نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــــریت تولیـــد پاییـــــز ۱۳۸۹- صفحـه ۹۲-۸۱

شمـــاره ۳، جلـــد ۲۱، پاییـــز ۱۳۸۹

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنایـــع و مدیـــریت تولیـــد

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

IJIE

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

توسعه مدل ریاضی برنامه‌ریزی حمل و نقل در معادن روباز با هدف بهبود بهره‌وری

احمد ماکوئی، ابراهیم تیموری و آربی سرکیسیان

کلمات کلیدی

معادن روباز،
توزیع کامیون،
مدل های ریاضی،
بهره وری تولید

چکیده:

ترابری در معادن روباز نیمی از هزینه های عملیاتی را به خود اختصاص می دهد. بهبود در این سیستم تأثیر به سزایی در کاهش هزینه ها و افزایش بهره روی تولید معدن دارد. بهره وری تولید در معدن، آمیزه ای از افزایش راندمان ماشین آلات و تحقق سیاست های استخراجی است. در این مقاله پس از طبقه بندی مدل های توزیع در معادن روباز، مدل ریاضی جدیدی با رویکرد اجرا، چه در آغاز و چه در حین شیفت پیشنهاد شده است. اجرای مدل در آغاز شیفت دیدی کلی از پارامترهای تولید و کنترل کیفیت محصول با توجه به سیاست های استخراجی ایجاد می کند. همچنین اجرای مدل در حین شیفت با استفاده از اطلاعات لحظه ای، سعی می کند تا نتایج را در نزدیکی انحراف از میانگین نتایج اولیه نگاه دارد. از این مدل می توان جهت ایجاد مدل های ابتکاری که خوراک نرم افزارهای شبیه سازی توزیع را تأمین می کنند، استفاده کرد.

۱. مقدمه

یکی از مراحل هزینه بر در استخراج معادن روباز، ترابری است. این بخش ۵۰٪ از هزینه های استخراجی را به خود اختصاص می دهد [۱]. قیمت بالای ماشین‌آلات معدنی، هزینه های بالای سرویس-نگهداری و همچنین هزینه‌های بالای مکانیزاسیون، لزوم افزایش بهره‌وری ماشین‌آلات را در پی داشته است. بنابراین به شدت نیاز به اتخاذ سیاست ها و راهبردهایی در این زمینه به منظور افزایش بهره وری ماشین آلات بارگیری و حمل و کاهش هزینه های ترابری در معادن، وجود دارد. امروزه با پیشرفت و توسعه فناوری و با استفاده از علوم و فنونی چون ریاضیات و کامپیوتر، نوآوری‌های فراوانی در زمینه‌های مختلف معدنکاری به وجود آمده است. در مورد سیستم‌های توزیع نیز وضع به همین منوال است. از سال ۱۹۸۰ در معادن بزرگ دنیا حرکت به سوی بهینه کردن سیستم بارگیری و حمل بوده است [۱۱]. جهت نیل به این هدف، سیستم های مختلف توزیع کامیون ها در معادن طراحی و پیاده سازی شده اند. این سیستم ها با گذر زمان و پیشرفت فناوری همواره دچار تغییرات و اصلاحات شده اند تا به شکل امروزی خود در معادن اجرا شوند. به کارگیری این مدل ها در معادن به صورت سیستم های دستی و یا نیمه خودکار ۵ الی ۱۲ درصد افزایش تولید را پی داشته است [۱۲]. این در حالی است که برای این مدل ها در سیستم های خودکار توزیع، افزایش تولید ۲۴ درصدی نیز ثبت شده است [۲].

در حال حاضر اکثر معادن ایران از روش های سنتی در برنامه ریزی حمل و نقل خود استفاده می کنند. تاکنون بیشتر تلاش ها برای طراحی مدلی خطی یا غیر خطی به کمک علومی چون منطق فازی و یا تحقیق در عملیات بوده است. این مدل ها ایستا بوده و با تغییر لحظه ای پارامترها در حین کار دچار مشکل می شوند. به علاوه تأثیر ماشین آلات بر یکدیگر نیز در حین شیفت مدنظر قرار نگرفته

تاریخ وصول: ۸۸/۱۱/۲

تاریخ تصویب: ۸۹/۴/۳۰

دکتر احمد ماکوئی، استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران. amakui@iust.ac.ir

دکتر ابراهیم تیموری، استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران. teimoury@iust.ac.ir

آربی سرکیسیان، دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت اجرائی دانشگاه علم و صنعت ایران. arbies@gmail.com

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

است. تلاش های انجام شده برای مکانیزاسیون این مدل ها نیز در مراحل اولیه خود هستند.

در بررسی ادبیات موضوع به مقالاتی برمی خوریم که از مدل های ریاضی استفاده نموده اند.Gerrit و Subhash [۳] در مقاله خود در سال ۱۹۸۸ یک مدل برنامه ریزی ریاضی برای زمان بندی معادن روباز را توسعه دادند و برای حل آن از یک فرآیند دو مرحله ای که شامل مراحل تکراری یک مدل زمان بندی اعداد صحیح و یک مدل ساده حمل و نقل می باشد استفاده کردند. پیش از آنها نیز Barbaro و Ramani [۷] در سال ۱۹۸۶ یک مدل برنامه ریزی اعداد صحیح ترکیبی چند پریودی برای زمان بندی تولید و انتخاب و جایابی تجهیزات ارائه نموده بودند.Temeng و Otuonye و Frendeway [۹] در مقاله خود در سال ۱۹۹۷،یک مدل توزیع چند مرحله ای را بر مبنای یک آلگوریتم زمان حقیقی و با هدف حداکثر کردن میزان تولید و کیفیت ارائه نمودند. مدلسازی، توسعه و اعتبار سنجی این آلگوریتم حمل و نقل مورد بحث قرار گرفته است. تعداد شاول ها در مدل به گونه ای در نظر گرفته شده اند که انحراف تناژ تجمعی هر شاول نسبت به هدف تعیین شده به حداقل برسد. وسایل حمل و نقل نیز به صورتی به شاول ها تخصیص می یابند که زمان انتظار این وسایل و شاول ها حداقل گردیده و میزان تولید حداکثر گردد.

Alarie و Gamache [۸]در سال ۲۰۰۲ مقاله ای در خصوص سیستمهای توزیع در معادن روباز ارائه کردند که در آن به مقایسه استراتژی های گوناگون برای حل مساله توزیع پرداخته شد و مزایا و عدم مزایای آنها به بحث گذارده شد.Chung [۵]در سال ۲۰۰۲ از تکنیک برنامه ریزی تصادفی برای مساله تخصیص کامین ها و شاول‌ها در معادن روباز با هدف حداقل سازی هزینه ها استفاده نمود. وی از دو روش بر مبنای منابع و بر مبنای محدودیت‌های شانسی استفاده کرد.Caro و Epstein و Santibanez و Weintraub [۴] در سال ۲۰۰۷ یک رویکرد یکپارچه برای فرآیند برنامه ریزی بلند مدت در معادن در صنعت مس کشور شیلی ارائه نمودند که شامل تصمیمات مربوط به استخراج و فرآوری کانی معدنی به صورتی سازگار با اهداف میان مدت و بلند مدت باشد.Jaoua و Riopel و Gamache [۶] در سال ۲۰۰۹ یک مدل شبیه سازی برای مدیریت ناوگان در سیستم‌های حمل و نقل داخلی ارائه نمودند که در آن با بهره‌گیری از مفاهیم مطرح در مهندسی ترافیک، یک مدل مفهومی جدید معرفی کردند که برای شبیه سازی وضعیت در ترمینال‌های کانتینرها و نیز معادن روباز می تواند استفاده گردد.

