بهينه‌سازي تخصيص و گسيل كاميون در سامانه ترابري معدن مس سرچشمه

سجاد حقير چهره‌قاني[۱]، علي اصغر خدايارى[۲] و محمد فاروق حسيني*[۳]

[۱] دانش آموخته كارشناسي‌ارشد مهندسي استخراج معدن - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

[۲] عضو هيأت علمي دانشكده مهندسي معدن - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

[۳] استاديار دانشكده مهندسي معدن - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸۴/۷/۱۶، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۵/۷، تاريخ تصويب ۸۵/۱۰/۱۶)

چكيده

هزينة مربوط به بخش بارگيري و حمل حدود۵۰ درصد از هزينه‌هاي توليد يك معدن روباز را به خود اختصاص مي‌دهد. در استخراج معادن، تخصيص و گسيل كاميون‌ها يكي از مهمترين و پيچيده‌ترين فرآيندهاي عملياتي است كه بهينه‌سازي آن مي‌تواند باعث صرفه‌جويي قابل توجهي شود، لذا بهره‌گيري از سامانه‌هاي مديريت حمل و نقل به منظور تأمين دو هدف بيشينه‌سازي توليد معدن و كنترل كيفيت سنگ ارسالي به كارخانه فرآوري مدنظر مديران معادن قرار گرفته است. در اين تحقيق يكي از مدل‌هاي موجود در تخصيص كاميون‌ها، برمبناي كمينه‌كردن تعداد كاميون مورد نياز و با در نظر گرفتن محدوديت‌هاي عملياتي معادن براي استخراج ميزان مشخصي از مواد معدني و باطله توسعه داده شده است. اين مدل توسط برنامه‌اي كه در محيط برنامه‌نويسي MATLAB تهيه شده، براي يک شيفت واقعي از معدن مس سرچشمه حل شده است. بررسي نتايج به‌دست آمده حاكي از افزايش طرفيت توليد به ميزان ۲۸/۵ درصد معادل با بيش از ده هزار تن در روز نسبت به وضعيت فعلي است.

واژه هاي كليدي: بهينه‌سازي – ديسپچينگ - تخصيص و گسيل - تئوري صف - معدن مس سرچشمه

مقدمه

در استخراج معادن، تخصيص و گسيل بهينه كاميون‌ها يكي از عوامل اصلي كاهش هزينه توليد است. سامانه ديسپچينگ در اكثر معادن به‌صورت يک فرايند چند مرحله‌اي جامع به‌كار گرفته مي‌شود كه در مرحله اول تخصيص بهينه كاميون‌ها بين ماشين‌آلات بارگيري و محل‌هاي تخليه (بر اساس نتايج مدل بهترين مسير) تعيين و در مرحله دوم گسيل زمان‌واقعي[۱] كاميون‌ها انجام مي‌گيرد كه ممكن است با دخالت و يا بدون دخالت اپراتور ديسپچري باشد. در عمل محدوديت اصلي در تخصيص بهينه كاميون‌ها، تأمين توليد پايدار و قابل‌قبولي از كانسنگ با حداكثر كارآيي ممكن ماشين‌آلات است. در گذشته براي تخصيص و گسيل كاميون‌ها در اكثر معادن از روشهاي ابتكاري استفاده مي‌شد. گرچه شيوه‌هاي ابتكاري هنوز هم براي معادن كوچک قابل كاربرد است، ولي استفاده از آن براي معادن بزرگ توصيه نمي‌شود. در معادن بزرگ به‌كارگيري تركيبي از روشهاي محاسباتي و ابتكاري پيشنهاد مي‌شود. روش مرسوم براي حل مسأله ديسپچينگ استفاده از روش‌هاي تحقيق در عمليات است. Elbrond و Soumis (۱۹۸۷) براي طرح‌هاي كوتاه‌مدت توليد از چندين مدل برنامه‌ريزي غيرخطي جامع و به هم پيوسته استفاده كرده‌اند كه در آن ديسپچينگ كاميون‌ها برمبناي كمينه‌كردن زمان انتظار كاميون و شاول انجام مي‌گيرد.

در ديسپچينگ از توابع هدف مختلفي مي‌توان استفاده كرد، كه Lizotte و همكاران (۱۹۸۹) برخي از آن‌ها را از قبيل بيشينه‌كردن كاربري كاميون‌ها، بيشينه كردن كاربري شاول‌ها، فاكتور انطباق و...، مورد بررسي قرار داده‌اند. Xi و همكاران (۱۹۹۴) بر روي مدل‌هاي چند مرحله‌اي ديسپچينگ مطالعه كرده‌اند، آن‌ها براي بهينه‌سازي تخصيص اوليه كاميون‌ها از دو مدل برنامه‌ريزي خطي، و براي گسيل زمان‌واقعي كاميون‌ها از مفهوم كمترين نسبت انحراف استفاده كرده‌اند. Temeng و همكاران (۱۹۹۷) براي حل مساله تخصيص كاميون از مدل برنامه‌ريزي آرماني، و براي گسيل زمان‌واقعي از مدل

* نويسنده مسئول : تلفن : ۰۲۱-۶۱۱۱۴۲۴۷ ، فاكس : ۰۲۱-۸۸۰۰۸۸۳۸ ، Email: mfarogh@ut.ac.ir

ترابري و كمينه كردن زمان انتظار شاول‌ها و كاميون‌ها استفاده مي‌كنند.

