقصد از شبکه باربری را حفظ می‌کنند.

$$\sum_{j=1}^{n_d} y_{ji} = \sum_{j=1}^{n_d} x_{ij} \qquad i = 1,2,...,n_s \tag{۱۵}$$

$$\sum_{i=1}^{n_s} x_{ij} = \sum_{i=1}^{n_s} y_{ji} \qquad j = 1,2,...,n_d \tag{۱۶}$$

محدودیت (۱۷) برای رسیدن به نسبت باطله‌برداری موردنیاز تعریف شده است.

$$R_L \le \frac{\sum_{i=n_{os}+1}^{n_s}\sum_{j=n_c+1}^{n_d} x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_{os}}\sum_{j=1}^{n_c} x_{ij}} \le R_U \tag{۱۷}$$

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

محدودیت (۱۸) 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.

$$\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_d} Ht_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^{n_c}\sum_{j=1}^{n_d} D_j x_{ij} + \sum_{i=1}^{n_c}\sum_{j=1}^{n_d} SD_j x_{ij} + \sum_{i=1}^{n_c}\sum_{j=1}^{n_d} R_{ji}y_{ij} + \sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_d} S_i y_{ji} \sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_d} SS_i y_{ji} \le Wt.N.T \tag{۱۸}$$

روابط (۱۹)و (۲۰) حداقل تولید موردنیاز در شیفت را در مدل اعمال می‌کند.

$$\sum_{i=n_{os}+1}^{n_s}\sum_{j=n_c+1}^{n_d} x_{ij} \ge Fwaste \tag{۱۹}$$

$$\sum_{i=1}^{n_{os}}\sum_{j=1}^{n_c} x_{ij} \ge Fore \tag{۲۰}$$

محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) انحراف کیفیت ماده‌معدنی ارسالی به سنگ‌شکن را در بازه تعریف شده مقادیر قابل قبول محدود می‌کند.

$$C_{kj}^{-} \le (Q_{kj} - L_{kj}) \sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ij} \qquad \begin{matrix} k = 1,2,...,n_q \\ j = 1,2,...,n_c \end{matrix} \qquad (۲۱)$$

$$C_{kj}^{+} \le (U_{kj} - Q_{kj}) \sum_{i=1}^{n_{os}} x_{ij} \qquad \begin{matrix} k = 1,2,...,n_q \\ j = 1,2,...,n_c \end{matrix} \qquad (۲۲)$$

۶-۴- 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 (۲۳) نمایانگر شکل کلی تابع هدف مدل می‌باشد که هر هدف بسته به میزان اهمیتش در سیستم ضریب وزنی مخصوص بخود را داراست.

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

از آنجا که آرمان‌های تولید و کیفیت ماده‌معدنی دارای دو مقیاس متفاوت (تناژ و عیار) 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 (۲۴) شکل دقیق تابع هدف را نشان می‌دهد.

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

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

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

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

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

۵- بهینه‌سازی سیستم ترابری معدن مس سونگون

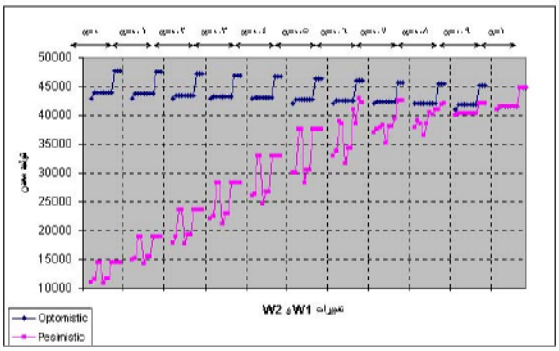
مطالعه موردی این مدل، معدن مس سونگون می‌باشد. این معدن یکی از غنی‌ترین معادن مس دنیا می‌باشد. کانسار مس پورفیری سونگون از نظر موقعیت جغرافیایی در منطقه کوهستانی واقع در استان آذربایجان شرقی ایران می‌باشد. ذخیره ماده‌معدنی این معدن بیش از ۷۰۰ میلیون تن تخمین زده شده است و به منظور بارگیری و حمل مواد از سیستم بارکننده-کامیون استفاده می‌شود. در طرح اولیه کل تولید روزانه در دو شیفت، ۷۰۰۰۰ تن با نسبت باطله‌برداری(Stripping ratio) ۴:۱ می‌باشد.

