Archive of SID

پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی
دوره ۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷

بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی با استفاده از رویکرد شبه‌مدل: شبیه‌سازی سیستم کامیون- شاول

میلاد ابوالقاسمیان[۱]، حمیدرضا اسکندری[۲*]، هادی دارابی[۳]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، موسسه آموزش عالی مهر آستان، گیلان، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی صنایع و بهره‌وری، مرکز مطالعات مدیریت و توسعه فناوری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳ پذیرش: **۱۳۹۷/۰۸/۲۶**

چکیده

شبیه‌سازی یکی از تکنیک‌های مناسب برای تحلیل و ارزیابی رفتار پویای سیستم‌های پیچیده است. در این مقاله از یک مدل شبیه‌سازی که برای اعزام تجهیزات جابه‌جایی مواد در فرایند استخراج سنگ سولفید در مجتمع معدن مس سرچشمه توسعه داده شده است، استفاده می‌شود زیرا سیستم جابه‌جایی مواد و هزینه‌های مربوط به آن تأثیر به‌سزایی در هزینه‌های عملیاتی سیستم حمل و نقل در معادن ایفا می‌کند. در این مقاله تعیین مقدار بهینه تجهیزات جابه‌جایی در فرایند استخراج سنگ سولفید با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی شبه‌مدل محور انجام شده است. در مرحله بهینه‌سازی، مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم متناسب‌سازی شده که از راه شناسایی متغیرهای اثرگذار در سیستم

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: eskandari@modares.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از طراحی آزمایش‌ها تقریب زده شده است، حل می‌شود. شبه‌مدل تقریب‌زده شده به‌خوبی قادر است نتایج شبیه‌سازی را تخمین بزند، بنابراین می‌توان اعتبار آن را نتیجه گرفت. یافته‌های این رویکرد بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی نتایج قابل قبولی را برای طراحی مجدد و کنترل فرایند استخراج به منظور افزایش بهره‌وری در اختیار مدیران مجتمع معدن مس سرچشمه قرار می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از حل مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که با استقرار ترکیب بهینه پیشنهادی می‌توان سطح میزان تولید در فرایند استخراج را حفظ کرد و علاوه بر آن ۸ درصد در هزینه‌های موجود کاهش ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی، شبه‌مدل رگرسیون چند جمله‌ای، طراحی آزمایش‌های مجتمع معدن مس سرچشمه.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین پایه‌های اقتصاد هر کشور، منابع معدنی و ذخایر زیرزمینی آن کشور است. بخش معدن به عنوان یکی از حفره‌های زیربنایی اقتصاد، نقش اساسی در تأمین مواد اولیه صنایع دیگر 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 انکارناپذیر است. بدون تردید بهره‌برداری صحیح از معادن کشور، یک عامل مثبت و مهم در رشد و توسعه اقتصادی محسوب می شود. در معادن فرایندهای مختلفی از قبیل اکتشاف، حفاری تا استخراج وجود دارد که هر یک از اجزای متفاوتی تشکیل شده‌اند. در بین تمامی اجزای صنعت معدن، سیستم جابه‌جایی نقش قابل توجهی در هزینه‌های عملیاتی معادن دارا است [۱].

معادن شامل چندین پارامتر احتمالی هستند که مدلسازی از راه تکنیک‌های سنتی آن را خیلی پیچیده می‌سازد. یکی از مناسب‌ترین روش‌هایی که می‌تواند برای شناخت وضعیت جاری این سیستم استفاده شود، ابزار قدرتمند شبیه‌سازی است. شبیه‌سازی تقلیدی از عملکرد فرایند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است که این امکان را برای کاربر مهیا می‌سازد تا با انجام آزمایش رفتار سیستم واقعی را حدس بزند [٦-١].

www.SID.ir

Archive of SID

هدف اصلی این مقاله، ایجاد یک روش سیستماتیک برای تعیین مقدار بهینه تجهیزات جابه‌جایی مواد در فرایند تحت بررسی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی شبه‌مدل محور در مجتمع معدن مس سرچشمه است. کنترل میزان تولید در سطح فرایند نیازمند پاسخ به سؤال‌های «چه می‌شود اگر[1]» است که خود مستلزم در نظر گرفتن سناریوهای مختلفی برای مشخصه سیستم است. در این مقاله، یک مدل که قادر است میزان تولید در فرایند استخراج سنگ سولفید در مجتمع معدن مس را با اعمال محدودیت‌های مدیریتی بهبود ببخشد، ارائه خواهد شد. علاوه بر آن این مقاله نشان می‌دهد که چگونه از یک مدل شبیه‌سازی و شبه‌مدل رگرسیون می‌توان برای طراحی و بهینه‌سازی در یک سیستم واقعی استفاده کرد.

این مقاله به صورتی که مشخص شده است، سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم یک مرور ادبیات تاریخی ارائه شده است. در بخش سوم روش پژوهش نشان داده شده است. در بخش چهارم کاربرد روش پیشنهاد شده برای مطالعه موردی نشان داده شده است. در بخش پنجم نتایج به دست آمده ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات

بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی کاربرد گسترده‌ای در سیستم‌های تولیدی و خدماتی به منظور طراحی مجدد سیستم موجود یا توسعه سیستم جدید دارند [۷]. در پی معرفی مسائل بهینه‌سازی شبیه‌سازی پیچیده و با توجه به کارایی روش‌های شبه‌مدل محور در پاسخگویی به این مسائل به‌تدریج نظر محققان را به خود جلب کرد. در ادبیات بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی با استفاده از شبه‌مدل محور مطالعات گوناگونی وجود دارد که به این مسئله تأکید می‌کنند.

