مدلسازی تحلیلی مبتنی بر شبیه سازی برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت و بلند مدت در معدن روباز

میلاد ابوالقاسمیان

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، مؤسسه آموزش عالی سهروردی، قزوین، ایران m.abolghasemian.bt@gmail.com

مریم دانشمندمهر

استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران m.daneshmand2010@gmail.com

عرفان حسن نایبی[1]

استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، hassannayebi@sharif.edu

چکیده

در این مقاله، یک چارچوب سلسله مراتبی دو سطحی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی تولید و ماشین آلات بارگذاری مواد در بزرگترین معدن روباز مس ایران ارائه شده است. برای حل مسأله برنامه‌ریزی ماشین آلات در معدن، یک مسأله برنامه-ریزی فرمول‌بندی شده و در چارچوب روش سلسله مراتبی دوسطحی پیشنهادی بکار گرفته شده است. از بسته نرم‌افزاری Opt Quest برای حل مسأله بهینه‌سازی در سطح بالای چارچوب پیشنهادی به منظور تهیه یک برنامه بلندمدت بهینه تولیدی ارائه شده است. در سطح پایین چارچوب، به کمک رویکرد شبه مدل محور یک تابع قطعی جهت برآورد دقیق میزان ماشین آلات بارگذاری با تعیین مقدار بهینه بیل‌های مکانیکی با استفاده از طراحی آزمایش‌ها یک برنامه کوتاه مدت متناسب سازی شده است. محاسبات انجام شده در این مجتمع معدنی نشان می‌دهد که چگونه چارچوب پیشنهادی قادر است بر میزان تولیدات، هزینه‌های جابجایی مواد و درآمد اثر مطلوب بگذارد.

کلمات کلیدی: چارچوب سلسله مراتبی، شبیه سازی مبتنی بر بهینه سازی، برنامه‌ریزی بلندمدت، برنامه ریزی کوتاه مدت، طراحی آزمایش

[1] نویسنده مسئول

یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین پایه‌های اقتصاد هر کشور، منابع معدنی و ذخایر تحت الارضی آن کشور است. امروزه سنگ معدنی مس بعنوان یکی از منابع تأمین درآمد در جهان بشمار می‌رود، بر این اساس بدلیل وابستگی زیاد به تأمین درآمد یک کشور به آن، ضروری است تا هزینه‌های موجود در درون یک معدن که شامل مراحل اکتشاف، حمل و نقل و... است، کاهش یابد. بخش معدن به‌عنوان یکی از حفره‌های زیربنایی اقتصاد، نقش اساسی در تأمین مواد اولیه صنایع دیگر را نیز دارد و توسعه سرمایه‌گذاری در این بخش می‌تواند موجب کسب ارزش افزوده مناسب در بسیاری از بخش‌های دیگر اقتصادی کشور شود. نقش معادن و منابع در رشد اقتصادی هر کشوری انکار ناپذیر است. بدون تردید بهره برداری صحیح از معادن کشور، یک عامل مثبت و مهم در رشد و توسعه اقتصادی محسوب می‌شود. در بین تمامی اجزای صنایع معادن، سیستم جابجایی نقش قابل توجهی در هزینه‌های عملیاتی معادن دارا است [1].

هر تن سنگ مس بارگذاری شده در کامیون‌ها نزدیک به 100 هزار دلار ارزش دارد [2]. به همین دلیل، یک معدن مس می‌تواند درآمد خود را در هر روز از طریق تولید بیشتر افزایش دهد. برای بیشینه کردن میزان تولیدات و به دنبال آن، افزایش درآمد در هر روز یک چارچوب سلسله مراتبی مبتنی بر شبیه سازی در این مقاله ارائه شده است. این چارچوب برنامه‌ریزی سلسله مراتبی یک ابزار مفید برای کاهش فضای متغیر تصمیم مسأله پیچیده محسوب می‌شود [3]. زیرا، معادن شامل چندین پارامتر احتمالی هستند که مدلسازی از طریق تکنیک‌های سنتی آن را خیلی پیچیده می‌سازد. در چنین سیستم‌هایی امکان پذیر نیست از طریق مدلسازی ریاضی تمام جنبه‌های مسأله را در نظر گرفت. زیرا در مدلسازی ریاضی فرض می‌شود که پارامترها قطعی هستند. یکی از مناسب‌ترین روش‌هایی که می‌تواند برای شناخت وضعیت جاری این نوع سیستم‌ها مورد استفاده قرار گیرد، ابزار قدرتمند شبیه سازی است [4]. شبیه سازی تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است که این امکان را برای کاربر فراهم می‌سازد تا با انجام آزمایش، رفتار سیستم واقعی را حدس بزند [5].

مزیت اصلی چارچوب توسعه داده شده این است که قادر است راستی آزمایی برنامه‌ریزی تولید را در سطح بالایی انجام دهد. برای حل مسأله موجود به کمک چارچوب پیشنهادی لازم است یک برنامه بهینه سازی و مدل ریاضی توسعه داده شود که سطوح اصلی این الگو بحساب می‌آیند. سطح پایین چارچوب که با هدف کاهش فضای متغیر تصمیم قابل قبول مسأله طراحی شده است شامل توسعه مدل شبیه سازی و یک برنامه بهینه سازی و اعمال محدودیت‌های موجود به آن، از طریق مطالعات گذشته سیستم و آنالیز چه می شود اگر است. سطح بالای چارچوب، شامل توسعه بهترین روش قابل قبول برای بدست آوردن راه‌حل بهینه برای هدف اصلی مسأله در یک زمان کم است. چارچوب ارائه شده بعد از انجام راستی آزمایی‌های لازم، قابل پیاده‌سازی در مورد مطالعاتی خواهد بود. علاوه بر این، یک برنامه ریزی بلند مدت و کوتاه مدت را برای مجتمع معدنی مشخص می کند. این کار را ابتدا با تعیین حجم بهینه تولید و سپس، تعیین منابع اثرگذار بر بارگذاری مواد استخراجی مشخص می کند. برای این منظور، پس از برآورد مدل ریاضی جایگزین مدل شبیه سازی به منظور تعیین ترکیب منابع اثرگذار بارگذاری مواد در راستای افزایش خروجی سیستم با اضافه کردن محدودیت های سیستمی ارائه شده است. بنابراین، مهمترین نوآوری‌ها و سهم اصلی مشارکت تحقیق جاری شامل موارد زیر است.

- ارائه برنامه‌ریزی تواما کوتاه مدت و بلند مدت برای شبیه‌سازی فرآیندهای استخراج و برنامه‌ریزی در معدن روباز، که به تحلیل دقیق‌تری از تأثیرات مختلف بر عملکرد معدن کمک می‌کند.
- توسعه مدل‌هایی برای شبیه‌سازی هزینه‌ها و سودهای مرتبط با برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، که می‌تواند به تصمیم‌گیری مالی بهتر در عملیات معدن کمک کند.
- ایجاد سازوکاری برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی، که می‌تواند به تسهیل فرآیندهای برنامه‌ریزی و بهبود کارایی عملیات معدن کمک کند.

باقی مانده این مقاله به صورتی که مشخص شده است، سازمان‌دهی می‌شود: در بخش 2، یک مرور تاریخی از موضوع که یکی از عناوین مهم این مقاله محسوب می‌شود، فراهم شده است. جزئیات بیشتر معدن مس سرچشمه و معرفی چارچوب اجرایی تحقیق در بخش 3 توضیح داده شده است، در بخش 4، نتایج بکارگیری چارچوب برنامه‌ریزی بهینه پیشنهاد شده، توضیح داده شده است و آزمایش‌هایی که نشان دهنده کارائی چارچوب ارائه شده هستند قرار داده شده است. سرانجام در بخش 5، نتایج بدست آمده ارائه شده است.

2- مرور ادبیات

توزیع سلسله مراتبی دو سطحی مبتنی بر شبیه سازی ارائه شده در این مقاله شباهت بسیاری به چارچوب برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی دارد که در ادبیات مربوط به آن تلاش‌های بسیاری برای حل برنامه‌ریزی یکپارچه و مسأله زمان‌بندی انجام شده است. چارچوب برنامه ریزی تولید سلسله مراتبی[2] کاربرد گسترده‌ای برای حل مسائل زنجیره تأمین با ترکیبات مختلف مانند، محیط محصولات چندگانه و تجهیزات چندگانه و محیط محصولات چندگانه دسته‌ای دارد [6]. عموما در بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی مدل شبیه سازی را به عنوان یک جعبه سیاه در نظر می‌گیرند. خروجی تخمینی هر شبیه سازی از طریق الگوریتم تعریف شده موجود در نرم افزار برای تعیین بهترین ترکیب ممکن سیستم با در نظرگرفتن جنبه‌هایی که در تابع هدف و محدودیت‌ها تعریف شده است ایجاد می‌شود. در این راستا، قاسمی، فرجزاده، هیوی، فلاور و پاپادوپولوس [7] و تکین و سابانچوقلو [8] در زمینه معرفی الگوریتم‌های بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی بحث کرده‌اند. تک، دویل و وانتن وگان [9] به معرفی نرم افزارهایی که می‌توان برای بهینه سازی مدل شبیه سازی از آنها استفاده کرد، پرداخته است. ابزار Opt Quest و نرم افزار Sim Runner معروف‌ترین نرم افزارهای بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی هستند که در این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. جعفرعلی، ونکاتشواران و سان [10] به مقایسه بین عملکرد Opt Quest و Sim Runner در تعیین زمان‌بندی بهینه برای سیستم‌های تولیدی پرداخته‌اند. آنها مشخص کردند که نرم افزار Opt Quest بهترین مقدار نزدیک به بهینه را بدست می‌آورد.

