

ارائه مدلی جدید جهت تخمین هزینه‌های سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف

مهسا خوشفرمان برجی^۱، احمدرضا صیادی^{۲*}، محمدرضا خالصی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مهر ۹۱، پذیرش اسفند ۹۲)

چکیده

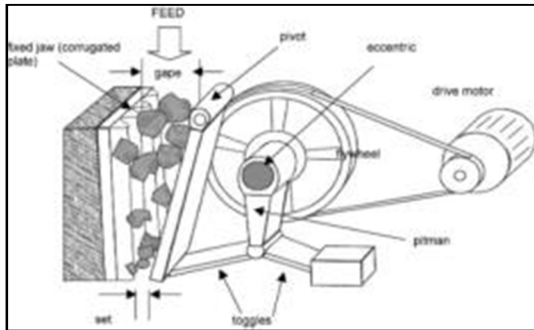
عملیات خردایش از جمله کلیدی‌ترین مراحل فرآوری مواد معدنی محسوب شده و سنگ‌شکن‌های فکی یکی از پرکاربردترین تجهیزات اصلی در این بخش هستند. انتخاب این تجهیزات تابعی از متغیرهای متعددی به ویژه قیمت تمام شده عملیات سنگ‌شکنی است. در این تحقیق مدلی جدید جهت تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف در قالب توابع رگرسیون تک متغیره و چند متغیره ارائه شده است. در تحلیل چند متغیره، به منظور افزایش دقت مدل، داده‌های جمع‌آوری شده مورد بررسی دقیق قرار گرفته و همبستگی بین آن‌ها با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی بر طرف شده است. در تابع رگرسیون تک متغیره، سطح دهانه ورودی به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است در حالیکه در تابع هزینه چند متغیره سطح دهانه ورودی به همراه توان سنگ‌شکن به عنوان متغیرهای مستقل جهت ساخت مدل تخمین هزینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کارایی هر یک از توابع هزینه با استفاده از میانگین خطای مطلق و بررسی باقیمانده‌ها سنجیده شده است. به طور میانگین، میزان خطای ۱۴/۹۳ و ۱۰/۹۱ درصد به ترتیب برای رگرسیون تک و چند متغیره محاسبه شده که میزان قابل قبولی در مطالعات پیش‌امکان‌سنجی و امکان‌سنجی است. همچنین توزیع نرمال باقیمانده‌ها گواهی بر اعتبار مدل‌های ارائه شده است. به منظور نشان دادن چگونگی کارکرد مدل، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی واحد سنگ‌شکنی اولیه یک معدنی فرضی طلا به کمک این مدل برآورده شده است.

کلمات کلیدی

تخمین هزینه، سنگ‌شکن فکی، رگرسیون، تحلیل مؤلفه‌های اصلی

۱- مقدمه

و عملیاتی بالای مدارهای خردایش و تأثیر زیاد آن بر اقتصاد کلی پروژه، انتخاب کاراترین مدار از نظر هزینه اهمیت اساسی دارد. در این تحقیق، هدف ارائه مدلی جهت تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی سنگ شکن‌های فکی با بازوی مضاعف در قالب توابع رگرسیونی تک و چند متغیره است.



شکل ۱: سنگ شکن فکی با بازوی مضاعف [۴]

۲- پیشینه مطالعات

تحقیقات متعددی در زمینه تخمین هزینه انجام شده که در آن‌ها از روش‌های مختلفی بهره گرفته شده است. هر یک از این روش‌ها توسط محققین به روش‌های گوناگونی تقسیم بندی شده‌اند. برای مطالعه بیش تر این روش‌ها می‌توان از منابع ۵ تا ۱۵ بهره برد.

یکی از مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین دسته‌بندی‌ها توسط نیازی در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است [۱۷] که بر آن اساس، روش‌های تخمین هزینه به دو دسته کلی کمی و کیفی تفکیک می‌شوند. در روش‌های کیفی، شباهت‌های موجود میان محصول جدید با نمونه‌های قبلی بررسی و هزینه‌ها بر مبنای مقایسه میان محصول جدید با محصولات تولیدی پیشین، تخمین زده می‌شوند. در روش‌های کمی تخمین هزینه بر پایه تحلیل جزئی فرآیندها و وضعیت‌های حاکم بر تولید است. دو زیرگروه اصلی روش‌های کیفی، روش‌های شهودی (Intuitive) و قیاسی (Analogical) هستند. روش شهودی بر پایه تجربیات پیشین استوار است؛ این در حالی است که در روش قیاسی با توجه به وجود معیارهای مشابه در داده‌های مربوط به هزینه محصولات پیشین، عملیات تخمین هزینه صورت می‌پذیرد. همچنین روش‌های کمی نیز در دو قالب روش‌های پارامتری و تحلیلی تقسیم‌بندی