برای مثال بارتون [۸] به بررسی روش‌های مختلف برای انتخاب رابطه شبه‌مدل‌ها از طریق روش‌های چند جمله‌ای و مدل‌های خطی از طریق طرح آزمایش به روش تاگوچی پرداخت. مونت گومری و مایرز [۵] دیدگاه تاگوچی را با روش RSM[2] ترکیب کردند و با استفاده از آن

1. What–If questions
2. Response Surface Method (RSM)

www.SID.ir

Archive of SID

میانگین و واریانس خروجی سطح آزمایش، هدف مورد نظر آنها برآورد شده است. دنگیز و آکبای [۹]، یک شبه‌مدل رگرسیون به منظور تعیین اندازه بهینه دسته‌های تولیدی در واحد مونتاژ برای سیستم MRP و JIT[1] ارائه دادند. کلاینن و سارژنت [۳] با استفاده از طرح عاملی کسری دو سطحی به برآورد یک شبه‌مدل مرتبه اول به منظور تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی فرایند تولید در یک شرکت لوله‌های فلزی پرداختند. کلاینن و گاوری [۲] یک روش برای بهینه‌سازی مسائل چند هدفه با استفاده از روش RSM ارائه کردند که در آن از روش طرح ابر مکعب لاتین برای نمونه‌گیری و از روش GA[2] برای بهینه‌سازی استفاده شده است. دنگیز و همکاران [۱۰] با استفاده از روش RSM یک سیستم پشتیان تصمیم‌گیری (DSS)[3] به منظور پیش‌بینی تعداد ماشین‌آلات و تعداد کارگران توسعه دادند. دنگیز [۱۱] با استفاده از روش طراحی تاگوچی به بهینه‌سازی و شبیه‌سازی خط تولید مدار الکتریکی در یک شرکت الکترونیکی پرداخت. یالچینکایا و بایحان [۱۲] یک رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی شبه‌مدل محور با استفاده متدولوژی سطح پاسخ برای بهینه‌سازی میانگین زمان سفر مسافران در یک متروی شهری ارائه دادند. احمد و الخمیس [۱۳] یک رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی در جهت طراحی یک ابزار تصمیم‌گیری برای عملیات موجود در یک بخش اورژانس در یک بیمارستان دولتی کویت پیشنهاد دادند. دنگیز و همکاران [۷] یک مدل کنترل تولید را به کمک روش RSM ارائه دادند که قادر است نرخ عملیاتی کارگاه نقاشی را براساس پارامترهای کنترلی در تولیدات روزانه یک کارخانه اتوبوس‌سازی در کشور ترکیه بهبود ببخشد. زینالی و همکاران [۱٤]، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای تعیین بهینه ترکیب منابع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی[4] در جهت بهبود جریان و تراکم بیمار در بخش اورژانس بیمارستان مدرس تهران ارائه کردند. محلوجی و مقدم [۱۵] با استفاده از شبه‌مدل کرایگینگ یک روش جدید برای حل مسئله بهینه‌سازی زمان‌بندی قطارها در متروی تهران بر مبنای بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی ارائه دادند.

1. Just in Time (JIT)
2. Genetic Algorithm (GA)
3. Decision Support System (DSS)
4. Artificial Neural Networks (ANN)

www.SID.ir

Archive of SID

در مسائل بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی، استفاده از روش‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوعه، تبرید شبیه‌سازی شده و بهینه‌سازی ازدحام ذرات جایگاه ویژه‌ای دارند.

برای مثال الخمیس و احمد [١٦]، یک الگوریتم استوار برای مسائل بهینه‌سازی شبیه‌سازی مقید ارائه کردند. ویژگی اصلی این الگوریتم به کارگیری برنامه‌ریزی تصادفی برای تعریف محدودیت‌های غیرقطعی است. ساب تیل و همکاران [٦]، یک الگوریتم به منظور بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل در معادن روباز توسعه دادند. الگوریتم ارائه شده به‌وسیله آنها یک روش چند مرحله‌ای با رویکرد چندمعیاره با استفاده از برنامه‌ریزی خطی، شبیه‌سازی گسسته پیشامد و روش‌های فراابتکاری است که برای تخصیص اعزام کامیون برای انجام عملیات در نظر گرفته شده است. منا و همکاران [٤] ارائه‌دهنده روشی با استفاده از بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی به منظور ماکزیمم‌سازی بهره‌وری کلی ناوگان حمل و نقل در یک معدن روباز هستند. اسکندری و همکاران [١] برای ارزیابی عملکرد سیستم کامیون – شاول در یک معدن روباز از ابزارهای شبیه‌سازی گسسته پیشامد و روش‌های فراابتکاری استفاده کردند. برای بهینه‌سازی از دو روش فراابتکاری NSGA-II و Fast - PGA استفاده شده است.

٣- روش پژوهش

مدل‌های شبیه‌سازی گسسته پیشامد[1] نقش حالت فیزیکی سیستم را بازی می‌کنند به‌طوری که در آنها پارامترهای سیستم به عنوان ورودی و نتایج شبیه‌سازی به عنوان خروجی استفاده می‌شود [٧]. عموماً طراحان سیستم با مشکلاتی از قبیل انتخاب پارامترها برای بهبود یا حتی بهینه‌سازی نتایج خروجی مواجه می‌شوند که تعیین آنها از طریق آزمودن سناریوهای مختلف زمان زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. طراحی آزمایش‌ها[2] در رسیدن به مجموعه بهینه پارامترهای ورودی و همچنین در ارزیابی و تحلیل طراحی سیستم می‌تواند استفاده بشود [١٧].