این مدل عمدتاً بر اساس باز ایجاد رفتارهای مهم ترافیکی قرار دارد.Chung و Kresta و Forbes و Marquez در سال ۲۰۰۵[۱۰]در مقاله خود با استفاده از از محدودیت های شانسی و رویکرد برنامه ریزی تصادفی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر زمان سیکل، مدلی را جهت تخصیص وسایل حمل و نقل توسعه دادند. برای بررسی تغییرات در مقادیر پارامترهای غیر قطعی، یک چارچوب زمان حقیقی برای به روز کردن مدل ایجاد گردید.

در این مقاله به منظور رفع مشکل مدل های ایستا، ایده تعمیم مدل با شرایط حین اجرا در شیفت ارائه شده است. مدل معرفی شده با استفاده از دو مدل ارائه شده توسط Chung [۱۰] و Temeng [۹] تلفیق با ایده های موجود ایجاد شده است.

۲. محدودیت های برنامه ریزی حمل و نقل در معادن روباز

در ترابری معادن روباز محدودیت‌های متعددی حضور دارند. بخشی از این محدودیت‌ها از محیط تحمیل شده و بخشی به‌عنوان استراتژی‌های استخراجی به‌صورت عمدی اعمال می‌شوند. محدودیت هایی چون ظرفیت ماشین‌آلات، ظرفیت تولید کارخانه فرآوری و سایر محدویت های از این قبیل جزو محدودیت های محیطی می‌باشند. این محدودیت‌ها در فاز طراحی بر معدن اعمال شده‌اند، بنابراین در فاز اجرا کنترل آن‌ها خارج از توان مدیر معدن است.

۲-۱. ظرفیت تولید

افزایش تولید یکی از اهداف معادن است. این امر با توجه به محصول تولیدی معدن که می‌تواند از نظر استراتژیکی با اهمیت باشد، متغیر خواهد بود.

با وجود این که بالا بودن حجم تولید در کنار ایجاد برخی فرصت ها چون امکان صادرات، باعث سرشکن شدن هزینه‌های ثابت می‌شود، اما آن همواره در معادن جزو اهداف اصلی نمی باشد. یکی از معیارهای تعیین کننده سطح تولید معدن، ظرفیت ورودی کارخانه فرآوری است. تولید بیشتر از این سطح هزینه‌های اضافی تخلیه، انبارداری و بارگیری مجدد را به معدن تحمیل می‌کند.

به دلیل وجود اختلاف زمانی فعالیت معدن و کارخانه که از اختلاف در تعداد شیفت‌ها نشأت می‌گیرد، معمولاً حداقل تولیدی برای معدن تعیین می‌شود تا این اختلاف پوشش داده شود. به علاوه وجود متغیرهای متعدد در فرآیند تولید ماده معدنی که امکان توقف تولید و یا ایجاد تغییرات ناخواسته در آن را اجتناب ناپذیر می‌کند، لزوم ایجاد ذخایر مطمئن برای کارخانه برای کاهش ریسک توقف تولید را به همراه دارد. بدین ترتیب معمولاً حداقلی برای سطح تولید در نظر گرفته شده و در برخی شرایط حتی میزان حداکثر تولید نیز محدود می‌شود. این محدودیت می‌تواند به‌صورت کلی برای کل تولیدات ویا جزئی برای تک تک سنگ شکن‌ها و یا محل‌های تخلیه اعمال گردد.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

۲-۲. کنترل کیفیت (عیار) تولیدی

کیفیت ماده معدنی ورودی به کارخانه فرآوری از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. کارخانه در بازه عیار خاصی طراحی شده است و در این شرایط با حداکثر کارائی فعالیت کرده و محصولی با مشخصات مورد نظر تولید خواهد کرد.

معمولاً کانه سنگ‌های استخراجی از نقاط مختلف معدن، از نظر عیاری با هم متفاوت می‌باشند. به این ترتیب به منظور ایجاد عیار مناسب ورودی کارخانه با اختلاط عیارهای مختلف با نسبت‌های قابل محاسبه، عیار هدف تحقق می‌یابد. با علم به این موضوع، لزوم برنامه‌ریزی تولید جهت استخراج به میزان لازم از سینه کارهای مختلف معدن که عیارهای گوناگون دارند، در ترابری معدن وجود دارد.

۲-۳. نسبت باطله برداری

نسبت حجم باطله برداشت شده به حجم کانه سنگ استخراجی نسبت باطله‌برداری خوانده می‌شود [۲]. هدف از استخراج باطله در معدنکاری روباز ایجاد دسترسی به کانه سنگ می‌باشد. استخراج بی‌رویه باطله باعث افزایش هزینه‌های تولید و استخراج اندک آن موجب ایجاد مشکل در روند تولید و دسترسی به کانه سنگ خواهد شد. به این ترتیب در فاز طراحی برای اجتناب از مشکلات مذکور، نسبت مناسب باطله‌برداری محاسبه می‌شود.

۲-۴. محدودیت‌های تخصیص کامیون

در معادن روباز استفاده از ماشین‌آلات غیریکنواخت مرسوم است. کامیون‌ها و ماشین‌های بارگیری با ظرفیت‌های مختلف و یا با مشخصات فنی متفاوت در کنار هم در حال فعالیت هستند. به علاوه با توجه به مشخصات ماشین‌آلات، برخی محدودیت‌های اضافی نیز ممکن است اعمال گردد. محدودیت هایی چون تخصیص کامیون به ماشین بارکننده خاص، تخصیص کامیون به محدوده‌ای خاص و تخصیص مجموعه‌ای از کامیون‌ها به محدوده‌ای خاص.

۲-۵. تعمیرات و نگهداری و سوخت گیری

لازم است تا تا پاره‌ای محدودیت‌ها برای ماشین‌آلات از نظر تعمیرات و نگهداری در سیستم ترابری لحاظ گردد. به‌طور مثال حداکثر زمان فعالیت لاستیک‌ها با توجه به کاتالوگ کارخانه سازنده مشخص می‌شود. فعالیت بیش از حد کامیون می‌تواند باعث ترکیدگی لاستیک و توقف کار کامیون شود که در کنار قطع تولید آن کامیون باعث بسته شدن جاده ترابری (رمپ) می‌شود. این نوع محدودیت‌ها در کنار برنامه‌ریزی‌های پیش‌گیرانه باعث واقعی‌تر شدن مدل خواهند شد. سوخت گیری ماشین‌آلات نیز یکی از مسائل حائز اهمیت در روند تولید می‌باشد. به منظور حفظ پیوستگی تولید معدن، برنامه‌ریزی نوبتی سوخت‌گیری ماشین‌آلات صورت می‌پذیرد.

سیستم ترابری مسئولیت کنترل این روند و پیش‌بینی عکس‌العمل‌های مناسب جهت حفظ روند تولید را برعهده دارد.

