



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

احمد ماقوئی، ابراهیم تیموری و آربی سرکیسیان

### چکیده:

ترابری در معادن روباز نیمی از هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد. بهبود در این سیستم تأثیر به سزاپی در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره روی تولید معدن دارد. بهره‌وری تولید در معدن، آمیزه‌ای از افزایش راندمان ماشین‌آلات و تحقق سیاست‌های استخراجی است. در این مقاله پس از طبقه‌بندی مدل‌های 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 سیاست‌های استخراجی ایجاد می‌کند. همچنین اجرای مدل در حین شیفت با استفاده از اطلاعات لحظه‌ای، سعی می‌کند تا نتایج را در نزدیکی انحراف از میانگین نتایج اولیه نگاه دارد. از این مدل می‌توان جهت ایجاد مدل‌های ابتکاری که خوارک نرم افزارهای شبیه سازی توزیع را تأمین می‌کنند، استفاده کرد.

### کلمات کلیدی

معدن روباز،  
توزیع کامیون،  
مدل‌های ریاضی،  
بهره‌وری تولید

### ۱. مقدمه

یکی از مراحل هزینه بر در استخراج معادن روباز، ترابری است. این بخش ۵۰٪ از هزینه‌های استخراجی را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. قیمت بالای ماشین‌آلات معدنی، هزینه‌های بالای سروپس-نگهداری و همچنین هزینه‌های بالای مکانیزاسیون، لزوم افزایش بهره‌وری ماشین‌آلات را در پی داشته است. بنابراین به شدت نیاز به اتخاذ سیاست‌ها و راهبردهایی در این زمینه به منظور افزایش بهره‌وری ماشین‌آلات بارگیری و حمل و کاهش هزینه‌های 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، سیستم‌های مختلف توزیع کامیون‌ها در معادن طراحی و پیاده سازی شده اند. این سیستم‌ها 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 مدل‌ها در معادن به صورت سیستم‌های دستی و یا نیمه خودکار ۵ الی ۱۲ درصد افزایش تولید را پی داشته است [۱۲]. این در حالی است که برای این مدل‌ها در سیستم‌های خودکار توزیع، افزایش تولید ۲۴ درصدی نیز ثبت شده است [۲].

در حال حاضر اکثر معادن ایران از روش‌های سنتی در برنامه‌ریزی حمل و نقل خود استفاده می‌کنند. تاکنون بیشتر تلاش‌ها برای طراحی مدلی خطی یا غیر خطی به کمک علومی چون منطق فازی و یا تحقیق در عملیات بوده است. این مدل‌ها ایستا بوده و با تغییر لحظه‌ای پارامترها در حین کار دچار مشکل می‌شوند. به علاوه تأثیر ماشین‌آلات بر یکدیگر نیز در حین شیفت مدنظر قرار نگرفته

تاریخ وصول: ۸۸/۱۱/۲

تاریخ تصویب: ۸۹/۴/۳۰

دکتر احمد ماقوئی، 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

پارامترهایی نظری زمان سیکل، مدلی را جهت تخصیص وسائل 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 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 به عنوان استراتژی های استخراجی به صورت عمده اعمال می شوند. محدودیت هایی چون ظرفیت ماشین آلات، ظرفیت تولید کارخانه فرآوری و سایر محدودیت های از این قبیل جزو محدودیت های محیطی می باشند. این محدودیت ها در فاز طراحی بر معدن اعمال شده اند، بنابراین در فاز اجرا کنترل آن ها 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 می تواند از نظر استراتژیکی با اهمیت باشد، متغیر خواهد بود.

با وجود این که بالا بودن حجم تولید در کنار ایجاد برخی فرصلت ها چون امکان صادرات، باعث سرشکن شدن هزینه های ثابت می شود، 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 هزینه های اضافی تخلیه، انبارگاری و بارگیری مجدد را به معدن تحمیل می کند.

به دلیل وجود اختلاف زمانی فعالیت معدن و کارخانه که از اختلاف در تعداد شیفت ها نشأت می گیرد، معمولاً حداقل تولیدی برای معدن تعیین می شود 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 می کند، 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 حداقل تولید نیز محدود می شود. این محدودیت می تواند به صورت کلی برای کل تولیدات و یا جزئی برای تک تک سنگ شکنها و یا محل های تخلیه اعمال گردد.