دیگر مطالعات گوناگونی که در سال‌های اخیر برای مسأله برنامه‌ریزی تجهیزات جابجایی مواد در معادن توسط پژوهشگران در این حوزه انجام شده است، را در دو دسته: روش تک مرحله‌ای و روش چند مرحله‌ای می‌توان طبقه‌بندی کرد. براساس نتایج حاصل شده از مطالعه منابع تئوریک موجود می‌توان به این نتیجه رسید که روش‌های چند مرحله‌ای قادر هستند اهداف تولید را به خوبی پوشش دهند. روش چند مرحله‌ای، مساله تخصیص را به دو زیر مسأله تقسیم می‌کند، مسأله اول که در رأس توجهات قرار دارد مسأله تولید است و مسأله دوم، تجهیز ادوات جابجایی می‌باشد. در میان مقالات منتشر شده، توجه بسیاری به روش‌های هیورستیک برای حل مسأله تجهیز کامیون شده است [11]. گرچه می‌توان مسائل در ابعاد کوچک را به شکل دقیق حل کرد اما به هرحال این روش‌ها جز راه‌حل‌های مسأله تخصیص محسوب می‌شوند. زیرا برای معیارهای مدنظر خواه بیشینه کردن میزان تولیدات و یا کمینه کردن عدم فعالیت تجهیزات – مثل زمان انتظار کامیون‌ها و یا زمان بیکاری بیل‌های مکانیکی- مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها حل بهینه‌ای همانند روش دقیق برای مسأله فراهم نمی‌آورند بلکه حل نزدیک به بهینه ایجاد می‌کنند [12]. چانگ و لین [13]، با استفاده از تکنیک‌های احتمالات به مطالعه و تجزیه و تحلیل سیستم معدن روباز پرداختند. شیشوان و بندروف [14] سیستم خود کنترلی را جهت تخصیص کامیون بهینه به منظور افزایش بهره‌وری طراحی کرد. کوئینینبرگ [15]، در مطالعه خود به بهینه سازی سیستم کامیون – بیل برای یک معدن روباز از طریق بکارگیری مبانی نظریه صف و برنامه‌ریزی ریاضی پرداخت. میراندا، مونته وچی، سیلوا و مارینس [16]، اولین مدل شبکه جهت اعزام کامیون به بیل مکانیکی در یک سیستم کامیون – بیل را برای معادن روباز معرفی کردند. پاتل و دسایی [17]، مدل توسعه داده شده توسط [16] را به صورت دو مرحله‌ای توسعه دادند به طوری که ابتدا هر بیل تعداد معینی کامیون را بارگذاری کند، سپس کامیون‌ها به مناطق مشخص اعزام شوند. چینبات و تاکاکو [18]، به ارزیابی

[2] Hierarchical Production Planning (HPP)

اعزام کامیون در یک معدن روباز با استفاده از برنامه‌ریزی خطی پرداختند. اسباربارو [19]، مدل [17] را توسعه دادند. آنها با استفاده از برنامه‌ریزی پویا برای تخصیص کامیون در مسیر استفاده کردند به طوری که طول صف و زمان انتظار برای بارگیری و زمان بیکاری بیل‌های مکانیکی را کاهش دادند. آلاریه و گاماچه [20]، به مطالعه روش‌های حل موجود برای اعزام کامیون در معدن روباز پرداخته‌اند. سگورف، واسلیف، دوکف، ژنوا، درانیایف و کارسموف [21]، به مطالعه کنترل زمان کامیون‌های صنعتی در معدن روباز پرداختند.

در تمامی مطالعات از روش‌های برنامه ریزی ریاضی مانند نظریه صف مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، به نظر می‌رسد که مدلسازی به کمک برنامه ریزی ریاضی قادر نیست تمام جنبه‌های مسأله را در نظر بگیرد. زیرا مدل‌های ریاضی فرض می‌کنند که پارامترها مثل زمان حمل و نقل، زمان تعمیرات و... همگی بصورت قطعی هستند. بنابراین رویکرد مدلسازی شبیه سازی برای ارزیابی سیستم حمل و نقل در چنین مسائلی مناسب می-باشد. چاندا و داگدلن [22] با استفاده از رویکرد برنامه-ریزی آرمانی، چارچوبی برای کمینه کردن مجموع انحرافات پارامترهای کیفیت و مقدار تولید ارائه دادند. شیه و فری [23] یک رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر محدودیت را برای کمینه کردن انحراف از معیار مراحل تولید در یک معدن زغال سنگ با در نظر گرفتن جزئیات احتمالی انجام دادند. چانگ، چن، یانگ و چن [6]، اقدام به تجزیه و تحلیل سیستم حمل و نقل معدن روباز از طریق شبیه سازی کرده است. رانیکمن، وگانز و کرکال [24]، با استفاده از نرم افزار WITNESS سیستم حمل و نقل کامیون را به منظور افزایش میانگین تولیدات به مقایسه سناریوهای مختلف پرداخت. چینبات و تاکایوا [25] با استفاده از ترکیب مدل شبیه سازی و روش DAMIC برای افزایش تولید و حذف گلوگاه اقدام کرد. منا، زبو و آراتا [26] ارائه‌دهنده روشی با استفاده از بهینه سازی مدل‌های شبیه سازی به منظور بیشینه سازی بهره‌وری کلی ناوگان حمل و نقل در یک معدن روباز هستند. تقی زاده، بذرکار و عابدزاده [27] یک مدل برنامه ریزی تولید با استفاده از برنامه ریزی فازی آرمانی ارائه شده است. در این مطالعه کاهش هزینه تولید، افزایش درآمد منجر به افزایش سود بررسی شده است. عابدی سعیدآباد و تقی زاده [28] در این مطالعه با هدف ارزیابی و بهبود عملکرد خط تولید از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری در یکی از کارخانجات آهن‌سازی ایران انجام شده است. ابوالقاسمیان، قانع و دانشمندمهر[1] در مطالعه خود یک مسأله برنامه ریزی دوفازی برای اجرای برنامه ریزی بلند مدت و کوتاه مدت در یک معدن روباز در ایران ارائه دادند. براساس این مطالعه ابتدا یک مقدار برای میزان استخراجات در دراز مدت برآورد شده است و سپس مقدار تجهیزات جابجایی که برای تحقق این هدف مورد نیاز است محاسبه شده است. ابوالقاسمیان، قانع و دانشمندمهر[4] در مطالعه خود یک برنامه ریزی چندهدفه برای کنترل میزان استخراجات و مدت زمان اعزام کامیون ها برای حمل بار را به منظور کاهش هزینه ها انجام داده اند. جهانگیری، ابوالقاسمیان، قاسمی و پورقادر [5] در مطالعه خود یک برنامه ریزی برای تعیین ترکیب بهینه کادر درمان در بخش اورژانس با استفاده از بهینه سازی مدل شبیه سازی شبه مدل محور ارائه کرده اند. آنها توانستند با ارائه یک شبه مدل مبتنی بر رگرسیون 48 درصد زمان انتظار پذیرش بیماران را در بخش اورژانس در زمان فراگیری کرونا کاهش دهند.

با توجه به بررسی منابع تئوریک موجود در ادبیات موضوع، برنامه‌ریزی تجهیزات جابجایی مواد در معدن را می‌توان در دسته برنامه‌ریزی احتمالی قرار داد. در اینصورت، با توجه به اینکه بیان جزئیات جریان در معدن واقعی در مسأله خیلی مشکل است، لذا ساخت مدل شبیه سازی سیستم که شامل متغیرهای تصمیم برای حل مسأله است ضروری می‌باشد.

3-روش تحقیق

در این بخش از تحقیق، ابتدا جزئیات مربوط به معدن مس سرچشمه به عنوان مطالعه موردی و همچنین چارچوب پیشنهادی تحقیق توضیح داده شده است.

3-1- معرفی مجتمع معدن مس سرچشمه

مجتع مس سرچشمه در استان کرمان در جنوب - شرقی ایران واقع شده است. سرچشمه دارای یک معدن بزرگ روباز است که دومین معدن بزرگ مس جهان محسوب می‌شود. این معدن در 65 کیلومتری جنوب -

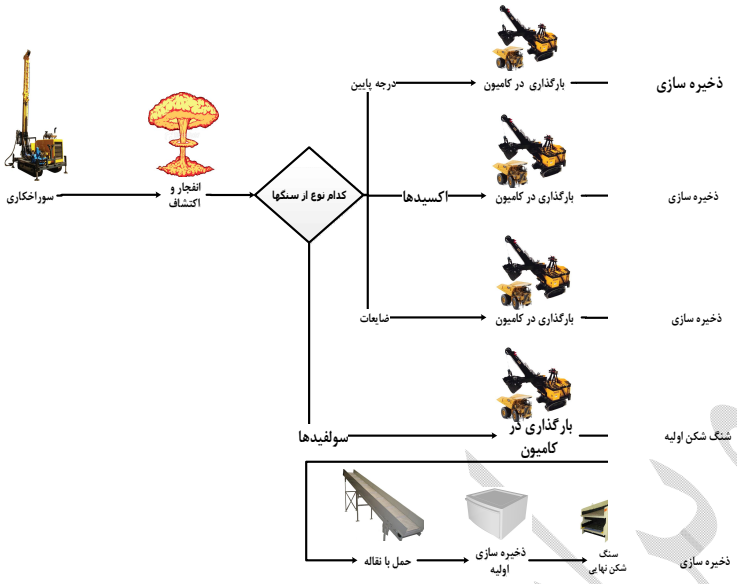
غربی شهرستان کرمان و50 کیلومتری جنوب شهرستان رفسنجان واقع شده است. ارتفاع متوسط منطقه در حدود 2600 متر است که بالاترین نقطه آن حدود 3000 متر ارتفاع دارد. در این معدن، مطالعه زمین و حفر کانال‌های زیرزمینی بخش اولیه فرآیند استخراج سنگ را شامل می-شود، که جمع‌آوری داده، تجزیه و تحلیل، بروزرسانی اطلاعات از حفاری تا استخراج مراحل اصلی آن محسوب می‌شوند. نتایج حاصل از پردازش دادها در اختیار بخش مهندسی به منظور توسعه برنامه‌های حفاری قرار می‌گیرد. در بخش برنامه‌ریزی حفاری، طرح حفاری میان مدت برنامه‌ریزی می‌شود. بخش عملیاتی مسئول اجرای برنامه-های حفاری بخش برنامه‌ریزی است. پس از اجرای حفاری، نوع مواد معدنی استخراج شده باید مشخص شود [1]. در حالت کلی مواد استخراج شده در این معدن را در 4 گروه طبقه‌بندی می‌کنیم، که عبارت‌اند از:

1. سنگ معدن سولفید: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن بیشتر از 0,7 درصد است.
2. سنگ معدن اکسید: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن بین 0,25 درصد و 0,7 درصد است.
3. سنگ درجه پایین: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن بین 0,15 درصد و 0,25 درصد است.
4. ضایعات: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن کمتر از 0,15 درصد است.