۳. طبقه بندی مدل های ریاضی توزیع

در این مقاله مدل های ریاضی توزیع از نظر زمان حل مدل (اجرا) به دو دسته تقسیم می شوند:

۱) T=0: در این نوع، مدل ریاضی قبل از آغاز شیفت اجرا می شود. اطلاعات ورودی این مدل ها در کنار پارامترهای تولید، اطلاعات مربوط به شیفت های قبل می باشد. بازه زمانی مورد نظر در این نوع مدل معمولاً کل شیفت است. به این ترتیب دیدی کلی از سیاست های استخراجی و محدودیت های موجود در اختیار می باشد. با توجه به اینکه وقایع پیش بینی نشده و تغییرات در پارامترها که همواره در طی شیفت اتفاق می افتند، در این مدل ها دیده نشده است، امکان کاهش بهره وری این نوع مدل در حین اجرا وجود دارد. امروزه برای رفع این مشکل در سیستم های نیمه خودکار و خودکار توزیع، در طول شیفت رایانه مدل را با اطلاعات جدید اجرا کرده و جواب ها را به روز رسانی می کند. یکی دیگر از مشکلات این مدل ها این است که هنگامی که مدل در طول شیفت اجرا می شود تنها کامیون های تخلیه کرده مبنا قرار می گیرند و کامیون هائی که در حال حرکت برای تخلیه هستند در نظر گرفته نمی شوند. این مهم بهره وری این مدل ها را کاهش می دهد. مدل Chung نمونه ای از این نوع مدل است.

۲) T>0: در این نوع، مدل ریاضی با هدف اجرا در طول شیفت طراحی شده است. این مدل ها اطلاعات لحظه ای را دریافت و شاول مناسب جهت تخصیص کامیون را مشخص می کنند. نظر به این که کامیون پس از تخلیه، درخواست مسیر می کند و در آن لحظه کامیون های دیگر هریک در وضعیت متفاوت هستند، مدل نیازمند اطلاعات لحظه ای بوده و برنامه ریزی برای بازه زمانی کوتاه انجام می گیرد. این بدان معنی است که مدل اهداف طول شیفت را در واحد زمان تقسیم می کند و با توجه به آن و شرایط موجود، توزیع کامیون انجام می شود. اجرای دستی چنین مدلی با توجه به وابستگی به اطلاعات لحظه ای بسیار دشوار است. مدل Temeng [۱۰] نمونه ای از این نوع مدل می باشد.

۴. مدل ریاضی برنامه ریزی حمل و نقل

تعداد کامیون ها و مسیرها در سیستم های ترابری معادن روباز محدود است و نقاط بارگیری و تخلیه به مدت طولانی ثابت می مانند. در ضمن فاصله رفت و آمد در مقایسه با مدت زمان شیفت کم بوده و میزان تقاضا در هر نقطه بالا می باشد. مدل ارائه شده در این تحقیق از ایجاد تغییرات در مدل Chung [۱۰] و تلفیق آن با مدلTemeng [۹] با اعمال پاره ای تغییرات و اضافات ایجاد شده است. سعی شده است تا در این مدل ایرادات مدل های ذکر شده

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

پوشش داده شود. نوآوری های مدل ارائه شده در این تحقیق به شرح زیر می باشد:

- مدل Chung حداقل سازی هزینه تولید و مدل Temeng حداقل سازی زمان انتظار ماشین آلات را هدف قرار می دهد. در این مدل بیشینه سازی تولید و کاهش زمان های تلف شده به طور هم زمان هدف گذاری شده است.
- مدل در زمان های T=0 و T>0 عمل می کند. با توجه به زمان وقوع، محدودیت ها تغییر می کنند.
- کنترل عیار محصول تولیدی در این مدل درنظر گرفته شده است.
- کنترل تولید ماده معدنی و باطله براساس سیاست های استخراجی صورت می‌پذیرد.
- امکان حضور محل های تخلیه متعدد با نیاز عیاری مختلف وجود دارد.
- تدابیری در خصوص تعمیرات-نگهداری ماشین آلات در مدل لحاظ شده است.
- مدل، بهینه سازی راندمان ماشین آلات و تولید را در کنار هم در نظر می گیرد.
- امکان حضور ماشین آلات با ظرفیت های گوناگون در مدل دیده شده است.
- توزیع در لحظه تخلیه کامیون مدنظر قرار می گیرد.

۴-۱. تابع هدف

تابع هدف مدل به صورت زیر تعریف می شود:

$$Maximize\ Z = \sum_{s}^{n}\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q}\left(\frac{x_{sdt}}{TDT_{sdt} + SDT_{s}}\right) \qquad (۱)$$

که در آن:

x_{sdt} – تناژ تولیدی شاول s توسط کامیون t اعزامی از دامپ d (تولید در مسیر دامپ d تا شاول s)

TDT_{sdt} – زمان مورد نیاز برای اعزام کامیون t به شاول s از دامپ d

SDT_{s} – تأخیر قابل پیش بینی پای شاول s

n – تعداد شاول ها

m – تعداد دامپ ها

q – تعداد کامیون ها

s – اندیس شاول ها

d – اندیس دامپ ها

- **زمان T=0**

در این زمان مقدار SDT_{s} با توجه به این که هنوز توزیعی انجام نشده است، برابر صفر می باشد. در این شرایط متغیر t معرف کلیه کامیون ها می باشد.

پاسخ مدل در این حالت حداکثر میزان تولید کامیون t ازشاول s اعزامی از دامپ d می باشد که در آن کامیون t شامل کلیه کامیون‌های در دسترس است. با تقسیم این عدد بر ظرفیت کامیون، تعداد دفعات بارگیری آن از شاول مربوطه محاسبه خواهد شد (پاسخ مدل Temeng [۹]). همچنین با تقسیم این عدد بر کل هزینه های تولید، هزینه هر تن ماده استخراج شده محاسبه خواهد شد (پاسخ مدل Chung [۱۰]).

بازه زمانی مورد نظر در این حالت کل زمان کاری خواهد بود. بدین ترتیب حل مدل در زمان T=0 چهارچوبی از میزان تولید هر شاول، تعداد دفعات بارگیری کامیون ها، کنترل عیار کلی و مواردی از این قبیل را ایجاد می کند تا تولید حداکثر و زمان تلف شده ماشین ها حداقل گردد. این اعداد جواب بهینه مدل را تشکیل می دهند اما برای پوشش این ایراد که وقایع پیش بینی نشده در طول شیفت کاری در مدل لحاظ و تعامل ماشین آلات نسبت به هم در نظر گرفته نشده است، مدل در هر بار تخلیه کامیون (T>0) دوباره اجرا شده و شاول مقصد برای کامیون با شرایط لحظه ای انتخاب خواهد شد.

- **زمان T>0**

مقدار SDT_{s} با توجه به وضعیت کامیون های ارسال شده قبلی متغیر خواهد بود. در این شرایط متغیر t معرف کامیون هائی است که تخلیه کرده اند به علاوه کامیون هائی که درحال حرکت به سوی دامپ ها برای تخلیه هستند.

پاسخ مدل در این حالت حداکثر میزان تولید کامیون t ازشاول s اعزامی از دامپ d می باشد که در آن t شامل کامیونی که تخلیه کرده و کلیه کامیون های در حال حرکت به سوی دامپ ها برای تخلیه می باشد. کامیون به شاولی ارسال خواهد شد که بیشترین تولید را با توجه به محدودیت ها شامل شود و دیگر نیازی به محاسبه تعداد دفعات بارگیری نخواهد بود. چرا که با هربار تخلیه هر کامیون این محاسبات انجام خواهد شد و توزیع بهینه در شرایط فعلی انتخاب خواهد شد (تنها یک توزیع در لحظه برای کامیون تصور می شود).

۴-۲. مفروضات مدل

امکان استفاده از تابع چند هدفه در مدل فوق وجود دارد. ولی با توجه به پیچیدگی حل توابع چند هدفه، این مدل به صورت تک هدفه تعریف شده است.