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 Ramani و Barbaro [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 [۹] در مقاله خود در سال ۱۹۹۷ Frendeway چند مرحله ای را بر مبنای یک الگوریتم زمان حقیقی و با هدف حداکثر کردن میزان تولید و کیفیت ارائه نمودند. مدل سازی، 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 تناظر تجمعی هر شاول نسبت به هدف تعیین شده به حداقل برسد. وسائل حمل و نقل نیز به صورتی به شاول ها تخصیص می یابند که زمان انتظار این وسائل 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. Chung [۵] در سال ۲۰۰۲ از عدم مزایای آنها به بحث گذارد. Santibanez و Epstein [۴] در سال ۲۰۰۷ تکنیک برنامه ریزی تصادفی برای مساله تخصیص کامین ها و شاول ها در معادن روباز با هدف حداقل سازی هزینه ها استفاده نمود. وی از دو روش بر مبنای متابع و بر مبنای محدودیتهای شناسی استفاده کرد. Caro و Santibanez و Weintraub [۶] در سال ۲۰۰۹ یک رویکرد یکپارچه برای فرآوری 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. Gamache و Riopel و Jaoua [۷] در سال ۲۰۰۹ شبیه سازی برای مدیریت ناوگان در سیستمهای حمل و نقل داخلی ارائه نمودند که در آن با بهره گیری از مقاهمی طرح در مهندسی ترافیک، یک مدل مفهومی جدید معرفی کردند که برای شبیه سازی وضعیت در ترمینال های کانتینرها و نیز معادن روباز می تواند استفاده گردد.

این مدل "عمدتاً" بر اساس باز ایجاد رفتارهای مهم ترافیکی قرار دارد. Chung و Kresta [۱۰] در سال ۲۰۰۵ مارکز Marquez و Forbes در مقاله خود با استفاده از محدودیت های شناسی و رویکرد برنامه ریزی تصادفی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در

سیستم ترابری مسئولیت کنترل این روند و پیش‌بینی عکس‌العمل-های مناسب جهت حفظ روند تولید را بر عهده دارد.

### ۳. طبقه‌بندی مدل‌های ریاضی توزیع

در این مقاله مدل‌های ریاضی توزیع از نظر زمان حل مدل (اجرا)

به دو دسته تقسیم می‌شوند:

(۱)  $T=0$ : در این نوع، مدل ریاضی قبل از آغاز شیفت اجرا می‌شود. اطلاعات ورودی این مدل‌ها در کنار پارامترهای تولید، اطلاعات مربوط به شیفت‌های قبل می‌باشد. بازه زمانی مورد نظر در این نوع مدل معمولاً کل شیفت است. به این ترتیب دیدی کلی از سیاست‌های استخراجی و محدودیت‌های موجود در اختیار می‌باشد. با توجه به اینکه وقایع پیش‌بینی نشده و تغییرات در پارامترها که همواره در طی شیفت اتفاق می‌افتد، در این مدل در حین دیده نشده است، امکان کاهش بهره وری این نوع مدل در حین اجرا وجود دارد. امروزه برای رفع این مشکل در سیستم‌های نیمه خودکار و خودکار توزیع، در طول شیفت رایانه مدل را با اطلاعات جدید اجرا کرده و جواب‌ها را به روز رسانی می‌کند. یکی دیگر از مشکلات این مدل‌ها این است که هنگامی که مدل در طول شیفت اجرا می‌شود تنها کامیون‌های تخلیه کرده مبنا قرار می‌گیرند و کامیون‌هایی که در حال حرکت برای تخلیه هستند در نظر گرفته نمی‌شوند. این مهم بهره وری این مدل‌ها را کاهش می‌دهد. مدل Chung نمونه‌ای از این نوع مدل است.

(۲)  $T>0$ : در این نوع، مدل ریاضی با هدف اجرا در طول شیفت طراحی شده است. این مدل‌ها اطلاعات لحظه‌ای را در دیافت و شاول مناسب جهت تخصیص کامیون را مشخص می‌کنند. نظر به این که کامیون‌پس از تخلیه، در خواست مسیر می‌کند و در آن لحظه کامیون‌های دیگر هریک در وضعیت متفاوت هستند، مدل نیازمند اطلاعات لحظه‌ای بوده و برنامه‌ریزی برای بازه زمانی کوتاه انجام می‌گیرد. این بدان معنی است که مدل اهداف طول شیفت را در واحد زمان تقسیم می‌کند و با توجه به آن و شرایط موجود، توزیع کامیون‌انجام می‌شود. اجرای دستی چنین مدلی با توجه به وابستگی به اطلاعات لحظه‌ای بسیار دشوار است. مدل Temeng [۱۰] نمونه‌ای از این نوع مدل می‌باشد.

### ۴. مدل ریاضی برنامه‌ریزی حمل و نقل

تعداد کامیون‌ها و مسیرها در سیستم‌های ترابری معادن رو باز محدود است و نقاط بارگیری و تخلیه به مدت طولانی ثابت می‌مانند. در ضمن فاصله رفت و آمد در مقایسه با مدت زمان شیفت کم بوده و میزان تقاضا در هر نقطه بالا می‌باشد. مدل ارائه شده در این تحقیق از ایجاد تغییرات در مدل Chung [۱۰] و تلفیق آن با مدل Temeng [۹] با اعمال پاره‌ای تغییرات و اضافات ایجاد شده است. سعی شده است تا در این مدل ایرادات مدل‌های ذکر شده

### ۲-۲. کنترل کیفیت (عیار) تولیدی

کیفیت ماده معنی ورودی به کارخانه فرآوری از اهمیت فوق العاده-ای 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.