نسبت مقدار استخراج انواع مختلف سنگ‌ها در این معدن به ترتیب 45 درصد، 5 درصد، 44 درصد و 6 درصد است. بر اساس انواع مختلف سنگ معدن، یک استراتژی جابجایی و ذخیره‌سازی برای سنگ معدن استخراجی انتخاب می‌شود. اولین نوع ماده معدنی، سنگ معدن سولفید است که ابتدا پس از بارگیری به یک ایستگاه سنگ‌شکن منتقل می‌شود. در این معدن روباز یک ایستگاه سنگ‌شکن با ظرفیت 60000 تن در هر روز وجود دارد. پس از آن ماده به یک سیلو ذخیره‌سازی مس با ظرفیت 150000تن انتقال می‌یابد که پس از گذراندن مرحله خردایش سنگ معدن مس نرم در این انبار ذخیره می‌گردد. سنگ‌های معدن اکسید، درجه پایین و ضایعات هر کدام به ایستگاه ذخیره‌سازی دامپینگ خود منتقل می‌شوند. مدل مفهومی سیستم جابجایی مواد و تجهیزات در معدن مس سرچشمه در شکل (1) و همچنین هزینه عملیاتی بکارگیری هر ساعت بیل نیز در جدول (1) نشان داده شده است (ابوالقاسمیان و همکاران، 2020).

مدیریت برای بیشینه کردن میزان تولیدات و درآمد حاصل از معدن محدودیت‌هایی را در نظر گرفته است که عبارت‌اند از:

1. تعداد بیل در دسترس محدود است،
2. میزان سنگ سولفید بارگذاری شده از منابع استخراجی باید مطابق ظرفیت معدن باشد،
3. میزان سنگ سولفید، اکسید، درجه پایین و ضایعات استخراج شده باید مطابق با تقاضای موجود باشد،
4. کل هزینه‌های بارگذاری موجود در معدن که شامل هزینه‌های بارگذاری مواد در کامیون‌ها توسط بیل‌ها می‌شود باید کمینه گردد.



شکل 1. مدل مفهومی سیستم جابجایی مواد در مجتمع معدنی مس سرچشمه [1].

جدول 1. مشخصات ادوات لازم برای تجهیز کامیون به منظور جابجایی [1].

نوع وسیله	کران بالا	کران پایین	تعداد موجود	هزینه ساعتی بکارگیری ($)
بیل مکانیکی 1	11	9	10	45
بیل مکانیکی 2	9	7	8	69
بیل مکانیکی 3	9	7	8	67
بیل مکانیکی 4	2	1	1	118

در شکل (2)، مدل انیمیشن شبیه سازی شده ساختار در نظر گرفته شده برای سازوکار مجتمع معدنی نشان داده شده است. علاو ه بر این، در شکل های (1 تا 5) مندرج در پیوست، محیط نرم افزاری به منظور شبیه سازی در ARENA نشان داده شده است.

شکل 2. مدل انیمیشن شبیه سازی شده سیستم معدن مس سرچشمه.

2-3- نماد گذاری

در جدول (2)، نمادهایی که برای متغیرها و پارامترها در مدل توسعه داده شده مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است.

جدول 2. نمادها

متغیرها	توضیحات
TP	میزان کل تولیدات
NS_i	تعداد بیل‌ها از نوع iام و $i=1,2,3,4$
TC_{in}	میزان محموله ورودی به سنگ شکن (تن)
S_{out}	میزان تولید سنگ سولفید (تن)
O_{out}	میزان تولید سنگ اکسید (تن)
L_{out}	میزان تولید سنگ درجه پایین (تن)
W_{out}	میزان تولید ضایعات (تن)
پارامترها	**توضیحات**
C_i	هزینه بکارگیری بیل (دلار) و $i=1,2,3,4$
B	میزان بودجه در دسترس (دلار)
C_c	ظرفیت سنگ شکن (تن)
سایر عوامل	**توضیحات**
متغیر سطح پاسخ	میزان تولید کل مجتمع
موارد قابل کنترل مدل شبیه سازی	میزان تولید سنگ سولفید، سنگ اکسید، سنگ درجه پایین و ضایعات و میزان محموله ورودی به سنگ شکن

3-3- روش بهینه سازی مدل شبیه سازی سلسله مراتبی پیشنهادی

چارچوب پیشنهادی دوسطحی سلسله مراتبی مبتنی بر شبیه سازی[1] به منظور افزایش درآمد از طریق کنترل فرآیند تولید مجتمع معدن مس سرچشمه در این بخش شرح داده شده است. در سطح بالای این چارچوب، کنترل مطلوب تولید وضعیت جاری مجتمع انجام می‌شود (شکل 3). با استفاده از سطح بالای چارچوب پیشنهادی، مقدار نزدیک به بهینه متغیرهای کنترل شده در مدل شبیه سازی براساس تقاضای موجود و ظرفیت مجتمع بدست می‌آید. تحقق هدف در سطح بالای فرآیند سبب می شود تا برنامه ریزی بلند مدت در سیستم تعیین شود. حل این مسأله، مقدار متغیرهای تصمیم را با توجه به ظرفیت محدود ایستگاه سنگ شکن تعیین می‌کند. در واقع بعد از حل مسأله ایجاد شده، میزان تولید هر یک از اقلام معدنی یا مقدار نزدیک به بهینه متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده، بدست می‌آیند. این متغیرهای تصمیم عبارت‌اند از: *میزان محموله ورودی به ایستگاه سنگ شکن، میزان تولید سنگ سولفید، میزان تولید سنگ اکسید، میزان تولید سنگ درجه پایین و میزان ضایعات*. بعد از تعیین مقادیر بهینه بدست آمده از حل مسأله در سطح بالا، در واقع برنامه بهنیه تولیدی برای مجتمع تنظیم می‌گردد. این برنامه همان برنامه ریزی کوتاه مدت در مجتمع معدنی خواهد بود. بر اساس این برنامه تهیه شده با تشکیل سطح پاسخ متناظر با سطح بالا، از طریق رویکرد شبه مدل محور[3] یک برنامه جدید برای تجهیز ادوات جابجایی لازم است تعریف شود. فلوچارت بهینه سازی در شکل (4) نشان داده شده است. مدل ریاضی فرمول‌بندی شده در سطح بالا، در حقیقت مسأله تولید بهینه‌ایی است که با هدف بیشینه سازی درآمد دنبال می‌شود. بدیهی است هر چه میزان مواد تولیدی بیشتر باشد میزان درآمد نیز بیشتر خواهد بود، اما این میزان باید به گونه‌ای باشد که با محدودیت‌های موجود در مجتمع سازگار باشد. در واقع این مسأله قادر است مقدار تولید انتظاری را که باعث افزایش درآمد می‌شود، بیشینه نماید. این تابع در معادله (1) نشان داده شده است. در سطح بالای چارچوب، تابع

[3] Meta modeling approach

تولید انتظاری از جمع خروجی واحدهای تولیدی در این مجتمع معدنی بدست می‌آید.

لازم به ذکر است، این معادله در سطح بالای چارچوب از طریق روش فراابتکاری و به صورت تخمینی در نظر گرفته شده است. معادله (2)، بیشترین سطح ظرفیت ایستگاه سنگ شکن را بیان می‌کند. معادلات (3) تا (6) میزان تولید مواد معدنی استخراجی را برای هر یک از اقلام طبقه‌بندی شده کنترل می‌کنند و محدودیت (7)، تضمین می‌کند که متغیرهای تصمیم مثبت گزارش شوند.

3-3-1- چارچوب پیشنهادی برای برنامه ریزی بلندمدت

در این بخش، به بحث بهینه سازی تولیدات در مجتمع معدن مس سرچشمه برای افزایش درآمد حاصل از آن می‌پردازیم. برای این منظور، از ابزار ابتکاری بهینه سازی Opt Quest موجود در نرم‌افزار Arena در سطح بالای چارچوب پیشنهادی استفاده شده است. Opt Quest یک روش ابتکاری برای جستجوی استراتژی بهینه است که جستجوهایی را بوسیله آنالیز تخمینی خروجی مدل شبیه سازی انجام می‌دهد. این نرم‌افزار با بهره‌مندی از روش‌های جستجوی هوشمندی همچون جستجوی ممنوع به جستجوی ترکیب بهینه مدل شبیه سازی ساخته شده در نرم‌افزار Arena تحت وضعیتی که برای متغیرها تعریف شده است از طریق تعریف اطلاعات مدل، مثل تعریف متغیر سطح پاسخ و متغیرهای قابل کنترل می‌پردازد. Opt Quest یک راه‌حل بالقوه برای مدل طراحی شده در نرم‌افزار Arena ارائه می‌دهد. Opt Quest نتایج شبیه سازی را تحلیل می‌کند و به واسطه جستجوی هوشمندانه‌ای که انجام می‌دهد یک راه‌حل جدید بالقوه مهیا می‌سازد [1]. برای استفاده از Opt Quest ابتدا باید ساختار مسأله بهینه سازی را مشخص نماییم. به عبارت دیگر، متغیرهای تصمیم و تابع هدف باید تعریف شوند. قصد ما این است که از طریق تعیین مقدار بهینه برای متغیرهای تصمیم اثرگذار در فرآیند استخراج در مجتمع معدن مس سرچشمه میزان تولیدات ماهانه را براساس برنامه‌ها و ظرفیت معدن افزایش دهیم. به طوری که می‌دانیم از طریق تولید بیشتر، می‌توان درآمد بیشتر حاصل کرد. برای این منظور، حدود بالا و پایین، متغیرهای تصمیم به عنوان پارامترهای از پیش تعیین شده در Opt Quest قرار داده می‌شوند. در جدول (3)، این مقادیر نشان داده شده است.