خردایش از جمله کلیدی‌ترین مراحل فرآوری مواد معدنی است و با استفاده از انواع سنگ‌شکن‌های ژیراتوری، فکی، مخروطی و ضربهای آغاز می‌شود. این ماشین‌آلات سهم مهمی در هزینه‌های تولیدی در معادن دارند. از جمله عوامل مؤثر در انتخاب نوع سنگ‌شکن می‌توان به ظرفیت کارخانه، اندازه خوراک، اندازه محصول مطلوب، ویژگی‌های سنگ معدنی، فرآیندهای پایین‌دستی و قیمت تمام شده اشاره کرد [۱]. از بین انواع سنگ‌شکن‌های یادشده، سنگ‌شکن‌های فکی و ژیراتوری پرکاربردترین سنگ‌شکن‌ها در مدار اولیه خردایش هستند [۲]. گرچه در صورت وجود اندازه دهانه برابر در مورد دو سنگ‌شکن فکی و ژیراتوری، ظرفیت سنگ‌شکن ژیراتوری حدود ۲.۵ برابر و نسبت خردایش آن حدود ۲ برابر سنگ‌شکن فکی است اما به دلیل هزینه پایین تر نصب و نیاز به نگهداری اندک، استفاده از سنگ‌شکن فکی در کارخانه‌هایی با ظرفیت کمتر از ۴۵۰ تن در ساعت، مناسب و مقرون به صرفه است [۳]. خرد کردن مواد در سنگ‌شکن فکی توسط نیروهای فشاری یا برشی بین دو صفحه (فک) صاف یا موج‌دار که یکی از آن‌ها ثابت و دیگری متحرک است انجام می‌شود. سنگ‌شکن‌های فکی در دو نوع سنگ‌شکن‌های با بازوی ساده و مضاعف تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل ۱ نمایی کلی از سنگ شکن فکی با بازوی مضاعف را نشان می‌دهد. در سنگ‌شکن‌های فکی تک بازویی، بیش‌ترین حرکت در بالای فک بوده و سنگ‌های نه چندان سخت با مقاومت فشاری حدود ۲۰۰ مگا پاسکال در آن خرد می‌شوند. به سبب سادگی عملیات سنگ‌شکنی، نگهداری و تعمیرات و همچنین نیاز به فضای کم از این نوع در معادن زیرزمینی نیز استفاده می‌شود. در سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف بیش‌ترین حرکت در پایین فک بوده و سنگ‌های با مقاومت حدود ۳۵۰ مگا پاسکال با کمک این دستگاه خرد می‌شوند. این نوع ماشین هزینه بالاتری نسبت به نوع تک بازویی داشته و نسبت به ابعاد سنگ‌های ورودی محدودیت بیشتری دارد [۴].

انتخاب و ارزیابی مجموعه تجهیزات سنگ‌شکنی فرآیند پیچیده‌ای بوده و در این بین با توجه به هزینه‌های سرمایه‌ای

حساب یک متغیر مستقل برآورد و از تأثیر سایر متغیرهای موثر بر هزینه چشم‌پوشی شده است. مضاف آنکه این مدل‌ها عمدتاً قدیمی بوده و روزآمد کردن آن‌ها همراه با خطای زیادی خواهد بود [۲۱]. همچنین در مقالات جدید ردیف ۱۰ الی ۱۲ جدول ۱، تنها به تخمین هزینه‌های ماشین‌آلات مورد استفاده در استخراج معادن پرداخته شده است. مقاله ردیف ۱۳ جدیدترین تحقیق در زمینه برآورد هزینه برخی از تجهیزات کارخانه‌های فراوری بوده و برخی از کاستی‌های مدل‌های پیشین را رفع کرده است.

در مقاله حاضر دو مدل مجزا مبتنی بر رگرسیون تک و چند متغیره برای تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف ارائه شده است. در شرایطی که دسترسی به اطلاعات کافی میسر نیست، به منظور تخمینی سریع و آسان می‌توان از مدل تک متغیره بهره جست. مدل چند متغیره نیز با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis)، که در اینجا به اختصار با PCA نشان داده می‌شود، امکان تخمین تفصیلی‌تر هزینه‌ها را فراهم می‌نماید.