معمولًا 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 باطله برداری خوانده می‌شود [۲]. هدف از استخراج باطله در معنده کاری رو باز 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 باطله برداری محاسبه می‌شود.

### ۲-۴. محدودیت‌های تخصیص کامیون

در معادن رو باز 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. محدودیت‌هایی 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 پاره‌ای محدودیت‌ها برای ماشین‌آلات از نظر تعمیرات و نگهداری در سیستم ترابری لحاظ گردد. به طور 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 خواهد شد. سوخت گیری ماشین‌آلات نیز یکی از مسائل حائز اهمیت در روند تولید می‌باشد. به منظور حفظ پیوستگی تولید معدن، برنامه‌ریزی نوبتی سوخت گیری ماشین‌آلات صورت می‌پذیرد.

پاسخ مدل در این حالت حداقل میزان تولید کامیون  $t$  ارشاول  $s$  اعزامی از دامپ  $d$  می باشد که در آن کامیون  $t$  شامل کلیه کامیون های 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]).

باذه 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 ها قبلی را ایجاد می کند تا تولید حداقل و زمان تلف شده ماشین ها حداقل گردد. این اعداد جواب بهینه مدل را تشکیل می دهند اما برای پوشش این ایراد که واقعی 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.

#### • $T>0$ زمان

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 در حال حرکت به سوی دامپ ها برای تخلیه هستند.

پاسخ مدل در این حالت حداقل میزان تولید کامیون  $t$  ارشاول  $s$  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 هر بار 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 تابع چند هدفه، این مدل به صورت تک هدفه تعریف شده است.

قابل ذکر است که متغیرهای کیفی متعددی در روند تراابری 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.

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 می پذیرد.
- امکان حضور محل های تخلیه متعدد با نیاز عیاری مختلف وجود دارد.
- تدبیری 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.

#### ۴-۳. تابع هدف

تابع هدف مدل به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Maximize } Z = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{TDT_{sdt}} \sum_{q=1}^Q \left( \frac{x_{sdt}}{TDT_{sdt} + SDT_s} \right) \quad (1)$$

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

#### • $T=0$ زمان

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.

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.

$$\bullet \quad T=0 \quad \text{زمان}$$

$$\sum_{s=1}^n \sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^q x_{stdt} \geq W \quad d = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (6)$$

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

– اندیس دامپ های باطله موجود

$$\bullet \quad T>0 \quad \text{زمان}$$

$$\sum_{s=1}^n \sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^q x_{stdt} \geq \frac{W}{H} \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^q (TDT_{stdt} + SDT_s) \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (7)$$

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

#### ۴-۳-۳. کنترل کیفیت (عيار) کانه تولیدی

خوارک 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 قبل 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 خوارک کارخانه و تولید بهینه محقق گردد.

$$\bullet \quad T=0 \quad \text{زمان}$$

$$\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^q x_{stdt} \alpha_s = \alpha_d \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^q x_{stdt} \quad d = 1, 2, \dots, N_{crusher} \quad (8)$$

#### 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.

#### ۱-۴-۳-۱. 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.

$$\bullet \quad T=0 \quad \text{زمان}$$

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

که در آن:

– کمترین میزان مطلوب از انباشت مواد در انتهای شیفت

– میزان انباشت موادمعدنی در ابتدای درشت در ابتدای شیفت

– مقدار مصرف موادمعدنی کارخانه در واحد زمان

– تعداد ساعت کاری معدن در شباهه روز

– اندیس سنگ شکن های موجود

$$\bullet \quad T>0 \quad \text{زمان}$$

$$\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^q x_{stdt} \geq \left( \frac{V_{min} - V_0}{H} + V_{ext} \right) * \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^q (TDT_{stdt} + SDT_s) \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (3)$$

$$\sum_{d=1}^m \sum_{s=1}^n x_{std} \geq R_s \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (4)$$

که در آن:

– اندیس شاول های موجود

$R_s$  – تقاضا برای شاول

$R_s$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R_s = \sum_{d=1}^m N_{sd} \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (5)$$

$N_{sd}$  – تناز مورد نیاز از مسیر دامپ d تا شاول

در سمت راست محدودیت ۳ با ضرب حداقل تولید در واحد زمان در زمان توزیع کامیون های آمده توزیع (تخليه کرده و یا در حال

$$\sum_d^m \sum_t^q \frac{x_{sd}}{(TDT_{sd} + SDT_s)} \leq C_s \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (15)$$

زمان  $T > 0$

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 می‌باشد. برنامه تولیدی محاسبه شده برای کامیون‌ها نباید از این ظرفیت فراتر رود.