ساختار کلی مسأله برنامه‌ریزی که برای افزایش تولیدات ماهانه مجتمع که در Opt Quest ساخته شده است در معادلات (1) تا (7) نشان داده شده است.

$$MaxTP = Total\ Solphide\ Throughput \quad (1)$$

$$s.t$$

$$\mathrm{Tc}_{in} \le C_c \quad \text{برای} \quad i = 1,2,3,4 \quad (2)$$

$$L \le S_{out} \le U \quad (3)$$

$$L \le O_{out} \le U \quad (4)$$

$$L \le L_{out} \le U \quad (5)$$

$$L \le W_{out} \le U \quad (6)$$

$$\mathrm{Tc}_{in}, S_{out}, O_{out}, L_{out}, W_{out} \ge 0 \quad (7)$$

3-3-2- چارچوب پیشنهادی برای برنامه ریزی کوتاه مدت

یک مدل شبیه سازی ساده شده یک سیستم واقعی است که برای یک زیرمجموعه از متغیرهای ورودی (فاکتورها)، پاسخ مدل شبیه سازی به عنوان تابع این

زیرمجموعه تعریف می‌شود. یک شبه مدل، یک مدل انتزاعی[4] از زیرمجموعه متغیرهای ورودی شبیه سازی است که قادر می‌باشد سیستم را تشریح نماید [5] در این مقاله، ساخت شبه مدل براساس روش [1] انجام شده است. مدل شبیه سازی ساخته شده برای تعیین میزان تولیدات سیستم به منظور بدست آوردن پاسخ متغیرها به ازای سناریوهای مختلف 2^k (k، تعداد متغیرها) طرح عاملی کامل برای چهار فاکتور زیر در نظر گرفته شده است:

1. X_1: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع 1،
2. X_2: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع 2،
3. X_3: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع 3،
4. X_4: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع 4.

حدود قابل قبول برای متغیرها عبارت اند از: $9 \le X_1 \le 11$، $7 \le X_2 \le 9$، $7 \le X_3 \le 9$ و $1 \le X_4 \le 2$. این فاکتورها، متغیرهای مستقل هستند که به عنوان متغیرهای ورودی به مدل شبیه سازی برای ساخت متغیر واسبته، میزان تولیدات TP بکار گرفته می‌شوند. تمام ترکیبات ممکن 4 متغیر مستقل (فاکتورها) و نتایج خروجی آنها به تعداد $3\times3\times3\times2=54$ باید جمع‌آوری شود و برای متناسب سازی شبه مدل مورد استفاده قرار بگیرد. این در حالی است که برای جمع آوری این تعداد داده به منظور برآورد معادله رگرسیون مخصوصا زمانی که تعداد فاکتورها زیاد است، نیازمند صرف زمان زیادی است. [1] نشان دادند که می تواند با استفاده از طرح آزمایش عاملی کامل 2^k یک شبه مدل معتبر ارائه داد. طرح آزمایش عاملی کامل، طرحی است مشتمل بر k عامل هر یک در دو سطح، و چون پاسخ چنین طرحی نیاز به $2\times2\times2\times...\times2=2^k$ مشاهده دارد آن را طرح 2^k می‌نامند. وقتی در یک طرح عاملی k عامل وجود دارد، این طرح به کمترین تعداد اجرا نیاز دارد. سطح هر عامل می‌تواند کمی، کیفی و یا حتی اعمال و عدم اعمال باشد. مدل آماری طرح 2^k شامل $\binom{k}{1}=1$ اثر اصلی، $\binom{k}{2}=1$ اثرمتقابل دو عاملی، $\binom{k}{3}=1$ اثرمتقابل سه عاملی و بالاخره $\binom{k}{k}=1$ اثرمتقابل k عاملی است. بنابراین طرح 2^k جمعا دارای $\binom{k}{1}+\binom{k}{2}+\binom{k}{3}+\ldots+\binom{k}{k}=2^k-1$ اثر است. در این مقاله، این طرح نیاز به 16 ترکیب دارد که فقط سطوح بالا و پایین هر فاکتور در جریان شبیه سازی برای جمع آوری اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هر ترکیب فاکتورها 10 بار به مدت 30 روز به اجرا درآمدند تا اطمینان حاصل شود که دقت خطا در تخمین میانگین نرخ تولیدات کمتر از 0,05 است. همچنین تحلیل‌های به عمل آمده از اندازه‌گیری عملکرد سیستم نشان می‌دهد که دوره گرم کردن سیستم معادل 4 روز است که باید در تنظیمات مدل قبل به اجرا درآوردن در نظر گرفته شود.

4- یافته های تحقیق

با اعمال تنظیمات ذکر شده در معادلات 1 تا 7 و تعریف مسأله، مدل در Opt Quest به اجرا در می‌آید. بعد از 638 بار اجرای مدل شبیه سازی در ابزار Opt Quest، بهترین مقدار شبیه سازی در تکرار 85 از بین 25 راه‌حل ممکن که در مجموعه معادلات تعریف شده صدق می‌کند، بدست می‌آید. در این تکرار مقدار تولیدات به 57799 تن می‌رسد. میزان تولید سنگ درجه پایین در وضعیت بدست آمده 3042 تن، سنگ اکسید 15336 تن، سنگ سولفید 31254 تن و ضایعات 1196 تن گزارش شده است. همچنین مقدار ظرفیت بهینه برای ایستگاه سنگ شکن 57897 تن بدست می‌آید. شکل (5)، مقدار تولید در هر تکرار شبیه سازی را نشان می‌دهد.

در جدول (4)، مقایسه‌ای بین وضعیت موجود و بهینه تولید نشان داده شده است. علاوه بر اینکه وضعیت بهینه نسبت به وضعیت موجود متوازن شده است، با توجه به ترکیب بدست آمده مقدار تولیدات 21 درصد افزایش می-نماید، که نشان می‌دهد می‌توان از طریق آن درآمد را نیز افزایش یابد.

با لحاظ کردن هدف عملیاتی فوق به عنوان هدف بلند مدت مجتمع، در ادامه می خواهیم ترکیب اجرای

[4] Abstraction Model

تجهیزات بارگیری را برای تحقق این هدف در کوتاه مدت تعیین نماییم. برای این منظور، اثرات اصلی چهار فاکتور، تقابل میان فاکتورها در مدل رگرسیون در معادله 10 نشان داده شده است.

(10)

$$TP = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_i \sum_j \beta_{ij} X_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_k \beta_{ijk} X_i X_j X_k + \beta_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4 + \varepsilon$$

که در آن:

TP: میزان کل تولیدات،

β_i : جزثابت معادله رگرسیون،

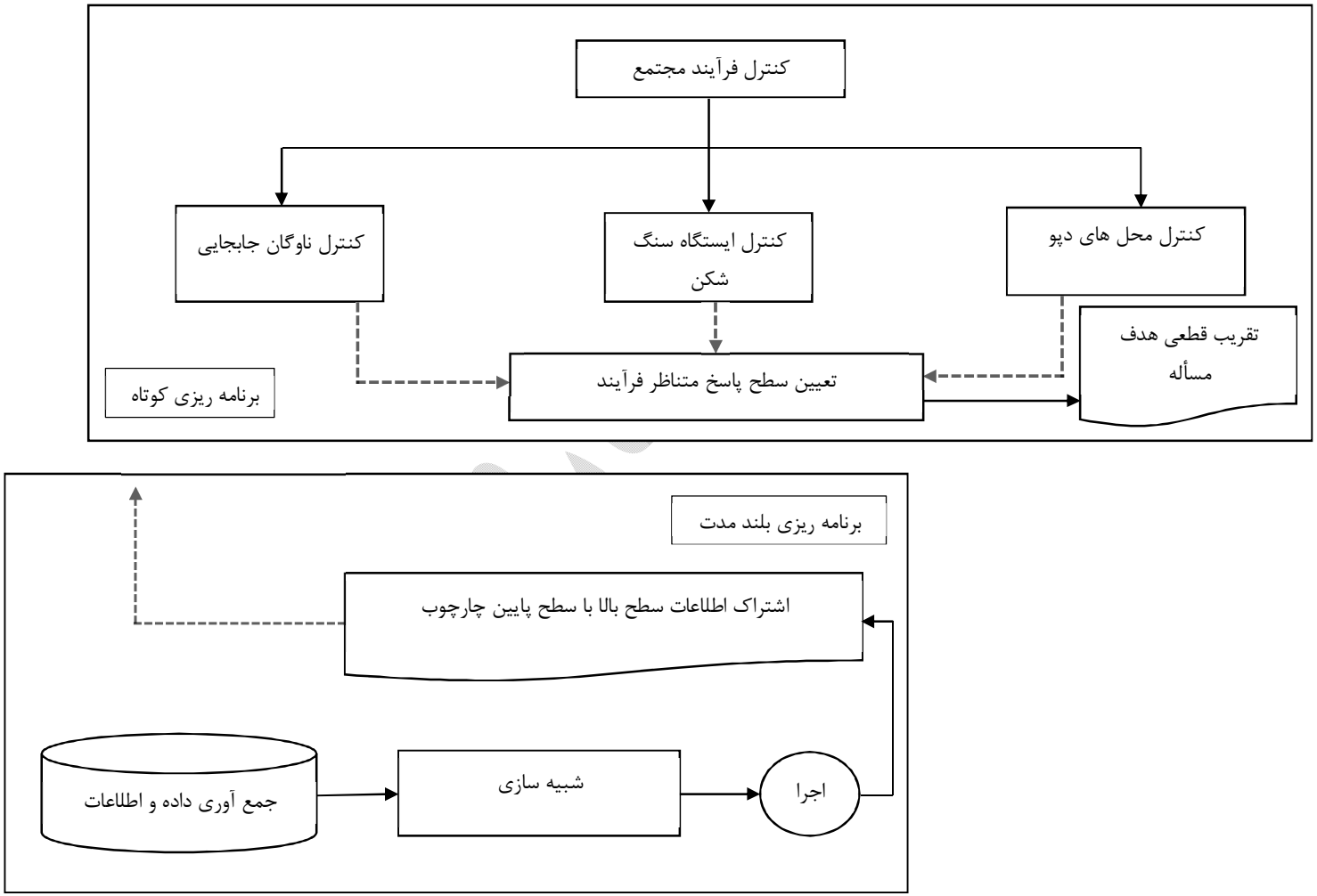
β_{ij} : اثر تقابل دوطرفه بین فاکتور i و j ،