شده‌اند. مدل‌های تخمین هزینه‌ای که با توجه به روش‌های پارامتری ارائه می‌شوند، از روش‌های آماری بهره برده و در آن‌ها هزینه به صورت تابعی از متغیرهای مستقل سازنده (Independent variable) بیان می‌شود. روش‌های تحلیلی نیز فرآیند تولید را به اجزای سازنده (Components)، تقسیم کرده و مجموع هزینه‌ی این بخش‌ها را در چرخه تولید به عنوان هزینه کلی بیان می‌نمایند [۱۶].

در این مقاله از روش‌های آماری و تحلیل رگرسیون برای ارائه مدل تخمین هزینه بهره برده شده است. کاربرد این روش‌ها عمدتاً از دهه ۱۹۷۰ آغاز و پس از آن به سرعت گسترش یافته است [۱۸-۲۰]. آغاز بررسی‌های مدون هزینه‌ای در صنعت معدن به دهه ۱۹۶۰ باز می‌گردد [۲۰] و در ادامه تلاش‌های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. از جمله می‌توان به مقالات ارائه شده در جدول ۱ اشاره کرد. در تمامی منابع ۱ الی ۹ جدول ۱ به فراوری مواد معدنی نیز توجه شده و مجموعه‌ای از مدل‌های تخمین هزینه ارائه شده است. این مدل‌ها در قالب نمودار و یا توابع رگرسیونی تک متغیره ارائه شده‌اند. به عبارت دیگر هزینه‌ها منحصرأ بر

جدول ۱: برخی از مدل‌های تخمین هزینه پروژه‌های معدنی

سال	دامنه تحقیق	نویسنده یا مرجع توسعه مدل	ردیف
۱۹۸۷	تخمین هزینه‌های معادن پلاستی کوچک [۲۲]	Stebbins	۱
۱۹۹۸، ۱۹۸۲	تخمین هزینه‌های ماشین‌آلات معادن و کارخانه‌های فراوری [۲۳]، [۲۴]	Mular	۲
۱۹۸۶	تخمین هزینه‌های قبل از تولید و عملیاتی معادن کوچک زیرزمینی [۲۵]	CANMET	۳
۱۹۸۷	تخمین هزینه‌های استخراج و فراوری مواد معدنی فلزی و غیر فلزی در آمریکا و کانادا [۲۶]	USBM	۴
۱۹۹۲، ۱۹۸۰	راهنمای ارزیابی سریع ذخایر معدنی [۲۷]، [۲۸]	O'Hara	۵
۱۹۹۴	مدل ساده‌ای برای انجام مطالعات پیش‌امکان‌سنجی [۲۹]	Camm	۶
۱۹۹۲	هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی در کارخانه‌های فراوری مواد معدنی [۳۰]	Pascoe	۸
۱۹۹۷	رویکردی جدید جهت ترکیب مدار در فراوری مواد معدنی [۳۱]	Venter et al.	۹
۲۰۱۰	تخمین هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات بارگیری و باربری در معادن روباز [۷]	Sayadi et al.	۱۰
۲۰۱۱	تخمین هزینه ماشین‌آلات LHD با استفاده از رگرسیون تک و چند متغیره [۸]	Sayadi et al.	۱۱
۲۰۱۲	تخمین هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی شاول‌های کج بیل [۹]	Sayadi et al.	۱۲
۲۰۱۴	ارائه یک مدل پارامتری برای تخمین هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی ۶ نوع اصلی آسیا [۳۲]	Sayadi et al.	۱۳

۳- داده‌ها

به منظور انجام تحقیق پیش رو، مجموعه‌ای از داده‌های فنی و اقتصادی مربوط به ۱۱ سنگ‌شکن فکی با بازوی مضاعف که توسط سازندگان مختلف ماشین‌آلات تولید شده و در معادن مختلف کشور ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفته‌اند، جمع‌آوری شده است [۳۳]. جدول ۲ بخشی از مشخصه‌های فنی این سنگ‌شکن‌ها شامل اندازه دهانه (G)، عرض فک (W) و توان (P) را نمایش می‌دهد. داده‌ها بر اساس اقلام اصلی هزینه به دو دسته سرمایه‌ای (Cc) و عملیاتی (Opc) تفکیک شده‌اند.

