نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره نهم، شماره ۲۵، سال ۱۳۹۳، صفحه ۱۰۹ تا ۱۱۷
Vol. 9, No. 25, 2015, pp.109-117

ارائه مدل انتخاب ناوگان شاول و کامیون با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی واحد عملیات ترابری

علی لشگری[۱]، احمدرضا صیادی[۲*]، مهدی یاوری شهرضا[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ali.lashgari.65@gmail.com
۲- *دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (نویسنده مسئول)، sayadi@modares.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران، myavari@ut.ac.ir

(دریافت ۱۷ مهر ۹۰، پذیرش ۳۰ تیر ۹۲)

چکیده

انتخاب ناوگان مناسب ترابری در معادن روباز باتوجه به اختصاص بیش از نیمی از هزینه‌ها به عملیات بارگیری و باربری، می‌تواند منجر به کاهش چشم‌گیر هزینه‌های تولید شود. این انتخاب متاثر از تنوع تولیدکنندگان، اندازه، مشخصات فنی و قیمت این ماشین‌آلات، همچنین گوناگونی شرایط محیطی و عملیاتی معادن بوده و فرآیند پیچیده‌ای دارد. در این مقاله مدلی ریاضی برای انتخاب اندازه و تعیین تعداد شاول‌های هیدرولیکی و کامیون-های موردنیاز، به عنوان رایج‌ترین سیستم بارگیری و باربری، با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی واحد این عملیات ارائه شده است. شرایط فنی، محیطی و عملیاتی در قالب محدودیت‌هایی شامل سازگاری ارتفاع پله‌ی استخراجی معدن و ارتفاع برداشت یا بارگیری شاول، ظرفیت‌های شاول و کامیون موجود در بازار، تأمین ظرفیت معدن‌کاری سالانه، سازگاری ارتفاع تخلیه‌ی شاول و بارگیری کامیون و ظرفیت آن‌ها و کمینه بودن زمان انتظار در مدل لحاظ شده‌اند. این مدل برای حمل و نقل ۲۰ میلیون تن سنگ در سال در معدنی با شرایط مشخص حل و اندازه و تعداد ماشین‌آلات موردنیاز به همراه هزینه‌ی واحد عملیات ترابری تعیین شده است.

کلمات کلیدی: **مدل‌سازی ریاضی، ناوگان ترابری، معادن روباز، هزینه‌ی عملیات**

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱.مقدمه

چرخه‌ی اصلی تولید در معادن روباز شامل عملیات چالزنی، آتشباری، بارگیری و باربری است. بارگیری و باربری بیش از نیمی از هزینه‌های عملیات اصلی تولید در این معادن را به خود اختصاص می‌دهند [۱]. از این رو باید در انتخاب ناوگان ماشین-آلات به جنبه‌های اقتصادی توجه ویژه‌ای کرد.

دو رکن اصلی اقتصادی در پروژه‌های مختلف هزینه‌ها و قیمت فروش محصول تولیدی هستند. قیمت مواد معدنی باتوجه به شرایط بازار تعیین می‌گردد و نقش تولیدکنندگان در تعیین آن ناچیز است. از این رو کمینه‌سازی هزینه‌های ترابری، با توجه به سهم آن در هزینه‌های عملیات اصلی تولید، نقش قابل توجهی در افزایش سودآوری دارد.

انتخاب سیستم ترابری (ترکیب روش‌های بارگیری و باربری) و تجهیزات ناوگان ترابری با هدف کمینه سازی هزینه‌ها با محدودیت‌های گوناگونی مواجه است. برخی از این محدودیت‌ها از شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی محیط و شرایط عملیاتی معدن‌کاری (نظیر لزوم سازگاری ارتفاع پله و بیشینه ارتفاع کندن شاول) ناشی شده و برخی دیگر متاثر از شرایط حاکم بر بازار تولید این ماشین‌آلات (نظیر دامنه ظرفیت‌های ماشین‌آلات موجود در بازار) هستند. گوناگونی روش‌ها و سیستم‌های بارگیری و باربری، تنوع شرکت‌های سازنده، اندازه، ابعاد، مشخصه‌های فنی و قیمت‌های مختلف این تجهیزات به همراه محدودیت‌های غیر تکنولوژیکی ذکر شده، فرآیند انتخاب و کمینه‌سازی هزینه‌های بارگیری و باربری را پیچیده می‌سازد.

این فرآیند انتخاب به دو بخش انتخاب سیستم ترابری به همراه تجهیزات آن و انتخاب اندازه و تعداد آن‌ها تقسیم می‌شود. به منظور انتخاب سیستم ترابری در معادن از روش‌هایی همچون سیستم‌های خبره و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توان استفاده کرد [۲ و۳]. استفاده از این روش‌ها منجر به انتخاب نوع ماشین‌آلات مناسب برای ترابری مواد در معادن می‌شود.

پس از انتخاب سیستم مناسب ترابری، انتخاب تجهیزات به مفهوم انتخاب اندازه و تعداد ماشین‌آلات موردنیاز صورت می‌گیرد. به دلیل قیمت بالای ماشین‌آلات معدنی، نیاز است انتخاب تجهیزات ترابری مواد به نحوی انجام گیرد که با کمترین هزینه‌ی ممکن، ظرفیت تولید برنامه‌ریزی شده‌ی معدن تامین شود.

به این منظور پژوهش‌های گوناگونی انجام گرفته و از ابزارهای مختلفی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به تئوری صف، سیستم‌های خبره و مدل‌سازی ریاضی اشاره کرد. روش‌های تئوری صف به انتخاب ماشین‌آلات با تمرکز بیشتر بر کمینه‌سازی زمان سیکل بارگیری و باربری می‌پردازد. در سیستم‌های خبره تلاش بر آن است تا از تجربه‌ی خبرگان برای انتخاب بهینه استفاده شود. در مواردی که یک یا چندین هدف وجود دارد یا نیاز به حل مساله‌ای با محدودیت‌های مختلف است، روش مدل‌سازی ریاضی مناسب می‌باشد. در مدل‌سازی ریاضی ارتباط میان مشخصه‌های مختلف مؤثر بر مسئله در قالب تابع هدف و محدودیت‌ها نشان داده می‌شوند.