β_{ijk} : اثر تقابل سه طرفه بین فاکتورهای i و j و k،

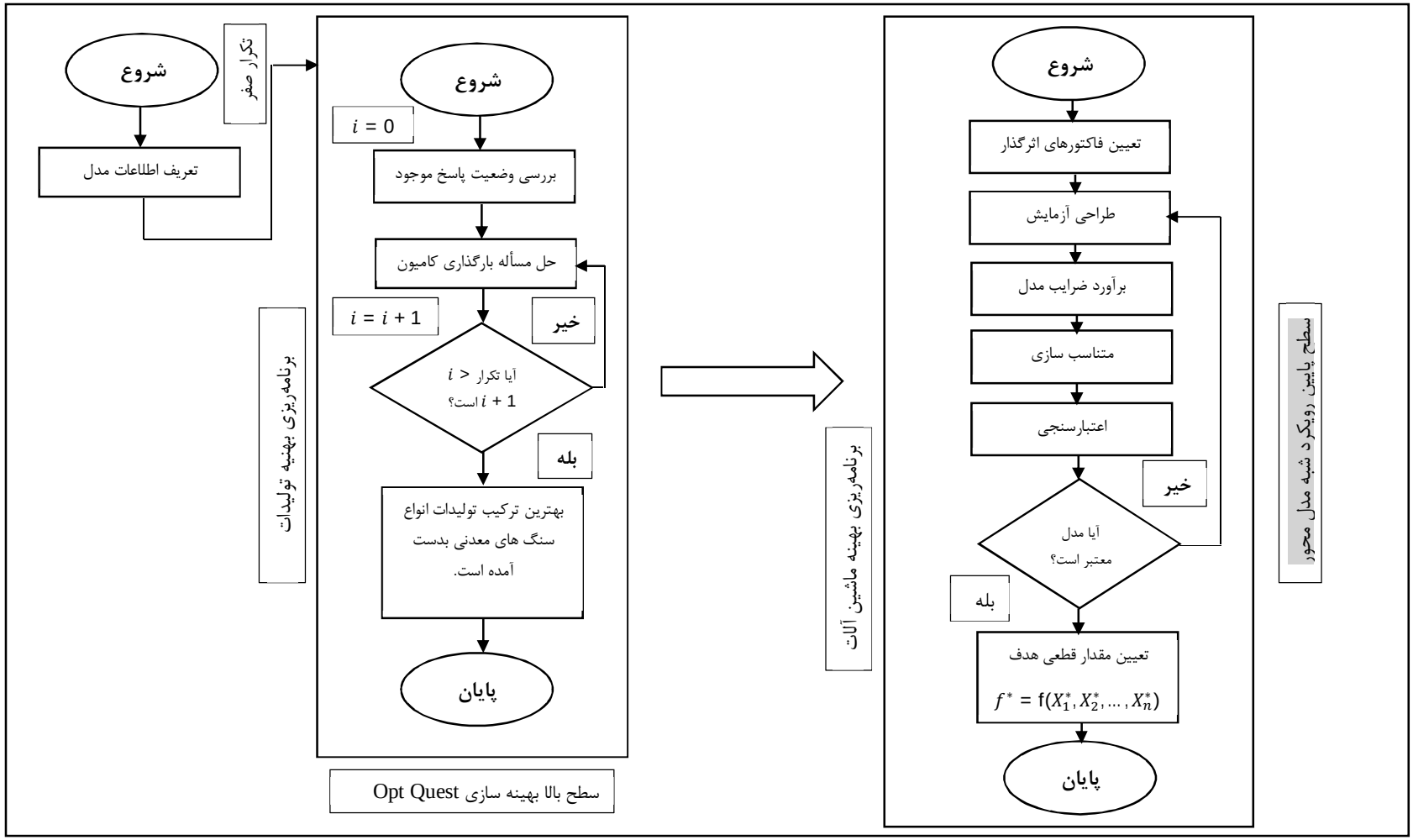
β_{1234} : اثر تقابل چهارطرفه بین تمامی متغیرها،

ε : خطای جزئیی متناسب سازی مدل رگرسیون است.

ویراستاری نشده



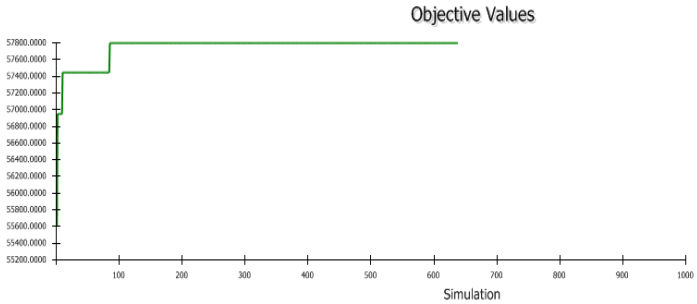
شکل 3. ساختار چارچوب دو سطحی سلسله مراتبی شبیه سازی مبتنی بر بهینه سازی



شکل 4. فلوچارت چارچوب بهینه سازی مدل شبیه سازی سلسله مراتبی پیشنهادی

جدول 3. مقدار پارامترهای از پیش تعیین شده

پارامتر	حد بالا	حد پایین	واحد اندازه‌گیری
ظرفیت سنگ شکن	60000	0	تن
مقدار تولید سنگ سولفید	35000	20000	تن
مقدار تولید سنگ اکسید	20000	15000	تن
مقدار تولید سنگ درجه پایین	3500	3000	تن
مقدار تولید ضایعات	1500	0	تن
بودجه	1656	0	دلار



شکل 5. مقدار تولید کل مجتمع در هر تکرار شبیه سازی

جدول 4. مقایسه بین وضعیت تولید موجود و بهینه

وضعیت	متغیرها					مقدار تولید (تن)	مقدار درآمد (دلار)
	L_{out}	O_{out}	S_{out}	W_{out}	Tc_{in}		
موجود	17422	6094	15121	9019	35000	47703	4770300
بهینه	3043	15336	31254	1191	57897	57799	5779900

جدول 5. تحلیل آماری شبه مدل رگرسیون

جمله	اثر	ضریب	مقدار F	مقدار P $Prob > F$
ثابت	47898	39382,25	5,52	0,01
X_1	-327,94	-1640,25	11,96	0,01
X_2	-44,69	2331,81	0,22	0,65
X_3	33,56	827,37	0,12	0,73
X_4	-185,94	8055,37	3,75	0,09

X_1X_3	240,19	240,19	6,25	0,04
X_1X_4	-203,06	-406,12	4,47	0,05
X_2X_3	-297,06	-297,06	9,57	0,01
X_3X_4	-273,06	-546,12	8,08	0,02

نتایج شبیه سازی برای $2^4=16$، نقطه طراحی جمع‌آوری شده است (جدول پیوست 2)، و ضرایب β برای شبه مدل چندجمله‌ای رگرسیون تخمین زده شده است. نتایج آزمایش با تحلیل آماری در نرم افزار DX انجام شده است که جدول (5) نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد. ستون اول در جدول (5)، اثرات اصلی و همه اثرات متقابل معنی‌دار را نشان می‌دهد. در ستون دوم، اثر بالقوه جملات نشان داده شده است. همچنین، ضرایب اثرات در ستون سوم نشان داده شده است، و به ترتیب در دو ستون آخر مقدار احتمالات و مقدار P، نشان داده شده است. با توجه به نتایج موجود در جدول (5)، مقدار آماره F، برای مدل برابر 5,52 بدست آمده است. این مقدار نشان دهنده این است که مدل معنی‌دار می‌باشد. در حقیقت با توجه به مقدار F، تنها 1,82 درصد ممکن است مدل در محدوده تعریف شده دچار اختلال گردد. مقادیر $Prob > F$ برای جملاتی که کمتر از 0,05 در جدول فوق گزارش شده است، معنی‌دار هستند و در متناسب سازی مدل از آن جملات استفاده می‌شود و مقادیر بالای 0,1 نشان دهنده این است که جمله معنی‌دار نیست. البته باید توجه داشته باشیم که اگرچه متغیرهای X_2 و X_3 معنی‌دار نیستند اما از آن دو برای تحلیل استفاده شده است، زیرا این متغیرها جز متغیرهای تصمیم سیستم مورد نظر هستند و ما قصد داریم مقدار بهینه آنها را در آینده محاسبه نماییم. نتایج Auto select مدل رگرسیون در نرم افزار DX، مدل رگرسیون چندجمله‌ای را به صورت معادله 11 متناسب سازی می‌نماید.