اجزای هزینه‌های عملیاتی عبارت‌اند از: هزینه‌های تعمیرات اساسی دوره‌ای (Overhaul) شامل قطعات و دستمزد، تعمیر و نگهداری (Maintenance) شامل قطعات و دستمزد، انرژی، روغن و قطعات فرسودنی (wear part). هزینه‌های سرمایه‌ای بر حسب دلار آمریکا و هزینه‌های عملیاتی بر حسب دلار آمریکا بر ساعت است. شکل ۲ نمودار میله‌ای داده‌های استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصه‌های آماری سنگ‌شکن فکی با بازوی مضاعف

مشخصه‌های آماری	مشخصه‌های آماری	
	حداقل	حداکثر
دهانه (متر)	۰/۲۵	۱/۲۲
عرض فک (متر)	۰/۶۱	۱/۵۲
توان (کیلووات)	۳۰/۱۹	۲۲۶/۴۱
هزینه سرمایه‌ای (دلار)	۱۱۲۲۴۵	۷۹۸۰۶۱
هزینه عملیاتی (دلار بر ساعت)	۱۶/۴۳	۹۹/۰۶

۴- روش مدل‌سازی

مدل‌های ارائه شده در این تحقیق در قالب توابع تک متغیره نمایی و چند متغیره خطی هستند. در تحلیل تک متغیره، سعی شده تمام روابط احتمالی ممکن برای نمایش یک رابطه تک متغیره مناسب مورد آزمون قرار گیرد. با توجه به تأکید محققین در دهه‌های گذشته بر صورت نمایی تابع هزینه تک متغیره سنگ‌شکن‌ها [۲۳] و همچنین بررسی‌های آماری انجام شده در تحقیق پیش رو، مدل تک متغیره نمایی به عنوان مدل برتر مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل‌سازی تابع هزینه چند متغیره، بررسی

همبستگی (Correlation) بین متغیرهای مستقل (متغیرهای فنی سنگ‌شکن) که توصیف کننده متغیر وابسته (هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی) هستند، عامل تعیین کننده در انتخاب روش ساخت مدل خواهد بود.

در مورد داده‌های استفاده شده، همبستگی بالایی بین متغیرهای ورودی مدل مشاهده و موجب شد تا در ابتدا با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی، همبستگی بین متغیرها حذف شود. در واقع این مشکل موجب خواهد شد تا هر متغیر به طور کاملاً مستقل روند تغییرات هزینه را بیان نکند. در این روش هر مؤلفه اصلی به صورت یک ترکیب خطی از متغیرهای مستقل اولیه وارد مدل می‌شود به گونه‌ای که بیشینه واریانس قابل قبول از دسته اولیه را حفظ کند. این امر به گونه‌ای انجام می‌شود که ضرایب هر کدام از متغیرهای درون مؤلفه اصلی هیچ همبستگی خاصی را با هم نشان ندهند. بر طبق این روش، شمار مؤلفه‌های اصلی با شمار متغیرهای مستقل اولیه برابر خواهد بود [۳۴]. به عنوان مثال در صورتی که سه متغیر مستقل اولیه در معادله وجود داشته باشند، سه مؤلفه اصلی (PCs) نیز بر همین اساس ارائه خواهد شد که بزرگ‌ترین ارزش متعلق به اولین مؤلفه خواهد بود. هر کدام از این مؤلفه‌های اصلی تحت یک رابطه رگرسیون خطی به عنوان یک متغیر جدید برای تخمین متغیر وابسته به کار گرفته می‌شوند.

معیار انتخاب هر مؤلفه اصلی بر اساس مقدار مشخصه‌ای (Eigen Value) است که به آن اختصاص می‌یابد. بر این اساس هر مؤلفه اصلی با مقدار مشخصه بالاتر از یک دارای اعتبار کافی جهت ورود به مدل خواهد بود. هم‌چنین وزن‌های ماتریسی برای هر مؤلفه اصلی در بردار مشخصه ماتریس همبستگی (Eigenvectors of correlation matrix) آورده شده است. ماتریس بردار مشخصه سهم هر متغیر اولیه را در ضریب به دست آمده از رگرسیون (B) برای هر مؤلفه اصلی نشان می‌دهد. در ادامه جهت استفاده از ضرایب جدید مدل ساخته شده بر مبنای مؤلفه‌های اصلی (که به صورت نا اریبی در تابع چند متغیره شرکت می‌کنند) لازم است تا در طول یک روند محاسباتی، امکان بهره‌گیری از این ضرایب را برای استفاده از متغیرهای اولیه فراهم آورد.