زمان  $T = 0$

$$\sum_s^n \sum_d^m \frac{x_{sd} (TDT_{sd} + SDT_s)}{V_t} \leq H \quad t = 1, 2, \dots, N_{truck} \quad (16)$$

که در آن:

$V_t$  – ظرفیت باربری کامیون  $t$

$N_{truck}$  – اندیس کامیون‌های 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 می‌شود. با ضرب این عدد در زمانی که این ارسال‌ها به طول خواهد انجامید، کل زمان فعالیت کامیون محاسبه می‌شود. این زمان باید از زمان کل شیفت کمتر باشد.

زمان  $T > 0$

$$\sum_s^n \sum_d^m \sum_t^q x_{sd} \leq \sum_s^n \sum_t^q V_t \quad (17)$$

که در آن:

$V_t$  – ظرفیت باربری کامیون  $t$

#### ۴-۳-۷. محدودیت‌های تعادلی

این محدودیت‌ها برای حصول اطمینان از تساوی تعداد بارگیری از شاول‌ها با تعداد دفعات تخلیه پیش‌بینی شده‌اند.

$T > 0$  و  $T = 0$

$$\sum_d^m \sum_t^q x_{sd} = \sum_d^m \sum_t^q y_{sd} \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (18)$$

$$\sum_s^n \sum_t^q x_{sd} = \sum_s^n \sum_t^q y_{sd} \quad d = 1, 2, \dots, N_{dump} \quad (19)$$

که در آن:

$y_{sd}$  – تناژ تخلیه شده در دامپ  $d$  توسط کامیون  $t$  اعماقی از شاول  $s$

که در آن:

$\alpha_s$  – اندیس کیفیت مواد در محل شاول  $s$

$a_d$  – حداقل اندیس کیفی مورد نیاز در محل تخلیه  $d$

•

$$G_{sd} - G \geq 0 \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad d = 1, 2, \dots, N_{dump} \quad (9)$$

که در آن:

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

$G$  – نسبت هدف عیاری برای هر مسیر

$G$  و  $G_{sd}$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$G_{sd} = \left[ \frac{X_{sd} * \alpha_s}{T_s * a_d} \right] \quad d = 1, 2, \dots, N_{dump} \quad (10)$$

$$G = \frac{1}{sd} \sum_s^n \sum_d^m G_{sd} \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (11)$$

$\alpha_s$  – اندیس کیفیت مواد در محل شاول  $s$

$a_d$  – 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 کامیون‌ها منتظر بمانند که این خود زمان تلف شده نامطلوبی است.

•

$$\sum_s^n \sum_t^q x_{sd} \leq H * D_d \quad d = 1, 2, \dots, N_{dump} \quad (12)$$

که در آن:

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

•

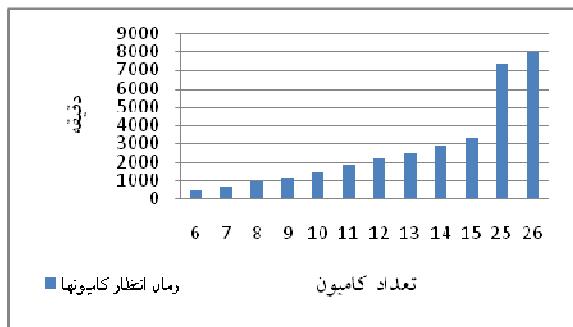
$$\sum_s^n \sum_t^q x_{sd} \leq D_d \sum_d^m \sum_t^q (TDT_{sd} + SDT_s) \quad d = 1, 2, \dots, N_{dump} \quad (13)$$

#### ۴-۳-۵. محدودیت پذیرش شاول

$T = 0$

$$\sum_d^m \sum_t^q \frac{x_{sd}}{H} \leq C_{shovel} \quad s = 1, 2, \dots, N_{shovel} \quad (14)$$

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 رو باز 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 اختیاب 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 اختیابی 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 تنازع تولیدی شاول‌ها طبق برنامه تولید با تنازع 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 شکل‌ها مدل پیشنهادی به اختصار RBDHM نشان داده شده است.

۴-۳-۸. محدودیت کنترل حداکثر زمان فعالیت لاستیک‌ها با توجه به فشاری که به لاستیک‌های کامیون‌ها در طول شیفت وارد می‌شود، کارخانه‌های تولید کننده لاستیک حداکثر زمان فعالیتی را برای لاستیک تعریف می‌کنند 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.

$$T > 0 \text{ و } T = 0$$

$$\sum_{s=1}^n \sum_{d=1}^m (TD_{sd} - TD_{sd} - TL_{sd}) \leq WT_t \\ t = 1, 2, \dots, N_{truck} \quad (20)$$

که در آن:

$TD_{sd}$  – زمان تخلیه کامیون  $t$  از شاول  $s$  پای دامپ  $d$

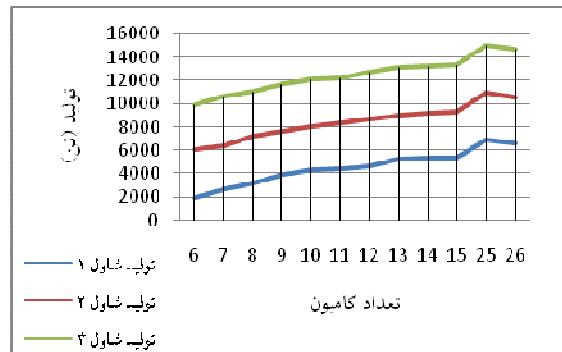
$TL_{sd}$  – زمان بارگیری کامیون  $t$  پای شاول  $s$  از دامپ  $d$