1. Discrete Event Simulation (DES)
2. Design of Experiment (DOE)

www.SID.ir

Archive of SID

در این مقاله از تکنیک طرح آزمایش غیرخطی مکعب مرکزی[1] برای شناسایی اثر فاکتورهای چندگانه در فرایند استخراج سنگ سولفید در مجتمع معدن مس سرچشمه استفاده شده است. با استفاده از این طرح، اثر تقابل موجود بین فاکتورهای انتخاب شده مؤثر بر عملکرد سیستم را می‌توان نشان داد. اثر اصلی بین فاکتورها و تقابل میان فاکتورها در معادله (۱) نشان داده شده است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \beta_{ij} X_{ij} + \sum_{l=1}^{k} \beta_l X_l^2 + \varepsilon \qquad (۱)$$

که Y سطح پاسخ، β_0 جزء ثابت معادله رگرسیون، β_i اثر اصلی فاکتورها، β_{ij} اثر متقابل بین دو فاکتور i و j است (به‌طوری که $i \neq j$) و β_l اثر درونی فاکتورها است.

شبه‌مدل‌ها بازی‌کننده نقش تابع هدف در فرایند بهینه‌سازی هستند. در واقع شبه‌مدل‌ها یک خلاصه آماری از نتایج شبیه‌سازی را مهیا می‌کنند و تحلیلگران بسیاری به اهمیت این نوع از مدل‌ها پرداخته‌اند [۱۱-۱۰]. در این پژوهش برای یکپارچه‌سازی مدلسازی ریاضی و مدل شبیه‌سازی رویکردی تحلیلی به منظور بهینه‌سازی تجهیزات جابه‌جایی مواد در فرایند استخراج سنگ سولفید در مجتمع معدن مس سرچشمه به کمک شبه‌مدل پیشنهاد شده است.

مسئله بهینه‌سازی تخمینی ایجاد شده به کمک ادغام مدلسازی ریاضی و مدل شبیه‌سازی را می‌توان به کمک رابطه (۲) نشان داد.

$$\text{Max } f(\theta) + \varepsilon(\theta) \qquad (۲)$$

$$\text{Subject to}$$

$$g_i(\theta) \leq B_i \qquad i = 1,2,\dots,n$$

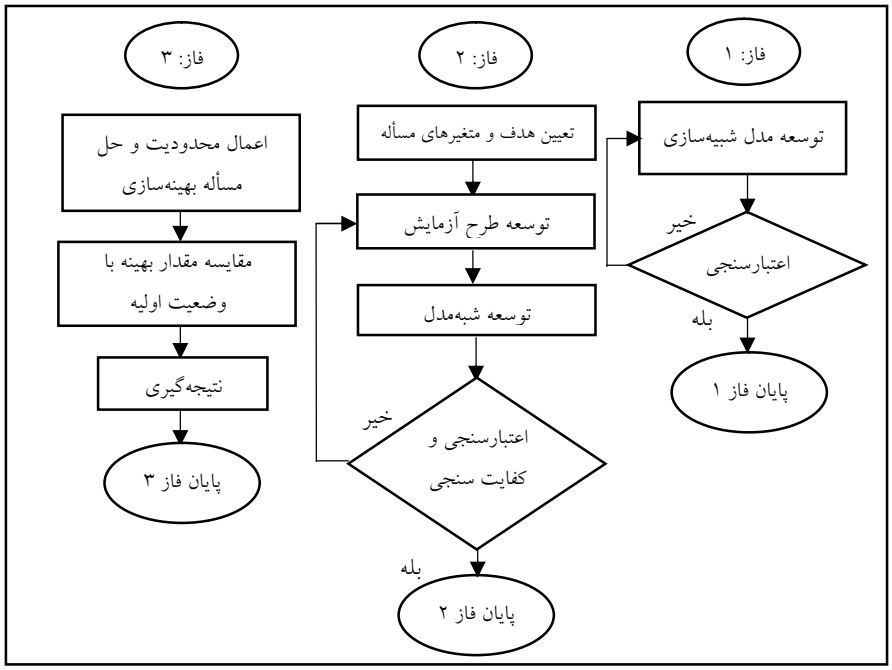
در رابطه (۲)، $\boldsymbol{\theta}$ فضای طراحی ایجاد شده به کمک متغیرهای تصمیم است. در واقع $\boldsymbol{\theta}$ یک بردار از متغیرهای تصمیم در فضای طراحی است. $f(\theta)$ تابع هدف در فضای طراحی شده $\boldsymbol{\theta}$ است. $\varepsilon(\theta)$ جزء تصادفی مسئله است که مقدار آن عموماً ناچیز است. $g_i(\theta)$، i امین محدودیت مسئله است، B_i کل بودجه اختصاص‌یافته به محدودیت i ام است و n تعداد کل محدودیت‌ها است [۱٤].

1. Central Composite Design (CCD)

www.SID.ir

Archive of SID

به صورت شماتیک در شکل ۱، نحوه پیداکردن شبه‌مدل مناسب در این پژوهش نشان داده شده است. از این طرح برای بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی شبه‌مدل محور استفاده شده است.