(11)

$$TP = 39382.25 - 1640.25X_1 + 2331.81X_2 + 827.3X_3 + 8055.37X_4 + 240.19X_1X_3 - 406.12X_1X_4 - 297.06X_2X_3 - 546.12X_3X_4$$

مقدار آماره P، برای مدل معنی‌دار و برابر با 0,01 گزارش شده است. در مدل رگرسیون، اثرات متقابل نشان-دهنده اثر همزمان تغییرات متناظر متغیرهای تصمیم در سطح پاسخ هستند. شبه مدل ارائه شده در معادله 11، به کمک مدل شبیه سازی سیستم واقعی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، ساخته شده است. با روشن شدن این معادله می‌توانیم بهترین ترکیب ممکن مجموعه متغیرهای تصمیم را از طریق بهینه سازی مدل، تحت محدودیت‌های مدیریتی بعد از تأیید اعتبار آن بدست آوریم.

4-1- اعتبارسنجی شبه مدل

میزان اعتبار شبیه سازی نشان می‌دهد که چگونه مدل می‌تواند رفتار سیستم واقعی را بازگو نماید. اعتبار شبه مدل از طریق روش‌های بسیاری که بصورت مقایسه بین خروجی شبه مدل و شبیه سازی است، انجام می‌شود. در این مقاله، جهت پذیرش شبه مدل از روش خطای نسبی[5] مطلق $ARE\left(SO,MO\right)=\left|\left(SO-MO\right)\right|/SO$ استفاده شده است، که در آن SO خروجی شبیه سازی و MO خروجی شبه مدل است (ابوالقاسمیان و همکاران، 2020). برای حصول اطمینان از اعتبار شبه مدل ساخته شده لازم است شبه مدل و مدل شبیه سازی در 5 نقطه دیگر طراحی –بجز نقاط طرح 2^4- به تصادف در محدوده قابل پذیرش اجرا شوند و سپس نتایج بدست آمده از اجرای شبیه سازی با مقادیر بدست آمده از شبه مدل مورد مقایسه قرار بگیرند.

[5] Absolute Relative Error (ARE)

جدول 6. اعتبارسنجی شبه مدل

نقاط طراحی				خروجی شبه مدل	خروجی شبیه سازی	مقدار خطای مطلق نسبی
X_1	X_2	X_3	X_4			
10	8	8	1	48081	47656±329	0,008
9	8	7	2	48717	47433±502	0,02
11	9	8	1	47912	48600±427	0,01
10	7	8	2	47751	49201±556	0,02
9	7	8	1	48251	49045±484	0,01

چهار ستون اول در جدول (6) نشان‌دهنده نقاط تصادفی انتخاب شده برای فاکتورهای X_1، X_2، X_3 و X_4 هستند. به ترتیب دو ستون بعد (SO, MO) نشان‌دهنده مقادیر بدست آمده از شبه مدل رگرسیون و مدل شبیه سازی هستند. متعاقبا، در ستون آخر مقدار خطای مطلق نسبی محاسبه شده است. متوسط ARE برای شبه مدل 1,3 درصد بدست آمده است. بنابراین نتیجه می‌گیریم که شبه مدل قادر است بخوبی مقادیر نزدیک به بهینه متغیرهای تصمیم را تعیین نماید. لذا می‌توان از معادله 11 در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی استفاده کرد. بطوریکه، در آینده با اعمال محدودیت‌های تکنولوژیکی بتوان ترکیب بهینه ماشین آلات بارگذاری را برای مسأله تعیین کرد.

4-2- حل مسأله تعیین ماشین‌آلات بارگذاری

ترکیب بهنیه منابع اثر گذار بارگذاری به منظور بیشینه سازی کل خروجی‌های سیستم که براساس محدودیت‌های مدیریتی و متغیرهای تصمیم قابل تعریف است را می‌توانیم بصورت زیر نشان دهیم. برای این منظور، پس از برآورد مدل ریاضی جایگزین مدل شبیه سازی به منظور تعیین ترکیب منابع اثرگذار بارگذاری مواد در راستای افزایش خروجی سیستم با اضافه کردن محدودیت های سیستمی ارائه شده است.

(12)

$$Max\ TP = 39382.25 - 1640.25X_1 + 2331.81X_2 + 827.3X_3 + 8055.37X_4 + 240.19X_1X_3 - 406.12X_1X_4 - 297.06X_2X_3 - 546.12X_3X_4$$

$$s.t:$$

$$\sum_{i=1}^{4} C_i NS_i \le B \qquad (13)$$

$$L_i \le NS_i \le U_i \qquad i = 1,2,3,4 \qquad (14)$$

$$X_i \ integer \qquad i = 1,2,3,4 \qquad (15)$$

معادله (12)، تابع هدف را نشان می‌دهد که طبق مراحل قبل تعیین شده است. معادله (13)، تضمین می‌کند که هزینه ماشین‌آلات بارگذاری از سطح بودجه در دست تجاوز نکند. در معادله (14)، محدوده تعریف شده برای بیل‌ها را در نظر می‌گیرد. برای این منظور، حدود بالا و پایین، تعداد موجود و هزینه بکارگیری ساعتی متغیرهای تصمیم به عنوان پارامترهای از پیش تعیین شده استفاده شده در Opt Quest قرار داده شده است. در جدول (1)، این مقادیر جمع‌آوری شده، نشان داده شده است.

ما در این سطح، با اهداف افزایش درآمد از طریق تولیدات بیشتر و کاهش هزینه‌های جابجایی تجهیزات

بارگذاری موجود سروکار داریم. بنابراین برای حل این مسأله دو هدفه از روش اپسیلون محدودیت استفاده شده است. بر طبق این روش، یکی از اهداف به عنوان تابع اصلی و هدف دیگر به عنوان محدودیت در نظر گرفته می-شود. با توجه به اینکه برای هدف هزینه، کران بالای B در نظر گرفته شده است، به این دلیل در این مقاله، تابع هزینه کل را به عنوان محدودیت در نظر گرفته‌ایم. ساختار تابع هزینه کل سیستم بارگذاری به صورت $C_T = \sum_{i=1}^{4} C_i NS_i \le B$، نشان داده می‌شود. این محدودیت هزینه در مدل بصورت $C_1NS_1 + C_2NS_2 + C_3NS_3 + C_4NS_4 \le B$ در نظر گرفته می‌شود. که در آن B، کران بالای سطح بودجه در دست برای ادوات بارگذاری در مجتمع معدن مس سرچشمه است، که باید از طریق تعیین مقدار بهینه تجهیزات بارگذاری، بهبود یابد یا این سطح حفظ گردد. مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح غیرخطی، با استفاده از نرم افزار LINGO حل شده و ترکیب بهینه منابع بارگذاری به صورت $X_1^* = 9, X_2^* = 8, X_3^* = 7, X_4^* = 2$ بدست آمده است. همچنین مقدار شبه مدل به ازای ترکیب بهینه یعنی $TP(X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*)$ برابر با 48210 تن بدست آمد که نشان دهنده افزایش در میزان تولید از 47703 تن به 48210 تن است.

3-4- تحلیل حساسیت

در این بخش از تحقیق تأثیر تغییر در پارامترهای مدل را بر روی تابع هدف بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا در مقدار فاکتورهای کلیدی یعنی بیل های مکانیکی نوع اول، نوع دوم، نوع سوم و نوع چهارم را نسبت به وضع بهینه تغییر می دهیم و مقدار تابع هدف را بررسی می کنیم. در جدول 7، تغییرات ناشی از این پارامترها بر روی مدل نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، در صورت افزایش مقدار فاکتورهای کلیدی تجهیزات جایجایی نسبت به وضع موجود از 47703 تن تولیدات به 47986 تن تولیدات کل افزایش پیدا می کند، اما نسبت به وضع بهینه علی رغم بکارگیری بیشتر منابع، تولیدات بیشتر حاصل نمی شود. علاوه بر این، در صورت کاهش منابع نیز میزان تولیدات کاهش پیدا می کند.

جدول 7. تغییرات بر روی مقدار فاکتورها

وضعیت	مقدار فاکتور				مقدار تولید (تن)
	بیل نوع 1	بیل نوع 2	بیل نوع 3	بیل نوع 4	
بهینه	9	8	7	7	48210
افزایش یافته	10	9	8	8	47986
کاهش یافته	8	7	6	6	42025

علاوه بر تغییر فوق، در مقدار بودجه در دسترس نیز تغییراتی به وجود آمده است و تأثیر تغییرات کاهشی و افزایشی آن بر روی مقدار تابع هدف و میزان کل استخراج بررسی شده است. با توجه به نتایج حاصل شده در صورتی که مقدار بودجه نسبت به وضعیت موجود افزایش نماید، ضمن افزایش در مقدار هزینه ها، مقدار تولید افزایش می کند. اما، مقدار تولید در مقایسه با وضعیت بهینه که برابر با 388 بدست آمده است تغییر محسوسی کرده و برابر با 48312 تن محاسبه شده است. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که افزایش در مقدار هزینه‌ها با توجه به افزایش در مقدار هزینه و تغییر محسوس در میزان تولید به صلاح نیست. اما در صورتی که مقدار بودجه کاهش یابد، علی-رغم اینکه هزینه‌ها کاهش می یابد اما افت بسیار شدیدی در مقدار تولید حاصل می شود.

جدول 10. تغییرات بر روی مقدار هزینه

وضعیت	مقدار هزینه (دلار)	مقدار تولید (تن)
جاری	33870	48210
افزایش یافته	42870	48315
کاهش یافته	15369	23458

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب سلسله مراتبی دو سطحی مبتنی بر شبیه سازی برای برنامه ریزی بهینه تولید و بارگذاری ماشین‌آلات در مجتمع معدن مس سرچشمه

ارائه شده است. هدف این چارچوب پیشنهادی بیشینه سازی درآمد معدن در هر شیفت کاری از طریق تعیین برنامه تولیدی بهینه انواع سنگ‌های معدنی مجتمع در سطح بالا و حل مسأله بارگذاری ماشین‌آلات (بیل‌های مکانیکی)، در سطح پایین است. برای این منظور، از یک مدل شبیه سازی توسعه داده شده در ARENA، استفاده به عمل آمده است. از ابزار Opt Quest جهت حل مسأله در سطح بالا و تعیین مقدار بهینه انواع مواد معدنی در مجتمع استفاده شده است. در سطح پایین این چارچوب پیشنهادی، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر بهینه سازی شبیه سازی یکپارچه به کمک شبه مدل رگرسیون و طراحی آزمایش‌ها طراحی شده است. این سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری قادر است به منظور ارزیابی اثر تکنولوژی تولید بر عملکرد یک سازمان به تصمیم‌گیران کمک برساند. علاوه بر این، در سطح پایین چارچوب پیشنهادی نشان داده شده است، که چگونه می-توان با استفاده از مدل سازی شبیه سازی و شبه مدل رگرسیون مقدار بهینه ترکیب منابع بارگذاری را بدست آورد.