با استفاده از این روش می‌توان با درنظر گرفتن تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی واحد عملیات ترابری در معادن روباز، ناوگانی را مشخص کرد که محدودیت‌های مختلف را نیز ارضا کند. سیستم انتقال مواد در معادن به دو دسته‌ی پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند. در ناوگان‌های پیوسته، عملیات بارگیری و باربری به طور مداوم و همزمان انجام می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به استفاده از مجموعه‌ی سنگ‌شکن داخل معدن و باربری توسط نوار نقاله اشاره کرد.

در ناوگان‌های گسسته عملیات انتقال مواد در فواصل زمانی مختلف یا چرخه‌ای صورت می‌پذیرد که از آن جمله می‌توان به بارگیری توسط شاول و باربری به‌وسیله‌ی کامیون‌های معدنی اشاره کرد. این ناوگان یکی از روش‌های ترابری متداول در معادن روباز است.

در این مقاله مدلی ریاضی جهت انتخاب بهینه ناوگان شاول و کامیون، با هدف کمینه سازی هزینه‌ی واحد عملیات ترابری در معادن روباز ارائه شده است. با استفاده از این مدل امکان تعیین تعداد و اندازه‌ی ماشین‌آلات بارگیری و باربری موردنیاز فراهم خواهد شد. در قسمت پایانی مقاله، ناوگان بهینه برای حمل ۲۰ میلیون تن مواد در سال برای یک معدن با استفاده از مدل ارائه شده تعیین و هزینه‌ی آن تخمین زده شده است.

۲. فرضیات مدل

در این مدل، ناوگان ماشین‌آلات همگن فرض شده است، به این معنی که تمام شاول‌ها دارای ظرفیت صندوقه‌ی مشابه و همچنین کلیه کامیون‌های انتخابی از نظر اندازه با یکدیگر مشابه خواهند بود. همگن بودن ماشین‌آلات ناوگان از طریق عملیات تعمیر و نگه‌داری و تامین قطعات یدکی، با توجه به سهم بالای این هزینه‌ها [۴-۶]، منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه‌های بارگیری و باربری خواهد شد.

در ارائه‌ی مدل تا حد امکان سعی شده‌است تا متغیرهای موجود در توابع هدف و محدودیت‌ها براساس ظرفیت ماشین‌آلات بیان شود. همچنین فرضیات دیگری در فرایند مدل‌سازی انجام گرفته است که درحین ارائه مدل بیان خواهند شد.

۳. تابع هدف

این مدل با هدف کمینه سازی هزینه‌ی واحد یک ساعت کار ناوگان عملیات ترابری (مجموع هزینه‌های عملیاتی و استهلاک ماشین‌آلات برحسب هر ساعت کارکرد آن‌ها) ارائه شده است (رابطه 1).

$$\min Z = OWC_{Sh} + OWC_{Tr} + OC_{Sh} + OC_{Tr} \qquad (۱)$$

که OWC هزینه‌های مالکیت در دوره عمر نسبی برحسب دلار بر ساعت و OC هزینه‌های عملیاتی برحسب دلار بر ساعت و اندیس‌های Sh و Tr به ترتیب بیانگر شاول و کامیون هستند.

۳-۱. هزینه‌های مالکیت

این بخش از هزینه‌ها شامل هزینه‌ای است که صاحبان پروژه باید بدون ملاحظات شرایط عملیاتی معدن بپردازند که در این مساله شامل هزینه مالکیت (OWC) شاول‌ها و کامیون‌ها است و از دو بخش هزینه استهلاک (CR) و مجموع هزینه‌های بهره، بیمه و انبارداری و مالیات (IC) می‌باشد (رابطه ۲) [۷].

$$OWC = CR + IC \qquad (۲)$$

رابطه‌ی (۳) نشان‌دهنده ارتباط هزینه مالکیت و اجزای آن است. هزینه استهلاک از تقسیم ارزش خالص بر عمر مفید دستگاه برحسب ساعت به دست می‌آید:

$$CR = \frac{CC - R}{h} \qquad (۳)$$

که در این رابطه CC قیمت تحویل ماشین، شامل مجموع قیمت خرید، هزینه حمل، تخلیه و جابه‌جایی، R ارزش اسقاط ماشین موردنظر و h عمرمفید ماشین برحسب ساعت است. ارزش اسقاط حدود ۱۵ درصد قیمت خرید برآورد می‌شود [۷].

به منظور محاسبه بخشی از هزینه‌ی مالکیت که مربوط به هزینه‌های بهره، بیمه و انبارداری و مالیات است از رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$IC = \frac{CC \times (p + i + t)(Y + 1)}{2 \times h} \qquad (۴)$$

که در این رابطه p و t به ترتیب بیانگر نرخ‌های بهره و مالیات، i بیمه و انبارداری و Y تعداد سال‌های عمرمفید دستگاه است که با تقسیم تعداد ساعت عمر مفید دستگاه بر ساعات عملیاتی برنامه‌ریزی شده سالانه برای ماشین موردنظر به دست می‌آید.

با ترکیب روابط (۲) تا (۴)، رابطه محاسبه هزینه مالکیت برای هر ماشین به شکل زیر (رابطه ۵) خواهد بود:

$$OWC = \frac{1.7CC + CC \times (p + i + t)(Y + 1)}{2 \times h} \qquad (۵)$$

بنابراین برای محاسبه هزینه مالکیت کل ناوگان شاول و کامیون می‌توان از رابطه (۶) استفاده کرد:

$$OWC = N_{Sh}\left[\frac{1.7CC_{Sh} + CC_{Sh} \times (p + i + t)(Y_{Sh} + 1)}{2 \times h_{Sh}}\right] + N_{Tr}\left[\frac{1.7CC_{Tr} + CC_{Tr} \times (p + i + t)(Y_{Tr} + 1)}{2 \times h_{Tr}}\right] \qquad (۶)$$

که N تعداد دستگاه‌ها است.