همه اين مطالعات نشان داده است كه بسته به ماهيت عملياتي معدن، تركيبي از اين الگوريتم‌ها و روش‌ها مي‌تواند راه‌حل مؤثري در بهينه‌سازي ديسپچينگ معادن باشد. علي‌رغم وجود تفاوت آشكار بين دو وظيفه تخصيص و گسيل زمان‌واقعي كاميون در معادن، هنوز وجوه انفكاك و ارتباط بين آنها به وضوح تعريف نشده است. تحقيقات Chung و همكاران (۲۰۰۴) نشان داده است كه كاربردهاي صنعتي ديسپچينگ عموماً به سه دليل با موفقيت محدودي روبرو بوده‌اند:

- محاسبات و حل مدل تخصيص نه بر مبناي اطلاعات جاري معدن، بلكه در شروع هر نوبت كاري و برمبناي مقادير متوسط داده‌هاي به‌دست آمده از اجراي عمليات در شيفت‌هاي قبلي انجام مي‌گيرد، كه اين امر انطباق تخصيص با شرايط لحظه‌اي سامانه را خدشه‌دار مي‌كند. به‌علاوه، در شيوه‌هاي به كار رفته، پارامترها حالت قطعي و معين دارند، در حالي‌كه محيط داراي ماهيت احتمالاتي است. عدم انطباق نتايج محاسبات با واقعيات در طي عمليات آشكار مي‌شود، و كاربران براي جبران ناسازگاري ناشي از نقص مدل، بايد انرژي و منابع بيشتري را صرف كنند.
- گذر از مرحله حل مسأله تخصيص به گسيل زمان‌واقعي كاميون‌ها دشوار بوده و عموماً نيازمند دخالت نيروي انساني است.
- در طي هر شيفت تغيير وضعيت‌هاي پيش‌بيني نشده و ناگهاني، مانند خرابي يا راه‌اندازي يكي از شاول‌ها در طي شيفت و تغيير حجم ناوگان باربري بروز مي‌كند، كه فرآيند ديسپچينگ بايد قابليت مديريت آن‌ها را داشته باشد.

مسأله تخصيص كاميون

مهمترين هدف مسأله تخصيص كاميون، پشتيباني از هدف نهايي توليد، يعني بيشينه كردن سود ناشي از عمليات است. گرچه به طور مفهومي ارتباط اين مسأله و مسائل اقتصادي عمليات روشن است ولي معمولاً ارتباط مستقيمي بين تخصيص كاميون و اهداف اقتصادي وجود ندارد. براي تخصيص كاميون در معادن اهداف زيادي را مي‌توان تعريف كرد، كه اين اهداف بسته به شكل، تركيب فيزيكي معدن، شرايط عملياتي و اهداف اقتصادي يا مديريتي معدن متفاوت‌اند. مدل ساده‌اي براي تخصيص كاميون، كه توسط Chung و همكاران ارايه شده است، به صورت زير است:

$$MinTruck: \sum_s \sum_d \sum_g K(g)X(s,d,g) \quad (۱)$$

Subject to:

$$V_0 + H[V_{Truck} - V_{Extraction}] \geq V_{Miin} \quad (۲)$$

$$V_{Truck} = \sum_s \sum_d \sum_g \frac{60}{\tau_0(s,d,g)} L_0(s,d,g)X(s,d,g) \quad (۳)$$

$$d = Waste\ Dumps,\ H\sum_s^n \sum_d^m \sum_g^q X_{(s,d,g)} \times V_g \geq D_w \quad (۴)$$

$$\sum_d \sum_g \frac{60}{\tau_0(s,d,g)} \overline{L}_0(s,d,g) \leq C_{shovel} \quad (۵)$$

$$\sum_s \sum_d X(s,d.g) \leq R(g) \quad (۶)$$

$$X(s,d,g) \geq 0 \quad (۷)$$

در معادلات اين مدل انديس‌هاي s, d و g به ترتيب به شاول، دامپ وكاميون اشاره دارد. K(g) فاكتور هزينه است كه به نوع كاميون بستگي دارد، و در معادن معمولاً بر مبناي كاميون‌هاي ۲۴۰ تني سنجيده مي‌شوند. X(s,d,g)، $L_0(s,d,g)$ و $\tau_o(s,d,g)$ به ترتيب نرخ گسيل، ظرفيت حمل و زمان چرخه كار كاميون نوع g در مسير بين شاول s و دامپ d است. V_0 نشان دهنده حجم اوليه مواد در انبار درشت و V_{Truck} و $V_{Extraction}$ به ترتيب حاكي از نرخ جريان ورودي و خروجي مواد در انبار درشت مي‌باشد و V_{min} كمترين حجم موادي است كه بايد در ابتداي شيفت در انبار درشت وجود داشته باشد. C_{shovel} ظرفيت ساعتي شاول s و D_w نيز مقدار تناژ باطله‌اي است كه بايد به صورت ساعتي حمل شود. R_g تعداد كاميون‌هاي در دسترس از نوع g و H، تعداد ساعت كاري در دوره يا شيفت است. معادلات ۲، ۵ و ۶ محدوديت‌هاي خطي كليدي در مدل هستند. محدوديت ۲ تأمين كننده سطح توليد و ظرفيت انباشت مواد بوده، و قيدهاي ۵ و ۶ به

ترتيب محدوديت كاميون‌هاي تخصيصي برحسب توان توليد شاول، و حد بالاي منابع كاميوني را نشان مي‌دهند. محدوديت مربوط به كنترل كيفي (عيار) جهت سهولت در اين مرحله حذف شده است. در اين مدل در عبارات رياضي و تابع هدف مورد استفاده كليه پارامترها، ازجمله زمان بارگيري و باربري كاميون‌ها، به صورت مقادير متوسط داده‌ها هستند (Chung و همكاران، ۲۰۰۴).

اين مدل با رويكردي به طرح توسعه معادن ارايه شده است. تابع هدف اين مدل در واقع، كمينه‌كردن هزينه عملياتي و سرمايه‌اي لازم براي استخراج مقدار معيني از كانسنگ مي‌باشد، ولي از آنجا كه كاميون‌هاي معدني حجم بزرگي از ناوگان ماشين‌آلات توليد را تشكيل مي‌دهند، شكل تابع هدف به صورت كمينه‌كردن منابع كاميوني درآمده است. اين مدل بيشتر براي معادني كه كارخانه فرآوري در مجاورت معدن بوده و وابستگي نزديكي بين آنها وجود داشته باشد، مناسب است. در عمليات استخراج ايجاد جريان ثابت و پايايي از توليد با در نظر گرفتن شرايط محدود كننده كارخانه و ظرفيت‌هاي محل‌هاي انباشت مواد الزامي است. محل انباشت كانسنگ يا انبار درشت، نقش كليدي در چرخه عمليات و توليد دارد و به عنوان يک پل رابط، دو عمليات مستقل توليد ناپيوسته معدن، و مصرف پيوسته كارخانه را به هم متصل مي‌نمايد.

