چهارمین همایش ملی معادن روباز
۲۴ تا ۲۷ اردیبهشت ماه ۱۳۹۶

بهینه سازی زمان‌بندی ناوگان حمل و نقل با استفاده از روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح

*ساناز بهنیافر[۱]، عباس آقاجانی بزازی[۲] **

[۱] دانش آموخته ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران sanaz.behniafar@yahoo.com

[۲] عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir

چکیده

افزایش قیمت ماشین‌آلات معدنی، هزینه‌های بالای سرویس و نگهداری و همچنین هزینه های بالای مکانیزاسیون، لزوم افزایش بهره‌وری ماشین‌آلات را در پی خواهد داشت. در این راستا تحقیق حاضر با هدف زمان‌بندی ناوگان حمل و نقل معدن با استفاده از روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح و بهینه‌سازی آن، بر اساس هزینه تعمیر و نگهداری انجام شده است. در این تحقیق، ناوگان حمل و نقل همگن در نظر گرفته شده است، زمان‌بندی و بهینه‌سازی برای یک افق ۱۰ ساله از عمر معدن صورت گرفته است و تخصیص کامیون‌های به شاول انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف این مساله بهینه سازی به صورت مدل ریاضی خطی عدد صحیح ترکیبی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که هزینه تعمیر و نگهداری بهینه در برنامه ناوگان حمل و نقل معادل با ۷/۳۵ میلیون دلار در دوره زمانی ده ساله می‌باشد. در ابتدا عملیات حمل و نقل توسط ۱۰ کامیون از ۵ نوع مختلف انجام می‌شود که با افزایش عمق پیت و حجم مواد معدنی و باطله، برنامه‌ریزی خرید ۱۰ کامیون جدید از یک نوع صورت می‌پذیرد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح، کمینه سازی هزینه، معدن سنگ آهن گل گهر، ناوگان حمل و نقل

۱. مقدمه

در معادن روباز ۵۰ درصد از هزینه‌های عملیاتی را هزینه‌های مربوط به بخش بارگیری و باربری به خود اختصاص می‌دهد. میزان موادی که به صورت دوره‌ای باید جابه جا شوند با تهیه برنامه‌ریزی تولید معدن تعیین می‌شود. پس از یک مدت زمان عملیاتی مشخص، موتور کامیون یک بازسازی و تعمیرات کلی نیاز دارد. هزینه تعمیرات در سیستم‌هایی که از ناوگان شاول و تراک برای بارگیری و حمل مواد استفاده می‌شود حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد از کل هزینه حمل و نقل را در معدن‌کاری روباز شامل می‌شود. میزان موادی که باید جابه‌جا شوند با تهیه و استفاده از برنامه زمان‌بندی تولید معدن مشخص می‌شود. سن یک کامیون معدنی با استفاده از کل ساعات عملیاتی و کاری کامیون بدست می‌آید. همچنین بعد از مدت زمان معینی از عملیات موتور کامیون نیازمند یک بازسازی و تعمیر اساسی است. در این راستا تحقیق حاضر با هدف زمان‌بندی ناوگان حمل و نقل معدن با استفاده از روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح و بهینه‌سازی آن بر اساس هزینه تعمیر و نگهداری انجام شده است.

۲. مروری بر تحقیقات گذشته

از اوایل دهه ۶۰ میلادی، روش‌های بهینه سازی برای مسایل معدن‌کاری مورد استفاده قرار گرفتند. برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح به عنوان یک روش با پتانسیل قابل توجه برای بهینه‌سازی عملیات‌های معدن‌کاری روباز و زیرزمینی شناخته شده است. در سال ۲۰۰۵ بورت و همکارانش چند روش برای محاسبه فاکتور تطابق ناوگان ناهمگن کامیون و بارکننده پیشنهاد کردند. براساس روش‌های پیشنهادی آن‌ها، فاکتور تطابق یک ناوگان شامل انواع مختلف کامیون‌ها و شاول‌ها با در نظر گرفتن زمان سیکل آن‌ها محاسبه می‌شود.

برنامه‌ریزی تولید معدن میزان کل موادی که باید به صورت دوره‌ای جابه‌جا شود، محل استخراج و مسافت مورد نیاز برای تخلیه (کارخانه فرآوری، دمپ باطله و یا مواد کم عیار) را مشخص می‌کند. روش‌های برنامه‌ریزی تولید معمولاً شامل ظرفیت کارخانه فرآوری برای مواد با ارزش (ماده معدنی) و کل میزان مواد ممکن برای جابه‌جایی با تجهیزات موجود است.