عمر مفید ماشین‌آلات موردنظر براساس داده‌های راهنمای هزینه WMEI به ترتیب ۲۵۰۰۰ و ۳۷۵۰۰ ساعت برای شاول و کامیون درنظر گرفته شده است [۸].

با بررسی داده‌های فنی و اقتصادی ۲۴ نوع متفاوت شاول هیدرولیکی و ۲۳ اندازه‌ی مختلف کامیون یک‌پارچه‌ی معدنی [۹]، روابط میان قیمت تحویل شاول و کامیون به ترتیب با ظرفیت جام شاول و گنجایش کامیون به صورت زیر (روابط ۷ و ۸)) به دست آمده‌اند:

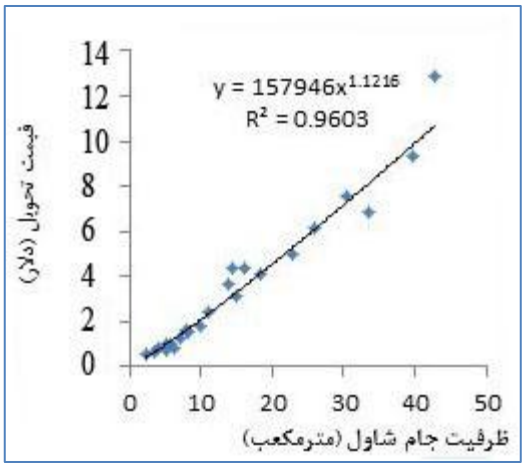
$$CC_{Sh} = 15794 \times BC_{Sh}^{1.121} \qquad (۷)$$

$$CC_{Tr} = 15804 \times BC_{Tr}^{0.951} \qquad (۸)$$

که BC_{Sh} و BC_{Tr} به‌ترتیب حجم جام شاول برحسب مترمکعب و گنجایش جام کامیون برحسب تن متریک هستند شکل ۱و شکل ۲).

با ملاحظات فوق و پس از ساده‌سازی ضرایب، می‌توان هزینه مالکیت کل ناوگان بارگیری و باربری را از رابطه (۹) محاسبه کرد:

$$OWC = 3.159 \times N_{Sh} \times (BC_{Sh})^{1.121}[1.7 + (p + i + t)(Y_{Sh} + 1)] + 0.2107 \times N_{Tr} \times (BC_{Tr})^{0.951}[1.7 + (p + i + t)(Y_{Tr} + 1)] \qquad (۹)$$



شکل ۱- تغییرات قیمت تحویل برحسب ظرفیت جام شاول

۳-۲. هزینه‌های عملیاتی

هزینه‌های عملیاتی ناوگان شاول و کامیون را می‌توان از رابطه (۱۰) محاسبه نمود:

$$OC = N_{Sh} \times (OC_{Sh} + OPC_{Sh}) + N_{Tr} \times (OC_{Tr} + OPC_{Tr}) \qquad (۱۰)$$

که OC هزینه عملیاتی کل برحسب دلار بر ساعت و OPC هزینه‌ی راننده ماشین است. هزینه‌ی عملیاتی شامل هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری دوره‌ای، تعمیرات اساسی، سوخت، لاستیک (درصورت وجود)، روغن‌کاری و قطعات فرسودنی است.

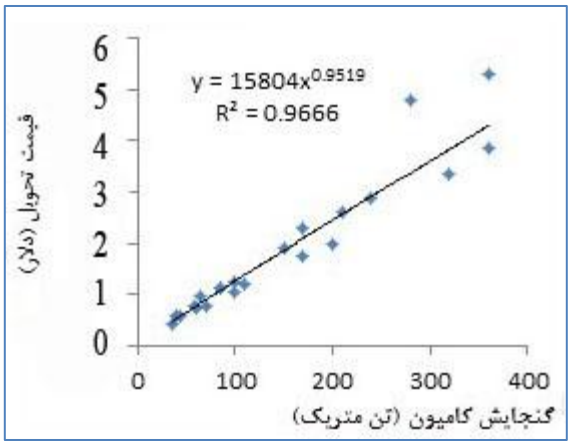
بر اساس بررسی داده‌های فنی و اقتصادی ۲۴ نوع متفاوت شاول هیدرولیکی و ۲۳ اندازه‌ی مختلف کامیون یک‌پارچه‌ی معدنی [۹]، روابط میان هزینه‌ی عملیاتی شاول و کامیون به ترتیب با ظرفیت جام شاول برحیب مترمکعب و گنجایش کامیون بر حسب تن متریک به صورت زیر (روابط ۱۱ و ۱۲) به‌دست آمده‌اند (شکل ۳ و شکل ۴).

$$OC_{Sh} = 16.71 \times BC_{Sh}^{1.043} \qquad (۱۱)$$

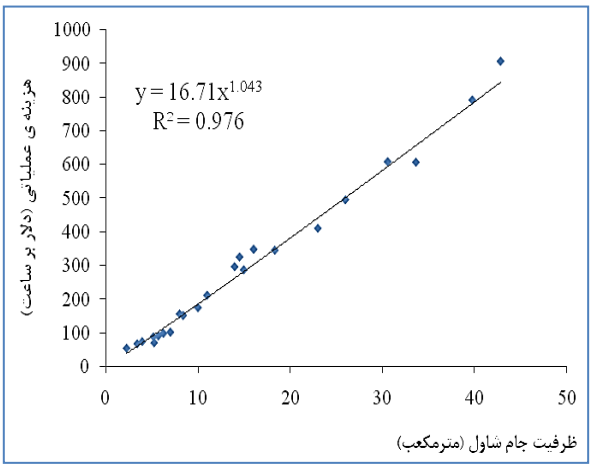
$$OC_{tr} = 1.205 \times BC_{tr}^{0.968} \qquad (۱۲)$$