قابل ذکر است که متغیرهای کیفی متعددی در روند ترابری معادن نقش دارند. متغیرهایی چون تبهر راننده، شرایط مسیر، فرسودگی ماشین آلات و مانند آن که با هدف پرهیز از پیچیدگی بیشتر در این مدل صرف نظر شده اند. با انگیزه ای مشابه، نوع سنگ شکن ها نیز یکسان فرض شده است.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

۴-۳. محدودیت های مدل

همانطور که اشاره شد محدودیت ها در زمان T=0 و T>0 متفاوت می باشند. مهم ترین دلیل این اختلاف بازه زمان محدود در T>0 می باشد. در T=0 دیدی کلی از شرایط و پارامترهای تولید وجود دارد و زمان مد نظر کل زمان کاری است ولی در T>0 دید محدود بوده و بازه زمان شامل لحظه فعلی از تولید تا زمان رسیدن و بارگیری کامیون ارسال شده، می باشد.

۴-۳-۱. محدودیت حداقل میزان تولید کانه

با توجه به شرایط معدن و کارخانه فرآوری، معمولاً حداقلی برای تولید کانه در نظر گرفته می شود. اختلاف در تعداد شیفت های کاری معدن و کارخانه فرآوری یکی از این دلایل است.

- **زمان T=0**

$$\sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \geq V_{min} - V_0 + (H * V_{ext}) \qquad d = 1,2,\dots,N_{crusher} \qquad (۲)$$

که در آن:

V_{min} – کمترین میزان مطلوب از انباشت مواد در انتهای شیفت

V_0 – میزان انباشت مواد معدنی در انبار درشت در ابتدای شیفت

V_{ext} – مقدار مصرف مواد معدنی کارخانه در واحد زمان

H – تعداد ساعات کاری معدن در شبانه روز

$N_{crusher}$ – اندیس سنگ شکن های موجود

- **زمان T>0**

$$\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \geq \left(\frac{V_{min} - V_0}{H} + V_{ext}\right) * \sum_{d}^{n}\sum_{t}^{q} (TDT_{sdt} + SDT_s) \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۳)$$

$$\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \geq R_s \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۴)$$

که در آن:

N_{shovel} – اندیس شاول های موجود

R_s – تقاضا برای شاول s

R_s به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R_s = \sum_{d}^{m} N_{sd} \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۵)$$

N_{sd} – تناژ مورد نیاز از مسیر دامپ d تا شاول s

در سمت راست محدودیت ۳ با ضرب حداقل تولید در واحد زمان در زمان توزیع کامیون های آماده توزیع (تخلیه کرده و یا در حال حرکت به سوی دامپ)، حداقل تولید مورد نیاز در آن لحظه (برای مجموع کامیون های دارای شرایط توزیع) محاسبه می شود .

محدودیت ۴ با هدف حصول اطمینان از تحقق اهداف تولیدی (نه فقط حداقل کانه مورد نیاز کارخانه) ارائه شده است. با توجه به این که در محدودیت ۳ محاسبه برخی هم زمانی های کامیون دشوار است، برای رفع خطای احتمالی آن، محدودیت ۴ اضافه شده است.

۴-۳-۲. محدودیت حداقل میزان تولید کانه

با توجه به طراحی معدن لازم است نسبت باطله برداری به استخراج کانه طبق محاسبات حفظ شود. بدین ترتیب حداقل میزان باطله برداری باید لحاظ گردد.

- **زمان T=0**

$$\sum_{s}^{n}\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \geq W \qquad d = 1,2,\dots,N_{dump} \qquad (۶)$$

W – میزان باطله ای که باید در طی عملیات روزانه برداشت شود

N_{dump} – اندیس دامپ های باطله موجود

- زمان T>0

$$\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \geq \frac{W}{H}\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} (TDT_{sdt} + SDT_s) \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۷)$$

در سمت راست این محدودیت از ضرب باطله استخراجی در واحد زمان در زمان توزیع کامیون های آماده توزیع (تخلیه کرده و یا در حال حرکت به سوی دامپ)، حداقل تولید باطله هدف در آن لحظه محاسبه می شود.

۴-۳-۳. کنترل کیفیت (عیار) کانه تولیدی

خوراک ورودی کارخانه فرآوری در بازه عیار مشخصی قرار دارد. معمولاً در یک معدن، کانه با عیارهای گوناگون استخراج می شود. با مخلوط کردن کانه های دارای عیار گوناگون با نسبت های قابل محاسبه، عیار ورودی کارخانه محقق می شود. بدین ترتیب لازم است برنامه تولیدی طوری باشد تا از عیارهای لازم به نسبت مشخص استخراج گردد تا در نهایت خوراک کارخانه و تولید بهینه محقق گردد.

- **زمان T=0**

$$\sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} x_{sdt}\alpha_s = \alpha_d \sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \qquad d = 1,2,\dots,N_{crusher} \qquad (۸)$$

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

که در آن:

α_s – اندیس کیفیت مواد در محل شاول s

α_d – حداقل اندیس کیفی مورد نیاز در محل تخلیه d

- **زمان T>0**

$$G_{sd} - G \geq 0 \quad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \quad d = 1,2,\dots,N_{dump} \qquad (۹)$$

که در آن:

G_{sd} – نسبت محصول محتوا بر کل محصول محتوای برنامه ریزی شده

G – نسبت هدف عیاری برای هر مسیر

G_{sd} و G به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$G_{sd} = \left[\frac{X_{sd} * \alpha_s}{T_s * \alpha_d}\right] \qquad d = 1,2,\dots,N_{dump} \qquad (۱۰)$$

$$G = \frac{1}{sd}\sum_{s}^{n}\sum_{d}^{m} G_{sd} \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۱۱)$$

α_s – اندیس کیفیت مواد در محل شاول s

α_d – حداقل اندیس کیفی مورد نیاز در محل تخلیه d

X_{sd} – تناژ تجمعی تولیدی از شاول s به دامپ d

T_s – حجم کل تولید شاول s طبق برنامه تولید

۴-۳-۴. محدودیت پذیرش سنگ شکن

سنگ شکن به عنوان نقطه ورودی به کارخانه، خود ظرفیت مشخصی در زمان برای پذیرش کامیون و تخلیه بار دارد. با پر شدن سنگ شکن لازم است تا کامیون ها منتظر بمانند که این خود زمان تلف شده نامطلوبی است.

- **زمان T=0**

$$\sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \leq H * D_d \qquad d = 1,2,\dots,N_{dump} \qquad (۱۲)$$

که در آن:

D_d – محدودیت پذیرش سنگ شکن بر حسب تن در واحد زمان

- **زمان T>0**

$$\sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \leq D_d \sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} (TDT_{sdt} + SDT_s)$$
$$d = 1,2,\dots,N_{dump} \qquad (۱۳)$$

۴-۳-۵. محدودیت پذیرش شاول

زمان T=0

$$\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} \frac{x_{sdt}}{H} \leq C_{shovel} \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۱۴)$$

زمان T>0

$$\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} \frac{x_{sdt}}{(TDT_{sdt} + SDT_s)} \leq C_s \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۱۵)$$

که در آن:

C_s – محدودیت پذیرش شاول بر حسب تن در واحد زمان

۴-۳-۶. محدودیت ظرفیت باربری کامیون

ظرفیت قابل حمل توسط هر کامیون با توجه به ابعاد آن متفاوت می باشد. برنامه تولیدی محاسبه شده برای کامیون ها نباید از این ظرفیت فراتر رود.