ماتریس بردار مشخصه، ضرایب نهایی بر حسب متغیرهای اولیه به گونه نا اریبی ارائه می‌شوند [۳۴-۳۶].

$$X = \frac{X_{dl} - X_{ave}}{S_x} \quad (1)$$

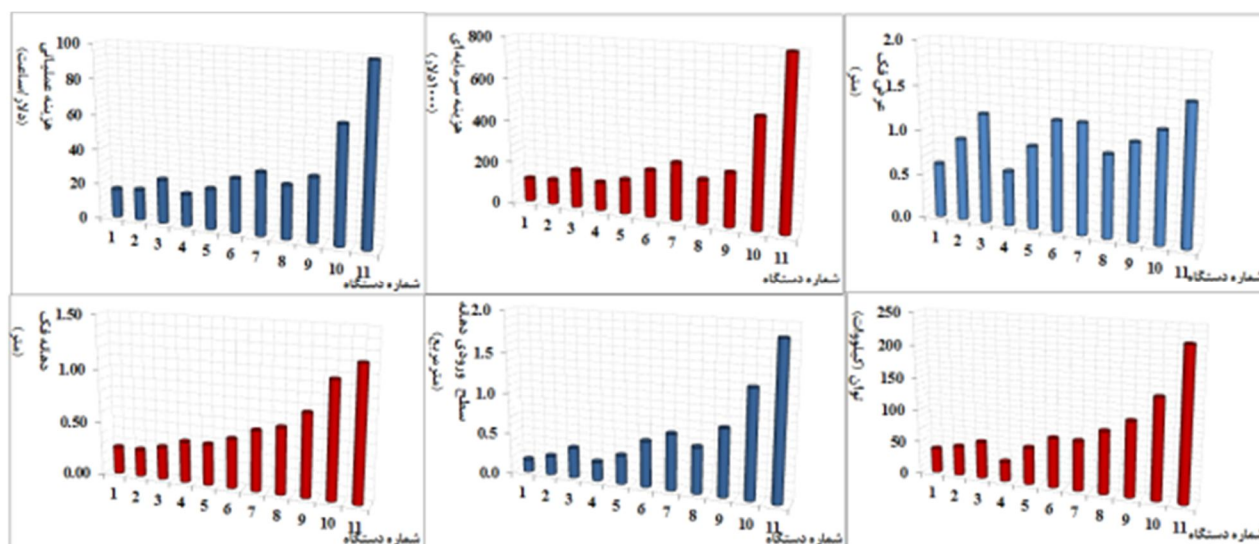
که در آن:

X : مقدار استاندارد شده،

X_{dl} : متغیرهای اولیه (در اینجا سطح ورودی دهانه و توان)

X_{ave} : میانگین و S_x انحراف استاندارد متغیر مربوطه است.

بنابراین به منظور قابلیت استفاده مجدد از متغیرهای اولیه در مدل‌سازی در اولین مرحله ضرایب حاصل از رگرسیون ساخته شده بر مبنای مؤلفه‌های اصلی در قالب یک بردار در ماتریس بردار مشخصه ضرب می‌شوند. در مرحله بعد با توجه به بی بعد کردن داده‌ها در آغاز کار، با استانداردسازی مقادیر موجود از طریق تفریق میانگین تعریف شده از هر متغیر و سپس تقسیم آن بر انحراف استاندارد به دست آمده (رابطه ۱) و سپس با ضرب این کسر در حاصل ضرب بردار ضرایب و



شکل ۲: داده‌های تحقیق

فک سنگ‌شکن نیز جهت انجام مقایسه بهتر در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین ساختار مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مورد آزمون قرار گرفته و مدل نمایی از دیدگاه آماری مناسب‌تر از سایرین تشخیص داده شده است. در این جدول، R^2 ضریب تعیین (Coefficient of determination (R-square)) نام دارد که بیانگر میزانی از تغییرپذیری متغیر وابسته است که توسط مدل رگرسیون قابل بیان است. همچنین RMSE (Root Mean Square Error) اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده را نمایش می‌دهد [۳۶]. با توجه به میزان بالاتر R^2 و مقدار نسبتاً پایین‌تر RMSE، سطح ورودی دهانه سنگ‌شکن به عنوان متغیر مستقل مدل تک متغیره هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی این نوع سنگ‌شکن پیشنهاد می‌شود. با توجه به شکل ۳، توابع هزینه سرمایه‌ای

۵- تحلیل رگرسیون تک‌متغیره

به منظور انجام یک تخمین مقدماتی می‌توان با مشخص کردن مؤثرترین متغیر، هزینه‌های عملیاتی و هزینه سرمایه‌ای را در قالب یک مدل تک متغیره بررسی کرد. تعیین ساختار این مدل به ملاحظات آماری و تجربه محققین در گذشته وابسته خواهد بود. در رابطه با سنگ‌شکن‌های فکی، نوع معادلات ارائه شده در مقالات گذشته به صورت نمایی و با متغیر مستقل سطح ورودی دهانه سنگ‌شکن است [۲۳ و ۳۰].