اختلاط مواد معدني و تنظيم كيفي محصول از ديگر پارامترهاي اساسي عمليات است كه برنامه‌ريزي آن بايد در طرح توسعه معدن و برنامه توليد شاول‌ها صورت گيرد. زيرپا گذاشتن محدوديت‌هاي كمي و كيفي فرض شده براي عمليات و محصول معدن، جرائم اقتصادي را در پي خواهد داشت. اگرچه اين محدوديت‌ها را مي‌توان با صرف منابع بيشتر پوشش داد، ولي در اين صورت همان جرائم به صورت افزايش هزينه‌هاي عملياتي و سرمايه‌اي ظاهر خواهند شد. مهمترين هدف عمليات، تأمين محدوديت‌ها و الزامات توليد با صرف كمترين منابع مي‌باشد.

مدل توسعه داده شده براي معدن سرچشمه

هدف كمينه‌كردن تعداد كاميون مورد نياز براي پوشش دادن شاول‌ها را مي‌توان با بيشينه كردن نرخ توليد مجموعه شاول-كاميون تأمين نمود. مدل توسعه داده شده بر مبناي مقادير متوسط داده‌هاي عملياتي از زمان حمل بار و برگشت كاميون‌هاي خالي و عيار سينه‌كارها صورت‌بندي مي‌شود، و با حل آن ضمن تعيين نرخ گسيل كاميون به هر سينه‌كار، مسيرهاي بهينه حمل و برگشت نيز تعيين مي‌گردد. اين مدل قابليت انطباق و به كارگيري در معادني كه داراي ناوگان ماشين‌آلات ناهمگون هستند، نيز مي‌باشد. اين ناهمگوني مي‌تواند از تنوع كاميون‌هاي با ظرفيت‌هاي مختلف، يا اختلاف در عمر كاركرد ماشين‌آلات مشابه با افت عملياتي متفاوت ناشي شود. براي تأمين اين منظور پارامتر شاخصي كه با توجه به هزينه عملياتي و سرمايه‌گذاري هر يک از انواع كاميون‌ها ضريبي را در آن‌ها اعمال مي‌كند، درنظر گرفته شده است. اين پارامتر براي كاميوني كه به عنوان مبنا انتخاب مي‌شود، واحد بوده و مقدار آن براي ساير انواع كاميون‌ها در مقايسه با كاميون مبنا، تعيين مي‌شود. اين شاخص در هر معدن و بر مبناي اسناد حسابداري و محاسبه هزينه حمل واحد بار توسط هر نوع كاميون، آمارهاي مديريتي و اقتضاي تركيب ناوگان ماشين‌آلات تعيين مي‌شود. در معدن سرچشمه، كه از كاميون‌هايي با ظرفيت يكسان بهره مي‌برد، چنين تفكيک و امتيازدهي بر مبناي ظرفيت قابل انجام نيست، بلكه امتيازدهي مي‌تواند با توجه به عمر كاركرد كاميون‌ها و در نتيجه كارآيي متفاوت آن‌ها صورت گيرد. در ادامه به شرح تابع هدف و قيود محدوديت مدل ارائه شده براي معدن سرچشمه پرداخته شده است.

تابع هدف

تابع هدف اين مدل به صورت زير تعريف مي‌شود:

$$Min\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}C_k X_{ijk}t_{ijk}+C_k P_{jik}t_{jik} \qquad (۸)$$

كه در اين رابطه:

X_{ijk} : نرخ گسيل كاميون نوع k از شاول i به دامپ j

P_{jik} : نرخ گسيل كاميون نوع k ازدامپ j به شاول i

t_{ijk} : زمان حمل بار كاميون نوع k از شاول i به دامپ j

t_{jik} : زمان برگشت كاميون نوع k از دامپ j به شاول i

C_k : فاكتور هزينه كاميون نوع k

n: تعداد شاول‌هاي فعال در معدن

m: تعداد دامپ‌هاي معدن

q: تعداد انواع كاميون‌هاي به كارگرفته شده در معدن

همان طوري كه ديده مي‌شود، اين تابع از مجموع دو جمله تشكيل شده است. جمله اول مربوط به كاميون‌هايي است كه از مبادي شاول‌ها و دستگاه‌هاي بارگيري به سمت مقاصد تخليه، يعني دامپ‌ها و سنگ‌شكن‌ها حركت مي‌كنند و كاميون‌هاي پر را دربر مي‌گيرد و جمله دوم به كاميون‌هايي مربوط مي‌شود كه از مقاصد تخليه به سمت مبادي بارگيري باز مي‌گردند، و كاميون‌هاي خالي را شامل مي‌شود. هر دو جمله از حاصل‌ضرب تعداد كاميون‌هاي گسيل شده (X_{ijk} در جمله اول و P_{jik} در جمله دوم) در زمان حركت آن‌ها (t_{ijk} در جمله اول و t_{jik} در جمله دوم) تشكيل شده است. با توجه به اين‌كه تعداد كاميون‌ها در ارتباط مستقيم با وزن بار جابه‌جا شده بوده، و زمان حركت بازنمايي كننده مسافت طي شده توسط كاميون‌ها مي‌باشد، بنابراين حاصل‌ضرب تعداد در زمان متناسب با حاصل‌ضرب وزن در مسافت، يعني كار انجام شده، بوده، و در نتيجه كمينه شدن تابع هدف در واقع به مفهوم كمينه شدن كار انجام شده توسط كاميون‌ها در آمدوشد بين باركننده‌ها و محل‌هاي تخليه مي‌باشد، كه نتيجه آن، با توجه به ثابت بودن نسبي مسافت‌ها، كمينه شدن تعداد كاميون‌ها خواهد شد.

