Archive of SID

پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی
دوره ۸، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۷

تخمین پارامتریک هزینه‌های ماشین‌آلات بارگیری و باربری در معادن روباز

محمد حبیبی[۱]، احمدرضا صیادی*[۲]، محمدرضا خالصی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- دانشیار، گروه استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳- استادیار، گروه فراوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۳۹٦/۰٤/۰۳ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۲

چکیده

عملیات بارگیری و باربری بخش مهمی از چرخه فرایند تولید در معادن روباز محسوب شده و سهم قابل توجهی از قیمت تمام شده تولید را به خود اختصاص می‌دهد. به منظور ارزیابی گزینه‌های فنی و تصمیم‌سازی در مرحله طراحی و مطالعات امکان‌سنجی پروژه‌های معدنی، دسترسی به مدل‌های تخمین هزینه سریع و کارآمد ضروری بوده و دقت و اعتبار آن‌ها از جمله عوامل بحرانی در موفقیت پروژه محسوب می‌شود. در این تحقیق مدلی جهت تخمین هزینه‌های این ماشین‌آلات با استفاده از تحلیل رگرسیون تک و چند متغیره ارائه شده است. تحلیل چند متغیره با استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی صورت گرفته است. ماشین‌آلات مورد مطالعه شامل بارگیرهای رایج نظیر شاول‌های هیدرولیکی و کابلی، لودر چرخ‌لاستیکی، کج‌بیل و کامیون یکپارچه باربر می‌باشند. توابع هزینه بر اساس نوع هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی تفکیک شده‌اند. هریک از اقلام هزینه‌های عملیاتی نیز به صورت تابعی مجزا ارائه شده است. متغیر مستقل در تحلیل تک متغیره ظرفیت بارگیری و باربری بوده و در چند متغیره بسته به نوع دستگاه شامل متغیرهای مشخصهٔ هر ماشین از جمله ظرفیت جام، ارتفاع بارگیری/ تخلیه، عمق

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

www.SID.ir

Archive of SID

حفر، طول بازو و توان موتور می‌باشند. کارائی هریک از توابع هزینه چند متغیره با استفاده از میانگین خطای مطلق سنجیده و بیشینه آن‌ها به ۱۷درصد برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: هزینه، ماشین‌آلات بارگیری و باربری، معادن روباز، رگرسیون، تحلیل مولفه‌های اصلی

۱- مقدمه

بارگیری و باربری از جمله عملیات اصلی چرخه تولید در معادن روباز محسوب شده و به ترتیب تا ۲۰ و ۷۰ ٪ از هزینه عملیاتی را می‌توانند به خود اختصاص دهند [۱]. بخش عمده این هزینه مربوط به ناوگان ماشین‌آلات بوده که عمدتا به‌صورت مجموعه "شاول-کامیون" و یا "لودر-کامیون" است. هر گونه تصمیم‌گیری در خصوص ادامه یا توقف پروژه‌های معدنی در گرو تخمین هزینه با صحت و دقت کافی است [۲]. تخمین دست پایین هزینه‌ها ممکن است منجر به انتخاب‌های اشتباه و شروع پروژه‌های غیراقتصادی شود. در صورتی که هزینه‌ها بیش از اندازه واقعی تخمین زده شوند، یا به دلیل غیر سودده نشان دادن پروژه فرصت سرمایه‌گذاری را منتفی می‌کنند، یا تا حد زیادی میزان سود ناشی از انجام پروژه را کاهش می‌دهند [۳]. **در مراحل اولیهٔ مطالعات امکان‌سنجی، اطلاعات مورد نیاز برآوردکنندگان هزینه به سهولت در دسترس نیست. بنابراین از مدل‌های تخمین هزینه با قابلیت تخمین سریع و با دقت کافی به منظور مقایسه گزینه‌های مختلف طراحی و انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها استفاده می‌شود.** مدل‌های تخمین هزینه موجود غالبا یا به علت قدمت زیاد و یا محدود بودن متغیرهای کنترل کننده هزینه از کارایی لازم برخوردار نیستند و نیاز به توسعه مدل‌های روزآمد و با دقت کافی وجود دارد [٤]. در این تحقیق به این مهم پرداخته و مدل جامع و روزآمدی برای تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای، عملیاتی و همچنین اقلام اصلی هزینه عملیاتی ماشین‌آلات اصلی عملیات تولیدی در معادن روباز ارایه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

روش‌های تخمین هزینه متعددی تاکنون ارایه شده و به صورت‌های مختلفی نیز براساس ویژگی‌های فرآیند تخمین طبقه‌بندی شده‌اند. بوهم روش‌های تخمین هزینه را در دسته‌های الگوریتمی، قضاوت خبرگان، مقایسه‌ای و روش bottom-up تقسیم می‌کند [۵]. Zhuang و همکارانش روش‌های تخمین هزینه را در دسته‌های تفکیک جزیی سنتی، تفکیک ساده شده، برپایه تکنولوژی گروهی، رگرسیون محور و فعالیت محور دسته‌بندی کرده‌اند [٦]. Ben-Arieh و Qian این دسته‌بندی را به صورت شهودی[1]، قیاسی، پارامتری و تحلیلی انجام داده‌اند [۷]. Shehab و Abdalla به ذکر دسته‌های شهودی، پارامتری، متغیر محور[2] و تولیدی[3]، بدون ارائه تعریف دقیقی از آن‌ها پرداخته‌اند [۸]. Roy پنج روش سنتی، پارامتریک، ویژگی محور، مورد محور و شبکه‌های عصبی مصنوعی را معرفی می‌کند [۹]. Cavalieri و همکاران سه رویکرد مقایسه محور، پارامتری و مهندسی را برای طبقه‌بندی روش‌های تخمین هزینه ارائه کرده‌اند [۱۰]. این دسته بندی‌ها براساس شباهت‌های میان روش‌ها صورت گرفته و توجهی به تفاوت‌های موجود بین روش‌ها نشده است. از این رو در مواردی که هدف، انتخاب روش مناسب برای تخمین هزینه‌ها می‌باشد کارایی کافی را نخواهند داشت. Niazi در سال ۲۰۰۸ رویکردی را با عنوان سیستم دسته‌بندی مرتبه‌ای روش‌های تخمین هزینه ارائه داد [۳]. در این رویکرد علاوه بر ارائه تعریفی دقیق برای هریک از دسته‌ها و روش‌های تخمین هزینه ، مشکل موجود در پژوهش‌های پیشین رفع شده و به طور همزمان شباهت‌ها و تفاوت‌های موجود بین روش‌ها مبنای طبقه‌بندی قرار گرفته‌اند. بر این اساس روش‌های تخمین هزینه در قالب یک ساختار درختی و در دو شاخه اصلی کیفی و کمی دسته‌بندی و توصیف شده‌اند [۳].