با توجه به اهمیتی که توان دستگاه در هزینه اغلب تجهیزات در بخش خردایش دارد، مقایسه‌ای بین دو پارامتر سطح ورودی دهانه و توان سنگ‌شکن به عنوان متغیر مستقل ورودی به مدل صورت گرفته است. البته تحلیل رگرسیون مربوط به توابع هزینه بر پایه اندازه دهانه و عرض

(دلار) و عملیاتی (دلار بر ساعت) به ترتیب به صورت رابطه (۲) و (۳) به دست آمده‌اند. در این شکل محور عمودی بیانگر هزینه و محور افقی معرف سطح ورودی دهانه سنگ شکن است.

$$C_c = 417000 \times OA^{1.01} \quad (2)$$

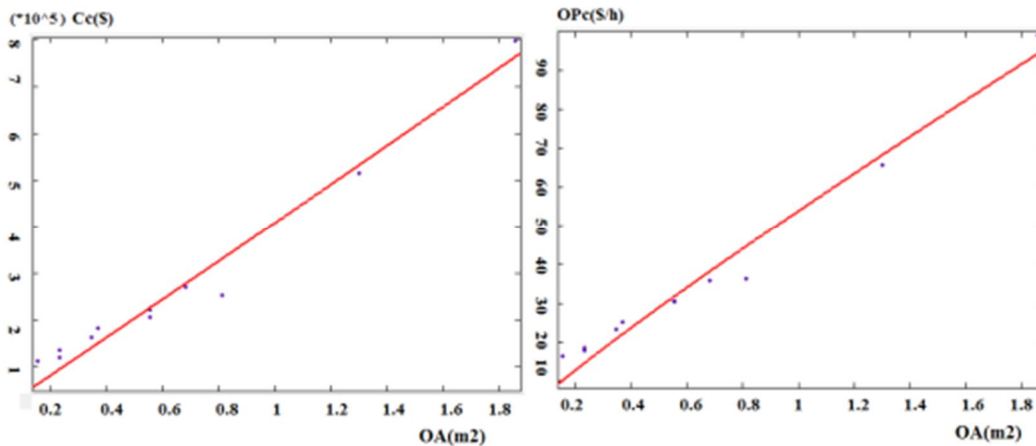
$$OPc = 53.95 \times OA^{0.90} \quad (3)$$

که در آن
 C_c : هزینه‌های سرمایه‌ای،
 OPc : هزینه عملیاتی،

OA : سطح ورودی دهانه سنگ شکن (Opening Area) است.

جدول ۱: پارامترهای آماری تحلیل رگرسیون تک‌متغیره

نوع هزینه	متغیر مستقل	ضریب متغیر	توان متغیر	آماره‌های مورد بررسی	
				RMSE	R ²
سرمایه‌ای	سطح ورودی دهانه (متر مربع)	۴۱۷۰۰۰	۱/۰۱	۴۰۸۷۰	۰/۹۶۶
	توان (کیلووات)	۱۳۸۱	۱/۱۷	۵۲۰۲۰	۰/۹۴۶
	دهانه (متر)	۵۳۴۲۰۰	۱/۳۹	۶۸۸۲۰	۰/۹۰۱
	عرض فک (متر)	۱۷۴۸۰۰	۳/۴۴۱	۱۰۸۱۰۰	۰/۷۵۶
عملیاتی	سطح ورودی دهانه (متر مربع)	۵۳/۹۵	۰/۹۰	۴/۶۰۰	۰/۹۶۹
	توان (کیلووات)	۰/۳۱	۱/۰۶	۵/۴۸۹	۰/۹۵۶
	دهانه (متر)	۶۸/۳۸	۱/۲۲۹	۸/۰۰۴	۰/۹۰۸
	عرض فک (متر)	۲۵/۹۰	۲/۹۵۷	۱۳/۷۰۰	۰/۷۲۹



شکل ۳: نمودار تغییرات هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی نسبت به سطح ورودی دهانه