در مقایسه با سایر مطالعات به‌طور کلی متدهای مختلفی از لحاظ نظری برای رویکرد شبه مدل محور مانند ابوالقاسمیان و همکاران [1]، ناگشوارانیار و همکاران [2]، ابوالقاسمیان و همکاران [4] و جهانگیری و همکاران [5] توسعه داده شده است. اما مهمترین مزیت چارچوب پیشنهادی ساختار سلسله مراتبی بودن آن است که بدلیل برنامه‌ریزی تواما کوتاه مدت و بلند مدت در معدن هم از رویکرد شبه‌مدل محور و هم مدل محور استفاده شده است. این در حالی است که در هر یک از مطالعات فوق الذکر تنها از یک رویکرد شبه‌مدل محور و توسعه یک شبه مدل استفاده شده است. اما در این تحقیق صرفا به توسعه یک شبه‌مدل بسنده نشده است. زیرا هر کدام از این رویکردها قادر به احصای نیازهای برنامه‌های معدنی به‌طور جداگانه می‌باشند. اما در این تحقیق با توسعه مبانی نظری و معرفی رویکرد بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی به‌طور سلسله مراتبی این قابلیت را به‌صورت همزمان فراهم آورده شده است. این در حالی است که در مطالعاتی مانند اوزدمیر و همکاران [11]، شیشوان و همکاران [14] و منا و همکاران [26] صرفا به برنامه‌ریزی کوتاه مدت در یک معدن از طریق مطالعه بر روی سیستم اعزام بهینه ترکیب‌های تجهیزات حمل و نقل پرداخته شده است. اما در این تحقیق به برنامه‌ریزی بلند مدت از طریق تعیین سطح بهینه تولیدات در دراز مدت نیز توجه شده است.

با توجه به موارد اشاره شده و نتایج حاصل شده، بینش های مدیریتی مختلفی از اجرای تحقیق حاضر برای مدیران معادن علی الخصوص مجتمع معدنی مس سرچشمه یه شرح زیر پیشنهاد می شود:

1- ایجاد یک استراتژی جامع برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت که شامل اهداف واضح، معیارهای عملکرد و زمان‌بندی‌های مشخص باشد.

2- سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین مانند نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیشرفته برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها.

3- ایجاد سیستم‌هایی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های واقعی از عملیات معدن به‌منظور بهبود دقت مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری.

4- راه‌اندازی سیستم‌های پایش و ارزیابی مستمر برای بررسی عملکرد و تأثیرات برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده و انجام اصلاحات لازم.

5- استفاده از شبیه‌سازی برای بررسی سناریوهای مختلف استخراج و برنامه‌ریزی، به‌منظور شناسایی بهترین گزینه‌ها و کاهش عدم قطعیت‌ها.

سرانجام، پیشنهاداتی که از سوی نویسندگان برای تحقیقات آتی مطرح می‌شود عبارت‌اند از: مقایسه عملکرد روش مدلسازی و روش حل جایگزین برای مسأله با چهارچوب پیشنهادی ارائه شده در این مقاله به منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین توسعه چهارچوب با ارائه چارچوبی به منظور ارزیابی سود حاصل در سیستم می‌توان اشاره کرد.

منابع

[1] Abolghasemian, M., Kanai, A. G., and Daneshmandmehr, M. 2020. A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. Iranian journal of management studies, 13(4), pp. 705-732. https://doi.org/10.22059/ijms.2020.294809.673898

[2] Nageshwaraniyer, S. S., Son, Y. J., and Dessureault, S. 2013. Simulation-based optimal planning for material handling networks in mining. Simulation, 89(3), pp. 330-345. https://doi.org/10.1177/0037549712464278

[3] de Sousa Junior, W.T., Montevechi, J.A.B., de Carvalho Miranda, R. and Campos, A.T., 2019. Discrete simulation-based optimization methods for industrial engineering problems: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering, 128, pp.526-540. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.073

[4] Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., and Daneshmand-Mehr, M. 2022. Simulation-Based Multiobjective Optimization of Open-Pit Mine Haulage System: A Modified-NBI Method and Meta Modeling Approach. Complexity, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/3540736

[5] Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., and Chobar, A. P. 2023. Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. International journal of industrial and systems engineering, 43(1), pp. 1-19. https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.128399

[6] Chang, K.H., Chen, T.L., Yang, F.H. and Chang, T.Y., 2023. Simulation optimization for stochastic casualty collection point location and resource allocation problem in a mass casualty incident. European Journal of Operational Research, 309(3), pp.1237-1262. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.065

[7] Ghasemi, A., Farajzadeh, F., Heavey, C., Fowler, J. and Papadopoulos, C.T., 2024. Simulation optimization applied to production scheduling in the era of industry 4.0: A review and future roadmap. Journal of Industrial Information Integration, p.100599. https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100599

[8] Tekin, E., and Sabuncuoglu, I. 2004. Simulation optimization: A comprehensive review on theory and applications. IIE transactions, 36(11), pp. 1067-1081. https://doi.org/10.1080/07408170490500654

[9] Teck, S., Dewil, R. and Vansteenwegen, P., 2024. A simulation-based genetic algorithm for a semi-automated warehouse scheduling problem with processing time variability. Applied Soft Computing, 160, pp.111713. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111713

[10] Jafferali, M., Venkateshwaran, J., and Son, Y. J. 2005. Performance comparison of search-based simulation optimisation algorithms for operations scheduling. International Journal of Simulation and Process Modelling, 1(1-2), pp. 58-71. https://doi.org/10.1504/IJSPM.2005.007114

[11] Ozdemir, B. and Kumral, M., 2019. Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines. Simulation Modelling Practice and Theory, 95, pp.36-48. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.04.006

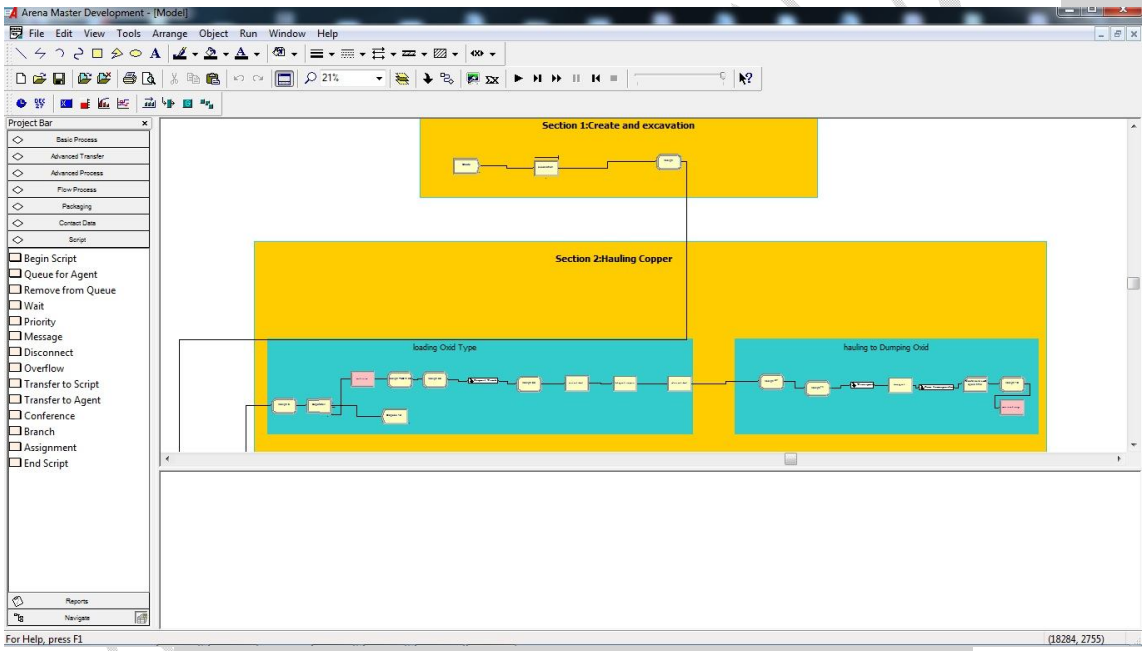
[12] Zhang, L., and Xia, X. 2015. An integer programming approach for truck-shovel dispatching problem in open-pit mines. Energy Procedia, 75, pp. 1779-1784. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.469

[13] Chang, K.H. and Lin, C.P., 2023. An efficient simulation optimization method for the redundancy allocation problem with