در مدل‌های تخمین هزینه پارامتری از روش‌های آماری و بیان هزینه به عنوان تابعی از متغیرهای موثر بر آن استفاده می‌شود که بنوعی تحلیل‌های رگرسیونی نیز در این دسته قرار می‌گیرند. تخمین هزینه مبتنی بر تحلیل‌های رگرسیونی در دهه ۱۹۷۰ مطرح [۱۱] و متعاقباً به طور وسیعی توسعه یافت. یکی از نخستین مطالعات در صنعت معدن به سال‌های ۱۹٦۰

1. Intuitive
2. Variant -based
3. Generative

www.SID.ir

Archive of SID

برمی‌گردد که توابعی برای تخمین هزینه کارخانه‌های فراوری مواد معدنی ارایه [۱۲] و در ادامه توسط دیگر محققین ادامه یافت. محققینی از جمله Mular در ۱۹۸۲ و ۱۹۹۸ [۱۳]، موسسه CANMET کانادا در ۱۹۸٦ [۱٤]، Stebbins در ۱۹۸۷ [۱۵]، دفتر معادن آمریکا نیز در همین سال [۱٦]، O'Hara در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۲ [۱۷]، Camm در ۱۹۹۱ [۱۸]، Pascoe در ۱۹۹۲ [۱۹]، Venter و همکاران در ۱۹۹۷ [۲۰] Noakes و Lanz در ۱۹۹۳ [۲۱]، شفیعی و همکاران در ۲۰۰۹ [۲۲]، Chen و Keys در ۲۰۰۹ [۲۳] مجموعه‌ای از مدل‌های تخمین هزینه ارایه نمودند.

از جمله نقاط ضعف و زمینه‌های بهبود مدل‌های موجود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- اغلب مدل‌ها به ارایه توابع هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی کل پروژه پرداخته و کمتر به تخمین هزینه انواع ماشین‌آلات مورد استفاده در چرخه تولید می‌پردازند. بدین ترتیب امکان بررسی تغییرات هزینه‌های جزیی‌تر برای استفاده در فرایند طراحی و همچنین مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی برای انتخاب و بهینه‌سازی ماشین‌آلات وجود ندارد.
- مدل تخمین هزینه عملیاتی عمدتا به صورت کلی بوده و یا تفصیل کافی نداشته بطوریکه به کلیه اقلام نظیر سوخت، نگهداری و تعمیرات، تایر و سایر اجزا پرداخته نشده است.
- این مدل‌ها عمدتاً به صورت تک متغیره و براساس ظرفیت ارایه شده و از تأثیر سایر عوامل موثر چشم‌پوشی شده است. به عنوان نمونه در خصوص تخمین هزینه ماشین‌آلات عواملی چون توان موتور و ارتفاع بارگیری ماشین که کنترل کننده هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی هستند مورد توجه قرار نگرفته‌اند. به عبارتی، در تحلیل چند متغیره، تعداد بیشتری از متغیرهای مؤثر بر هزینه دخالت داده شده بطوریکه واریانس بیشتری از داده‌ها در هنگام تحلیل آماری پوشش داده شده و دقت تخمین بالا می‌رود.
- اکثر مدل‌ها قدیمی بوده و روزآمدکردن آن‌ها با استفاده از شاخص‌های هزینه همراه با خطای زیادی است.

بر این اساس در دهه گذشته مطالعات جدیدی در خصوص برآورد هزینه در حوزه‌های مختلف پروژه های معدنی با هدف رفع این نقاط ضعف ارایه شده‌اند. از این جمله می‌توان به

www.SID.ir

Archive of SID

صیادی و همکاران در ۲۰۱۲ و ۲۰۱٤ [۲٤]، [۲۵] و [۲٦]، موهوتسیوا و همکاران در ۲۰۱۵ [۲]، ارفع‌نیا و همکاران در ۲۰۱۷ [4]، نوری و اصانلو در سال ۲۰۱۸ [۲۷]، خوشفرمان و همکاران در ۱۳۹۲ [۲۸]، لشگری و همکاران در ۱۳۹۳ [۲۹] و خوشفرمان و همکاران در ۱۳۹٤ [۳۰] اشاره نمود که مجموعه‌ای از توابع هزینه برای برخی از ماشین‌آلات معادن روباز، زیرزمینی و کارخانه‌های فرآوری ارایه نموده‌اند. بررسی این مقالات نشان می‌دهد که در حوزه ماشین‌آلات بارگیری و باربری معادن روباز تنها به ارایه مدل تخمین هزینه چند متغیره یکی از انواع ماشین‌ها (نوع کج بیل و توسط نگارندگان مقاله حاضر [۲٤]) پرداخته شده و مدل‌های روزآمد و با دقت مناسب در خصوص سایر ماشین‌آلات تولیدی در معادن روباز کمتر در اختیار است.

در این تحقیق سعی شده ضمن رفع کاستی مدل‌های پیشین از جنبه پوشش متغیرهای موثر بر هزینه، مدلی روزآمد جهت تخمین مقدماتی هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی ماشین‌آلات بارگیر و باربر غیر پیوسته در معادن روباز ارایه شود. ماشین آلات بارگیر شامل شاول‌های هیدرولیکی و کابلی، لودر چرخ‌لاستیکی، کج‌بیل و کامیون یکپارچه به عنوان ماشین باربر می‌باشند. این مدل در قالب توابع هزینه رگرسیونی تک و چند متغیره ارایه شده است.

۲- روش تحقیق

ساز و کار به کار رفته در این پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است. بدین منظور ضمن بررسی عوامل مؤثر بر هزینه، توابع هزینه با استفاده از روش‌های رگرسیون تک و چند متغیره ارائه شده است. مدل هزینه عملیاتی در قالب توابع کل و اجزاء آن (سوخت، تعمیر و نگهداری و تعمیرات اساسی، تایر و روغن‌کاری) توسعه یافته‌اند.

۲-۱ مدل هزینه‌ای تک متغیره

اولین قدم در ساخت هر مدل رگرسیون انتخاب متغیر توضیحی مناسب است. بدین منظور تمام مشخصه‌های فنی موجود برای هر ماشین مورد بررسی قرارگرفته‌اند. هم‌زمان با انتخاب هر مشخصه به‌عنوان متغیر مستقل، شکل تابع نیز در نرم‌افزار MATLAB و در ابزار cftool

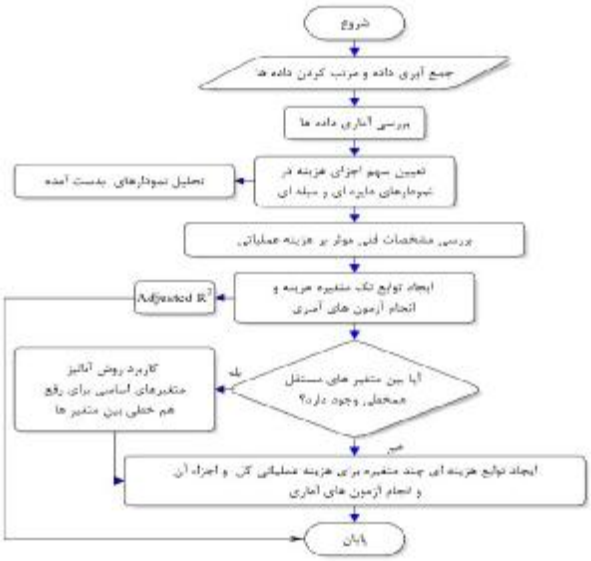
www.SID.ir

Archive of SID

آزمون شده است. دراین‌ارتباط ساختار مدل‌های ارائه‌شده در مطالعات پیشین نیز راهنمای مناسبی محسوب می‌شود (معادله ۱ و ۲). در هر مورد پس از پذیرش متغیر مستقل مناسب، شکل قابل‌قبول توابع ازلحاظ آماری به‌دقت موردبررسی قرار گرفته است. در این مقاله، مدل نمایی مورد استفاده قرار گرفته است.