شکل ۱ فلوچارت کلی پژوهش در حل مسئله تعیین مقدار بهینه تجهیزات جابه‌جایی

٤- مطالعه موردی: سیستم کامیون - شاول معدن مس سرچشمه

٤-١- تشریح سیستم

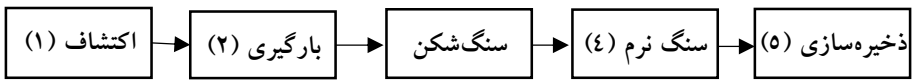
در این مقاله رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در سیستم کامیون- شاول مجتمع معدن مس سرچشمه مطالعه شده است. مجتع مس سرچشمه در استان کرمان و در جنوب‌شرقی ایران واقع شده است. سرچشمه دارای یک معدن بزرگ روباز است که دومین معدن بزرگ مس جهان محسوب می‌شود. این معدن در ٦٥ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان کرمان و۵۰ کیلومتری جنوب شهرستان رفسنجان واقع شده است. ارتفاع متوسط منطقه در حدود ٢٦٠٠ متر است که بالاترین نقطه آن حدود ۳۰۰۰ متر است. در این معدن مطالعه زمین و حفر

www.SID.ir

Archive of SID

کانال‌های زیرزمینی بخش اولیه فرایند تولید سنگ است که جمع‌آوری داده، تجزیه و تحلیل، به‌روزرسانی اطلاعات از حفاری تا استخراج را شامل می‌شود. نتایج حاصل از پردازش داده‌ها 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 برنامه‌های حفاری بخش برنامه‌ریزی است. پس از اجرای حفاری، نوع مواد معدنی استخراج شده باید مشخص شود [۱].

مدل مفهومی سیستم جابه‌جایی مواد و تجهیزات در معدن مس سرچشمه در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، فرایند استخراج سنگ سولفید دارای ۵ ایستگاه کاری است. در اولین مرحله رویکرد پیشنهاد شده، ایجاد یک مدل شبیه‌سازی برای ایستگاه‌های کاری در این مجتمع با استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد در نظر گرفته شده است، این مدل توسط اسکندری و همکاران [۱] توسعه داده شده است. در مرحله مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار ARENA، هر شیفت کاری شبانه‌روزی معادل ۲٤ ساعت با سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری حالت پایدار[1] سیستم نخست لازم است مدل به مدت طولانی اجرا شود. طول هر تکرار اجرای شبیه‌سازی ۳۰ روز است که شامل ٤ روز دوره گرم‌کردن[2] سیستم می‌باشد. فواصل اطمینان خروجی شبیه‌سازی به منظور مقداردهی اولیه در تکرارها در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) قرار دارد. از این فاصله اطمینان برای مقایسه خروجی شبیه‌سازی با مقدار واقعی آن استفاده می‌شود. تعداد تقریبی تکرارها با استفاده از آزمون و خطا وقتی که دقت اندازه‌گیری میانگین و طول زمان اجرا برای هر فاصله بیشتر از ۵ درصد نباشد، به دست می‌آید. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اگر تعداد تکرارها ۱۰ در نظر گرفته شود مقدار دقت اندازه‌گیری در این محدوده قرار می‌گیرد. فرایند استخراج سنگ سولفید نشان داده شده در شکل ۲ با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی ARENA مدلسازی شده است.



شکل ۲ مدل مفهومی سیستم استخراج سنگ سولفید

1. Steady-state
2. Warm-up period

www.SID.ir

Archive of SID

اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی از راه مقایسه نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل با نتایج واقعی حاصل می‌شود. با توجه به عدم وجود تفاوت معنادار بین این دو سری می‌توان اعتبار مدل شبیه‌سازی را نتیجه گرفت. براساس تجزیه و تحلیل نتایج خروجی مدل شبیه‌سازی وضعیت موجود نشان می‌دهد که تعداد کامیون‌های موجود در صف ایستگاه سنگ‌شکن تقریباً بالا است. همچنین طول صف کامیون‌ها برای بارگیری سنگ سولفید تا حدودی طولانی است، این به آن معنا است که ایستگاه سنگ‌شکن در زیر سیستم مورد نظر، یک ایستگاه گلوگاهی[1] است. بنابراین عناصر کاری سرویس‌دهنده به این ایستگاه‌های کاری که معمولاً در این معدن از کامیون‌های ۱۰۰تن، ۱۲۰ تن، ۱۵۰ تن و ۲٤۰ تن برای حمل سنگ سولفید استفاده می‌شود به عنوان فاکتورهای اثرگذار انتخاب شده‌اند. درواقع این عناصر کاری، فاکتورهای بحرانی اثرگذار بر فرایند استخراج سنگ سولفید در مجتمع معدن مس سرچشمه محسوب می‌شوند. هدف اصلی این مقاله این است که با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی شبه‌مدل محور، مقدار بهینه تجهیزات جابه‌جایی در فرایند استخراج سنگ سولفید تعیین شود به‌طوری که با به‌کارگیری متوازن و بهینه تجهیزات جابه‌جایی باعث ایجاد بهبود در توان تولیدات ماهانه سنگ سولفید و کاهش در هزینه‌های موجود شود.