زمان T=0

$$\sum_{s}^{n}\sum_{d}^{m} \frac{x_{sdt}(TDT_{sdt} + SDT_{sdt})}{V_t} \leq H$$
$$t = 1,2,\dots,N_{truck} \qquad (۱۶)$$

که در آن:

V_t – ظرفیت باربری کامیون t

N_{truck} – اندیس کامیون های موجود

توضیح این که در سمت چپ محدودیت ۱۶ از تقسیم تولید کل کامیون t بر ظرفیت آن، تعداد دفعات بارگیری آن در طول زمان کاری (H) محاسبه می شود. با ضرب این عدد در زمانی که این ارسال ها به طول خواهد انجامید، کل زمان فعالیت کامیون محاسبه می شود. این زمان باید از زمان کل شیفت کمتر باشد.

زمان T>0

$$\sum_{s}^{n}\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} x_{sdt} \leq \sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} V_t \qquad (۱۷)$$

که در آن:

V_t – ظرفیت باربری کامیون t

۴-۳-۷- محدودیت های تعادلی

این محدودیت ها برای حصول اطمینان از تساوی تعداد بارگیری از شاول ها با تعداد دفعات تخلیه پیش بینی شده اند.

زمان T=0 و T>0

$$\sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} x_{sdt} = \sum_{d}^{m}\sum_{t}^{q} y_{sdt} \qquad s = 1,2,\dots,N_{shovel} \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} x_{sdt} = \sum_{s}^{n}\sum_{t}^{q} y_{sdt} \qquad d = 1,2,\dots,N_{dump} \qquad (۱۹)$$

که در آن:

y_{sdt}– تناژ تخلیه شده در دامپ d توسط کامیون t اعزامی از شاول s

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

۸-۳-۴. محدودیت کنترل حداکثر زمان فعالیت لاستیک ها

با توجه به فشاری که به لاستیک های کامیون ها در طول شیفت وارد می شود، کارخانه های تولید کننده لاستیک حداکثر زمان فعالیتی را برای لاستیک تعریف می کنند که فعالیت در این بازه از زمان از کمترین ریسک حادثه برخوردار است. این محدودیت به عنوان نمونه ای برای گسترش مدل در بعد تعمیرات-نگهداری گنجانده شده است.

زمان $T=0$ و $T>0$

$$\sum_{s}^{n}\sum_{d}^{m}(TDT_{sdt}-TD_{sdt}-TL_{sdt})\leq WT_t$$

$$t=1,2,\dots,N_{truck} \qquad (۲۰)$$

که در آن:

TD_{sdt} – زمان تخلیه کامیون t اعزامی از شاول s پای دامپ d

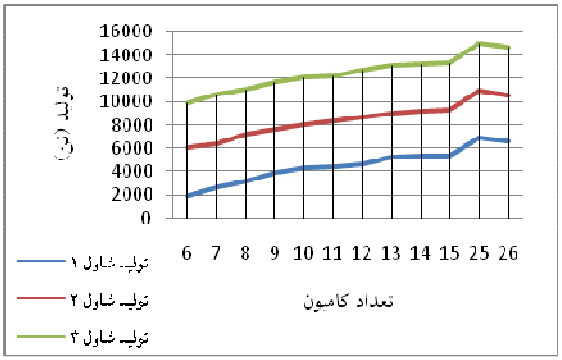
TL_{sdt} – زمان بارگیری کامیون t پای شاول s اعزامی از دامپ d

WT_t – حداکثر زمان فعالیت برای لاستیک کامیون جهت پرهیز از خرابی ها

۴-۴. نتایج اجرای مدل

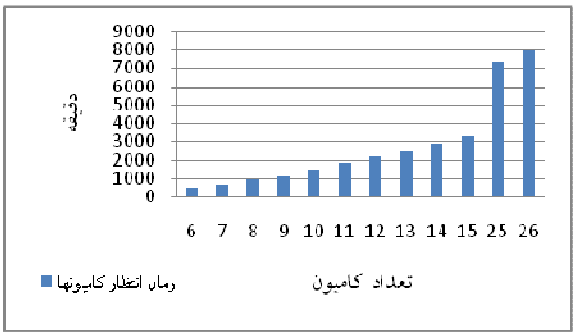
هدف از ارائه مدل پیشنهادی ایجاد یک حل برای تعیین مقادیر متغیرهای تصمیم گیری جهت شرایط ایستای آغازین می باشد. به کارگیری مدل ریاضی برای تصمیم گیری های بهینه در شرایط پویا و متغیر پارامترها بسیار پیچیده و دشوار خواهد بود. برای مرحله پویای مساله، از یک مدل شبیه سازی استفاده شده و نتایج به دست آمده از مدل ریاضی به نرم افزار شبیه سازی توسعه داده شده در این مقاله داده شده است و با استفاده از اطلاعات یک معدن فرضی محاسبات انجام گردیده است.

در شکل ۱ تأثیر افزایش تعداد کامیون در میزان تولید هر شاول نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش تعداد کامیون‌ها، میزان تولید شاول‌ها نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که قانون بازده نزولی را می‌توان به‌وضوح در شکل ملاحظه کرد. با افزایش تعداد کامیون به بیش از ۲۵ دستگاه، تولید شاول‌ها کاهش یافته است.



شکل ۱. تأثیر افزایش تعداد کامیون ها در تولید

شکل ۲ افزایش کل زمان انتظار کامیون‌ها را با افزایش تعداد کامیون و ثابت ماندن سایر متغیرها نشان می‌دهد.



شکل ۲. تأثیر افزایش تعداد کامیون‌ها در کل زمان تلف شده کامیون‌ها

هدف از اطلاعات ارائه شده ایجاد دیدی از تأثیر افزایش تعداد کامیون است. مدل‌های توزیع در معادن روباز نه تنها بیشترین تأثیر را از تعداد ماشین‌آلات می‌پذیرند بلکه بر آن تأثیرگذار نیز هست. کاهش تعداد ماشین‌آلات مورد نیاز جهت دستیابی به اهداف تولیدی مشخص یکی از اهداف مدل‌های توزیع است. در این‌جا با توجه به سطح تولید مورد نظر می‌توان تعداد کامیون‌ها را طوری انتخاب کرد که زمان انتظار آن‌ها در سطح قابل قبول باشد.

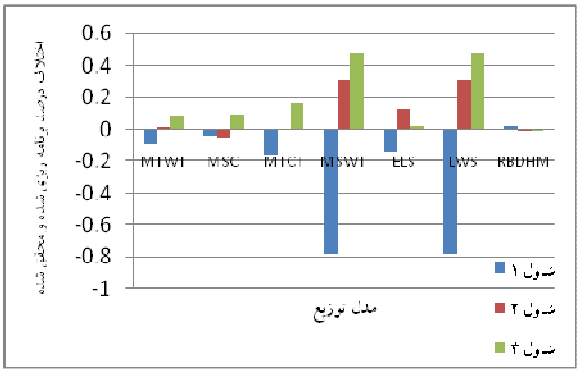
به منظور آزمون قابلیت‌های مدل در شرایط مختلف، این مدل با ۶ مدل توزیع پایه مقایسه شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌ها انتخابی برای مقایسه به قرار زیر می‌باشند:

- حداقل‌سازی زمان انتظار کامیون (MTWT)
- حداقل‌سازی زمان انتظار شاول (MSWT)
- حداقل‌سازی سیکل کار کامیون (MTCT)
- حداقل‌سازی اشباع شاول (MSC)
- استراتژی زودترین شاول برای بارگیری (ELS)
- استراتژی شاول با بیشترین زمان انتظار (LWS)