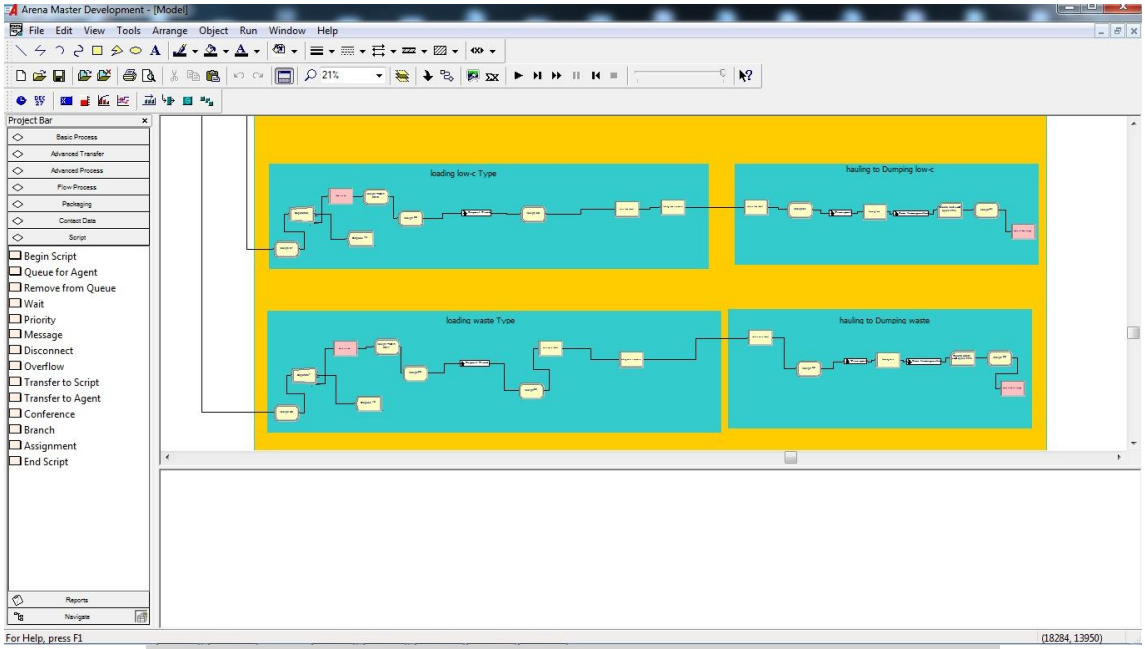
https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.063
[20] Alarie, S., and Gamache, M. 2002. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16(1), pp. 59-76. https://doi.org/10.1076/ijsm.16.1.59.3408
[21] Sgurev, V., Vassilev, V., Dokev, N., Genova, K., Drangajov, S., Korsemov, C., and Atanassov, A. 1989. TRASY—an automated system for real-time control of the industrial truck haulage in open-pit mines. European Journal of Operational Research, 43(1), pp. 44-52. https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90408-6
[22] Chanda, E. K. C., and Dagdelen, K. 1995. Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. International Journal of Surface Mining and Reclamation, 9(4), pp. 203-208. https://doi.org/10.1080/09208119508964748
[23] Shih, J. S., and Frey, H. C. 1995. Coal blending optimization under uncertainty. European Journal of Operational Research, 83(3), pp. 452-465. https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00243-6
[24] Runciman, N., Vagenas, N., and Corkal, T. 1997. Simulation of haulage truck loading techniques in an underground mine using WITNESS. Simulation, 68(5), pp. 291-299. https://doi.org/10.1177/003754979706800504
[25] Chinbat, U., and Takakuwa, S. 2008. Using operation process simulation for a six sigma project of mining and iron production factory. Winter Simulation Conference, pp. 2431-2438. https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736351
[26] Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., and Arata, A. 2013. Availability-based a chance constraint. Journal of the Operational Research Society, pp.1-15. https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2272860
[14] Shishvan, M.S. and Benndorf, J., 2019. Simulation-based optimization approach for material dispatching in continuous mining systems. European Journal of Operational Research, 275(3), pp.1108-1125. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.015
[15] Koenigsberg, E. 1982. Twenty five years of cyclic queues and closed queue networks: A review. Journal of the Operational Research Society, 33(7), pp. 605-619. https://doi.org/10.1057/jors.1982.136
[16] Miranda, R.D.C., Montevechi, J.A.B., Silva, A.F.D. and Marins, F.A.S., 2014. A new approach to reducing search space and increasing efficiency in simulation optimization problems via the fuzzy-DEA-BCC. *Mathematical Problems in Engineering*, *2014*. https://doi.org/10.1155/2014/450367
[17] Patel, M., and Desai, D. A. (2018). Critical review and analysis of measuring the success of Six Sigma implementation in manufacturing sector. *International* Journal of Quality & Reliability Management, 35(8), 1519-1545. https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2017-0081
[18] Chinbat, U. and Takakuwa, S., 2009, December. Using simulation analysis for mining project risk management. In Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), (pp. 2612-2623). IEEE. https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429647
[19] Sbarbaro, H.M.D., 2021. Simulation Of Haulage Systems Using A Flexible Simulation Environment. IFAC-PapersOnLine, 54(11), pp.133-138.

Science, 9(9), pp. 68. http://dx.doi.org/mas.v9n9p68
[28] Saidabad, A. A., & Taghizadeh, H. 2015. Performance and improvement of production line function using computer simulation (case study: An iron foundry). American Journal of Computational Mathematics, 5(4), pp. 431. https://doi.org/10.4236/ajcm.2015.54038
simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. International Journal of mining science and Technology, 23(1), pp. 113-119. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.017
[27] Taghizadeh, H., Bazrkar, A., & Abedzadeh, M. 2015. Optimization production planning using fuzzy goal programming techniques. Modern Applied

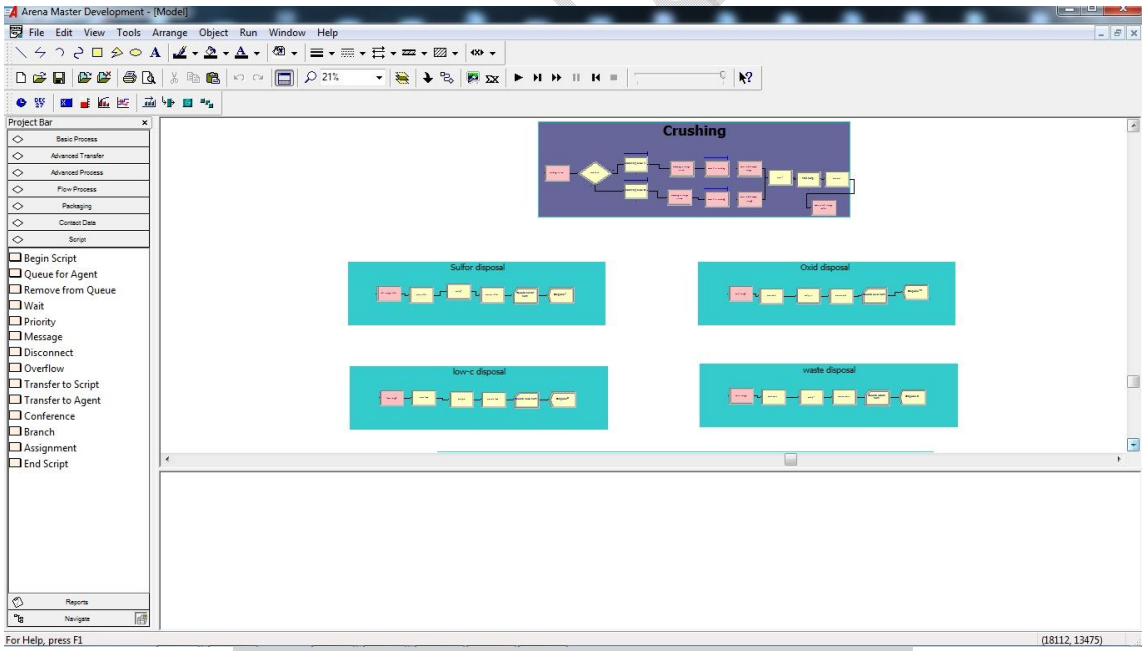
پیوست:



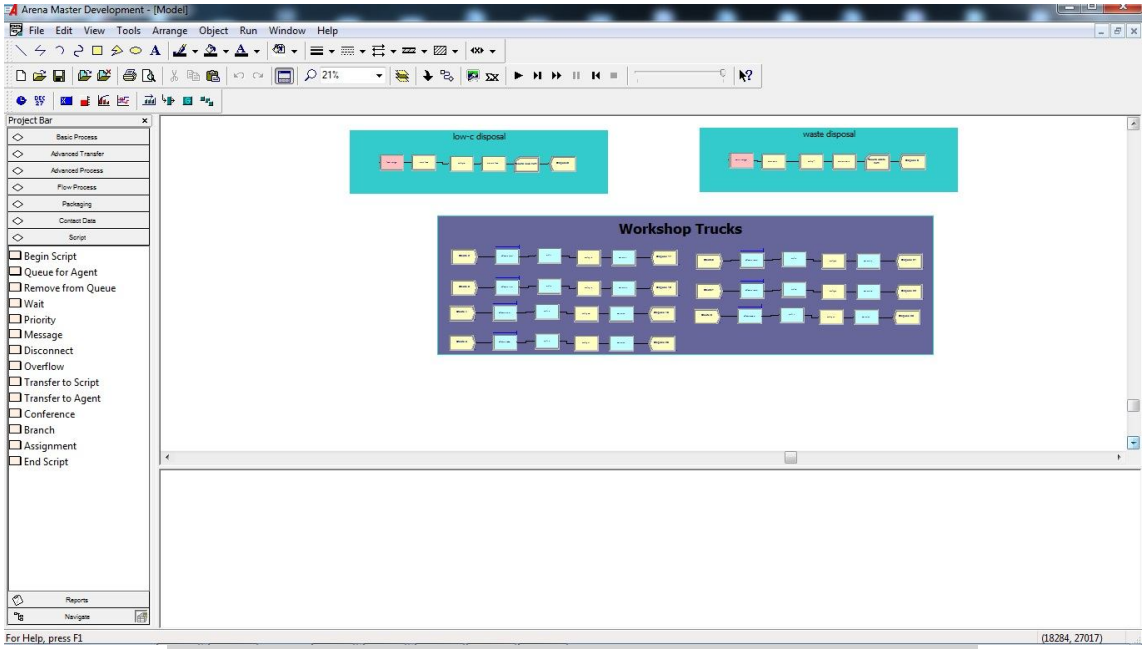
شکل 1. محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های استخراج و حمل انوع سنگ های معدنی



شکل 2. ادامه محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های استخراج و حمل انواع سنگ های معدنی



شکل 3. محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های بخش سنگ شکن (کراشر)



شکل 4. محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های کارگاه کامیون ها و تجهیزات حمل و نقل

شماری نشده