٤-۲- توسعه شبه‌مدل

اولین مرحله برای ساخت شبه‌مدل، انتخاب متغیرهای ورودی و تعیین سطوح برای آنها است [۱۸]. این متغیرها عبارتند از:

A. تعداد کامیون‌های ۱۰۰ تن (X_1) با سطح کمینه ۱۲ و سطح بیشینه ۳٦
B. تعداد کامیون‌های ۱۲۰ تن (X_2) با سطح کمینه ۱۰ و سطح بیشینه ۲۰
C. تعداد کامیون‌های ۱۵۰ تن (X_3) با سطح کمینه ۱۰ و سطح بیشینه ۲۰
D. تعداد کامیون‌های ۲٤۰ تن (X_4) با سطح کمینه ۱ و سطح بیشینه ۳

متغیرهای A، B، C و D، متغیرهای مستقل هستند که از آنها به عنوان ورودی در مدل شبیه‌سازی برای تعیین متغیر وابسته، یعنی میزان استخراج سنگ سولفید مورد استفاده قرار

1. Bottleneck station

www.SID.ir

Archive of SID

می‌گیرد. برای هر چهار متغیر A، B، C و D، سه سطح در هر ترکیب در نظر گرفته شده است. فواصل موجود برای متغیرهای مستقل به‌ترتیب ۲۵، ۱۱، ۱۱ و ۳ است. تعداد کل ترکیبات برای اجرای شبیه‌سازی $25 \times 11 \times 11 \times 3 = 9075$ است. به جای اجرای شبیه‌سازی به تعداد ۹۰۷۵ بار برای تعیین ترکیب ممکن متغیرها از طرح مکعب مرکزی (CCD) استفاده شده است. این طرح با شبه‌مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم مطابقت کامل دارد. طرح مکعب مرکزی شامل یک طراحی فاکتوریل کامل یا کسری دو مرحله‌ای به همراه نقاط مرکزی است که تعدادی نقطه به نام نقاط غیر مرکزی به آن اضافه شده است. با استفاده از این طرح انحنای موجود در سیستم قابل تخمین خواهد بود. اگر فاصله مرکز طراحی تا نقاط فاکتوریل برای هر متغیر ± 1 در نظر گرفته شود فاصله مرکز طراحی تا نقاط غیرمرکز $\pm\alpha$ خواهد بود که در آن $|\alpha| > 1$ است. براساس روش CCD برای سه متغیر کلیدی، ۲۵ آزمایش طراحی و اجرا شده است که برای هر متغیر سه سطح کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های ایجاد شده براساس روش CCD دارای ۱ نقطه مرکزی و ۲٤ نقطه غیر مرکزی هستند. میانگین خروجی هر آزمایش در ۱۰ بار تکرار مدل شبیه متغیر پاسخ مسئله است. در این پژوهش برای طراحی آزمایش‌ها و پیدا کردن مقادیر پارامترهای شبه‌مدل از نرم‌افزار Design Expert 10 استفاده شده است.

شبه‌مدل رگرسیون چند جمله ای درجه دوم کاندید با ١٤ جمله برای چهار متغیر کلیدی فرایند در معادله (٤) نشان داده شده است.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_1 X_2 + \beta_6 X_1 X_3 + \beta_7 X_1 X_4 + \beta_8 X_2 X_3 + \beta_9 X_2 X_4 + \beta_{10} X_3 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_2^2 + \beta_{13} X_3^2 + \beta_{14} X_4^2 \qquad (٤)$$

در معادله (٤)، y میزان استخراج سنگ سولفید در مجتمع است. β_0 اثر ثابت مدل است. $\beta_1 - \beta_4$ ضرایب اثرات اصلی هستند. $\beta_5 - \beta_{10}$ ضرایب آثار متقابل بین متغیرها هستند. $\beta_{11} - \beta_{14}$ ضرایب آثار درونی متغیرها هستند و ε مقدار خطای جملات است. نتایج شبیه‌سازی برای طرح آزمایشی جمع‌آوری شده است. ضرایب β_i $(i = 0, \dots, 14)$ برای شبه‌مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم تخمین زده شده است. نتایج آماری و تخمین ضرایب فاکتورهای آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۱ فاکتورهایی که مقدار P-Value آنها کمتر یا برابر ۰/۰۵ است در مدل باقی می‌مانند. R^2 تعدیل شده برابر با ۹۷/۱۵

www.SID.ir

Archive of SID

درصد تعیین شده است که تغییر در متغیرهای مستقل مدل (تعداد بهینه کامیون) را نشان می‌دهد. همچنین مقدار تعیین شده ۹۹/۰۲ درصد برای ضریب R^2 به اندازه کافی بالا است که نشان می دهد بین مقادیر آزمایش و پیش‌بینی تفاوت معناداری وجود ندارد. نتایج زیر را می‌توان از راه تحلیل مقدار P-Value به‌دست آورد که عبارتند از:

۱. فاکتورهای اصلی X_3, X_2 و X_4 از نظر آماری معنیادار هستند اما X_1 از نظر آماری معنادار نیست، زیرا سطح احراز P-Value مدل برای آن به‌دست نیامده است. اما ما به‌طور عمد با توجه به اینکه این متغیر جز متغیرهای تصمیم مسئله محسوب می‌شود و با توجه به اثر کم، از آن در مدل استفاده شده است؛

۲. اثر متقابل بین متغیرهای X_2X_3 و X_3X_4 از نظر آماری معنادار است و سایر آثار متقابل معنادار نیست؛

۳. اثر درونی X_3^2 از نظر آماری معنادار است ولی سایر آثار درونی معنادار نیست؛

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل مقادیر P-Value، فاکتورهایی که آثار آماری معناداری دارند، در شبه‌مدل باقی می‌مانند و فاکتورهایی که آثار آماری معنادار ندارند از مدل نهایی حذف می‌شوند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، شبه‌مدل را به صورتی که در معادله (۵) نشان داده شده است، متناسب‌سازی می‌کنیم.