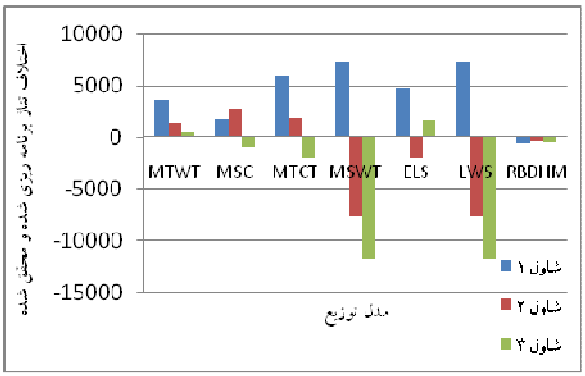
در این‌جا دو عامل برای مقایسه بین مدل‌ها مدنظر قرار گرفته است. عامل اول اختلاف بین درصد تولید هر شاول طبق محاسبات در سیاست استخراجی با درصد تولید محاسبه شده از اجرای مدل می‌باشد. عامل دوم نیز اختلاف تناژ تولیدی شاول‌ها طبق برنامه تولید با تناژ تولید محاسبه شده از مدل است. با توجه به اهمیت کنترل حجم تولیدی از هر شاول و کنترل عیار ورودی به کارخانه این عامل‌ها انتخاب شده‌اند، چرا که آن‌ها بیان کننده اختلاف مدل با برنامه تولیدی هستند.

نرم‌افزار تک تک ۷ مدل را مطابق با شرایط مدنظر که در ادامه بحث خواهد شد، برای یک شیفت کاری شبیه‌سازی کرده است. اجرای مدل نتایج شکل‌های ۳ و ۴ را به دنبال داشته است. در این شکل ها مدل پیشنهادی به اختصار RBDHM نشان داده شده است.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]



شکل ۳. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۰۰ تنی



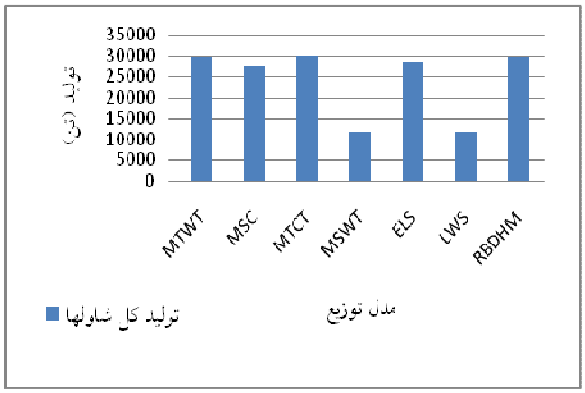
شکل ۴. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۰۰ تنی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل پیشنهادی کمترین اختلاف را از برنامه تولیدی دارد. این اختلاف منفی است چرا که اهداف تولیدی به‌طور صددرصد محقق نشده‌اند و هر شاول به میزان کمی کسری تولید دارد. این کسری تولید برای شاول ۱ تا ۳ به ترتیب ۶۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ تن می‌باشد.

این ارقام به مدیر معدن این امکان را می‌دهد که حجم تولید بهینه را برای شرایط فعلی انتخاب کند.

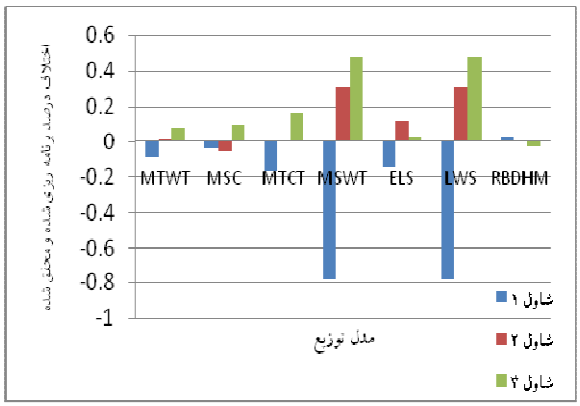
همان‌طور که در خصوص مدل‌های دیگر ملاحظه می‌شود، اختلاف تولید بسیار شدید بوده و کسری و یا مازاد تولید زیادی دیده می‌شود. این مهم کنترل عیار محصول نهائی را به‌هم خواهد زد. از سوی دیگر برنامه‌ریزی تولید بهینه با این شرایط دشوار است.

با توجه به تأثیر عوامل کنترل میزان تولید و عیار در مدل پیشنهادی، سطح تولید مدل در مقایسه با مدل‌های دیگر پائین‌تر است. در واقع کنترل عوامل مذکور باعث کاهش سطح تولید مدل می‌شود. آزمون قابلیت‌های تولیدی مدل بدون در نظر گرفت عوامل کنترل عیار و میزان تولید در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل قابلیت ایجاد سطح تولیدی با تولید حداکثر را دارد.

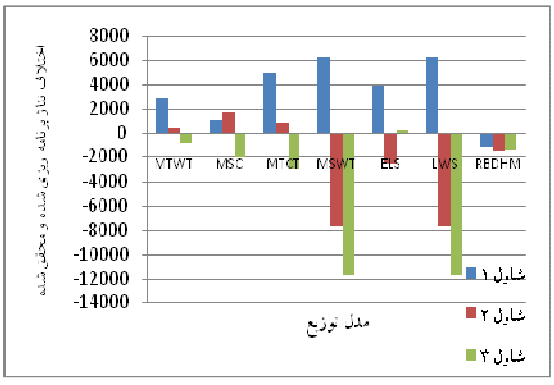


شکل ۵. سطح تولید مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها بدون کنترل عیار و تولید

در ادامه تأثیر افزایش حجم کامیون‌ها بر نتایج مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه مدل‌ها با کامیون‌های ۹۰ تنی، شکل‌های ۸ و ۹ کامیون‌های ۱۲۰ تنی، شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کامیون‌های ۱۵۰ تنی و در نهایت شکل‌های ۱۲ و ۱۳ کامیون‌های ۲۰۰ تنی را مورد بررسی قرار می‌دهند.



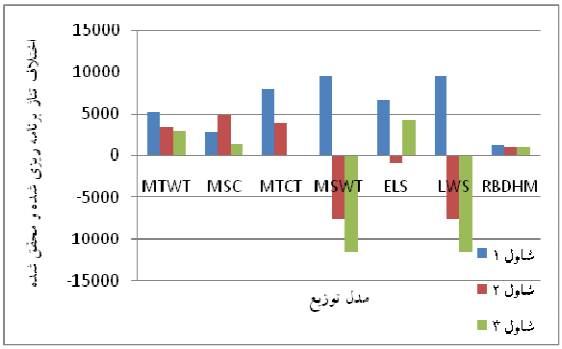
شکل ۶. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۹۰ تنی



شکل ۷. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۹۰ تنی

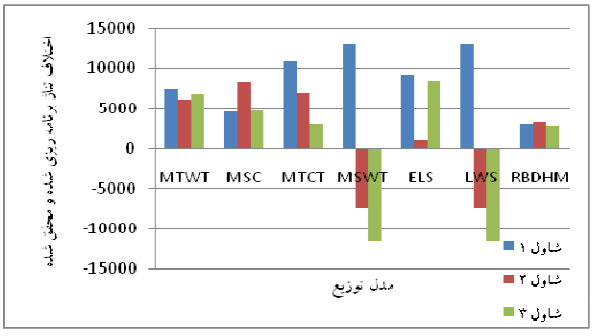
[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