$WT_t$  – حداکثر زمان فعالیت برای لاستیک کامیون جهت پرهیز از خرابی‌ها

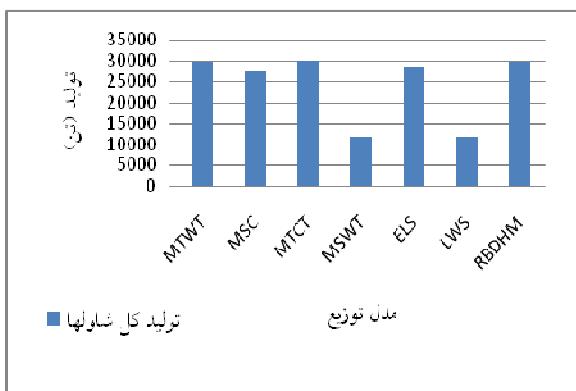
#### ۴-۴. نتایج اجرای مدل

هدف از ارائه مدل پیشنهادی ایجاد یک حل برای تعیین مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری جهت شرایط ایستای آغازین می‌باشد. به کارگیری مدل ریاضی برای تصمیم‌گیری‌های بهینه در شرایط پویا و متغیر پارامترها بسیار پیچیده و دشوار خواهد بود. برای مرحله پویایی مساله، از یک مدل شبیه‌سازی استفاده شده و نتایج به دست آمده از مدل ریاضی به نرم افزار شبیه‌سازی 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 می‌باید. 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.

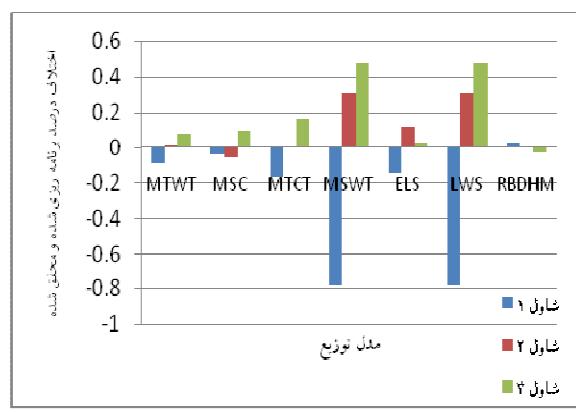


شکل ۱. تأثیر افزایش تعداد کامیون‌ها در تولید

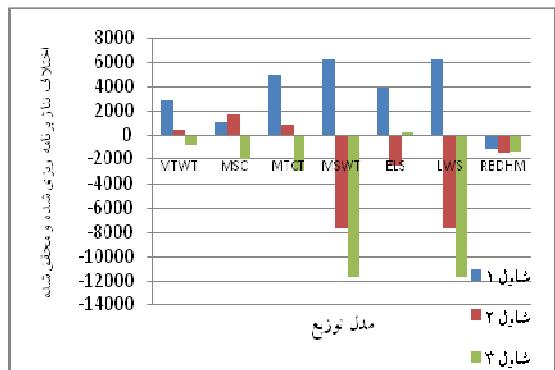


شکل ۵. سطح تولید مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها بدون کنترل عیار و تولید

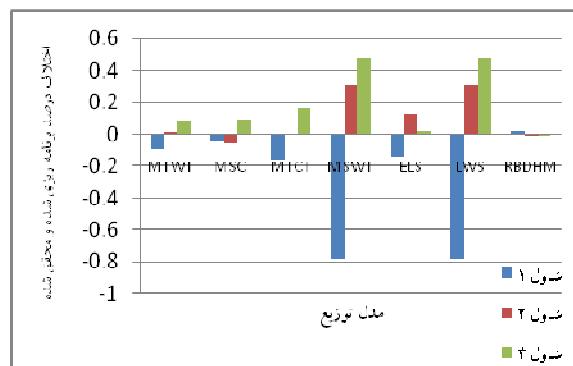
در ادامه تأثیر افزایش حجم کامیون‌ها بر نتایج مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه مدل‌ها با کامیون‌های ۹۰ تنی، شکل‌های ۸ و ۹ کامیون‌های ۱۰۰ تنی، شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کامیون‌های ۱۵۰ تنی و در نهایت شکل‌های ۱۲ و ۱۳ کامیون‌های ۲۰۰ تنی را مورد بررسی قرار می‌دهند.