$$Y= aX^b \quad (۱)$$

$$Y = aX+b \quad (۲)$$



شکل ۱- روش تحلیل داده‌ها

۲-۲ مدل هزینه‌ای چندگانه

شکل خطی تابع رگرسیون چندگانه را می‌توان به‌صورت رابطه ۳ نشان داد؛ که در آن X_1 تا X_n متغیرهای مستقل توضیح‌دهنده متغیر وابسته هزینه یا همان Y هستند. ازآنجاکه هدف

www.SID.ir

Archive of SID

رگرسیون، عبور خطی از میانگین داده‌های موجود و با حداقل خطای ممکن است، u_i تفاوت بین هر جزء را با میانگین خود در هر سطح ثابت X در نمونه موجود را نشان خواهد داد.

$$Y = B_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + \cdots + B_n * X_n + u_i \qquad (۳)$$

به‌منظور دست‌یابی به مناسب‌ترین ضرایب به‌گونه‌ای که بیش‌ترین و دقیق‌ترین توصیف را از متغیر وابسته موردنظر ارائه دهند از روش حداقل مربعات (OLS) استفاده شده است. در این روش سعی بر آن است تا با فرض وجود n جفت داده (x_i,y_i) به‌عنوان نمونه بتوان بهترین خط را به‌گونه‌ای برداده‌ها برازش داد که اختلاف هر y_i با مقدار میانگین خود در هر سطح ثابت X_i به حداقل مقدار ممکن رسیده باشد. درنتیجه رابطه (٤) توسط گاوس[1] پیشنهاد شده است. با مشتق‌گیری از رابطه زیر برحسب پارامترهای B_o تا B_n و یافتن کم‌ترین مقدار ممکن $\left(\left(\frac{\partial L}{\partial B}\right) = 0\right)$، می‌توان به ضرایبی برای نمونه موجود دست یافت که این عبارت را به حداقل مقدار خود برسانند. در این روش، ضرایب به‌دست‌آمده از نمونه موجود (B'_j) اصطلاحاً مقادیر نااریبی از ضرایب جامعه اصلی (B) خواهند بود و در مدل‌سازی مورداستفاده قرار می‌گیرند [۳۱].

$$L = \sum_{i=1}^{n} u_i{}^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - B_0 - \sum_{i=1}^{k} (B_j * x_{ij}))\text{^}2 \qquad (٤)$$

درنهایت ضریب بهینه (B'_j) توسط رابطه ٤ قابل‌محاسبه است که در آن‌که X و y به ماتریس داده‌های موجود و X' ماتریس ترانهاده X خواهند بود [۳۲].

$$B'_j = (X' * X)^{-1} * X' * y \qquad (٥)$$

از مفروضات رگرسیون OLS نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌هاست که به‌طور خلاصه به شکل رابطه (٦) بیان می‌شود.

$$u_j \sim N(0 \text{ و } \sigma^2) \qquad (٦)$$

در رگرسیون چندگانه هدف اصلی یافتن یک ارتباط صحیح و بالا بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته است. درصورتی‌که این ارتباط بین متغیرهای مستقل نیز برقرار باشد می‌توان از ماتریس همبستگی (بیانگر همبستگی هر عضو در ستون i با همبستگی عضو دیگر در ستون j) جهت شناسایی آن بهره برد. مقادیر بالای این کمیت‌ها گواه همبستگی بالای عناصر ماتریس

1. Karl Gauss

www.SID.ir

Archive of SID

است (رابطه ۷). جهت بررسی همبستگی ضرایب رگرسیون، سطر و ستون این ماتریس شامل مقادیر X_i خواهد بود و از این طریق عمل مقایسه زوجی بین پارامترها به‌آسانی صورت خواهد گرفت.

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

در صورت وجود همبستگی مشکلاتی مانند ناپایداری ضرایب، افزایش واریانس ضرایب و عدم تأثیر محسوس و صحیح در اثر افزایش متغیر جدید به مدل به وجود خواهد آمد [۳۱]. ازاین‌رو پیش از مدل‌سازی، با استفاده از روش‌هایی نظیر روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA[1]) به رفع آن اقدام می‌گردد. تحلیل مولفه‌های اصلی در تعریف ریاضی یک تبدیل خطی متعامد است که داده را به دستگاه مختصات جدید می‌برد به طوری که بزرگترین واریانس داده بر روی اولین محور مختصات، دومین بزرگترین واریانس بر روی دومین محور مختصات قرار می‌گیرد و همین طور برای بقیه. تحلیل مولفه‌های اصلی می‌تواند برای کاهش ابعاد داده مورد استفاده قرار بگیرد، به این ترتیب مولفه‌هایی از مجموعه داده را که بیشترین تاثیر در واریانس را دارند حفظ می‌کند. برای ماتریس داده X^T با میانگین تجربی صفر، که هر سطر یک مجموعه مشاهده و هر ستون داده‌های مربوط به یک شاخصه است، تحلیل مولفه‌های اصلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

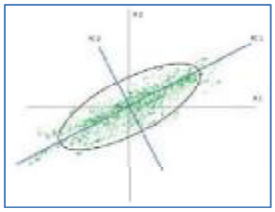
$$Y^T = X^T W = V \quad (۸)$$

به طوری که $V\Sigma W^T$ تجزیه مقدارهای منفرد ماتریس X^T می‌باشد [۳۳]. در این روش ابتدا محورهای اصلی در جهت پراکندگی بیشترین تعداد داده‌ها ایجاد می‌شوند (شکل۲) و پس از اتمام پردازش به حالت اولیه بازگردانده می‌شوند. در ابتدا همانطور که گفته شد، n متغیر هم‌بسته[2] در قالب یک ترکیب خطی با عنوان مؤلفه اصلی (PC) بیان می‌شوند. از این مؤلفه‌های اصلی می‌توان برای حذف همبستگی بین متغیرهای مستقل، جهت انجام تخمین‌های پایا[3] (نااریب) استفاده کرد.