محدوديت‌ها

محدوديت‌ها و قيود عملياتي، حوزه تغيير تابع هدف و دامنه جواب‌هاي موجه مسأله را تعيين مي‌نمايند. برخي از مهمترين محدوديت‌ها عبارت‌اند از:

الف) برابر بودن تعداد كاميون‌هاي ورودي به هر گره و كاميون‌هاي خروجي از آن در واحد زمان

اين روابط هم براي نقاط تخليه و هم نقاط بارگيري صادق است.

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} X_{ijk} = \sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} p_{jik} \quad i = 1,2,...,n$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} X_{ijk} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} p_{jik} \quad j = 1,2,...,m$$

(۹)

ب) غير منفي بودن تخصيص‌ها

$$X_{ijk} \geq 0$$

$$P_{jik} \geq 0$$

(۱۰)

ج) محدوديت توليد شاول‌ها

از نظر عملياتي هر يک از شاول‌ها در واحد زمان توان بارگيري مشخصي دارند. بنابراين، تعداد كاميون‌هاي بارگيري شده در هر شاول در واحد زمان نمي‌تواند از حد معيني فراتر رود. اين محدوديت به صورت رابطه ۱۱ بيان شده است. از سوي ديگر هزينه عملياتي بالاي شاول‌ها و ضرورت فعال نگه‌داشتن سينه كارها، تعريف حد پاييني براي كاميون‌هاي بارگيري شده در هر شاول در واحد زمان، و در واقع حفظ بهره‌وري حداقل شاول‌ها را ضروري مي‌سازد، كه اين محدوديت كنترل كننده زمان انتظار شاول‌ها نيز مي‌باشد، اين قيد به صورت رابطه ۱۲ بازنمايي شده است.

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} V_k X_{ijk} \leq S_i \quad i = 1,2,...,n$$

(۱۱)

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} V_k X_{ijk} \geq rS_i \quad i = 1,2,...,n$$

(۱۲)

در اين رابطه:

S_i : حد بالاي توان بارگيري شاول i ام بر حسب كاميون در واحد زمان

r : ضريبي از توان بارگيري شاول كه بين صفر و يک بوده و كمترين ضريب فعاليت شاول را نشان مي‌دهد.

V_k : ظرفيت باربري كاميون نوع k

د) محدوديت پذيرش دامپ‌ها

اين قيد بيشينه ترافيک كاميون در محل تخليه را در سقف D_j محدود مي‌كند.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} V_k X_{ijk} \leq D_j \quad j = 1,2,...,m$$

(۱۳)

ه) محدوديت حداقل ميزان توليد

بر اساس برنامه‌ريزي به عمل آمده، عمليات معدن روزانه بايد حجم معيني از باطله و كانسنگ را توليد نمايد. در اغلب معادن كارخانه فرآوري به صورت سه شيفت در حال كار است، در حالي‌كه معدن تنها در دو شيفت توليد دارد. علاوه بر اين ممكن است تعداد روزهاي كاري معدن و كارخانه فراوري متفاوت بوده يا به دليل مسائل پيش‌بيني نشده توليد معدن براي مدت كوتاهي متوقف گردد. به همين دليل در بيشتر معادن پل واسطي تحت

عنوان انبار درشت مواد وجود دارد که وجـود خـوراک لازم براي شيفت سوم کارخانـه و ذخيـره اضـطراري چنـد روزه براي شرايط پيش‌بيني نشده را تضمين مي‌کند. در نتيجه، نرخ توليد شيفت‌هاي کاري معـدن معمـولاً بيشـتر از نـرخ مصرف هر شيفت کارخانه مي‌باشد. محدوديت مربـوط بـه حداقل ماده معدني توليد شده در معدن به صـورت رابطـه ۱۴ بازنمايي شده است. رابطه ۱۵ نيز همين محـدوديت را در رابطه با باطله تأمين مي‌کند.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} X_{ijk} \times V_k \geq \frac{V_{\min} - V_0}{H} + V_{ext} \quad j = 1,2,...,N_{crusher}$$

(۱۴)

$$H\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} X_{ijk} \times V_k \geq W \quad j = 1,2,...,N_{Waste\ Damp}$$

(۱۵)

در اين دو رابطه داريم:

V_0: ميزان انباشته مواد معدني در انبار درشت در ابتـداي شيفت

$V_{\min}$: کمترين ميزان مطلوب از انباشـته مـواد در انتهـاي شيفت

H : تعداد ساعات کاري معدن در شبانه روز

V_{ext} : مقدار مصرف مواد معدني کارخانه در واحد زمان

W : ميزان باطله‌اي که بايد در طي عمليات روزانه برداشت شود.

و) کنترل کيفي کانسنگ توليدي

از آنجا که کارخانه فـرآوري کانسـنگ ورودي را در محدوده عياري مشخصي مي‌پذيرد و اغلب در هيچ يـک از سينه‌کارهاي معدني انطباق کافي با اين شرط وجود ندارد، لذا خوراک کارخانـه از اخـتلاط محصـول چنـد سـينه‌کـار تأمين مي‌شود. نسبت اختلاط يا استخراج هر سينه‌کـار بـه صورتي تعيين مي‌شود که در نهايت عيار مطلوب به دسـت آيد. رابطه ۱۶ نشان دهنده اين محدوديت عملياتي است.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} V_k X_{ijk} \times \alpha_i = \alpha_j \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} V_k X_{ijk} \quad j = 1,2,...,N_{crusher}$$

(۱۶)

به طوري‌که:

α_i : انديس کيفيت مواد در محل بارگيري i

α_j : حداقل انديس کيفي مواد مورد نياز درمحل تخليه j

شـرط کيفيـت مـواد در مقاصـد نـه تنهـا بـراي سـنگ‌شـکن، بلکـه بـراي کليـه دامـپ‌هـا از قبيـل کنـار سنگ‌شکن، فروشويي و.... نيز قابل اعمال است. مي‌توان بـا جايگزيني علامت بزرگتر يا مساوي، يا علامت کـوچکتر يـا مساوي به جاي علامت مساوي، انعطاف پـذيري سـامانه را نيز بين حدود ۵ تا ۱۰ درصد لحاظ کرد.