مفهوم زمان‌بندی تجهیزات معدن با هدف دست‌یابی به بودجه هزینه تعمیرات در طول عمر معدن بحث جدیدی نیست در حالی که زمان‌بندی تجهیزات برای دست یافتن به کمترین هزینه تعمیرات به عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین مسأله در پروسه زمان‌بندی مفهوم جدیدی است. هیچ روش مبتنی بر ریاضیات وجود ندارد که تمام ناوگان کامیون و تمام طول عمر معدن را در نظر بگیرد و هزینه تعمیرات را به حداقل برساند و به درستی هزینه بازسازی موتور و تعمیرات کلی را در یک زمان مشخص ادغام کند.

۳. توزیع کامیون‌ها بین شاول‌ها

در گذشته تعداد کامیون‌هایی که برای هر شاول درنظر گرفته می‌شد، بیش از تعداد ضروری بود. در سال‌های اخیر هم ظرفیت شاول‌ها و هم ظرفیت کامیون‌ها افزایش یافته است. این افزایش مسلماً موجب افزایش قیمت کامیون‌ها و کاهش اختلاف قیمت بین این دو ماشین شده است. به این دلیل اتلاف وقت و زمان انتظار کامیون‌ها بیش از حد نرمال، مقرون به صرفه نیست. بنابراین بعد از سال ۱۹۸۰، بهینه‌سازی سیستم‌های بارگیری و حمل به منظور افزایش بهره‌وری معادن مورد توجه بیشتری قرار گرفت. بهره‌وری را می‌توان استفاده حداکثر از منابع، کاهش اتلاف وقت کامیون‌ها و در نتیجه بیشینه کردن تولید با ماشین‌آلات ثابت، تعریف کرد.

در این مطالعه براساس مسیرهای مختلف رفت و برگشت و زمان رفت و برگشت و مقـدار مسافت پیموده شده در هر مسیر، ساعات مورد نیاز جهت سرویس دهی در هر مسیر و فراوانی مسافرین در ساعات مختلف هر مسیر، اقدام به طراحی مدلی جهت بهینه سازی سیستم حمل و نقل شده است. مدل مزبور بصورت خطی و عدد صحیح بیان شده، که می‌توان با استفاده از نرم افزارهای مختلف برنامه ریزی خطی عدد صحیح حل نمود و نتایج آن را به صورت مختلف مورد استفاده قرار داد.

۴. روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح

در برنامه‌ریزی خطی مسایلی وجود دارند که در آنها برخی متغیرهای مقید به داشتن اعداد صحیح (مقادیر گسسته) هستند. به عنوان مثال فرض کنید X_i بیانگر تعداد سدهای ساخته شده، تعداد رودخانه، تعداد نیروی انسانی استخدام شده و یا تعداد فلز مورد استفاده در موشک باشد . در این حالت X_i، هر مقدار صحیح یا مساوی صفر را اختیار خواهد کرد.
بنابراین تعریف آن‌ها در انتهای مدل به صورت $X_i \geq 0$ بی‌معنی است (یعنی بخش پذیری برای این متغیر بی‌معنی است). پس باید گفت X_i فقط مقادیر عدد صحیح بزرگتر یا مساوی صفر اختیار خواهد کرد (باید نوشته شود $X_i \geq 0$ و X_i عددی صحیح است). از سوی دیگر در برخی مسایل نیز متغیرهای تصمیم وجود دارند که مقادیر ۰ یا ۱ اختیار می‌کنند (Achterberg و همکاران، ۲۰۰۸).

۴-۱. برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط

برنامه ریزی عدد صحیح مختلط به مدل‌هایی گفته می‌شود که در آن متغیرهای پیوسته و گسسته (عدد صحیح و پیوسته) به صورت همزمان در مساله پدیدار می‌شوند. بسیاری از مدل‌های بهینه سازی دارای متغیرهای پیوسته و عدد صحیح بوده که به صورت خطی و تفکیک پذیر در قیود و تابع هدف ظاهر می‌شود (Sahinidis و همکاران، ۲۰۰۹).