با ترکیب روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) می‌توان هزینه‌ی عملیاتی کل ناوگان را با استفاده از رابطه‌ی (۱۳) محاسبه نمود:

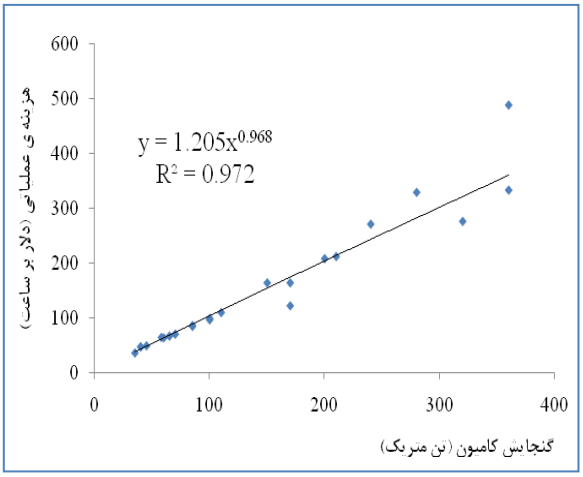
$$OC = 16.71 \times N_{Sh} \times (BC_{Sh})^{1.043} + 1.205 \times N_{Tr} \times (BC_{Tr})^{0.968} + N_{Sh} \times OPC_{Sh} + N_{Tr} \times OPC_{Tr} \qquad (۱۳)$$



شکل ۲- تغییرات قیمت تحویل برحسب گنجایش کامیون



شکل ۳- تغییرات هزینه‌ی عملیاتی برحسب ظرفیت جام شاول



شکل ۴- تغییرات هزینه‌ی عملیاتی برحسب گنجایش کامیون

۳-۳. تابع هدف نهایی

به این ترتیب تابع هدف به صورت زیر به دست می‌آید:

$$MinZ = 3.159\times N_{Sh}\times(BC_{Sh})^{1.121}[1.7+(p+i+t)(Y_{Sh}+1)]+ 0.2107\times N_{Tr}\times(BC_{Tr})^{0.951}[1.7+(p+i+t)(Y_{Tr}+1)] +16.71\times N_{Sh}\times(BC_{Sh})^{1.043}+1.205\times N_{Tr}\times(BC_{Tr})^{0.968} +N_{Sh}\times OPC_{Sh}+N_{Tr}\times OPC_{Tr} \quad (۱۴)$$

۴- محدودیت‌های مدل

باتوجه به ماهیت متغیرها و مشخصه‌های فنی و اجرایی، محدودیت‌های درنظر گرفته شده در مدل توضیح داده می‌شوند. این محدودیت‌های تحمیل شده باعث محدود شدن فضای جواب قابل قبول می‌شوند، به این معنی که با اعمال هریک از این محدودیت‌ها بخشی از منطقه ممکن برای پاسخ‌ها که خارج از محدوده مجاز تحمیل شده است حذف شده و در نتیجه فضایی از پاسخ‌های مورد قبول به‌دست می‌آید.

در نهایت و با بررسی نحوه تغییر تابع هدف با تغییر در متغیرهای موثر می‌توان جواب بهینه را یافت.

۴-۱ مثبت بودن متغیرها

تعداد ماشین آلات باید متغیری مثبت و صحیح باشند (رابطه ۱۵):

$$N_{Sh}, N_{Tr} \geq 0 \qquad and \qquad N_{Sh}, N_{Tr} \in Z \quad (۱۵)$$

۴-۲ تعلق به مجموعه اندازه‌های موجود

اندازه یا ظرفیت ماشین‌آلات باید مقادیری گسسته مطابق با ظرفیت‌های موجود در بازار را اختیار کنند. با توجه به اینکه در این مقاله مبنای محاسبات هزینه، کتاب راهنمای تخمین هزینه WMEI است، ظرفیت‌های موجود در این منبع به عنوان ظرفیت‌های موجود درنظر گرفته شده‌اند. روابط (۱۶) و (۱۷) نشان‌دهنده این محدودیت هستند.

$$BC_{Sh} \in \{2.29, 3.44, 4, 5.20, 5.27, 5.73, 7, 6.30, 8, 8.41, 10, 11, 14, 14.53, 15, 16, 18.35, 23, 26, 30.58, 33.64, 39.75, 42.82\} \quad (۱۶)$$

$$BC_{Tr} \in \{35, 40, 45, 58, 60, 65, 70, 85, 100, 110, 150, 170, 200, 210, 240, 280, 320, 360\} \quad (۱۷)$$

۴-۳ سازگاری ارتفاع پله و بیشینه‌ی ارتفاع کندن شاول

ارتفاع پله یکی از عوامل تعیین کننده در انتخاب ماشین‌آلات بارگیری می‌باشد. درصورتی که بیشینه‌ی ارتفاع برداشت ماشین بارگیر کمتر از ارتفاع پله باشد خطر ریزش مواد بالادست بر روی ماشین در هنگام بارگیری وجود دارد.

از این رو می‌باید این ارتفاع بیش از ارتفاع پله‌ی کاری معدن باشد. از نظر فنی حالت بهینه برای این انتخاب مقداری نزدیک به ارتفاع پله (و یا ارتفاع قرار سنگ خردشده) است [۱۰].