ز) محدوديت تعداد کاميون در دسترس

اين شرط براي کنترل انطباق برنامه‌ريزي توليـد بـا تعـداد کاميون در دسـترس معـدن اسـت. بـر ايـن اسـاس حجـم برنامه‌ريزي تخصيص و گسيل کاميونها محـدود بـه تعـداد کاميونهاي آماده به کار معدن خواهد بود.

$$N = \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} \frac{X_{ijk}\left(t_{ijk} + t_{Lik} + t_{WLi}\right) + P_{jik}\left(t_{jik} + t_{WDj}\right)}{60 \times u}\right] + 1$$

(۱۷)

در اين رابطه:

t_{Lik}: زمان بارگيري کاميون نوع k توسط شاول i

t_{Wli}: زمان انتظار کاميون براي بارگيري در پاي شاول

T_{WDj}: زمان انتظار براي تخليه در دامپ j

u: شاخص نسبت زمان کاري مفيد به زمان در دسترس که بين صفر و يک است.

حل مدل ديسپچينگ در معدن سرچشمه

براي ارزيابي نتايج استفاده از مدل در معادن، مي‌توان از نرم‌افزارهاي شبيه‌سازي موجود مانند ARENA يا TALPAK استفاده کرد؛ اما در عمل حل مدل ارائه شده فرآيندي است که در ابتداي هر شيفت و بر مبناي برنامه ارائه شده از سوي واحد کنترل سنگ معدن اجرا مي‌شود. بدين منظور برنامه‌اي در زبان برنامه‌نويسي MATLAB تهيه شده است که علاوه بر حل مدل تخصيص، کار گسيل زمان واقعي کاميونها و گزارش‌دهي از توليد را نيز انجام مي‌دهد که تصويري از صفحه اصلي اجراي برنامه در شکل ۱ آمده است. در ادامه اين بخش فرآيند حل مدل و داده‌هاي عملياتي مربوط به يک نمونه از اجراي برنامه ديسپچينگ در معدن مس سرچشمه ارائه شده است. شاول‌هاي فعال در اين مثال ، شاول‌هاي ۱، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۱۰ هستند. شاول‌هاي ۳، ۵، ۶ و ۷ مخصوص بارگيري ماده معدني و شاول‌هاي ۱ و ۱۰ مخصوص برداشت باطله‌اند. شاول ۸ نيز در مرز ماده معدني و باطله قرار دارد و قادر به برداشت هر دو نوع سنگ است. جدول (۱) ويژگي‌هاي عملياتي شاول‌هاي فعال در مدل حل شده را نشان مي‌دهد.

جدول۱: مشخصات عملياتي شاول‌هاي فعال در حل مدل.

کد شاول / شرح	شاول ۱	شاول ۳	شاول ۵	شاول ۶	شاول ۷	شاول ۸	شاول ۱۰
مدل	P&H۱۹۰۰	P&H۱۹۰۰	P&H۱۹۰۰	P&H۱۹۰۰	P&H۱۹۰۰	P&H۱۹۰۰	P&H۲۱۰۰
حد بالاي توان (ton/h)	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۲۰۰۰
حد پايين توان (ton/h)	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
متوسط توليد (ton/h)	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۵۰۰
عيار سينه كار (%)	۰	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۷۸	۱/۶۱	۰/۳۲	۰

شكل۱ :تصويري از صفحه اصلي نرم افزار ارائه شده براي ديسپچينگ در معدن سرچشمه.

از ديگر داده‌هاي عملياتي اصلي كه براي اجراي مدل مورد نياز هستند، محدوديت‌هاي مربوط به محلهاي تخليه مواد هستند. اين پارامترها براي دامپ‌هاي باطله به صورت بيشينه ظرفيت پذيرش و براي سنگ‌شكن حداقل، حداكثر و متوسط عيار پذيرش و كمينه تناژ ساعتي است. در معدن سرچشمه بيشينه ظرفيت قابل دسترس دامپهاي باطله ۱۰۰،۰۰۰ تن در ساعت و بيشترين مقدار قابل تخليه در سنگ‌شكن ۵۰۰۰ تن در ساعت مي‌باشد. ميزان متوسط مصرف كارخانه ۲۰۰۰ تن در ساعت و موجودي ابتداي شيفت انبار درشت ۱۵۰۰۰۰ تن لحاظ شده است. شاخص كيفي ماده معدني در سنگ‌شكن ۰/۹ درصد است كه بيشينه حد اختلاف از آن تا ۰/۰۵ درصد قابل‌قبول خواهد بود. جدول (۲) زمان‌هاي رفت مسيرهاي ممكن براي ترابري را به تفكيك نشان مي‌دهد. براي مسيرهاي رفت، تنها مسيرهايي كه منطقاً امكان حركت وجود دارد، مورد زمان‌سنجي قرار گرفته‌اند. مثلاً زمان‌سنجي مسير رفت شاولي كه محصول آن باطله است، نسبت به سنگ‌شكن بي‌معني خواهد بود.

ناوگان كاميون‌هاي معدن مس سرچشمه گرچه همگي داراي ظرفيت يكسان اوليه ۱۲۰ST مي‌باشند، ولي از دو نوع متفاوت هستند. كاميون‌هاي نوع وابكو[۲] كه از اولين سال بهره‌برداري معدن به كارگرفته شده‌اند و اكنون بالغ بر ۳۰ سال از عمر آنها مي‌گذرد، به لحاظ توان عملياتي (حجم بار قابل حمل و سرعت) افت قابل‌توجهي دارند و نوع درسر[۳] كه ۱۴ سال از عمر آنها مي‌گذرد، و در وضعيت عملياتي نسبتاً بهتري قرار دارند. مدل ارائه شده

اين قابليت را داراست كه تنوع نوع و ظرفيت كاميون‌ها را نيز لحاظ نمايد، ولي از آنجا كه در معدن سرچشمه با اعمال سياستهاي عملياتي خاص مانند به كارگيري كاميونهاي نوع وابكو در مسير سنگ‌شكن، كه شيب مسير كمتري دارد، سعي شده است تا حدامكان بر ناهمگوني تناژ قابل حمل كاميون‌ها غلبه شود و از طرف ديگر محاسبه فاكتور هزينه C_k نيازمند داده‌هاي اقتصادي متعددي از قبيل هزينه تعمير و نگهداري و... است كه در دسترس نبوده‌اند، لذا در مثال حل شده، از فاكتور C_k تنوع كاميون‌ها صرف‌نظر شده است. هرچند، اختلاف زمان رفت و برگشت انواع كاميون‌ها خود مسأله ناهمگوني كارآيي را تا حدي پوشش مي‌دهد. زمان‌هاي بارگيري، تخليه و انتظار و برگشت كاميونها در معدن سرچشمه تعيين شده و نتايج به صورت جداول (۳) ، (۴) و (۵) آورده شده است.