$$Y = -2848/33 + 1/28X_1 + 148/16X_2 + 1793/99X_3 + 1094/48X_4 - 8/22X_2X_3 - 63/46X_3X_4 - 48/84X_3^2 \quad (۵)$$

در مجتمع معدن مس سرچشمه می‌توان از شبه‌مدل بالا برای پیداکردن تعداد بهینه کامیون جهت اعزام، برای کنترل سطح تولید در طول فرایند استخراج سنگ سولفید، با اعمال محدودیت‌های مدیریتی زمانی که اعتبار آن تأیید شود، استفاده کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ نتایج آماری و تخمین ضرایب Design Expert برای Y

جمله	ضریب کدبندی	ضریب واقعی	ضریب خطای استاندارد	آماره-t	مقدار-P
ثابت	۱۵۰۸۹/۲٤	-۲۸٤۸/۳۳	۷۸/٦۳	۱۹۱/۹۰۲	۰/۰۰۰۱
X_1	۷/٦۰	۱/۲۸	٤۲/۹۲	۰/۱۷۷	۰/۸٦۲۹
X_2	۱۸٦/٤٦	۱٤۸/۱٦	٤۳/۹۲	٤/۳۳۳	۰/۰۰۱۵
X_3	۱۱۲٦/۰۱	۱۷۹۳/۹۹	٤۲/۹۲	۲٦/۲۳۵	۰/۰۰۰۱
X_4	۲۵۸/۲۰	۱۰۹٤/٤۸	٤۲/۹۲	٦/۰۱۱	۰/۰۰۰۱
X_1X_2	۲۲/۳۷	۰/۳۷	٤۵/۵۳	۰/٤۹۱	۰/٦۳۳۸
X_1X_3	-۸/۲۸	-۰/۱٤	٤۵/۵۳	۰/۱۸۱	۰/۸٦۹۲
X_1X_4	-۲۵/۹۲	-۲/۲٦	٤۵/۵۳	۰/۵٦۹	۰/۵۸۱۷
X_2X_3	-۲۰۵/۵۲	-۸/۲۲	٤۵/۵۳	٤/۵۱۳	۰/۰۰۱۱
X_2X_4	٦۷/۵۳	-۱۳/۵۱	٤۵/۵۳	۱/٤۸۳	۰/۱٦۸۸
X_3X_4	-۳۱۷/۲۸	-٦۳/٤۵	٤۵/۵۳	٦/۹٦۸	۰/۰۰۰۱
X_1^2	۰/٤٦	۰/۰۰۳	۱۱٤/۱۲	۰/۰۰٤	۰/۹۹٦۹
X_2^2	-۱۹/٦۰	-۰/۷۸	۱۱٤/۱۲	۱/۷۱۷	۰/۸٦۷۱
X_3^2	-۱۰۹٦/۰٤	-٤۳/۸٤	۱۱٤/۱۲	۹/٦۰٤	۰/۰۰۰۱
X_4^2	-۲/۰٤	-۲/۰٤	۱۱٤/۱۲	۰/۰۱۷	۰/۹۸٦۱

٤-۳- اعتبارسنجی شبه‌مدل

اندازه‌گیری اعتبار شبه‌مدل نشان می‌دهد که آیا مدل مبین رفتار سیستم واقعی است یا خیر. در واقع به کمک اعتبارسنجی می‌توان پی برد که آیا مدل به‌درستی از سوی طراح ساخته شده است یا خیر؟ [۱]. برای اعتبارسنجی شبه‌مدل متناسب‌سازی شده در این پژوهش از مقدار خطای مطلق نسبی[1] استفاده شده است. براساس این روش شبه‌مدل در یک مقدار تصادفی از فضای طراحی – به غیر فضای آزمایش- مورد آزمایش قرار می‌گیرد. خروجی به‌دست آمده از اجرای آزمایش در شبه‌مدل را MO و خروجی به‌دست آمده از اجرای مدل شبیه‌سازی را SO می‌نامیم. مقدار خطای مطلق نسبی بین شبه‌مدل و مدل شبیه‌سازی از راه معادله (٦) محاسبه می‌شود [۱۰-۹].

1. Absolute Relative Error (ARE)

www.SID.ir

Archive of SID

$$ARE\ (SO, MO) = \frac{|SO-MO|}{SO} \quad (٦)$$

متوسط مقدار ARE شبه‌مدل در جدول ۲، ۲ درصد در ۱۰ تکرار برآورد شده است. بنابراین از این مقدار به‌دست آمده نتیجه گرفته می‌شود که شبه‌مدل می‌تواند به عنوان مدل انتزاعی مدل شبیه‌سازی استفاده شود زیرا با توجه به قرار گرفتن در فاصله اطمینان ۹۵ درصد میزان خطای برآورد شده کمتر از ۵ درصد خطای مجاز در این فاصله است.