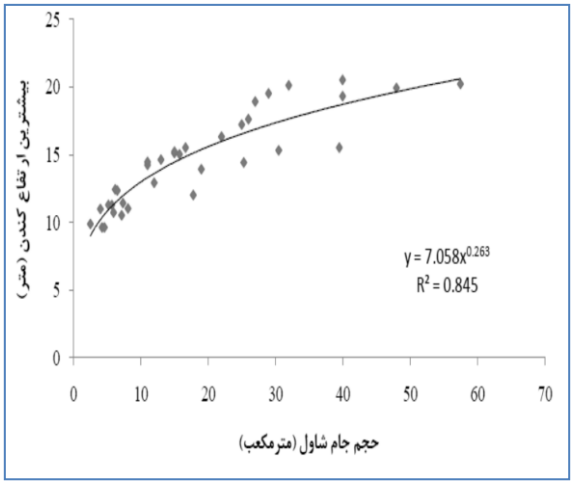
مطالعه‌ی داده‌های ۲۷ مدل مختلف شاول‌های هیدرولیکی تولید شده توسط شرکت‌های سازنده‌ی اصلی (Komatsu، Caterpillar، Bucyrus و Liebherr) نشان می‌دهد بیشینه‌ی ارتفاع برداشت شاول (H_{Sh}) با افزایش حجم صندوقه، به صورت نمایی افزایش می‌یابد و ارتباط آن‌ها به صورت رابطه (۱۸) است:

$$H_{Sh} = 7.058\times(BC_{Sh})^{0.263} \quad (۱۸)$$

ضریب تعیین این رابطه برابر با ۸۴/۵ درصد است که نشان می‌دهد با تقریب مناسبی می‌توان بیشینه‌ی ارتفاع کندن شاول را با در دست داشتن حجم صندوقه‌ی آن تخمین زد (شکل ۵).

به این ترتیب محدودیت موردنظر به شکل رابطه (۱۹) خواهد بود. در این رابطه H_B نشانگر ارتفاع پله است.

$$H_B \leq 7.058\times(BC_{Sh})^{0.263} \quad (۱۹)$$



شکل ۵ - تغییرات حجم جام شاول هیدرولیکی و بیشینه‌ی ارتفاع برداشت آن

۴-۴ تأمین ظرفیت معدن‌کاری سالانه توسط ناوگان شاول‌ها

با ارضای این محدودیت سازگاری ناوگان بارگیری و ظرفیت معدن‌کاری سالانه معدن تضمین می‌شود. این ظرفیت تابع عوامل متعدد فنی و اقتصادی بوده و در خلال فرآیند طراحی و مطالعات امکان‌سنجی تعیین می‌شود.

برای محاسبه‌ی توان تولید ناوگان بارگیری می‌توان از رابطه (۲۰) استفاده کرد [۹]:

$$P_{Lo}=\frac{3600\times N_{Sh}\times BC_{Sh}\times F_B\times\gamma\times A\times U\times F_s\times H_s}{T_{Sh}} \quad (۲۰)$$

که P_{Lo} توان تولید شاول‌ها در سال، F_B ضریب پرشوندگی جام شاول، γ وزن مخصوص مواد خردشده برحسب تن بر مترمکعب، A ضریب دسترسی[1]، U ضریب بهره‌وری عمومی عملیات[2]، F_S ضریب مهارت راننده، H_S ساعات کاری شاول در سال و H_S زمان هر سیکل عملیات بارگیری توسط شاول برحسب ثانیه است. با بررسی زمان سیکل کاری ارائه شده برای شاول‌ها، در شرایط کاری مختلف [۱۱]، می‌توان سیکل کاری شاول در شرایط مختلف را براساس ظرفیت شاول در قالب توابع نمایی (۲۱) تا (۲۴) بیان کرد.

$$T_{Sh}=14.72(BC_{Sh})^{0.2177} \quad \text{شرایط برداشت آسان} \quad (۲۱)$$

$$T_{Sh}=19.42(BC_{Sh})^{0.1779} \quad \text{شرایط برداشت متوسط} \quad (۲۲)$$

$$T_{Sh}=23.59(BC_{Sh})^{0.1467} \quad \text{شرایط متوسط - سخت} \quad (۲۳)$$

$$T_{Sh}=26.92(BC_{Sh})^{0.1451} \quad \text{شرایط برداشت سخت} \quad (۲۴)$$

به این ترتیب این محدودیت به شکل رابطه‌ی (۲۵) بیان می‌شود. که بنا بر شرایط برداشت می‌توان زمان سیکل کاری را با یکی از روابط ارائه شده جایگزین کرد.

$$PR\le\frac{3600\times N_{Sh}\times BC_{Sh}\times F_B\times\gamma\times A\times U\times F_s\times H_s}{T_{Sh}} \quad (۲۵)$$

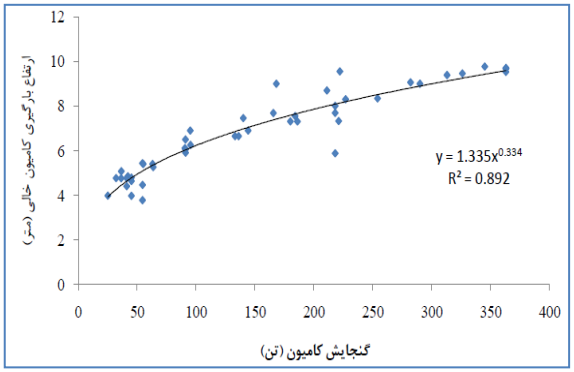
۵-۴ سازگاری ارتفاع تخلیه شاول و ارتفاع بارگیری کامیون

همواره لازم است که ارتفاع تخلیه‌ی بار توسط ماشین‌آلات بارگیری حداقل برابر با ارتفاع بارگیری کامیون خالی داشته باشد. همچنین ارتفاع تخلیه نباید اختلاف زیادی با ارتفاع کامیون خالی داشته باشد، زیرا درصورتی که مواد از ارتفاع زیاد به داخل کامیون تخلیه شوند، موجب بروز مشکلاتی همچون خرابی صندوقه‌ی کامیون و وارد آمدن ضربه و خسارت به شاسی یا بدنه‌ی آن می‌شود [۱۲].