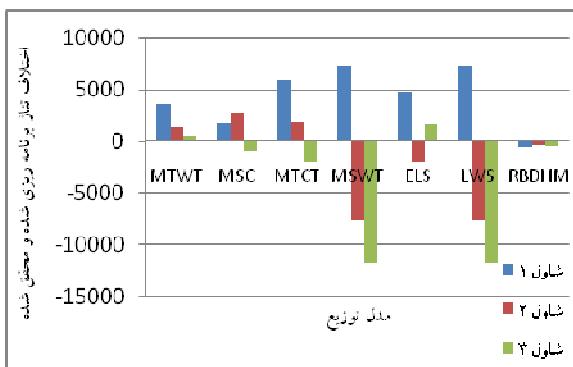
شکل ۶. اختلاف در صد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۹۰ تنی



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



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



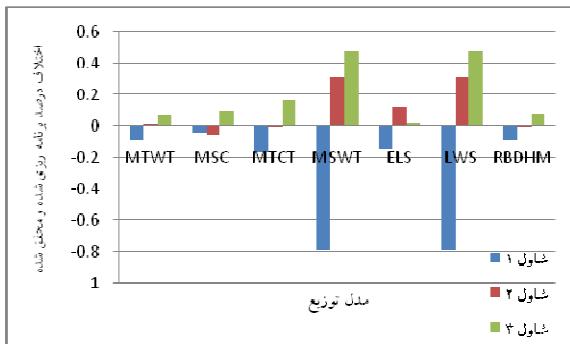
شکل ۴. اختلاف تناز برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۰۰ تنی

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

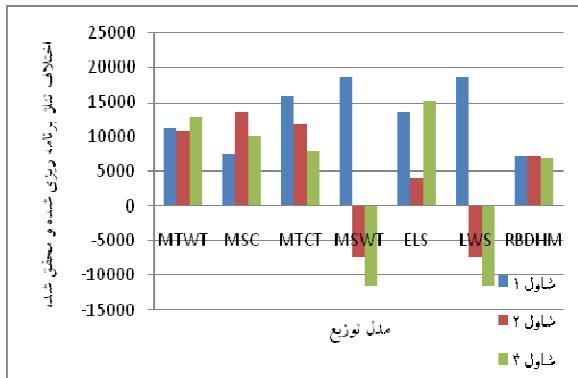
این ارقام به مدیر معدن این امکان را می‌دهد که حجم تولید بهینه را برای شرایط فعلی انتخاب کند.

همان‌طور که در خصوص مدل‌های دیگر ملاحظه می‌شود، اختلاف تولید بسیار شدید بوده و کسری و یا مازاد تولید دیده می‌شود. این مهم کنترل عیار محصول نهائی را بهم 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 حدکثر را دارد.

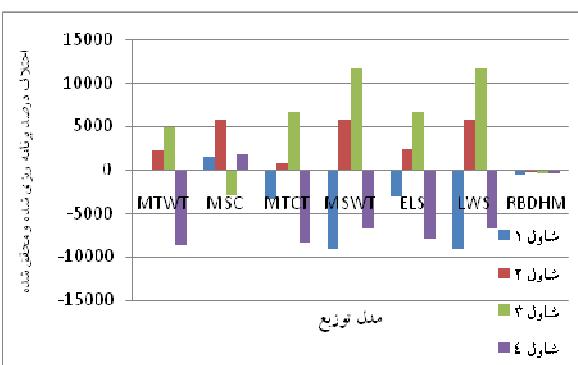


شکل ۱۲. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۲۰۰ تنی

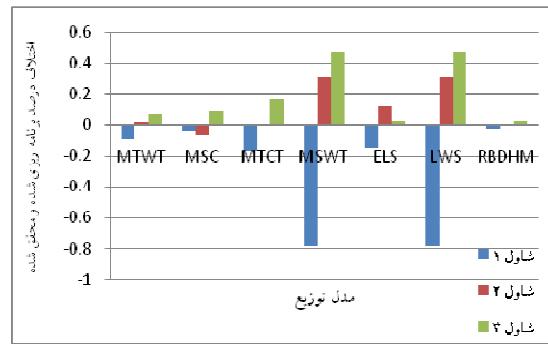


شکل ۱۳. اختلاف تناز برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۲۰۰ تنی

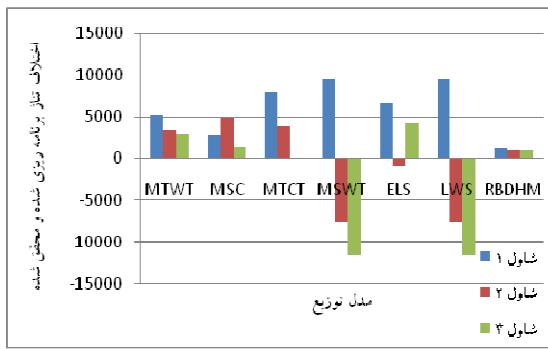
مقایسه نتایج حاکی از آن است که مدل معرفی شده با افزایش ظرفیت کامیون‌ها یکنواختی تولید خود را با توجه به کنترل عیار محصول تولیدی حفظ می‌کند. سایر مدل‌ها همان روند اختلاف شدید در تولید شاول‌ها را دارند. حال تأثیر تعداد شاول‌ها بر نتایج اجرای مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج حل مدل‌ها با ۴، ۵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