این مدل در معدن مس سونگون آزمایش شد. تولید حاصل از مدل تخصیص انعطاف‌پذیر، محاسبه و در مقایسه با طرح برنامه‌ریزی تولید معدن مشخص شد که استفاده از این مدل باعث افزایش تولید به میزان ۱۵ درصد می‌شود. طبق طرح برنامه-ریزی تولید معدن مس سونگون، محدوده تغییرات عیار سنگ ارسالی به سنگ‌شکن بین ۰/۶۸ تا ۰/۷۸ قابل تغییر است. از آنجا که این مدل قابلیت محاسبه عیار سنگ ارسالی به سنگ‌شکن را دارد، مشخص شد با اجرای مدل بهینه‌سازی سیستم ترابری

بهترین عیار موردنیاز سنگ‌شکن (۰/۷۳ درصد) تأمین می‌گردد. همچنین استفاده مناسب از تجهیزات بارگیری و حمل و تخصیص صحیح آنها کاهش چشمگیری در هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی و نگهداری را خواهد داشت.

۶- تحلیل پارامترهای فازی تولید بارکننده

در این بخش تولید معدن با توجه به نادقیق بودن اطلاعات مربوط به تولید بارکننده‌ها بررسی می‌شود. میزان تجربه، شناخت سیستم، آشنایی با زمین‌شناسی منطقه و بسیاری عوامل دیگر به تصمیم‌گیرنده کمک خواهد کرد تا میزان تولید بارکننده را با یک ضریب اطمینان تخمین بزند. این ضریب همان درجه عضویت α در مدل فازی است. شکل (۳) میزان تولید سیستم را با درجه عضویت‌های مختلف براساس ضرایب وزنی متفاوت آرمان‌های مدل نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، هر چه میزان عدم قطعیت تصمیم‌گیرنده در مورد پارامتر تولید بارکننده 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 یک نزدیک‌تر باشد، ریسک تصمیم‌گیری کمتر و جواب مدل دقیق‌تر خواهد بود.



شکل ۳- تغییرات تولید معدن با ضرایب وزنی مختلف به ازای تغییر آلفا

۷- تعیین پارامترهای حساس برمدل بهینه‌سازی سیستم بارگیری و حمل معدن مس سونگون

آنالیز حساسیت انجام شده بر مدل نشان داد که پارامترهای حساس بر آرمان تولید مدل، 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 خواهند داشت.

۸- نتیجه

یکی از ویژگی‌های این مدل کاربرد آن در صورت نادقیق بودن اطلاعات تصمیم‌گیرنده است. از ویژگی‌های دیگر این مدل، قابلیت بهینه‌سازی سیستم حمل‌ونقل معادنی است که کارخانه فرآوری آنها چندین خط تولید دارد. بعبارت دیگر مدل مزبور قادر به ارسال موادمعدنی با عیارهای متفاوت به چندین سنگ‌شکن می‌باشد. در ضمن قابلیت بهینه‌سازی سیستمی با چهار نوع سنگ ماده‌معدنی پرعیار، اکسید، ماده‌معدنی کم‌عیار و باطله را دارد. از توانایی‌های دیگر مدل مواقعی است که یک بارکننده در مرز بین دو نوع سنگ مختلف قرار دارد، در این حالت مدل می‌تواند بگونه‌ای برنامه‌ریزی کند که بارکننده از هر دو نوع سنگ برداشت نماید.

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.

[3] Temeng, Victor A. & Otuonye, Francis O. & Frendewey, James O. , "Real-Time Truck Dispatching Using a Transportation Algorithm", 1997, IJSM, Balkema, Rotterdom, 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", 2004, Modares Technucil Journal, (In Press).

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