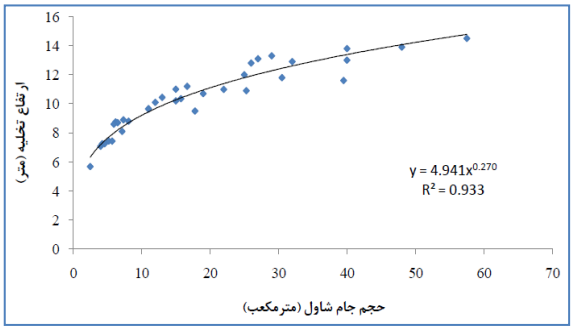
محدوده خاصی برای حد بالای این ارتباط در منابع ارائه نگردیده است. از این رو این محدودیت به صورت رابطه (۲۶) بیان می‌شود.

$$ELH_{Tr}\le DH_{Sh} \quad (۲۶)$$

که ELH ارتفاع بارگیری کامیون خالی برحسب متر و DH ارتفاع تخلیه بار شاول برحسب متر است. با بررسی نحوه تغییر ارتفاع بارگیری کامیون با افزایش گنجایش آن و همچنین نحوه تغییر ارتفاع تخلیه‌ی شاول با افزایش حجم جام آن، می‌توان این دو متغیر را نیز براساس گنجایش کامیون و حجم جام شاول بیان کرد. به این منظور ۴۹ کامیون و ۲۷ شاول ساخته شده توسط پنج شرکت سازنده‌ی اصلی (Caterpillar,Komatsu، Liebherr، Hitachi و Bucyrus) مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج حاصل مطابق روابط (۲۷) و (۲۸) و شکل ۶ و شکل ۷ می‌باشد.



شکل ۶ - ارتباط میان گنجایش و ارتفاع بارگیری کامیون خالی



شکل ۷ - ارتباط میان حجم جام و ارتفاع تخلیه‌ی شاول

[1] Machine availability

ضریب دسترسی نسبت زمان در دسترس بودن ماشین به زمان کاری در سال است و از طریق فرمول مقابل محاسبه است: $(T_t-T_{M\&R})/T_t$

[2] General operation efficiency

ضریب بهره وری نسبت زمان کارکردن ماشین به زمان در دسترس است و از طریق فرمول مقابل محاسبه است: $[(T_t - (T_{M\&R} + T_l)] / (T_t - T_{M\&R})$

که در این روابط T_t زمان کاری در سال، $T_{M\&R}$ زمان تعمیر و نگهداری و جایگزینی قطعات، T_l مجموع زمان‌های افت مرتبط با موارد زیر است: T_{l1} شرایط آب و هوایی و جغرافیایی، T_{l2} پرسنل نظیر ورود و خروج، غذا و ...، T_{l3} عملکرد ماشین.

در این مدل ضریب بهره وری عمومی مورد استفاده قرار گرفته که در آن افت‌های زمانی مربوط به ماشین لحاظ نشده و این تاخیر در زمان سیکل ماشین وارد شده است.

$$DH_{Sh} = 4.941\times(\mathrm{BC}_{Sh})^{0.27} \quad (۲۷)$$

$$\mathrm{ELH}_{Tr} = 1.335\times(\mathrm{BC}_{Tr})^{0.334}\,\frac{1}{\ } \quad (۲۸)$$

با توجه به روابط فوق، محدودیت موردنظر به شکل زیر خواهد بود.

$$\left(\mathrm{BC}_{Tr}\right)^{0.334} \le 3.7(\mathrm{BC}_{Sh})^{0.27} \quad (۲۹)$$

۴-۶ سازگاری ظرفیت شاول و کامیون

به دلیل هزینه‌ی بالای به‌کارگیری ماشین‌آلات معدنی، نیاز است پرکردن کامیون با حداقل تعداد دفعات تخلیه بار شاول انجام گیرد، از سوی دیگر بزرگی بیش از اندازه شاول و حجم زیاد بار تخلیه شده در هر سیکل بارگیری منجر به وارد آمدن ضربه و خسارت به شاسی و بدنه کامیون می‌شود. ظرفیت کامیون باید به صورت استاندارد سه تا پنج برابر ظرفیت جام شاول باشد. البته حد بالای این ظرفیت گاهی تا ۶ برابر نیز انتخاب می‌شود [۱۲]. به این ترتیب محدودیت سازگاری ظرفیت شاول و کامیون به صورت رابطه (۳۰) خواهد بود:

$$3\times\gamma\times\mathrm{BC}_{Sh} \le \mathrm{BC}_{Tr} \le 6\times\gamma\times\mathrm{BC}_{Sh} \quad (۳۰)$$

۴-۷ کمینه بودن زمان انتظار شاول

در عملیات بارگیری و باربری، درصورت عدم اختصاص تعداد کافی کامیون به هر شاول، زمان انتظار شاول افزایش یافته که منجر به کاهش سودآوری خواهد شد. همچنین درصورت تخصیص تعداد بیش از اندازه کامیون به یک شاول این زمان انتظار برای کامیون‌ها به‌وجود خواهد آمد. به منظور کمینه‌سازی زمان انتظار شاول‌ها، نیاز است تا باتوجه به اندازه و تعداد شاول‌های به‌کار گرفته شده، اندازه‌ی کامیون‌ها، مسافت و شیب مسیرهای باربری، تعداد کامیون موردنیاز برای ناوگان تعیین شود. این ناوگان در مراحل اجرایی پروژه با استفاده از روش‌های گوناگون همچون تخصیص ثابت، روش‌های توزیع و مونیتورینگ برای کار با شاول‌ها برنامه‌ریزی می‌شوند [۱۳]. برای کمینه‌سازی زمان انتظار بارگیرها، توان تولید ناوگان باربری در هر ساعت باید بیش از ناوگان بارگیری در ساعت باشد (رابطه ۳۱):