جدول ۲ نتایج اعتبارسنجی شبه‌مدل رگرسیون

آزمایش تصادفی	متغیرها					نتایج خروجی		ARE_{10}
	X_4	X_3	X_2	X_1	شبه‌مدل	شبیه‌سازی ۱۰ تکرار		
۱	۲	۱۲	۱۱	۱۳	۱۳۹۵۹	۱٤۱۹۹		۰/۰۱
۲	۱	۱٤	۱٦	۲۰	۱۵۲۹۷	۱٤۹۰۷		۰/۰۲
۳	۳	۱۷	۱۳	۳۲	۱۵۵٤۹	۱۵۱۰۸		۰/۰۲
٤	۱	۱۹	۱٤	۱۸	۱۵۵۹۲	۱۵۰۸۵		۰/۰۳
۵	۲	۱۳	۱۸	۳۰	۱۵٤٦٤	۱۵۰٤۱		۰/۰۲

٤-٤- مدلسازی ریاضی و بهینه‌سازی

برای کنترل تابع هدف در برنامه‌ریزی سیستم‌های پیچیده، عموماً تکنیک‌های بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ریاضی به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۷]. ساختار کلی مسئله برنامه‌ریزی که برای کنترل تولیدات ماهانه در فرایند استخراج سنگ سولفید ساخته شده است، در معادلات (۷) تا (۱۰) نشان داده شده است. در این مسئله بهینه‌سازی، Y، تابع میزان استخراج سنگ سولفید در مجتمع معدن مس سرچشمه با متغیرهای تصمیم X_1، X_2، X_3 و X_4 است که باید ماکزیمم شود، این تابع فرم تحلیلی ندارد و از راه روش پیشنهادی توضیح داده شده در بخش‌های قبل برآورده شده است. C_i، هزینه عملیاتی ماهانه تجهیزات جابه‌جایی است. B، حداکثر بودجه قابل دسترس ماهانه است و L_i و U_i، بیشترین و کمترین مقدار سطوح ظرفیت تجهیزات جابه‌جایی است. تمامی پارامترهایی که به‌وسیله مدیریت از قبل تعیین شده است، در جدول ۳ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ پارامترهای از پیش تعیین شده مدل ریاضی [۱]

متغیر تصمیم	L_i	U_i	هزینه(C_i)
کامیون ۱۰۰ تن	۱۲	۳٦	٤٥
کامیون ۱۲۰ تن	۱۰	۲۰	٦۹
کامیون ۱۵۰ تن	۱۰	۲۰	٦۷
کامیون ۲٤۰ تن	۱	۳	۱۱۸

$$\max Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (۷)$$

$$s.t$$

$$\sum_{i=1}^{4} C_i X_i \leq B \quad (۸)$$

$$L_i \leq X_i \leq U_i \qquad \text{برای } i = 1,2,3,4 \quad (۹)$$

$$X_i \ integer \qquad \text{برای } i = 1,2,3,4 \quad (۱۰)$$

بنابراین فرم کلی مسئله براساس معادلات (۱۱) تا (۱۷) نوشته خواهد شد.

$$\text{maxY} = -2848/33 + 1/28X_1 + 148/16X_2 + 1793/99X_3 + 1094/48X_4 - 8/22X_2X_3 - 63/46X_3X_4 - 43/84X_3^2 \quad (۱۱)$$

$$s.t$$

$$12 \leq X_1 \leq 36 \quad (۱۲)$$

$$10 \leq X_2 \leq 20 \quad (۱۳)$$

$$10 \leq X_3 \leq 20 \quad (۱٤)$$

$$1 \leq X_4 \leq 3 \quad (۱۵)$$

$$45X_1 + 69X_2 + 67X_3 + 118X_4 \leq 4576 \quad (۱٦)$$

$$X_i \ Integer \qquad \text{برای } i = 1,2,3,4 \quad (۱۷)$$

مسئله بهینه‌سازی غیرخطی به کمک نرم‌افزار LINGO حل شد تا ترکیب بهینه تجهیزات جابه‌جایی از طریق حل مدل به صورت $X_1 = ۳٦$، $X_2 = ۲۰$، $X_3 = ۱۳$ و $X_4 = ۳$ به دست آید. با تعیین تابع هدف شبه‌مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم، بهترین ترکیب ممکن تجهیزات جابه‌جایی به منظور اعزام به سایر نقاط فرایند حاصل شده است. به کمک روش

www.SID.ir

Archive of SID

پیشنهادی ارائه شده، ترکیب گوناگونی برای منابع در مقایسه با وضعیت جاری در فرایند به‌دست آمده است. مدل تخمینی ارائه شده پیشنهاد می‌دهد که در فرایند استخراج سنگ سولفید مجتمع معدن مس سرچشمه لازم است ۷ عدد از کامیون ۱۵۰ تن کم شود، در مقابل ۱ عدد به تعداد کامیون‌های ۲٤۰ تن اضافه شود و سایر کامیون‌ها بدون تغییر باقی بمانند. این تغییرات به‌وجود آمده باعث می‌شود تا میزان تولیدات در فرایند از مقدار ۱۵۱۰۵ تن به مقدار ۱۵۱۲۰ تن افزایش پیدا کند که نشان‌دهنده افزایش جزئی و حفظ سطح تولید است. بنابراین ترکیب بهینه قادر است سطح تولیدات موجود را حفظ کند. اما علاوه بر این تغییرات مذکور باعث می‌شود تا میزان هزینه‌های موجود از ٤٥٧٦ به ٤۲۲٥ کاهش پیدا کند که نشان‌دهنده ۸ درصد کاهش در مصرف هزینه‌ها است. در جدول ٤ مقایسه بین وضعیت موجود و پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ٤ مقایسه بین وضعیت طراحی موجود و طراحی بهینه

وضعیت	متغیر				میزان تولید	هزینه تولید
	X_4	X_3	X_2	X_1		
موجود	۲	۲۰	۲۰	۳٦	۱۵۱۰۵	٤٥۷٦
بهینه	۳	۱۳	۲۰	۳٦	۱۵۱۲۰	٤۲۲٥