۶- تحلیل رگرسیون چندمتغیره

به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات هزینه، لازم است تا با پیشرفت روند تخمین و دست‌یابی به جزئیات بیشتر، متغیرهای فنی بیشتری را در محاسبات دخیل کرد. انتخاب این پارامترها وابسته به اطلاعات در دسترس و درجه اهمیت هر کدام از آن‌ها است. متغیرهای به کار رفته در مدل در

بخش ۳ معرفی شده‌اند [۱۰]. در صورت وجود همبستگی بالای بین داده‌های مربوط به متغیرهای مستقل، قبل از ارائه مدل لازم است تا همبستگی بین داده‌ها به شکل مناسبی حذف گردد. روند حذف این همبستگی تحت عنوان روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی در بخش ۴ شرح داده شده است [۱۰].

که با وجود ارجحیت فنی مدل ارائه شده در مقاله پیش رو، مدل سه متغیره نیز با استفاده از پارامترهای یاد شده ساخته و با مدل دو متغیره مقایسه شده است. استفاده از متغیرهای اندازه دهانه و عرض فک در قالب مدل سه متغیره خطای بیش‌تری را نسبت به مدل دو متغیره مبتنی بر سطح ورودی دهانه نشان داد. البته توابع هزینه رگرسیون تک‌متغیره نیز در بخش قبل مؤید کارایی کم‌تر اندازه دهانه و عرض فک بودند [§۰]. بنابراین با در نظر گرفتن دو پارامتر سطح ورودی دهانه و توان دستگاه مدل رگرسیون چند متغیره برای هزینه‌های مربوطه ارائه می‌شود. جدول ۵ مقادیر مشخصه را برای مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد [§۰]. سهم هر یک از مؤلفه‌های اصلی در ساخت مدل به صورت درصدی از واریانس کل مشاهده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد به منظور حفظ کل واریانس موجود برای توصیف متغیر وابسته، از هر دو مؤلفه اصلی برای ساخت مدل استفاده می‌شود.

جدول ۵: مقادیر مشخصه و واریانس مربوط به هر مؤلفه

مؤلفه‌ها	مقدار مشخصه	واریانس کلی %
مؤلفه اول	۱/۹۸	۹۹/۳۶
مؤلفه دوم	۰/۰۲	۰/۶۴

پس از حذف همبستگی بین داده‌ها (ساخت مؤلفه‌های اصلی توسط نرم افزار Statistica)، مدلی با در نظر گرفتن مؤلفه‌های اصلی به عنوان متغیرهای مستقل جدید، ساخته می‌شود که ضرایب آن تحت عنوان B به همراه سایر پارامترهای مؤثر در بررسی معناداری ضرایب برای این نوع سنگ‌شکن در جدول ۶ نشان داده شده است.

در این جدول، تنها ضرایبی که از نظر آزمون معناداری t استیودنت معتبر تشخیص داده شده و موجب معناداری کل مدل می‌گردند، ارائه شده‌اند. معناداری کل مدل در این آزمون از طریق آماره p-value سنجیده می‌شود، بدین صورت که مثلاً در سطح اعتماد ۹۵٪ باید مقدار p-value کم‌تر از ۰/۰۵ و یا در سطح اعتماد ۹۰٪ کمتر از ۰/۱ باشد.

جدول ۴ میزان بالای همبستگی را در مورد متغیرهای سنگ‌شکن فکی با بازوی مضاعف نشان می‌دهد.

در روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی، به تعداد داده‌های موجود برای هر متغیر مستقل، داده‌هایی نیز برای هر مؤلفه اصلی که آن‌ها نیز از نظر تعداد با متغیرهای مستقل اولیه برابر هستند، ساخته خواهد شد.

جدول ۴: میزان همبستگی بین متغیرها

متغیر	G	W	P
G	۰/۹۷	۰/۹۲	۱/۰۰
W	۰/۸۹	۱.۰۰	۰/۹۲
P	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۹۷

نحوه تشکیل این داده‌ها به گونه‌ای است که همبستگی بین متغیرها را به حداقل می‌رساند. با توجه به اینکه در مدل حاضر تعداد متغیرها محدود بوده و امکان بررسی تمام مؤلفه‌ها وجود دارد، کلیه مؤلفه‌های بدست آمده در تحلیل چند متغیره به عنوان مؤلفه‌های معنی‌دار در نظر گرفته شده و در تحلیل چند متغیره مورد بررسی قرار می‌گیرند. به عبارتی مؤلفه‌های اصلی با مقدار مشخصه کوچک‌تر از یک نیز در مدل وارد شده است. به این ترتیب با در نظر گرفتن این مؤلفه‌ها به عنوان متغیرهای مستقل و هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی به عنوان متغیر وابسته، تحلیل چند متغیره صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از تغییر متغیر مناسب می‌توان تابع به دست آمده را به صورت رابطه‌ای از متغیرهای اولیه حاضر در مدل ارائه داد که در بخش ۴ شرح داده شده است [§۰].