$$HPR_{Lo} \le HPR_{Ha} \quad (۳۱)$$

که در این رابطه $\mathrm{HPR_{Lo}}$ و $\mathrm{HPR_{Ha}}$ به ترتیب توان تولیدی ناوگان باربری و بارگیری برحسب تن متریک در ساعت هستند. توان تولید ساعتی ناوگان بارگیری از ضرب تعداد شاول در توان تولید ساعتی شاول ($\mathrm{P_{Lo}}$) به‌دست می‌آید. توان تولیدی ناوگان باربری برحسب تن متریک در هر ساعت با استفاده از رابطه (۳۲) تعیین می‌شود:

$$HPR_{Ha} = \frac{N_{Tr}\times 3600}{T_{Tr}}\times\left[\frac{BC_{Tr}}{BC_{Sh}\times\gamma}\right]\times BC_{Sh}\times\gamma \quad (۳۲)$$

که $\mathrm{T_{Tr}}$ زمان سیکل باربری برحسب کامیون است. زمان سیکل باربری شامل زمان‌های لازم برای مانور و استقرار برای قرارگیری در پای شاول (T1)، بارگیری (T2)، حمل مواد بارگیری شده تا محل تخلیه (T3)، چرخش، مانور و تخلیه مواد حمل شده (T4) و بازگشت کامیون خالی تا محل بارگیری (T5) می‌باشد.

زمان مانور و استقرار در پای شاول (T1) از ۳۶ تا ۴۸ ثانیه متغیر است که در این پژوهش به طور متوسط ۴۲ ثانیه درنظر گرفته شده است [۱۲]. زمان مانور و تخلیه مواد حمل شده (T4) شامل دو بخش چرخش به همراه مانور و بالا بردن صندوقه و تخلیه و پایین آوردن صندوقه است که زمان عملیات اول حدود ۱۸ تا ۴۲ ثانیه و زمان عملیات دوم ۶۰ تا ۷۲ ثانیه می‌باشد [۱۲]. این زمان تاحد زیادی به مهارت راننده و هندسه محل بارگیری و تخلیه بستگی دارد. با فرض تعدد دستگاه‌های باربری توزیع این زمان به سمت میانگین آن که در مجموع برابر با ۹۶ ثانیه است، میل خواهد کرد. فرض ثابت بودن این زمان‌ها منجر به تغییر زیادی در جواب نخواهد شد. زیرا این مقادیر در مقایسه با بخش‌های دیگر چرخه باربری بسیار کوچک بوده و به این ترتیب خطای ناشی از این ساده‌سازی نیز ناچیز خواهد بود. زمان بارگیری (T2) به نسبت اندازه کامیون و زمان چرخه بارگیری شاول وابسته است. به این معنی این زمان به تعداد دفعات تخلیه-ی بار شاول و چرخه زمانی مربوط به آن وابسته است و می‌توان آن را توسط رابطه (۳۳) محاسبه نمود:

$$T_2 = \left[\frac{BC_{Tr}}{BC_{Sh}\times\gamma}\right]\times T_{Sh} \quad (۳۳)$$

زمان حمل مواد بارگیری شده تا محل تخلیه و زمان بازگشت کامیون خالی از محل تخلیه تا محل بارگیری با توجه به فاصله و سرعت حمل تعیین می‌شود. با فرض استفاده از جاده‌های دوبانده و رفت و برگشت کامیون در یک مسیر باربری، تنها تفاوت در زمان رفت (با بار) و برگشت (خالی) در سرعت حرکت خواهد بود.

به این ترتیب با توجه به نکات ذکر شده زمان چرخه باربری از رابطه (۳۴) محاسبه می‌شود:

$$T_{Tr} = 138 + \left[\frac{BC_{Tr}}{BC_{Sh} \times \gamma}\right] \times T_{Sh} + T_3 + T_5 \qquad (۳۴)$$

با جای‌گذاری روابط زمان سیکل عملیاتی شاول و کامیون، محدودیت موردنظر به صورت رابطه‌ی (۳۵) درخواهد آمد:

$$1 + \frac{138 + T_3 + T_5}{N_{Tr} \times \left[\frac{BC_{Tr}}{BC_{Sh} \times \gamma}\right]} \le \frac{T_{Sh}}{N_{Sh} \times F_B \times A \times U \times F_S \times H_S} \qquad (۳۵)$$

۴-۸ کمینه بودن زمان انتظار کامیون

با استفاده از این محدودیت زمان انتظار کامیون‌ها بررسی می‌شود تا اطمینان حاصل شود این زمان از دقایقی اندک فراتر نمی‌رود. این محدودیت به صورت رابطه (۳۶) بیان می‌شود [۷]:

$$\sum_{i=1}^{5} T_i \le N_{Tr} \times (T_1 + T_2) \qquad (۳۶)$$

به این مفهوم که زمان سیکل باربری یک کامیون باید کمتر از زمان موردنیاز کل ناوگان برای مانور و قرارگیری کنار شاول و بارگیری باشد. با جایگذاری روابط مربوطه خواهیم داشت (رابطه ۳۷):

$$48 + T_3 + T_5 \le (N_{Tr} - 1) \times \left(42 + \frac{BC_{Tr} \times T_{Sh}}{BC_{Sh} \times \gamma}\right) \qquad (۳۷)$$

۵- مطالعه موردی

در این قسمت یک پروژه معدنی با مشخصات و شرایط مندرج در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور حل مدل موردنظر از نرم‌افزار Lingo.11 استفاده شده است. در کد مورد استفاده محدودیت دوم منظور نشده و نیاز است پس از حل وجود اندازه ماشین‌آلات انتخاب شده کنترل شود و درصورت عدم هم‌خوانی اندازه‌ها، ماشین‌آلاتی با اندازه موجود مجاور بررسی شوند. با حل این مدل پاسخ به دست آمده نشان‌دهنده نیاز به ۲ شاول هیدرولیکی با ظرفیت ۷/۵۲ مترمکعب و ۱۲ کامیون ۸۹/۸۳ تن متریک است.