۴-۲. تابع هدف

تابع هدف ارائه شده در معادله ۱ سعی در کمینه کردن هزینه نگهداری برای ناوگان ناهمگن کامیون در دوره زمانی مورد نظر است. در این مطالعه هزینه خرید کامیون‌های جدید هم بخشی از هزینه نگهداری محسوب می‌شود.

$$\text{Min} \sum_{y}^{Y_{\max}} \sum_{t}^{T_{\max}} \sum_{b}^{B_{\max}} C_{t,b,y} \times X_{t,b,y} + \sum_{y}^{Y_{\max}} \sum_{b}^{B_{\max}} T_{t,c,y} \times FE_{t,y} \qquad (۱)$$

در معادله فوق $X_{t,b,y}$ تعداد ساعات کاری کامیون t در سال y ام، $C_{t,b,y}$ مقدار هزینه تنزیل شده بر حسب دلار بر ساعت برای کامیون t در سال yام، $Y_{t,y}$ اگر کامیون t بیش از ساعت های ظرفیتی خویش در سال y ام مورد استفاده قرار بگیرد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است، $FE_{t,y}$ میزان هزینه لازم برای بازسازی موتور کامیون در سال yام. لازم به ذکر است در تابع هدف میزان ساعت مجاز کاری کامیون در هر سال با زیرنویس b مشخص شده و اگر کامیون بیش از این ساعت کار کند متحمل هزینه های تعمیر و نگهداری شده که با زیرنویس c مشخص شده است.

۴-۳. محدودیت‌ها

هفت محدودیت در این مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح در نظر گرفته شد که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

$$\sum_{b}^{b_{\max}} X_{t,b,y} \leq A_{t,y} \qquad \forall y = 1,2,3,\ldots,y_{\max} \;;\; t = 1,2,3,\ldots,t_{\max} \qquad (۲)$$

$$b_{max}\sum_{y}^{y_{max}} X_{t,b,y} \le M_{t,b} \quad \forall b = 1,2,3,\dots,b_{max} \; ; \; t = 1,2,3,\dots,t_{max} \tag{۳}$$

$$t_{max}\sum_{b}^{b_{max}} X_{t,b,y} + H_{t,y-1} = H_{t,y} \quad \forall y = 1,2,3,\dots,y_{max} \; ; \; t = 1,2,3,\dots,t_{max} \tag{۴}$$

$$b_{max}\sum_{k=1}^{y} X_{t,b,k} - M_{t,b} \times Y_{t,b,y} \ge 0 \quad \forall b = 1,2,3,\dots,b_{max} \; ; \; t = 1,2,3,\dots,t_{max} \tag{۵}$$

$$X_{t,b+1,y} - M_{t,b+1}\sum_{k=1}^{y} Y_{t,b,k} \le 0 \quad \forall b = 1,2,3,\dots,b_{max} \; ; \; t = 1,2,3,\dots,t_{max} \tag{۶}$$

$$\sum_{t=1}^{t_{max}} (H_{t,y} - H_{t,y-1}) = R_y \quad \forall y = 1,2,3,\dots,y_{max} \tag{۷}$$

$$X_{t,b,y} \ge 0 \quad \forall t,b,y$$
$$Y_{t,b,y} \quad \forall t,b,y \; (Binary) \qquad Y_{t,c,y} \quad \forall t,c,y \; (Binary) \tag{۸}$$

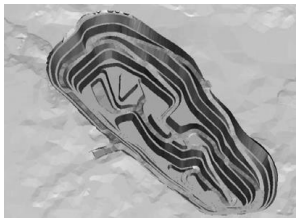
اولین محدودیت از اینکه کل ساعت‌های عملیاتی یک کامیون در یک دوره زمانی معین از ساعت‌های موجود برای کامیون تجاوز نکند، اطمینان حاصل می‌کند. در این رابطه $A_{t,y}$ ساعات موجود برای کامیون t در دوره زمانی معین y می‌باشد.

محدودیت دوم، هنگامی که کل ساعت‌های عملیات در یک محدوده سنی با کل ساعات موجود در آن محدوده برابر شود، ساعت عملیاتی کامیون به محدوده بعدی منتقل می‌شود. b یا محدوده‌های سنی را می‌توان با توجه به نوع و طبقه‌بندی کامیون و شرایط عملیات تنظیم کرد. در مطالعه موردی این تحقیق، محدوده‌های سنی با استفاده از افزایش‌های ۵۰۰۰ ساعتی شکل گرفته‌اند. اولین محدوده سنی با توجه به سن کامیون در آن زمان تعیین می‌گردد. برای مثال اگر سن یک کامیون در زمان انجام این محاسبات ۲۳۵۰۰ ساعت باشد، محدوده‌های ۱ تا ۴ باید حدود صفر ساعتی و محدوده پنجم حدود ۱۵۰۰ ساعتی داشته باشد و بقیه محدوده‌ها بر روی ۵۰۰۰ ساعت تنظیم شوند. محدودیت سوم، سن کامیون‌ها را در پایان هر دوره محاسبه می‌نماید. این محدودیت برای میزان ساعت‌های عملیاتی با تنظیم $H_{t,y}$ بر روی سن جاری و کنونی کامیون t برای $y=0$ به کار می‌رود. برای $y>0$ این معادله ساعت‌های تجمعی عملیات را برای یک دوره زمانی معین محاسبه می‌کند. محدودیت‌های ۴ و ۵ کامیون‌ها را مجبور به استفاده درست و متوالی از محدوده‌های سنی می‌کند بدین معنی که قبل از ورود به محدوده سنی بالاتر ساعت‌های محدوده‌های سنی قبلی باید کامل شده باشند. این محدودیت‌ها از استفاده تصادفی محدوده‌ها توسط کامیون‌ها جلوگیری می‌کند. محدودیت ششم، ساعات کاری کامیون که برای معدن مورد نیاز