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری به منظور اعزام بهینه تجهیزات جابه‌جایی مواد در فرایند استخراج سنگ سولفید در مجتمع معدن مس سرچشمه در کرمان توسعه داده شده است. این مدل قادر است میزان تولید در زیرسیستم مورد نظر را با توجه به متغیرهای اثرگذار در فرایند تخمین بزند. در این مقاله نشان داده شده است که چگونه یک تحلیلگر می‌تواند به‌سادگی با استفاده از روش بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی شبه‌مدل محور، مسئله موجود در یک سیستم پیچیده را مدلسازی و حل کند. با استفاده از متغیرهای اثرگذار در فرایند، طراحی آزمایش‌ها و همچنین تکنیک‌های اعتبارسنجی، یک شبه‌مدل به عنوان تابع

www.SID.ir

Archive of SID

هدف مسئله تقریب زده شده است. این شبه‌مدل از میان شبه‌مدل‌های کاندید رگرسیون انتخاب شده است. شبه‌مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم انتخاب شده در واقع عملکرد بهتری از نظر دقت، اعتبار و کفایت آماری نسبت به سایر شبه‌مدل‌های رگرسیون داشته است. فرایند بهینه‌سازی به منظور تعیین نقطه نزدیک بهینه[1] منابع با در نظر گرفتن محدودیت مدیریتی (۱۶) و همچنین سایر محدودیت‌ها (۱۲)، (۱۳)، (۱٤) و (۱۵) به اجرا درآمد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مقادیر فضای آزمایش نشان داد که کارایی مدل پیشنهادی به حد کافی قابل قبول است. با استفاده از ترکیب شدنی، بیشترین سطح تولید در فرایند استخراج سنگ سولفید، یعنی ۱۵۱۲۰ تن در ماه محاسبه شد که نشان می‌دهد می‌توان از طریق جایگزینی ترکیب بهینه در سیستم، میزان تولید در استخراج سنگ سولفید را نسبت به حالت اولیه حفظ کرد، علاوه بر این، هزینه به‌کارگیری منابع کلیدی را نیز ۸ درصد کاهش داد که باعث ۳۵۱ واحد پولی صرفه‌جویی (از ٤۵۷٦ به ٤۲۲۵) می‌شود.

٦- منابع

[1] Eskandari H. R., Darabi H., Hosseinzadeh *S. A. H. (*2013) "Simulation and Optimization of Haulage System of an Open-Pit Mine"; Proceedings of the 13th Summer Computer Simulation Conference, Article No. 37, Toronto, Ontario, Canada.

[2] Kleijnen J. P. C., Gaury E. G. A. (2001) *Optimization versus robustness in simulation: A practical methodology with a production-management case-study*, Citeseer.

[3] Kleijnen J. P. C., Sargent R. G. (2000) "A methodology for fitting and validating metamodels in simulation"; *European Journal of Operational Research*, 120: 14 – 29.

[4] Mena R., Zio E., Kristjanpoller F., Arata A. (2013) "Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints"; *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(1): 113-119.

[5] Montgomery D. C., Myers, R. H. (1995) "Response surface methodology"; *Design and Analysis of Experiments,* pp. 445-474.

[6] Subtil R. F., Silva D. M., Alves J. C. (2011) "A practical approach to truck dispatch for open pit mines"; in 35thAPCOM Symposium, pp. 24-30.

1. Near Optimum

www.SID.ir

Archive of SID

[7] Dengiz B., Tansel Y., Onder B. (2015) "A meta model based simulation optimization using hybrid simulation – analytical modeling to increase the productivity in automotive industry"; *Mathematics and Computers in Simulation*.

[8] Barton R. R. (1992) "Meta-models for simulation input–output relations"; Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 289-299.

[9] Dengiz B., Akbay K. S. (2000) "Computer Simulation of a PCB Production Line: Meta – Modeling Approach"; *International Journal Production Economy*, 63: 195 – 205.

[10] Dengiz B., Bektas T., Ultanir A. E. (2006) "Simulation optimization based DSS application: A diamond tool production line in industry"; *Simulation Model Practice Theory*, 14(3): 296 – 312.

[11] Dengiz B. (2009) "Redesign of PCB Production Line with Simulation and Taguchi Design"; Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 2197 – 2204.

[12] Yalçınkaya Ö., Bayhan G. M. (2009) "Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology"; *European journal of operational research*, 196(1): 225-233.

[۱۳] Ahmed M. A., Al-Khamis T. M. (2009) "Simulation optimization for an emergency department healthcare unit in Kuwait"; *European Journal of Operational Research*, 198: 936-942.

[۱٤] Zeinali F., Mahootchi M., Sepehri M M. (2015) "Resource Planning in the Emergency Department: A Simulation – Based Meta Modeling Approach"; *Simulation Modeling Practice and Theory*, 53(2): 123-148.

[۱۵] مقدم سمیرا، محلوجی هاشم (۱۳۹٦)، (زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه مترو با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار از طریق شبیه‌سازی)؛ *مجله علمی پژوهشی مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شریف*.

[۱٦] Al-Khamis T. M., Ahmed M. A. (2005) "Simulation–based optimization for repairable systems using practice swarm algorithm"; Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp.857-861.

[17] Ic Y.T. (2012) "an experimental design approach using TOPSIS method for the selection of computer-integrated manufacturing technologies"; *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28: 245–256.

www.SID.ir