نزدیک‌ترین اندازه شاول موجود ۸ مترمکعب است. به این ترتیب در مدل به جای متغیر اندازه و تعداد شاول به ترتیب مقادیر ۸ و ۲ قرار داده می‌شود و اندازه و تعداد کامیون‌ها دوباره تعیین می‌شوند که این روند منجر به انتخاب ۱۲ کامیون با اندازه ۹۱/۰۵ تن متریک می‌شود. با توجه به اینکه نزدیک‌ترین اندازه کامیون موجود در بازار ۹۱ تن متریک است، ناوگان انتخاب شده شامل ۲ شاول هیدرولیکی ۸ مترمکعب و ۱۲ کامیون ۹۱ تن متریک است که هزینه‌های ساعتی ناوگان برابر با ۲۳۶۷/۳۵ دلار در ساعت خواهد بود.

جدول ۱ مشخصات مطالعه موردی

عمر مفید شاول	۲۵۰۰۰ ساعت
عمر مفید کامیون	۳۷۵۰۰ ساعت
نرخ بهره	٪۱۰
نرخ بیمه و انبارداری	٪۱
نرخ مالیات	٪۱
ارتفاع پله	۱۲متر
عرض پله باربری	۲۴متر
میزان مواد جابه‌جا شده	۲۰ میلیون تن در سال
ضریب پرشوندگی جام شاول	۰،۸۵
وزن مخصوص خردشده*	۳ تن بر متر مکعب
ضریب دسترسی	۰/۹۵
ضریب بهره‌وری	۰/۸۳
ضریب چرخش شاول	۱
ساعات کاری در سال	۵۶۰۰ ساعت بر سال
شرایط کاری شاول	متوسط سخت
مدت زمان رفت	۷ دقیقه
مدت زمان برگشت	۵ دقیقه
دستمزد راننده	۲۶ دلار بر ساعت
* میانگین وزنی وزن مخصوص باطله و سنگ معدن	

۶ - نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه‌های بالای بارگیری و باربری در معادن روباز، انتخاب صحیح ناوگان ترابری منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌ها می‌شود. مدل ارائه شده در این مقاله به انتخاب تعداد و اندازه‌ی شاول و کامیون با هدف کمینه‌سازی قیمت تمام شده‌ی عملیات ترابری می‌پردازد. این مدل دارای هشت محدودیت مختلف می‌باشد که سازگاری ناوگان ترابری با محیط کاری و همچنین سازگاری تجهیزات بارگیری و باربری با یکدیگر را تضمین می‌کند. با استفاده از این مدل ماشین‌آلاتی مطابق با اندازه‌های موجود در بازار، به نحوی انتخاب می‌شوند که زمان انتظار ماشین‌آلات بارگیری و باربری کمینه شود. در ارائه‌ی مدل تا حد امکان سعی شده‌است تا متغیرهای موجود در توابع هدف و محدودیت‌ها براساس ظرفیت ماشین‌آلات بیان شود که در این راستا روابطی میان هزینه‌های عملیاتی و قیمت تمام‌شده‌ی ماشین‌آلات با ظرفیت آن‌ها و همچنین ارتباط مشخصات فنی

مختلف با ظرفیت‌ها ارائه شده است. همچنین کاربرد مدل برای جابه‌جایی ۲۰ میلیون تن مواد در یک معدن با شرایطی مشخص بررسی شده است که منجر به انتخاب دو دستگاه شاول ۸ مترمکعب و ۱۲ دستگاه کامیون ۹۱ تن شده است.

References

1. Kennedy, B. A.; 19902; "Surface Mining", 2nd Ed., SME, Littleton, Colorado.

2. Ganguli, R., Bandopadhyay, S.; 2002; "Expert system for equipment selection", International journal of mining, reclamation and environment, Vol. 16:3, pp.163 -170.

3. Bascetin A.; 2003; "A Decision Support System for optimal equipment selection in open pit mining: Analytical hierarchy process", Istanbul Tech University journal of Geoscience, Vol.16, pp.1-11.

4. Sayadi, A.R., Lashgari, A., Basiri, M.H.; 2010; "Loading and hauling equipments maintenance cost estimation in surface mining", International congress on e.Maintenance, Lulea, Sweden, 212–217.

5. Sayadi, A. R., Lashgari, A., Fouladgar, M.M.; 2012; "Estimating capital and operational costs of backhoe shovels", Journal of Civil engineering and management, Vol. 18(3), pp 378-385.

6. Sayadi, A.R., Lashgari, A., Paraszczak, J.; 2011; "Hard-rock LHD cost estimation using single and multiple regressions based on principal component analysis", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 27, pp 133-141.

7. Hartman, H.L. and Mutmansky, J. M.; 2002; "Introductory Mining Engineering", 584 p.

8. Western Mining Engineering Institute; 2002; "Mine and Mill Equipment; an estimator guide", Aventurine, USA.

9. Lashgari, A.; 2010; "Cost estimation of open pit mining equipment", M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Theran, Iran.

10. Hustrolid W. and Kuchta, M.; 2006; "Open pit mine planning and design", Taylor & Francis, 972 p.

11. Atkinson, T.; 1992; "Selection and sizing of excavating equipment", SME mining engineering handbook, chapter 13-3.

12. CATERPILLAR Inc.; 2001; "Caterpillar Performance Handbook", Peoria, Illinois.

13. Mkhatshwa, S.V.; 2009; "Optimization of the loading and hauling fleet at Mamatwan open pit mine", The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 109; pp. 223-232.