است، با توجه به ساعت‌های موجود و در دسترس سیستم تامین می‌کند. محدودیت ۷ به طور مناسبی صحیح و نامنفی بودن متغیرها را کنترل می‌کنند.

۵. اجرای مدل در معدن سنگ آهن گل گهر

معدن سنگ آهن گل گهر متشکل از ۶ ذخیره سنگ آهن است که مجموع این ذخایر بالغ بر ۱۱۳۵ میلیون تن برآورد گردیده است. ذخیره معدن شماره A بر اساس حفاری‌های اکتشافی ۲۵۰ میلیون تن است و شکل کلی ذخیره تقریبا بصورت یک عدسی کشیده با امتداد NW-SE است (شکل ۱).



شکل ۱. محدوده نهایی ذخیره شماره ۱ معدن گل گهر در طراحی اولیه

از آنجا که قرارداد با شرکت‌های پیمانکاری متأثر از مسافت حمل مواد می باشد و با افزایش عمق معدن مسافت‌های حمل نیز افزایش می‌یابند بنابراین از پله ۱۱ به بعد به ازاء هر پله پایین تر از این سطح ۰/۰۲۵ درصد افزایش هزینه منظور شده است. بر اساس اطلاعات واقعی معدن عمر این ذخیره ۱۰ سال در نظر گرفته شد و میزان ساعات مورد نیاز برای حمل مواد و کل ساعات کار در دسترس ناوگان کامیون‌ها در هر سال نیز در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ساعت کار سالانه ناوگان کامیون مورد نیاز و در دسترس

سال	تعداد ساعات کاری مورد نیاز	تعداد ساعات کاری در دسترس
۱۳۸۵	۲۲۲۵۰۱	۲۴۲۱۰۰
۱۳۸۶	۲۵۶۳۱۰	۲۵۶۳۱۰
۱۳۸۷	۲۶۳۵۱۰	۲۷۹۶۳۱
۱۳۸۸	۲۵۶۹۰۱	۲۹۱۲۵۰
۱۳۸۹	۲۲۱۰۵۱	۲۵۶۳۱۸
۱۳۹۰	۲۳۵۱۲۰	۲۴۵۶۳۰
۱۳۹۱	۲۲۵۱۸۰	۲۶۷۸۰۱
۱۳۹۲	۲۵۳۶۸۰	۲۹۸۵۶۰
۱۳۹۳	۱۵۸۳۶۰	۱۷۸۹۵۳
۱۳۹۴	۲۰۱۵۹۶	۲۲۶۳۸۱
۱۳۹۵	۳۶۸۵۱۰	۳۹۶۵۸۱

در این مطالعه موردی، برای به دست آوردن عملکرد بهینه مدل MIP پیشنهادی، ۱۵ کامیون با شرایط سنی ۴۵۰۰ ساعت کارکرد در نظر گرفته شده است. داده های هزینه تعمیر و نگهداری برای پنج نوع تراک با سن و ظرفیت حمل بار و هزینه های خرید در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲. هزینه و ظرفیت برای انواع مختلف تراک