1. Principal Component Analysis
2. Correlated
3. Stabilized

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲ ساختار pcها [۲۵]

۳-۲ اعتبارسنجی

جهت بررسی و اعتبارسنجی روابط هزینه به‌دست‌آمده از آماره‌های ضریب تعیین تعدیل شده[1] و میانگین نرخ خطای مطلق[2] (MAER) استفاده می‌شود. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چه سهم یا درصدی از واریانس کل متغیر وابسته (Y) توسط مدل رگرسیونی توضیح داده می‌شود.

$$R^2 = \frac{\sum_i (f_i - \overline{y})^2}{\sum_i (y_i - \overline{y})^2} \qquad (۹)$$

که در این رابطه R^2 بیانگر ضریب تعیین، y_i، f_i و $\overline{y}$ به ترتیب نشانگر مقادیر نمونه، مقادیر محاسبه شده و میانگین متغیر وابسته هستند [۳۱]. بالا بودن مقدار به‌دست‌آمده از این رابطه نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین متغیرهای توضیحی و متغیر وابسته خود است.

یک‌راه مناسب برای بررسی کارایی و معناداری تابع رگرسیون بهره‌گیری از روش میانگین نرخ خطای مطلق است (رابطه ۱۰). در این روش میانگین اختلاف هزینه‌های واقعی و هزینه‌های تخمین زده‌شده بر اساس درصدی از مقدار هزینه واقعی موردسنجش قرار می‌گیرند [۳٤].

$$MAER = [\Sigma \left| (C_e - C_a) / C_a \right| \times 100] / n \qquad (۱۰)$$

1. Adjusted R2
2. Mean Absolute Error Rate

www.SID.ir

Archive of SID

که در این رابطه C_e، C_a و n به ترتیب مقدار واقعی هزینه، هزینه‌های تخمین زده‌شده و تعداد نمونه‌ها هستند. از این ابزار در بررسی اعتبار مدل رگرسیون چندگانه نیز بهره برده می‌شود.

۳- داده‌ها

مجموعه‌ای از داده‌های فنی و اقتصادی ۷٦ ماشین مختلف بارگیر و باربر جمع‌آوری گردید. این داده‌ها بر اساس اطلاعات سازندگان مختلف ماشین‌آلات در سطح جهانی و اطلاعات میدانی در معادن آمریکا، با توجه به قیمت‌های پایه در ایالات متحده در سال ۲۰۱۳ تهیه شده‌اند (جدول۱) [۳۵]. اجزای هزینه‌های عملیاتی شامل تعمیرات اساسی دوره‌ای (قطعات و دستمزد)، تعمیر و نگهداری (قطعات و دستمزد)، سوخت، روغن‌کاری، لاستیک و قطعات فرسودنی است. قابل ذکر است که هزینه دستمزد اپراتور ماشین در محاسبات در نظر گرفته نشده است. هزینه‌های سرمایه‌ای بر حسب دلار آمریکا و هزینه‌های عملیاتی برحسب دلار بر ساعت می‌باشد). توزیع کلی داده‌ها در جدول ۲ و سهم نسبی اقلام هزینه‌های عملیاتی در جدول ۳ ارائه شده است.

٤- تحلیل رگرسیون تک متغیره

برای تعیین توابع تخمین هزینه، نمودار هزینه بر حسب یکی از مشخصه‌های فنی ماشین، رسم و منحنی مناسب بر آن‌ها برازش شده است. همان‌طور که ذکر شد تمام توابع، به صورت معادله (۱) می‌باشند. یکی از مشخصه‌های معنی‌دار و رایج ماشین‌آلات بارگیر حجم جام (BC) بوده که در اینجا نیز به عنوان متغیر توضیحی مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان نمونه تابع هزینه سرمایه‌ای (CC) بر حسب دلار و عملیاتی (OPC) بر حسب دلار برساعت برای لودر با توجه به شکل ۳ به ترتیب به صورت رابطه (۱۱) و (۱۲) به‌دست آمده‌اند. میزان ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۹ است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ هزینه واحد اقلام هزینه [۳۵]

US$/MCM	۳۰٤/٤۱	گاز طبیعی	US$/hour	۳۵/۵۷	دستمزد تعمیر و نگداری
US$/kwh	۰/۰۷٦	برق	US$/liter	۰/۸٤	سوخت دیزل
US$/liter	۳/۳۲	روان کارها	US$/liter	۰/۸٦	بنزین

جدول۲ دامنه‌ی تغییرات مشخصات فنی و هزینه‌های ماشین‌آلات بارگیری مورد مطالعه

	شاول‌ها		لودرها	کج بیل	تراک
	کابلی	هیدرولیکی	چرخ لاستیکی		یکپارچه
تعداد ماشین	۸	۲۱	۱۵	۱۵	۱۷
ظرفیت جام (متر مکعب)	۱۳ -٦۱/۲	۳ - ۵٦	۱-٤۰/۵	۰/۲۵ - ۳۹/۸	۳٦-۳٤۵ تن
ارتفاع تخلیه[1] (متر)	-	۴۵ - ۱٦/۵	۲/۵ -۷/۳	۵/۱ - ۳۹/۸	۳/۳ - ۷/٤
عمق حفر[2] (متر)	-	-	-	٤/۱ -۱۳	-
توان (اسب بخار)	۱۵۱۰-٦۸۵۰	۲۵۰-۳۳۵۰	۷۰-۲۳۰۰	۵۷ -۳۸۰۰	۳٦۵۰ - ۵۱۱
هزینه سرمایه‌ای (هزار دلار)	۲۳۸۰۰- ٤۹۰۱	۷۵۱/۷-۱٦۵۰۰	۹۵/۹-٦۲۰۰	۱۱۹ -۱۷٤۲۰	٦۵٦٤ - ٦۵۵
هزینه عملیاتی (دلار بر ساعت)	۵۰۷- ۱٦۲	۸۸/۷۲-۱۱۹۷/۷۳	۱۳/۱-۵٦٦	۱۳/۹ -۹۹۹/۵	-٦۵٤/۷٤ ۵۹/٤۱

جدول ۳ سهم نسبی (درصد) اقلام هزینه عملیاتی (مستخرج از نتایج تحقیق)

نوع ماشین	تعمیرات اساسی	تعمیر و نگهداری	سوخت /انرژی	روغن کاری	تایر	قطعات فرسودنی
شاول کابلی	۲٦/۳	۳۳/۲	۱۷/٦	۱۱/۱	۰	٦/۵
شاول هیدرولیکی	۲۰/۵	۳۲	۳۸	۷/۱	۰	۲/٦
لودر چرخ لاستیکی	۵	۹/۳	٤۵/۸	۷/٤	۱۹	۱
کج بیل	۱۷	۲۵	٤۵	۸	۰	٤
کامیون	۷	۱۲	٤٤	۹	۲۸	-

1. Dump height
2. Digging depth

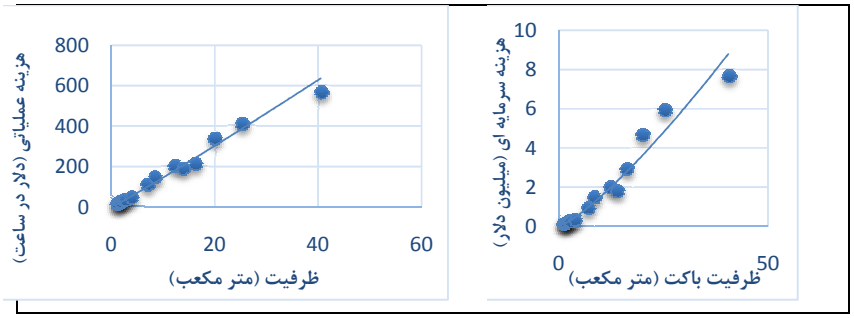
www.SID.ir

Archive of SID

$$CC = 83936\, BC^{1.257} \quad (۱۱)$$

$$OPC = 12.91 BC^{1.053} \quad (۱۲)$$

به طریق مشابهی ضرایب توابع هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی کل (جدول ٤) و همچنین ضرایب توابع اقلام هزینه عملیاتی سایر ماشین‌آلات (جدول۵) محاسبه شده است.