جدول۲ : زمان رفت كاميون‌هاي معدني بين شاول‌ها و محل‌هاي تخليه برحسب دقيقه.

مبدأ / مقصد	سنگ شكن	دامپ ۳۱	دامپ ۲۶
شاول ۳	۷,۰۲	∞	∞
شاول ۵	۷,۵۶	∞	∞
شاول ۶	۱۱,۲۳	∞	∞
شاول ۷	۸,۵	∞	∞
شاول ۸	۹,۵۶	۷,۴۸	۳۰,۶۶
شاول ۱	∞	۲۲,۸	۶,۲۶
شاول ۱۰	∞	۱۲,۹	۴۶,۶۵

جدول ۳ : زمان تخليه و انتظار براي تخليه بر حسب دقيقه.

زمان / مقصد	زمان تخليه	زمان انتظار براي تخليه
سنگ شكن	۰,۹	۰,۸۵
دامپ ۳۱	۰,۹۹	۰
دامپ ۲۶	۰,۸۹	۰

در اين مثال فرض شده است كه مقدار حجم مواد معدني با مصرف در شيفت شب از مقدار حدي ۱۷۰ هزار تن به ۱۵۰ هزار تن تقليل يافته است. در اين صورت استخراج معدن علاوه بر ۲۰۰۰ تن مصرف پيوسته كارخانه، اين كمبود انبار درشت را نيز بايد پوشش دهد. نتايج اجراي برنامه براي شرايط مفروض، به صورت شكل (۲) بوده است. شكل (۲) نشان‌دهنده نرخ تقاضاي هر يک از شاول‌هاي دخيل در توليد و نرخ گسيل كاميون از هر دامپ به هر يک از شاول‌ها است. همان‌طوري‌كه ملاحظه مي‌شود، هر كاميون بعد از تخليه براي برگشت مي‌تواند مسيري كاملاً متفاوت از مسير رفت داشته باشد. به‌عنوان مثال از هر ۱۰ دستگاه كاميوني كه در ساعت از شاول ۱۰ به دامپ ۳۱ ارسال مي‌شود، ۶ عدد آن در برگشت به شاول ۵ مراجعت خواهند داشت (چهره‌قاني، ۱۳۸۴).

جدول ۴: زمان بارگيري و انتظار بارگيري بر حسب دقيقه.

زمان / مبدأ	زمان بارگيري	زمان انتظار بارگيري
شاول ۳	۲,۴۱	۱,۱۹
شاول ۵	۲,۳۵	۰,۷۵
شاول ۶	۳,۵۳	۱,۲۵
شاول ۷	۲,۶۷	۰,۶۸
شاول ۸	۲,۷۷	۱,۴۹
شاول ۱	۲,۴	۰,۳۰
شاول ۱۰	۱,۵۲	۰,۹۱

جدول۵ : زمان برگشت كاميون‌هاي معدني بين محل‌هاي تخليه و شاول‌ها برحسب دقيقه.

مبدأ / مقصد	شاول ۳	شاول ۵	شاول ۶	شاول ۷	شاول ۸	شاول ۱	شاول ۱۰
سنگ شكن	۶,۸۶	۶,۸۵	۷,۹۵	۷,۶۲	۵,۶۰	۲۳,۵	۷,۴۰
دامپ ۳۱	۸,۵۴	۸,۰۲	۱۲,۵	۱۰,۹	۷,۸۰	۱۸,۰	۸,۹۵
دامپ ۲۶	۲۹,۸	۳۳,۷	۴۱,۶	۳۰,۰	۳۳,۷	۴,۳۹	۳۱,۱

بحث و نتيجه‌گيري

استفاده از مدل‌هاي تخصيص و گسيل زمان‌واقعي در سامانه شاول-كاميون باعث افزايش توان توليد يک ناوگان ماشين‌آلات معدني با تعداد مشخص و ثابتي از كاميون‌ها مي‌شود. به عبارت ديگر، با استفاده از مدل‌هاي بهينه‌سازي تخصيص و گسيل زمان‌واقعي، مي‌توان با ناوگان كوچكتري از ماشين‌آلات، نسبت به روشهاي سنتي، به ميزان مشخصي از توليد دست يافت. براي ارزيابي تأثير استفاده از مدل تخصيص ارائه شده در اين تحقيق ميزان توليد در حالت سنتي با توليد به‌دست آمده از حل مدل مقايسه شده است.

در وضعيت فعلي، معدن با بهره‌گيري از تعداد متوسط ۲۵ دستگاه كاميون كه حداقل ۲۳ دستگاه از آن‌ها در خط توليد مي‌باشند، در شيفت اول حداكثر ٤٥ هزار تن ماده معدني و باطله توليد مي‌كند. اين در حالي‌است

که تولید حاصل از حل مدل با همان تعداد کامیون و شرایط عملیاتي که در جداول ۱ تا ۵ ارائه شد، حدود ۵۷۸۰۰ تن است. به عبارت بهتر با استفاده از مدل تخصیص میزان تولید متوسط شیفت اول هر کامیون از ۱۹۵٦ تن در حالت سنتي به ۲۵۱۳ تن افزایش مي‌یابد که نشان دهنده ۲۸/۵ درصد افزایش توان تولید است.