سن اصلی	حداقل ساعات	حداکثر ساعات	کامیون ۱ (هزینه/ساعت)	کامیون ۲ (هزینه/ساعت)	کامیون ۳ (هزینه/ساعت)	کامیون۴ (هزینه/ساعت)	کامیون ۵ (هزینه/ساعت)
۱	۰	۵	۲۸/۵	۵۰/۲۵	۲۹/۵	۳۲/۱۵	۱۶/۳۵
۲	۵	۱۰	۲۶/۷	۵۰/۳۶	۳۲/۰	۳۰/۱۵	۱۷/۲۵
۳	۱۰	۱۵	۲۹/۵	۴۹/۶۵	۱۵/۰	۳۱	۱۵/۲۵
۴	۱۵	۲۰	۳۲/۰	۴۹/۳۶	۱۸/۰	۳۲	۱۴
۵	۲۰	۲۵	۱۵/۰	۵۲/۰۰	۱۷/۶۵	۳۰	۱۳/۸۵
۶	۲۵	۳۰	۱۸/۰	۴۹/۲۵	۱۹/۳۵	۲۹/۵۲	۱۳
۷	۳۰	۳۵	۱۷/۶۵	۴۵/۰۰	۲۰/۵۸	۲۸/۵۵	۱۴
۸	۳۵	۴۰	۱۹/۳۵	۴۹/۶۵	۲۳/۷۵	۲۷/۳۵	۱۵/۲۵
۹	۴۰	۴۵	۲۰/۵۸	۴۹/۳۶	۲۲/۱۵	۲۶/۳۵	۱۸/۰
۱۰	۴۵	۵۰	۲۳/۷۵	۴۹/۲۵	۲۰/۱۵	۲۵/۵۲	۱۹/۱۰
۱۱	۵۰	۵۵	۲۲/۱۵	۴۲/۳۵	۲۴/۱۲	۲۳/۷۵	۱۹/۶۴
۱۲	۵۵	۶۰	۲۰/۱۵	۴۰/۲۱	۱۵/۳۲	۲۸/۶۲	۱۸/۲۵
۱۳	۶۰	۶۵	۴۲/۱۲	۴۰/۲۵	۳۲/۱۵	۳۲	۱۷/۶۵
۱۴	۶۵	۷۰	۱۵/۳۲	۵۰/۳۶	۲۳/۷۵	۳۰	۱۷/۶۵
۱۵	۷۰	۷۵	۳۲/۱۵	۴۹/۶۵	۲۲/۱۵	۲۹/۵۲	۱۹/۱۰
۱۶	۷۵	۸۰	۲۳/۷۵	۴۹/۳۶	۲۰/۱۵	۲۸/۵۵	۱۹/۶۴
۱۷	۸۰	۸۵	۲۲/۱۵	۵۲/۰۰	۱۳/۲۵	۲۷/۳۵	۱۸/۲۵
۱۸	۸۵	۹۰	۲۰/۱۵	۴۹/۲۵	۱۳/۶۵	۲۶/۳۵	۱۷/۶۵
۱۹	۹۰	۹۵	۲۴/۱۲	۴۵/۰۰	۱۴/۸۵	۲۵/۵۲	۱۷/۶۵
۲۰	۹۵	۱۰۰	۱۵/۳۲	۴۹/۶۵	۱۵/۶۵	۲۲/۲۳	۱۴/۲۵
هزینه تعمیر و نگهداری (هزینه/ساعت)	--	--	۲۰/۱۵۳	۴۸/۱۱۰۵	۲۰/۶۵۸۵	۲۶/۸۹۳	۱۵/۹۰۶۵
ظرفیت ترابری (تن)	--	--	۱۳۲	۲۰۶	۱۳۲,۸۰	۱۳۵	۱۲۴
هزینه خرید (میلیون دلار)	--	--	۱/۳۶	۲/۱۶	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۲۱

علاوه بر این، برای هر کامیون باید هزینه نگهداری عمده از قبیل تعمیر موتور، قبول نوسازی پس از ۷۰،۰۰۰ ساعت و سایر هزینه های نگهداری درنظر گرفته شود.

۶. نتایج

هزینه بهینه محاسبه شده برای تعمیر و نگهداری ناوگان کامیون توسط مدل MIP پیشنهادی برابر با تقریبا ۷/۳۵ میلیون دلار در طول مدت زمان ۱۰ ساله بدست آمد. در ابتدا عملیات حمل و نقل توسط ۱۰ کامیون از ۵ نوع مختلف انجام می‌شود که با افزایش عمق پیت و حجم مواد معدنی و باطله، برنامه ریزی خرید ۱۰ کامیون جدید از یک نوع صورت گرفت و در نهایت ساعات کاری مورد نیاز برای هر کامیون نیز با استفاده از روش MIP محاسبه گردید.

۷. منابع

Burt, C., Caccetta, L., & Welgama, P. (2005). ***Models for Mining Equipment Selection 1***.

Achterberg, T., Berthold, T., Koch, T., & Wolter, K. (2008, May). Constraint integer programming: A new approach to integrate CP and MIP. In **International Conference on Integration of Artificial Intelligence (AI) and Operations Research (OR) Techniques in Constraint Programming** (pp. 6-20). Springer Berlin Heidelberg.

Sahinidis, N. V., & Grossmann, I. E. (1991). Reformulation of multiperiod MILP models for planning and scheduling of chemical processes. **Computers & Chemical Engineering, 15**(4), 255-272.