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



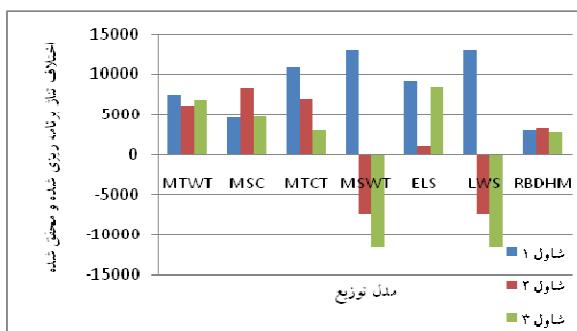
شکل ۸. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۲۰ تنی



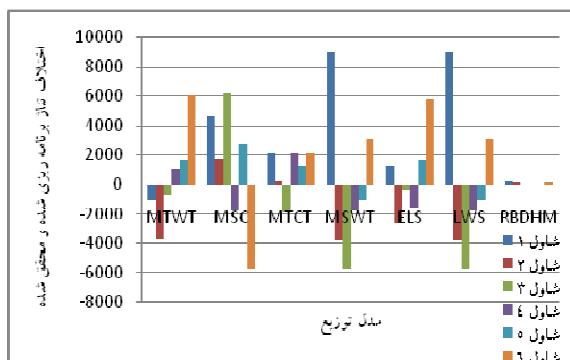
شکل ۹. اختلاف تناز برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۲۰ تنی



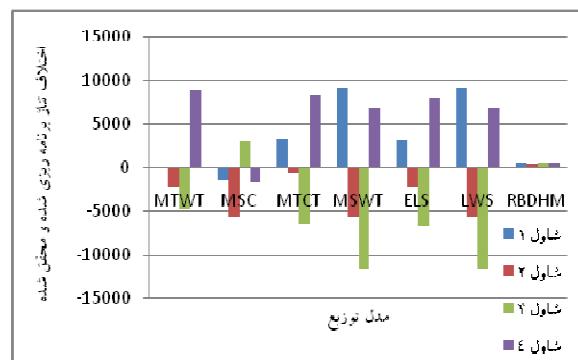
شکل ۱۰. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید شاول‌ها برای کامیون ۱۵۰ تنی



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

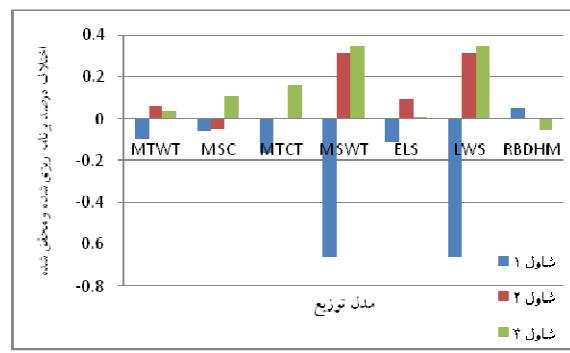


شکل ۱۹. اختلاف تناز برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۶ شاول

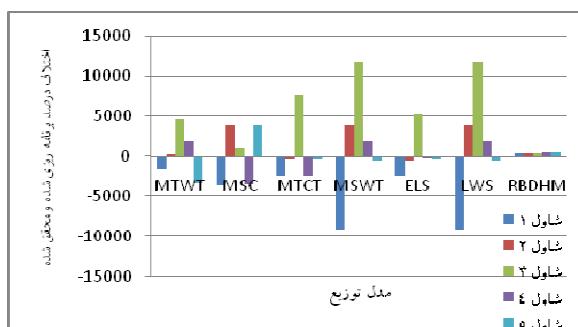


شکل ۱۵. اختلاف تناز برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۴ شاول

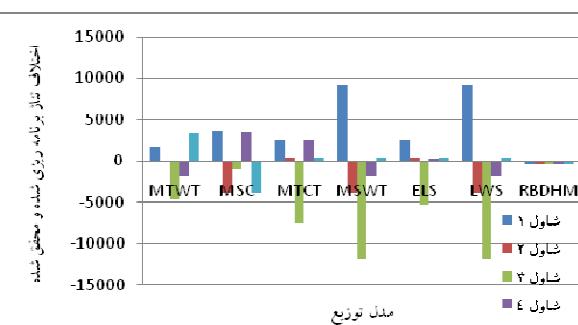
بدین ترتیب عکس العمل مدل در برابر تغییر تعداد شاول نیز مشابه تغییر در ظرفیت کامیون، حفظ یکنواختی تولید با توجه به سیاست‌های کنترل عیار است. حتی دو برابر کردن و سه برابر کردن مسافت‌ها نیز تأثیر مشابهی به همراه دارد. این موضوع در شکل‌های زیر قابل ملاحظه است.