ارزیابي تاثیر مدل تخصیص ارائه شده نسبت به وضعیت سنتي را با تحلیل برگشتي دیگري نیز مي‌توان نشان داد. اگر هدف تولید را میزان مشخصي برابر با مقدار به‌دست آمده از حل مدل یعني ۵۷۸۰۰ تن فرض کنیم، محاسبه تعداد کامیون لازم براي دستیابي به این مقدار تولید در وضعیت سنتي و مقایسه آن با تعداد ۲۵ دستگاه کامیون استفاده شده در حل مدل تخصیص، نشان‌دهنده نحوه کاهش تعدادکامیون مورد نیاز عملیات خواهد بود. اگر چه در روش سنتي، محاسبه تعداد کامیون‌هاي مورد نیاز بر اساس زمان متوسط چرخه‌کاري کامیون‌ها امکان‌پذیر است، در این تحقیق براي لحاظ پارامترهاي احتمالاتي مؤثر در چرخه عملیات و برخورداري از ضریب اطمینان بیشتر تعداد کامیون‌ها بر اساس روابط تئوري صف محاسبه شده است، که نتیجه حاصل از آن را مي‌توان به عنوان حد بالاي تعداد کامیون مورد نیاز در نظر گرفت.

اگر فرض شود که براي بارگیري و حمل در هر سینه‌کار، سامانه صف M/GI/1 برقرار باشد، یعني ورود کامیون‌ها به سامانه ارائه خدمت (دستگاه بارگیري) از توزیع پواسون پیروي نموده و زمان سیکل باربري نیز توزیع نامشخصي داشته باشد و در هر سینه کار تنها یک دستگاه بارگیري وجود داشته باشد در این صورت براي نرخ سرویس دستگاه بارگیري و نرخ ورود کامیون مي‌توان نوشت:

$$\mu = 1/(t_l + t_m) \quad (۱۸)$$

$$\theta = N/(t_w + T) \quad (۱۹)$$

که در آن داریم:

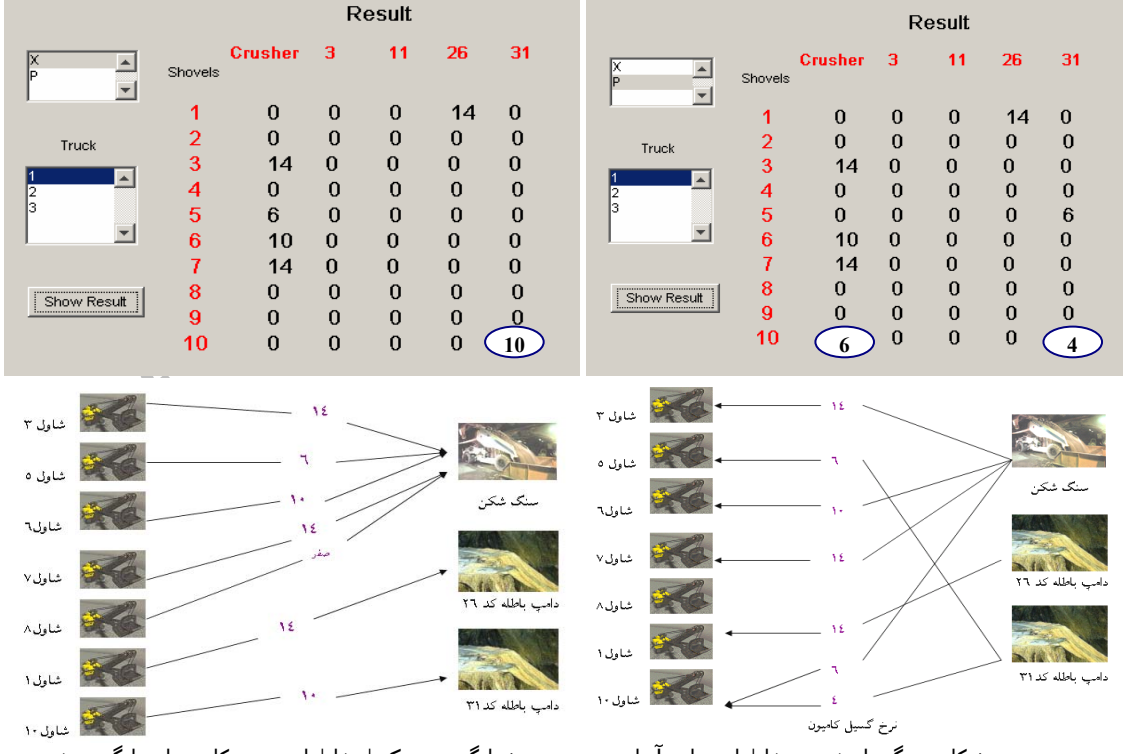
t_l : زمان بارگیري هر کامیون توسط دستگاه بارگیري

t_m : زمان مانور کامیون براي قرارگرفتن در کنار شاول

N: تعداد کامیون‌هاي موجود در سامانه

t_w: زمان انتظار متوسط کامیون در محل شاول قبل از دریافت سرویس

T: زمان چرخه کاري هر کامیون



نرخ بارگیري هریک از شاولها و مقصد کامیونهاي بارگیري شده — نرخ کامیون گسیل شده به شاولها و مبانی آنها

شکل ۲ : نرخ تردد کامیون در هر یک از مسیرهاي رفت و برگشت بین دامپ‌ها و شاول‌ها.

بر اساس تئوري صف زمان انتظار هر كاميون براي بارگيري از رابطه ۲۰ و تعداد معادل كاميون از رابطه ۲۱ تخمين زده مي‌شود:

$$t_w = \theta(1+\mu^2\sigma^2)/(2\mu(\mu-\theta))$$

(۲۰)

$$N = \theta T + \theta^2(1+\mu^2\sigma^2)/(2\mu(\mu-\theta)$$

(۲۱)

در اين روابط σ^2 پراش زمان سرويس دستگاه بارگيري يا $1/\mu$ است (سكاكي. حميد، ۱۳٦۸).