شکل ۸. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۲۰ تنی

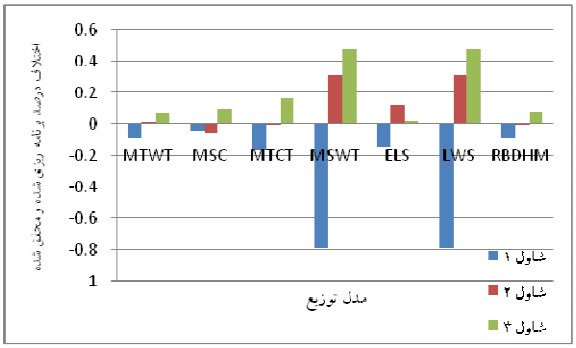


شکل ۹. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۲۰ تنی

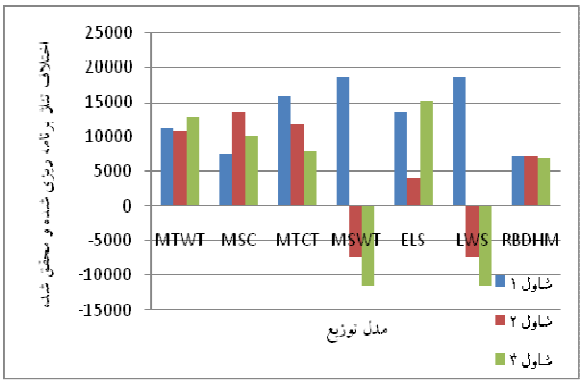
شکل ۱۰. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۵۰ تنی



شکل ۱۱. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۵۰ تنی

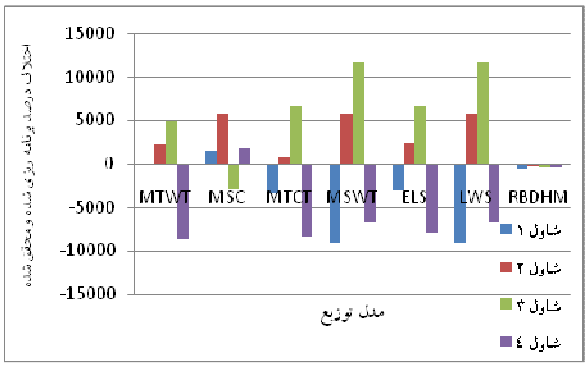


شکل ۱۲. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۲۰۰ تنی



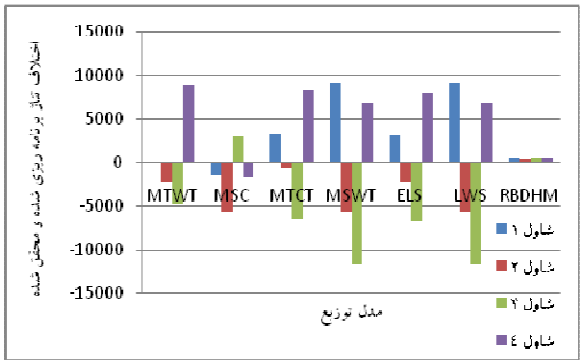
شکل ۱۳. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۲۰۰ تنی

مقایسه نتایج حاکی از آن است که مدل معرفی شده با افزایش ظرفیت کامیون‌ها یکنواختی تولید خود را با توجه به کنترل عیار محصول تولیدی حفظ می‌کند. سایر مدل‌ها همان روند اختلاف شدید در تولید شاول‌ها را دارند. حال تأثیر تعداد شاول‌ها بر نتایج اجرای مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج حل مدل‌ها با ۴، ۵ و ۶ شاول ارائه شده است.

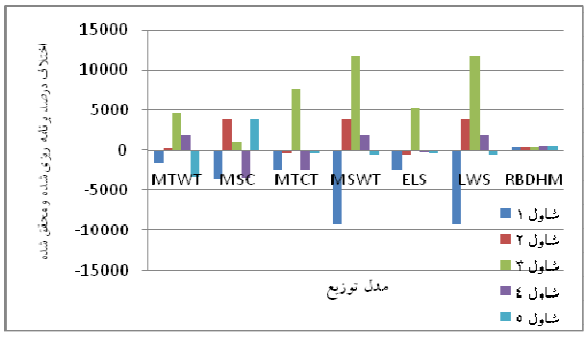


شکل ۱۴. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۴ شاول

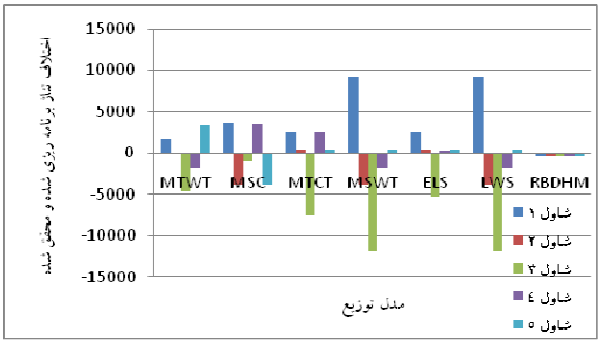
[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]



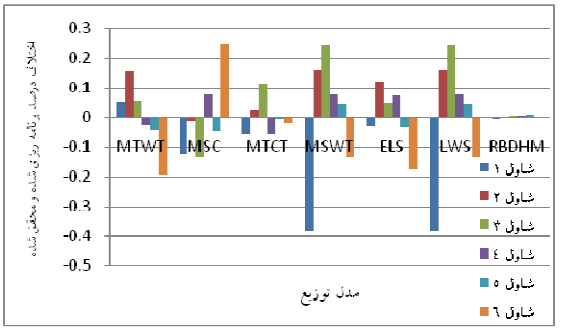
شکل ۱۵. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۴ شاول



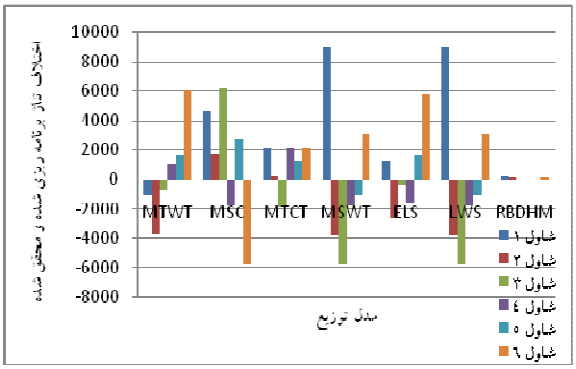
شکل ۱۶. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۵ شاول



شکل ۱۷. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۵ شاول

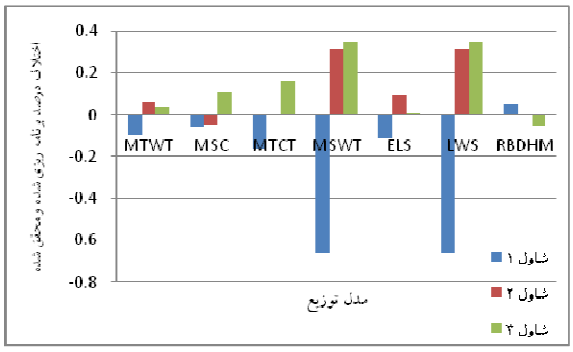


شکل ۱۸. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۶ شاول

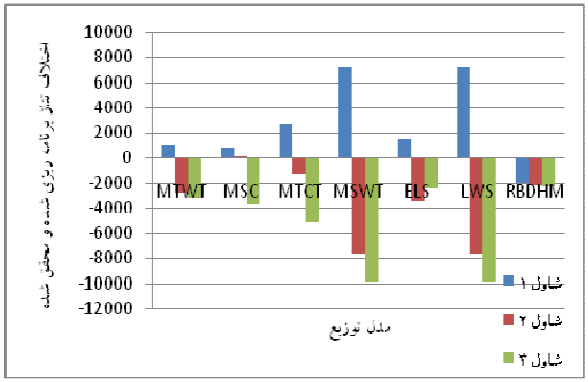


شکل ۱۹. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۶ شاول

بدین ترتیب عکس‌العمل مدل در برابر تغییر تعداد شاول نیز مشابه تغییر در ظرفیت کامیون، حفظ یکنواختی تولید با توجه به سیاست‌های کنترل عیار است. حتی دو برابر کردن و سه برابر کردن مسافت‌ها نیز تأثیر مشابهی به همراه دارد. این موضوع در شکل‌های زیر قابل ملاحظه است.