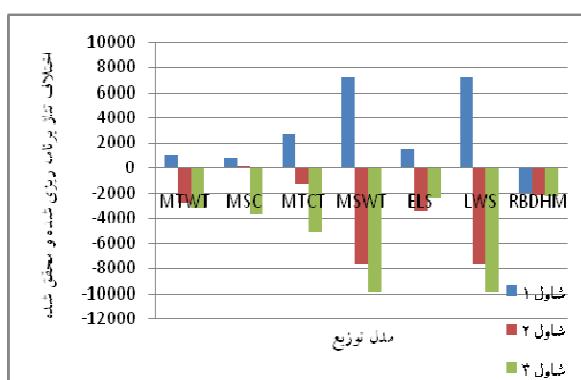
شکل ۲۰. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۵ با مسافت‌های دو برابر



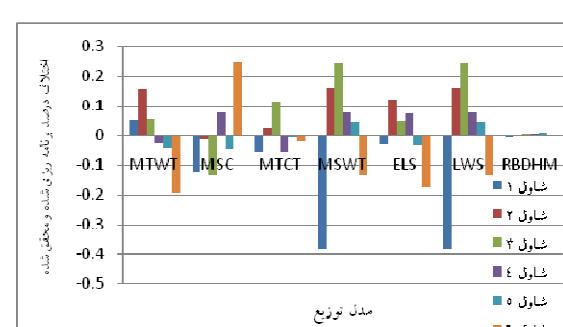
شکل ۱۶. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۵ شاول



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



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

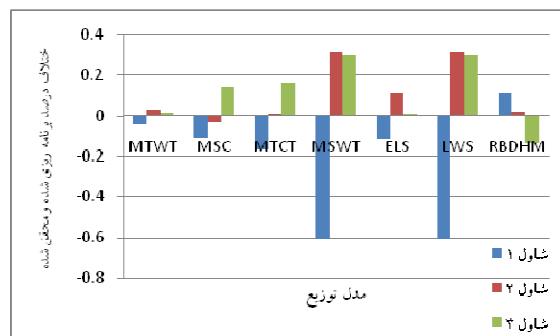


شکل ۱۸. اختلاف درصد برنامه‌ریزی شده و محقق شده تولید ۶ شاول

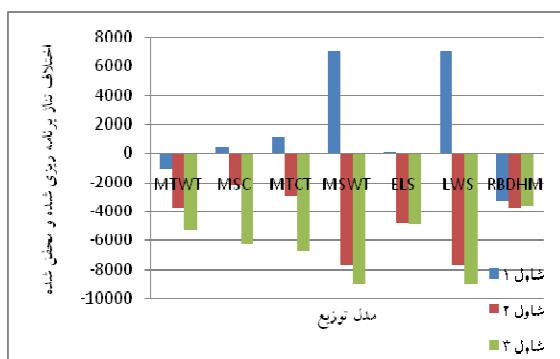
مدل ارائه شده در این مقاله کنترل عیار و میزان تولید را با توجه به سیاست‌های استخراجی به عنوان بهره وری تولید معدن در نظر می‌گیرد. این مدل در مقابل تغییر در تعداد و ظرفیت کامیون‌ها، تعداد شاول‌ها و مسافت‌ها، روند کنترل عیار و تولید خود را حفظ می‌کند. این مهم با مقایسه اختلاف درصد و تناز برنامه ریزی شده و محقق شده این مدل به دست آمده است. بدین ترتیب مدل معرفی شده روند مطمئنی برای حصول سیاست‌های استخراجی معادن رو باز در پیش می‌گیرد. بروز تغییرات ناگهانی چون خرابی ماشین‌آلات، پر شدن سنگ شکن و مشابه آن، روند کنترل عیار و تولید مدل را به هم نمی‌ریزد.

### 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



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



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

مطابق شکل با افزایش مسافت‌ها یکنواختی اختلاف تناز 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 می‌زنند. 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 مدل‌های ریاضی توزیع، نیاز به اجرای مدل در واحد زمان با اطلاعات لحظه‌ای وجود دارد. استفاده از مدل‌های زمان واقعی نیز با توجه به محدودیت‌های داده ها، کنترل عیار و تولید معدن را با مشکل روپرتو می‌کند. در این مقاله مدلی ریاضی معرفی شد که در دو مرحله اجرا می‌شود. نخست قبل از آغاز شیفت با استفاده از اطلاعات کلی و سپس در حین شیفت با استفاده از اطلاعات لحظه‌ای. 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 سیاست‌های استخراجی می‌شود. پارامترهای مورد استفاده، تغییر متغیرهای تعداد و ظرفیت کامیون‌ها، تعداد شاول‌ها و مسافت‌ها بوده اند.

[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", 2<sup>nd</sup> Iran Open-pit Mines Conference, Kerman, Iran, 2005.