نمونه‌اي از نتايج اين محاسبات كه براي مدل حل شده در معدن مس سرچشمه انجام گرفته، در جدول (٦) آورده شده است. نتايج حاصل نشان مي‌دهد كه در روش تخصيص سنتي و ثابت براي دستيابي به سطح توليد ۵۷۸۰۰ تن، حداقل ۳۰ دستگاه كاميون مورد نياز خواهد بود كه مقايسه آن با ۲۵ دستگاه كاميون مورد استفاده در حل مدل ارائه شده، حاكي از كاهش ۱٦ درصدي تعداد كاميون مورد نياز در ناوگان كاميوني معدن مس سرچشمه با استفاده از اين مدل تخصيص است. مدل و برنامه ارائه شده ميزان توليد را با انتخاب مسيرهايي با كوتاه‌ترين زمان مسافرت كاميون‌هاي پر و خالي بيشينه مي‌كند و از طرف ديگر با اختلاط مناسب توليد سينه‌كارهاي مختلف عيار مطلوب و مورد تقاضاي سنگ‌شكن را فراهم مي‌سازد.

اين مدل قابليت كاربرد براي معادني با ناوگان ماشين‌آلات ناهمگون را داراست، به طوري‌كه گوناگوني نوع و ظرفيت كاميون‌ها و دستگاه‌هاي باربري مشكلي را در اجراي برنامه پيش نمي‌آورد.

اطلاعات موردنياز مدل همان اطلاعاتي هستند كه هم اكنون به طور روزانه توسط واحد كنترل سنگ جمع‌آوري و ثبت مي‌شود و براي اجراي مدل ثبت اطلاعات جديدي موردنياز نيست.

در حال حاضر در هيچ يک از معادن كشور از سامانه‌هاي ديسپچينگ استفاده نمي‌شود، كه علت اصلي اين موضوع عدم اتوماسيون سامانه‌هاي مديريت ماشين‌آلات است. با توجه به مزاياي اقتصادي سامانه‌هاي مديريت ماشين‌آلات كه افزايش توليد و كاهش منابع موردنياز تنها يكي از آن‌ها است، پيشنهاد مي‌گردد كه در طراحي فاز توسعه معادن موجود و معادن جديد به‌كارگيري سامانه‌هاي ديسپچينگ و مونيتورينگ به‌عنوان يک اولويت اصلي در نظر گرفته شود.

جدول ۶ : محاسبه تعدادكاميون معادل با برنامه ريزي توليد بر مبناي ديسپچينگ كاميون‌ها.

(شاول)	(دامپ)	زمان رفت	زمان برگشت	زمان بارگيري	زمان تخليه	زمان انتظار	انحراف معيار زمان بارگيري	تعداد سيكل كاري	تعداد كاميون معادل توليد برمبناي تئوري صف
۳	سنگ شكن	۷,۰۲	٦,۸٦	۲,٤۱	۰۹	۱,۱۹	۰,۲	۱٤	٦
۵	سنگ شكن	۷,۵٦	۸,۰۲	۲,۳۵	۰,۹	۰,۷۵	۰,۲	٦	۲
٦	سنگ شكن	۱۱,۲۳	۷,۹۵	۳,۵۳	۰,۹	۱,۲۵	۰,۲	۱۰	٦
۷	سنگ شكن	۸,۵	۷,٦۲	۲,٦۷	۰,۹	۰,٦۸	۰,۲	۱٤	٦
۱	باطله ۲٦	٦,۲٦	٤,۳۹	۲,۱٤	۰,۹	۰,۳	۰,۲	۱٤	۵
۱۰	باطله ۳۱	۱۲,۹	۸,۹٦	۱,۵۲	۱	۰,۹۱	۰,۱	٤	۲
۱۰	باطله ۳۱	۱۲,۹	۷,۰٤	۱,۵۲	۱	۰,۹۱	۰,۲	٦	۳
تعداد بار سولفور حمل شده در ساعت: ٤۴					تناژ توليد سولفور در شيفت: ۲۷٤۰۰ تن				عيار كارخانه: ۰/۹
تعداد بار باطله حمل شده در ساعت: ٤۲					تناژ توليد باطله در شيفت ۲۰٤۰۰ تن				مجموع توليد: ۵۷۸۰۰
تعداد كاميون معادل با توليد برمبناي تئوري صف: ۳۰									

تشكر و قدرداني

در پايان راهنمايي‌هاي با ارزش آقاي مهندس ياوري عضو محترم دانشكده مهندسي معدن پرديس دانشكده های فنی دانشگاه تهران را، كه مشاورت اين پژوهش را به عهده داشتند، ارج نهاده، و از مساعدت آقايان مهندس آتش‌پنجه و مهندس اميررحمت از امور تحقيق و توسعه مجتمع مس سرچشمه و مهندس ابراهيمي‌نسب از واحد پروژه معدن مس سرچشمه، در شناسايي نيازمندي‌هاي عمليات معادن و ارائه برخي از منابع باارزش، كمال تشكر و امتنان را دارد.

مراجع

1 - Chung, H. Ta., James, V. K. and Forbes, J. F. (2004). *A Stochastic Optimization Approach to Mine Truck Allocation.* Chemical and Materials Engineering Department, University of Alberta.

2 - Elbrond J. and Soumis F. (1987). "Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines." *International Journal of Surface Mining,* PP. 1-6.

3 - Lizotte Y., Bonates E. and Leclerc A. (1989). "Analysis of truck dispatching with dynamic heuristic procedures." *Off-Highway Haulage in Surface Mines,* Golosinski & Srajer (eds), Balkema, Rotterdam, PP. 47-55.

4 - Temeng, V. A., Otuonyr, F. O. and Frendewey, J. O. (1997). *Real –Time Truck Dispatching Using a Transportation Alghorithm, IJSM,* Balkema, Rotterdom, PP.203-207.

5 - Xi Y. and Yegulalp T. M. (1994). "Optimum dispatching algorithm for Anshan open-pit mine." *APCOM Proceedings 24,* PP. 426-433.

6 - Chehreghani, S. (2005). *Dispatching and monitoring system for mine transport optimization* (in Farsi), Master thesis, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran

7 - Sakkaki, S. H. (1989). *Patterns for optimization of loading and transportation in open pit mines* (in Farsi). Master thesis in Industrial Enginering, Amir Kabir Technical University, Tehran.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Real-Time Dispatching
2 - WABCO
3 - DRESSER