شکل ۳ روند تغییرات هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی لودرها نسبت به ظرفیت جام

جدول ٤ ضرایب توابع رگرسیونی تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای (دلار) و عملیاتی (دلار بر ساعت)

نوع ماشین		متغیر مستقل	اقلام هزینه	a	b	ضریب تعیین
کامیون یکپارچه		ظرفیت(ton)	سرمایه‌ای	۱٤/۱۲۷	۱/۰۳۹	۰/۹۷
			عملیاتی کل	۱/۰۲۱۹	۱/۰۹	۰/۹۷
شاول‌ها	کابلی	حجم جام (m^3)	سرمایه‌ای	۳۸۰۹۱۰	۱/۰٤۹	۰/۹٤
			عملیاتی کل	۲۵/۷۹۷	۰/٦٦۸	۰/۹۲
	هیدرولیکی	حجم جام (m^3)	سرمایه‌ای	۱٤٦۰۹۸	۱/۱۵۹	۰/۹۷
			عملیاتی کل	۲٦/۲۸	۰/۹٤۱	۰/۹۷
کج بیل		حجم جام (m^3)	سرمایه‌ای	۲۹۵۹۹۰	۰/۰۱۳٤	۰/۹۷
			عملیاتی کل	۳٤/٤۹	۰/۸۳۵	۰/۹۸

کمترین و بیشترین توان توابع هزینه به ترتیب متعلق به شاول هیدرولیکی و کج بیل است. در خصوص هزینه عملیاتی، بیشترین و کمترین ضریب توان نیز به ترتیب متعلق به قلم هزینه تایر لودر چرخ لاستیکی و قلم هزینه روغن کاری شاول کابلی است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵ ضرایب توابع رگرسیونی تخمین هزینه‌های اقلام هزینه عملیاتی (دلار بر ساعت)

ماشین	اقلام هزینه	a	b	ضریب تعیین	MAER
شاول کابلی	تعمیرات اساسی	۵/۸۷	۰/۸۱	۰/۸۶	۱۲/۸
	تعمیر و نگهداری	۷/۳۸	۰/۸۱	۰/۸۶	۱۲/۸
	سوخت/انرژی	۸/۹۲	۰/۵۶	۰/۹۶	٤/٦۲
	روغن‌کاری	۱/۰۸	۱۱/۰٤۹	۰/۹٤	۱۱/۳۳
	قطعات فرسودنی	۲/۵۲	۰/۵۸	۰/۹٤	٦/۳٤
شاول هیدرولیکی	تعمیرات اساسی	۵/۱۳	۰/۹٦	۰/۹٦	۱۲
	تعمیر و نگهداری	۷/٦۹	۰/۹٦	۰/۹٦	۱۲
	سوخت/انرژی	۱۱/۳۰	۰/۸۹	۰/۹٦	۹/۷۵
	روغن‌کاری	۱/۱۵	۱/۱۱	۰/۹۷	۱۰/۸
	قطعات فرسودنی	۱/٤۷	۰/٦۵	۰/۹۷	۷/۱٦
لودر چرخ لاستیکی	تعمیرات اساسی	۰/٦۳	۱/۰٦	۰/۹۸	۱۲
	تعمیر و نگهداری	۱/۱۷	۱/۰٦	۰/۹۸	۱۲/۲
	سوخت	٦/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۷	۱۲/۳۹
	روغن‌کاری	۰/۷۵	۱/۱۸	۰/۹۸	۱۳/۳
	قطعات فرسودنی	۰/۱۹	۰/۷۰	۰/۹۸	۸/۲٦
	تایر	۱/٤۸	۱/۲۹	۰/۹۵	–
کمپرسی	تعمیرات اساسی	۵/٤٤	۰/۸۷	۰/۹٦	۱۸/٦
	تعمیر و نگهداری	۸/۱۷	۰/۸۷	۰/۹٦	۱۸/٤
	سوخت	۱۵/۸۹	۰/۸	۰/۹۹	۸/۸٦
	روغن‌کاری	۲/۳٦	۰/۹۷	۰/۹۸	۱۷
	قطعات	۱/۹۵	۰/۵٦	۰/۹۷	۱۱/۷
تراک یکپارچه	تعمیرات اساسی	۰/۱۲۷	۰/۹۵۷	۰/۹٦	۱۰/۰۵
	تعمیر و نگهداری	۰/۲۳۷	۰/۹۵۷	۰/۹٦	۱۰/۱۰
	سوخت	۱/۲٦۵	۰/۸۷٤	۰/۹۸	۵/۵۹
	روغن‌کاری	۰/۱۵۱	۰/۹۸۸	۰/۹۷	۸/۱٤
	تایر	۱/۰۳۲	۱/۵۲	۰/۹٤	–

۵- تحلیل چند متغیره

توابع تک متغیره در مواردی که تخمین هزینه برای مراحل ابتدایی پروژه صورت گرفته و دسترسی به داده‌های مربوط به ماشین‌آلات محدود می‌باشد، مناسب است. علی‌رغم بالا بودن

www.SID.ir

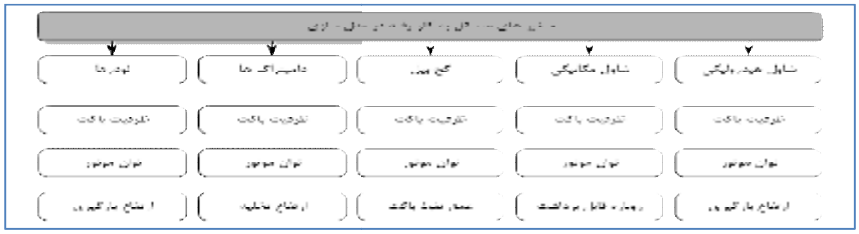
Archive of SID

ضریب تعیین و در نتیجه معنی‌داری استنباط‌های آماری انجام شده، تغییرات هزینه ماشین‌آلات تنها بر اساس تغییرات یک متغیر بررسی‌شده و از اثر سایر متغیرهای مؤثر چشم پوشی گردیده است. با توجه به در نظر گرفتن ۳ مشخصه‌ی فنی برای هر یک از ماشین‌آلات، می‌توان تحلیل آماری چند متغیره قابل قبول‌تری بر روی هزینه‌های ماشین‌آلات انجام داد.