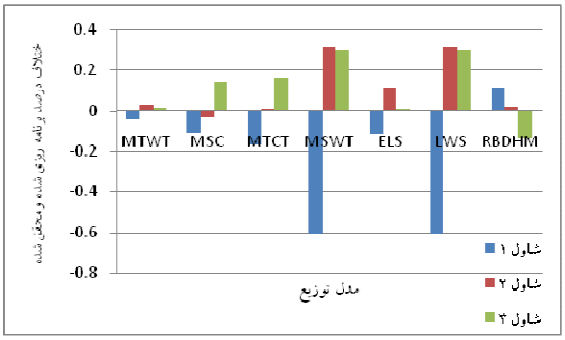


شکل ۲۰. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید با مسافت‌های دو برابر

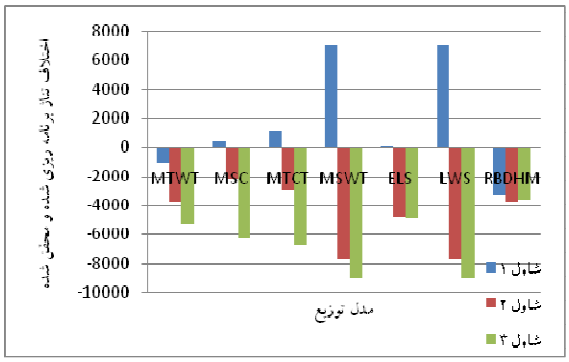


شکل ۲۱. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده با مسافت‌های دو برابر

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]



شکل ۲۲. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید با مسافت‌های سه برابر



شکل ۲۳. اختلاف تناژ برنامه‌ریزی شده و محقق شده با مسافت‌های سه برابر

مطابق شکل با افزایش مسافت‌ها یکنواختی اختلاف تناژ تولیدی برنامه‌ریزی شده و محقق شده برای مدل حفظ می‌شود ولی اختلاف درصد تولید برنامه‌ریزی شده و محقق شده دچار تغییرات شده و کنترل عیار را بر هم می‌زند. این مهم با اضافه شدن فواصل شدیدتر می‌شود. وضعیت مدل‌های دیگر نیز مشابه بوده و در برخی تغییرات شدیدتر است. تنها مدل MTWT در مسافت سه برابر بهتر از مدل پیشنهادی عمل کرده است.

۵. نتیجه گیری

به منظور رفع مشکل ایده آل نگری مدل های ریاضی توزیع، نیاز به اجرای مدل در واحد زمان با اطلاعات لحظه ای وجود دارد. استفاده تنها از مدل های زمان واقعی نیز با توجه به محدودیت های داده ها، کنترل عیار و تولید معدن را با مشکل روبرو می کند. در این مقاله مدلی ریاضی معرفی شد که در دو مرحله اجرا می شود. نخست قبل از آغاز شیفت با استفاده از اطلاعات کلی و سپس در حین شیفت با استفاده از اطلاعات لحظه ای. این مدل به عنوان ورودی نرم افزار شبیه سازی توزیع نشان داد که استفاده از آن باعث حفظ روند کنترل عیار و تولید معدن مطابق با سیاست های استخراجی می شود. پارامترهای مورد استفاده، تغییر متغیرهای تعداد و ظرفیت کامیون ها، تعداد شاول ها و مسافت ها بوده اند.

مدل ارائه شده در این مقاله کنترل عیار و میزان تولید را با توجه به سیاست های استخراجی به عنوان بهره وری تولید معدن در نظر می گیرد. این مدل در مقابل تغییر در تعداد و ظرفیت کامیون ها، تعداد شاول ها و مسافت ها، روند کنترل عیار و تولید خود را حفظ می کند. این مهم با مقایسه اختلاف درصد و تناژ برنامه ریزی شده و محقق شده این مدل به دست آمده است. بدین ترتیب مدل معرفی شده روند مطمئنی برای حصول سیاست های استخراجی معادن روباز در پیش می گیرد. بروز تغییرات ناگهانی چون خرابی ماشین آلات، پر شدن سنگ شکن و مشابه آن، روند کنترل عیار و تولید مدل را به هم نمی ریزد.

مراجع

[1] Çetin, N., "*Open-pit Truck/Shovel Haulage System Simulation*", Doctoral Dissertation, Natural and Applied Science, Middle East Technical University, 2004.

[2] "*Testimonials for Automatic Truck Dispatching (ATD)*", Wenco Corporation, 2005.

[3] Chung, H., Ta., Kresta, J.V., Forbes, J.F., Marquez, H.J., "*A Stochastic Optimization Approach to Mine Truck Allocation*", International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, September 2005, pp. 162 – 175

[4] Gerrit, V.R., Goodman, Subhash C., Sarin., "*A Mathematical Programming Approach for Scheduling Equipment in a Surface Coal Mining Operation*", Engineering, Volume 6, Number 4, December 1988, pp. 327-341

[5] Caro, R., Epstein, R., Santibañez، P., Weintraub, A., *An Integrated Approach to the Long-Term Planning Process in the Copper Mining Industry, International Series in Operations Research & Management Science*, Handbook Of Operations Research In Natural Resources, Springer USVolume 99, pp. 595-609, ,2007.

[6] Chung Huu, Ta., "*Optimal Haul Truck Allocation in the Syncrude Mine",* Master of Science Thesis, Department of Electrical & Computer Engineering, University of Alberta, 2002.

[7] Jaoua, A., Riopel, D., Gamache, M., *"Efficient Simulation Model for Real-Time Fleet Management Problems in Internal Transport Systems"*, GERAD and Department of Mathematical and Industrial Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, Les Cahiers du GERAD, G-2009-33, 2009.

[8] Barbaro, R.W., Ramani, R.V., *"Generalized Multi Period MIP Model for Production Scheduling and Processing Facilities Selection and Location*", Mining Engineering, February 1986, pp. 107-114

[9] Alarie, S., Gamache, M., "*Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines*", International Journal of Mining Reclamation and Environment, Volume 16, Issue 1, March 2002, pp. 59 – 76

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]

[10] Victor, A., Temeng, Francis, O., Otuonye, James, O., Frendewey, Jr., *"Real-Time Truck Dispatching Using a Transportation Algorithm*", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Volume 11, Issue 4 , 1997, pp. 203 - 207

[11] Ranjbar Bafghi, A., "*Choghart Iron Mine Truck Haulage System Optimization*", Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering, Azad University Oloom Tahghighat branch, 2001.

[12] Oraee K., Ahmadi M., Asi B., "*Mathematical Model of Multi-Size Truck Dispatching in Open-Pit Mines*", 2nd Iran Open-pit Mines Conference, Kerman, Iran, 2005.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2024-11-28]