شکل کلی توابع تخمین هزینه چند متغیره به صورت زیر می‌باشد:

$$TOC = c_1 BS + c_2 DH + c_3 HP + C_0 \qquad (۱۳)$$

در این رابطه Y هزینه تخمین‌زده‌شده و Ciها ضرایب به دست آمده از تحلیل چند متغیره هستند. همچنین متغیرهای BC، DH، W، HP، DD، BL به ترتیب بیانگر ظرفیت جام دستگاه، ارتفاع تخلیه، وزن، توان موتور، عمق حفر و طول بازو می‌باشند. شکل ٤ متغیرهای مستقل در مدل‌سازی ماشین‌آلات مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ٤ متغیرهای مستقل به کار رفته در ساخت مدل ۳ متغیره در ماشین‌آلات مختلف

بررسی داده‌های مورد استفاده بیانگر وجود هم خطی بسیار بالایی است. به عنوان نمونه هم خطی داده‌های لودر در (جدول ٦) آورده شده و کمترین میزان هم‌خطی مشاهده شده ۰/۹٤ است. بنابراین لازم است این هم خطی حذف گردد.

جدول٦ ضرایب هم خطی میان متغیرهای مستقل لودر

	ارتفاع بارگیری	ظرفیت بارگیری	توان
ارتفاع بارگیری (DH)	۱	۰/۹٤٥	۰/۹٦۷
ظرفیت بارگیری (BS)	۰/۹٤٥	۱	۰/۹٥۸
توان (HP)	۰/۹٦۷	۰/۹٥۸	۱

www.SID.ir

Archive of SID

در این راستا تحلیل حاضر در قالب سه مرحله صورت گرفته است. ابتدا به کمک روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی هم خطی میان متغیرهای مستقل حذف شده، سپس مؤلفه‌های اصلی (PC's) ساخته شده و به عنوان متغیرهای مستقل در تحلیل چند متغیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طبق تعریف هر مؤلفه اصلی (PC) شامل یک ترکیب خطی از متغیرهای مستقل اولیه در مدل است به گونه‌ای که ضرایب ارائه شده در آن هیچ‌گونه هم خطی با هم نداشته باشند. در این روند هر مؤلفه اصلی که مقدار مشخصه[1] آن بزرگ‌تر از یک باشد معنی دار محسوب می‌شود. جدول ۷ نشان دهنده مقادیر مشخصه‌ی ماتریس هم‌خطی برای لودر به عنوان نمونه می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، از میان ۳ مؤلفه‌ی اصلی، تنها یکی دارای مقدار مشخصه‌ی بیش از یک بوده و قادر به توضیح حدود ۹۲ درصد از تغییرات متغیرهای لودر می‌باشد. با توجه به اینکه در مدل حاضر تعداد متغیرها محدود بوده و به سبب حفظ تمام واریانس توضیحی توسط مؤلفه‌های اصلی در این پژوهش تمام PC های بدست آمده در تحلیل چند متغیره مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول ۷ مقادیر مشخصه‌ی ماتریس هم خطی متغیرهای مستقل

	مقدار مشخصه	واریانس کلی ٪	مقدار مشخصه تجمعی	واریانس تجمعی٪
مؤلفه اول	۰/۹۱٤۲۲	۹۷/۱٤	۲/۹۱٤	۹۷/۱٤
مؤلفه دوم	۰/۰٥٥٦۱	۱/۸٥	۲/۹٦۹۹	۹۸/۹۹
مؤلفه سوم	۰/۰۳۰۰۸	۱/۰۰۲	۳	۱۰۰

به این ترتیب و با درنظر گرفتن PC های به‌دست آمده به عنوان متغیرهای مستقل و هزینه‌ها به عنوان متغیر وابسته، تحلیل چند متغیره انجام می‌گیرد. جدول۸ نشان دهنده‌ی نتایج تحلیل چند متغیره‌ی هزینه‌های عملیاتی لودر با استفاده از مؤلفه‌های اصلی به‌دست آمده است.

1. Eigen value

www.SID.ir

Archive of SID

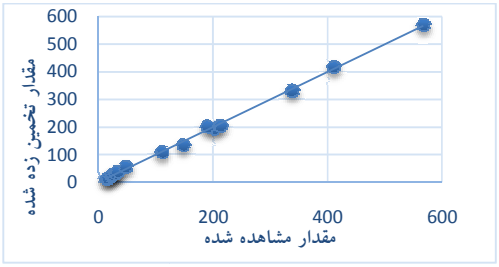
جدول ۸ نتایج رگرسیون هزینه های عملیاتی لودر

	ضریب B	آزمون t	p-level	آزمون F کل	p-level
عرض از مبدأ	۱۵٦/٤۹	۲/۰۱٦۸	۰.۰۰۰	۲۱٤٤/۸٦	۰/۰۰۰۰۰۰
مؤلفه اول	-۹۷/۸۱	۱/۲۲۳	۰.۰۰۰		
مؤلفه دوم	۵۳۰۹	۸/۸٤٦	۰.۰۰		
مؤلفه سوم	-۳/۸۳۸	۱۲/۰۳٦۷	۰/۷۵		

از ضرب ضرایب B بدست آمده از جدول ۸ در بردار مشخصه‌ی ماتریس همبستگی، ضرایب رگرسیون هریک از پارامترهای اصلی هزینه‌های عملیاتی لودر (TOC) محاسبه گردید (رابطه ١٤).

$$TOC = 7.712(BS) + 8.367(DH) + 0.095(HP) - 24.3 \quad (١٤)$$

به منظور ارزیابی کارایی توابع چندمتغیره از روش میانگین نرخ خطای مطلق[1] استفاده گردیده است (رابطه۱۰). به این ترتیب میانگین نرخ خطای مطلق توابع برای لودر به طور متوسط برابر با ٪۷/٤۸ می‌باشد. ضمنا مقدار $Adj.\ R^2$ نیز معادل ٪۹۹ بدست آمد. شکل ۵ مقایسه دو مقدار واقعی و تخمین زده شده را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد.



شکل۵ مقایسه مقدار هزینه عملیاتی کل تخمین‌زده شده و مقدار واقعی

به‌طور مشابهی ضرایب توابع چند متغیره هزینه عملیاتی سایر ماشین‌آلات محاسبه و توابع هزینه آن به شرح زیر بدست آمده است. میانگین نرخ خطای مطلق برای کلیه ماشین‌آلات مورد بررسی نیز ذیل هر تابع ارایه شده است.

1. Mean Absolute Error Rate

www.SID.ir

Archive of SID

(۱۵) شاول هیدرولیک

$$TOC = 7.8(BC) - 0.49(DH) + 0.214(HP) + 4.02$$

Adj. R^2 = 99% MAER = ۷/۴۸

(۱۶) شاول کابلی

Adj. R^2 = 71% ۱۲/۸۲MAER =

(۱۷) کج‌بیل

$$TOC = 4.37(BC) + 1.93(DH) + 0.18(HP) - 26.37$$

Adj. R^2 = 98% ۱٤/۹MAER =

(۱۸) تراک یکپارچه

$$TOC=20.631(LH)+1.25(BC)+0.0443(HP)-112.955$$

Adj. R2 = 96% ۱٦/٦MAER =

نتایج و توابع بدست آمده برای اجزای مختلف هزینه عملیاتی برای ماشین آلات باربری و بارگیری نیز در جدول ۹ قابل مشاهده است. فقط توابعی گزارش شده که معناداری آنها در آزمون‌های آماری تایید شده است.

٦- بحث

پنج نوع اصلی ماشین‌آلات بارگیری و باربری شامل ۷۸ نمونه متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. گرانقیمت‌ترین ماشین مورد مطالعه مربوط به شاول کابلی است که دارای هزینه سرمایه‌ای ۲۳۸۰۰۰۰۰ دلار و عملیاتی ۵۱۰ دلار بر ساعت است.

توابع تک متغیره به صورت نمائی هستند. توان متغیر مستقل (حجم جام) در توابع هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی به ترتیب در دامنه ۰/۰۱ – ۱/۱ و ۰/٦٦ – ۱/۰۹ تغییر می‌کند. دامنه تغییرات این توان در خصوص اقلام هزینه عملیاتی (جدول ٦) در حدود ۰/۵ – ۱/۳ است. استفاده از این توابع درمواردی که میزان دسترسی به اطلاعات مربوط به ماشین‌آلات محدود است، مناسب می‌باشد. توابع ارائه‌شده با توجه به حداقل میزان ضریب تعیین (۹٤٪) و همچنین بیشینه MAER (۱۷٪) از اعتبار کافی جهت استفاده در مطالعات پیش امکان‌سنجی در پروژه‌های معدنی و عمرانی برخوردار هستند.

در تحلیل چند متغیره، تعداد بیشتری از متغیرهای مؤثر در توابع دخالت دارند و واریانس بیشتری از داده‌ها را پوشش می‌دهند. میزان خطای متوسط، کمتر از ۱۷درصد است. قابل ذکر است که این توابع تنها در دامنه تغییرات ذکر شده در جدول ۲ دارای اعتبار بوده و باید از از تعمیم آنها در بازه کمتر و یا بیشتر از مقادیر ذکر شده اجتناب نمود.

www.SID.ir

Archive of SID

جهت استفاده از توابع فوق در ایران می‌توان از ضرایب تعدیل موقعیت جغرافیایی و زمان استفاده نمود. در واقع هزینه سرمایه‌ای تفاوت زیادی نداشته و تنها باید هزینه عملیاتی را تعدیل نمود. فاکتور تعدیل از حاصل تقسیم هزینه واحد قلم هزینه در ایران به هزینه متناظر در آمریکا (جدول ۱) بدست می‌آید. به عنوان مثال فاکتور تعدیل هزینه انرژی از حاصل تقسیم قیمت یک لیتر بنزین در ایران (۲۷ سنت) به یک لیتر بنزین در آمریکا (۸٦ سنت) قابل محاسبه است. جهت تعدیل هزینه تعمیرات اساسی و تعمیر و نگهداری نیز می‌توان با توجه به سهم هزینه دستمزد و مصرفی‌ها عمل نمود. فاکتور تعدیل هزینه دستمزد نیز از تقسیم هزینه دستمزد یک ساعت تکنسین تعمیر در ایران به هزینه متناظر در کشور آمریکا بدست می‌آید.

با توجه به اینکه داده‌ها بر اساس دلار ۲۰۱۳ است باید تعدیل هزینه با توجه به شاخص هزینه ماشین‌آلات در این سال و سال مورد نظر مثلا ۲۰۱۷ صورت گیرد. شاخص هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی از منبع ۲۸ قابل تهیه است.

جدول ۹ نتایج رگرسیون چند متغیره هزینه‌های عملیاتی ماشین‌آلات

ماشین	بخش‌های مختلف هزینه	تابع هزینه	$Adj.R^2$	MEAR
تراک یکپارچه	تعمیرات اساسی	OC=3.308(LH)+0.0012(BC)+0.0061(HP)−11.02	۰/۹۰	١٤/٤٢
	تعمیر و نگهداری	OC=6.136(LH)+0.0021(BC)+0.0113(HP)−20.48	۰/۹۰	١٤/٤٢
	سوخت/انرژی	OC=0.0027(LH)+2.82×10−5(BC)+0.06(HP)−0.0093	۰/۹۹	۰.۰۲
	روغن‌کاری	OC=3.367(LH)+0.0067(BC)+0.0097 (HP)−12	۰/۹۵	۱۱/۵
شاول هیدرولیک	تعمیرات اساسی	OC=2.56(BC)−0.12(DH)+0.031(HP)+1.06	۰/۹۸	۱۱/۳۵
	تعمیر و نگهداری	OC=3.836(BC)−0.19(DH)+0.047 (HP)+1.6	۰/۹٦	۱۰
	سوخت/انرژی	OC=−0.0002(BC)+0.0003(DH)+0.121 (HP)−0.007	۰/۹۹	۰.۰٦۷
	روغن‌کاری	OC=1.216(BC)−0.226(DH)+0.012(HP)−0.1	۰/۹۵	۱۰/۷۵

www.SID.ir

Archive of SID

ماشین	بخش‌های مختلف هزینه	تابع هزینه	$Adj.R^2$	MEAR
	قطعات فرسودنی	OC=0.186(BC)+0.051(DH)+0.0022(HP)+1.42	۰/۹۷	۵/۵
	تعمیر و نگهداری	OC=0.52(OB)+2.08(BC)−0.01 (HP)+55.93	۰/۹۷	۷/۵
	روغن‌کاری	OC=0.035(OB)+0.86(BC)−0.0044(HP)+9.34	۰/۹۷	۷/۰۲
	قطعات فرسودنی	OC=0.02(OB)+0.19(BC)−0.00066(HP)+10	۰/۹۵	٦/۸۸
بلدوزر	تعمیرات اساسی	OC=1.33(BC)+0.63(DH)+0.03(HP)−9.08	۰/۹۹	۸/٤۷
	سوخت/انرژی	OC=0.0006(BC)−0.0001(DH)+0.093 (HP)+0.002	۰/۹۹	۰/۰۱
لودر	تعمیرات اساسی	OC=0.46(BS)−0.59(DH)+0.007 (HP)+1.23	۰/۹۸	۱۱/۲۵
	تعمیر و نگهداری	OC=0.857(BS)−1.113(DH)+0.012 (HP)−2.2	۰/۹۸	۱۱/۲۳
	سوخت/انرژی	OC=0.0005(BS)+0.002(DH)+0.096 (HP)+0.01	۰/۹۹	۰/۰۱
	روغن‌کاری	OC=0.6(BS)−2(DH)+0.018 (HP)+3.55	۰/۹۹	۱٦/۳۳

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدلی جدید جهت تخمین هزینه‌ی عملیاتی ماشین‌آلات اصلی بارگیری در معادن روباز با استفاده از تحلیل رگرسیون تک و چند متغیره ارائه شده است. همچنین توابع تخمین اقلام هزینه عملیاتی نیز به منظور تخمین جزیی‌تر ارائه شده است. توابع ساده تک متغیره در شرایطی که طراحی تفصیلی انجام نشده و مشخصه‌های ماشین‌آلات مورد نیاز تعیین نشده باشد مورد استفاده قرار گرفته در غیر این صورت می‌توان از توابع چند متغیره استفاده نمود. مدل‌های رگرسیون چندمتغیره به دلیل تئوری قوی ریاضی ابزاری معمول در برآوردهای هزینه می‌باشند. روش تحلیل مولفه‌های اصلی امکان رفع هم خطی میان متغیرهای مستقل و تعریف مجموعه‌ای از متغیرهای توصیفی مناسب‌تر برای برآورد هزینه‌ها با استفاده از تحلیل

www.SID.ir

Archive of SID

رگرسیون چند متغیره را فراهم می‌کند. با توجه به میانگین نرخ خطای مطلق زیر ۱۷ درصد برای توابع هزینه چندمتغیره، این مدل‌ها می‌توانند در مطالعات پیش‌امکان‌سنجی و امکان‌سنجی مفید باشند.

۸- منابع

[1] Gregory, B.S. (2003) "Excavator selection", 12th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, pp. 395-403.

[2] Mohutsiwa, M., Musingwini, C. (2015) "Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study", The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 115, pp. 789-797.

[3] Niazi, A., Dai, J., Balabani, S., Seneviratne, L. (2006) "Product cost estimation: Technique classification and methodology review", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, pp. 563–575.

[4] Arfania, S., Sayadi, A. R., Khalesi, M.R., (2017), "Cost modeling for flotation machines", The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 117, pp. 89–96.

[5] Boehm, B.W., 1984. Software Engineering Economics. IEEE Transactions on Software Engineering, Vol.10. No.1, pp. 4–21.

[6] Zhang, Y.F. and Fuh, J.Y.H., (1998) "A neural network approach for early cost estimation of packaging products", Computers & Industrial Engineering, Vol. 34, No. 2. Pp. 433-450.

[7] Ben-arieh, D. and Qian, L., (2003) "Activity-based cost management for design and development stage", International Journal of Production Economics, Vol. 83, No 2, pp.169-183.

[8] Shehab, E.M. and Abdalla, H.S., (2001) "Manufacturing cost modeling for concurrent product development", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 17, No.4, pp. 341-353.

[9] Roy, R., (2003) "Cost Engineering: Why, What and How", www.cranfield.ac.uk, accessed 1/11/2004.

[10] Cavalieri, S., Maccarrone, P., Pinto, R., (2004) "Parametric vs. neural network models for the estimation of production costs: A case study in the automotive industry", International Journal of Production Economics, Vol. 91, No. 2, pp.165-177.

[11] Bowers, W., Hunt, D.R. (1970) "Application of mathematical formula to repair cost data" Transactions of the ASAE, Vol. 13, pp. 806-809.

www.SID.ir

Archive of SID

[12] Prasad, L. (1969) "Mineral Processing Plant Design and Cost Estimation', Processors Division of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal.
[13] Mular, A. L., Parkinson, E. A. (1972) "Mineral Processing Equipment Costs and Preliminary Capital Cost Estimation", Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
[14] Redpath, J.S. (1987) "Estimating Preproduction and Operating Costs of Small Underground Deposits", Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Minister of Supply and Services Canada, 252 p.
[15] Stebbins, S. A. (1987) "Cost estimation handbook for small placer mines", Pittsburgh, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines.
[16] Clement, Jr., George K., (1980) "Capital and operating cost estimating system manual for mining and beneficiation of metallic and nonmetallic minerals", Bureau of Mines, U.S. Dept. of the Interior.
[17] O'HARA, A. (1992) "Costs and cost estimation", SME mining engineering handbook vol. 1. United State: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
[18] Camm, T. W. (1991) "Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations", U.S. Bureau of Mines Information Circular 9298, USA.
[19] Pascoe, R.D. (1992) "Capital and operating costs of minerals engineering plants - a review of simple estimation techniques", Minerals Engineering, Vol. 5, No. 8, pp. 883-893.
[20] Venter, J., Bearman. R. A., Everson. R. C. (1997) "A novel approach to circuit synthesis in mineral processing", Minerals Engineering, vol. 10, pp. 287-299.
[21] Noakes, M., Lanz, T. (1993) "Cost Estimation Handbook for the Australian Mining Industr" Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
[22] Shafiee, S., Nehring, M., Topal, E. (2009) "Estimating average total cost of open pit coal mines in Australia", Australian Mining Technology Conference.
[23] Chen, S. and Keys K. L. (2009) "A cost analysis model for heavy equipment", Computers & Industrial Engineering, vol. 56, pp. 1276-1288.
[24] Sayadi و A. R, Lashgari, A., Fouladgar, M. M., Skibniewski, M. J. (2012) "Estimating capital and operational costs of backhoe shovels" Journal of Civil Engineering and Management, vol. 18, Issue 3, pp. 378-385.
[25] Sayadi, A. R, Lashgari, A., Paraszczak, J. J. (2012) "Hard-rock LHD cost estimation using single and multiple regressions based on principal

www.SID.ir

Archive of SID

component analysis", Tunneling and Underground Space Technology, vol. 27, No. 1, pp. 133-141.
[26] Sayadi, A. R., Khalesi, M. R., Khoshfarman Borji. M. (2014) "A parametric cost model for mineral grinding mills", Minerals Engineering, vol. 55, pp. 96-102.
[27] Nourali, H., Osanloo, M., (2018) "A regression-tree-based model for mining capital cost estimation", International Journal of Mining, Reclamation and Environment,DOI:10.1080/17480930.2018.1510300
[28] Khoshfarman Borji, M., Sayadi, A. R., Khalesi, M.R. (2013) "A new model for cost estimation of Double Toggle Jaw Crushers", Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering", Vol. 3, No. 5, pp. 66-76, in Persian.
[29] Lashgari, A., Sayadi, A.R., Yavari Shahreza, M. (2015) "A mathematical model for shovel-truck equipment selection to lower loading and hauling cost in surface mines", Iranian J. of Mining Engineering, Vol. 9, No. 25, pp. 109-117, in Persian.
[30] Khoshfarman Borji, M., Sayadi; A. R., Khalesi, M.R. (2015) "Capital and operating cost estimation for standard and negative pressure hydrocyclone", Iranian Journal of Mining Engineering", Vol.10, No. 26, pp. 69-82.
[31] Gujarati, D. N. (2004), Basic econometrics, 4rd ed. The McGraw-Hill Company.
[32] Everitt, B., Hothorn, T. (2011), An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R, Springer New York.
[33] Montgomery, D. C., Runger, G. C. (2007), Applied statistics and probability for engineers, 3rd ed (With CD): Wiley India Pvt. Limited.
[34] Kaiser, H. F., (1960) "The application of electronic computers to factor analysis" Educational and Psychological Measurement, Vol. 20, No. 1, pp. 141-151.
[35] InfoMine Inc.; 2013; "Mine and mill equipment costs", Available from http://www.infomine.com.sthe wherethe was

www.SID.ir