قبل از ارائه این روش لازم است تا به اختصار نحوه انتخاب پارامترهای صحیح جهت مدل‌سازی شرح داده شود. همان‌طور که اشاره شد برای هر سنگ‌شکن حداقل سه پارامتر فنی اندازه دهانه (G)، عرض فک (W) و توان (P) در دسترس است. اما با توجه به پیشینه مطالعات [۲۳، ۲۴، ۲۷، ۲۸] و نیز کیفیت مدل که درباره آن بحث خواهد شد، بهتر است تا از پارامتر سطح ورودی دهانه به جای دو بعد طول و عرض آن استفاده کرد. از این رو در این تحقیق از دو پارامتر سطح ورودی دهانه (OA) و توان جهت ساخت مدل رگرسیون دو متغیره استفاده شده است. لازم به ذکر است

$$Cc = 200521 \times OA + 1790 \times P - 10092 \quad (5)$$

$$OPc = 23.84 \times OA + 0.21 \times P + 2.24 \quad (6)$$

همچنین ضرایب بدست آمده برای اجزای هزینه عملیاتی در جدول ۸ قابل مشاهده است.

جدول ۸: ضرایب توابع رگرسیونی هزینه‌های اقلام هزینه عملیاتی

د	B	a	اقلام هزینه
-۰/۳۰	۰/۰۵	۵/۹۲	تعمیرات اساسی
-۰/۴۸	۰/۰۹	۹/۶۰	نگهداری و تعمیرات
-۰/۰۱	۰/۰۷	-۰/۰۳	انرژی
-۰/۰۵	۰/۰۱	۱/۱۴	روغن کاری
۳/۱۵	-۰/۰۱	۵/۸۱	قطعات فرسودنی

۷- آزمون مدل

به منظور ارزیابی کارایی توابع چند متغیره از روش میانگین نرخ خطای مطلق (Mean Absolute Error Rate) استفاده شده است. در این روش میانگین اختلاف هزینه‌های واقعی و هزینه‌های تخمین زده شده بر اساس درصدی از مقدار هزینه واقعی مورد سنجش قرار می‌گیرند. این مقدار از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۷، ۳۵]:

$$MAER = \left[\sum_{i=1}^n \left| (C_{e_i} - C_{a_i}) / C_{a_i} \right| \times 100 \right] / n \quad (7)$$

که در آن

C_e : هزینه‌های تخمین زده شده

C_a : هزینه‌های واقعی و n : تعداد داده‌ها است.

جدول ۹ میزان میانگین نرخ خطای مطلق مربوط به مدل‌های ارائه شده را نشان می‌دهد. این میزان خطا در خصوص توابع اقلام هزینه عملیاتی به طور میانگین ۸/۳۵ درصد است.

جدول ۹: میزان خطای مربوط به سنگ شکن فکی

MAER	نوع هزینه	نوع مدل
۱۳/۰۴	هزینه سرمایه‌ای	رگرسیون دو متغیره
۸/۷۷	هزینه عملیاتی	
۱۶/۳۸	هزینه سرمایه‌ای	رگرسیون تک متغیره
۱۳/۴۹	هزینه عملیاتی	

جدول ۶: نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره بر پایه آنالیز مؤلفه‌های اصلی با استفاده از دو پارامتر سطح دهانه و توان

هزینه‌ها	آماره‌ها	پارامترها	
		انحراف استاندارد B	B
سرمایه‌ای	عرض از مبدأ	۱۳۸۳۸/۰۱	۲۷۶۰۱۴/۵۰
	مؤلفه ۱	۱۰۲۹۵/۷۰	۱۴۷۰۷۶/۸۰
عملیاتی	عرض از مبدأ	۱/۳۰	۳۶/۲۶
	مؤلفه ۱	۰/۹۶	۱۷/۴۹

جدول ۷ مقادیر ماتریس بردار مشخصه برای سنگ‌شکن فکی با بازوی مضاعف که بیان‌کننده رابطه بین متغیرهای اولیه و مؤلفه‌های اصلی هستند را نشان می‌دهد. متغیرهای مورد بررسی سطح ورودی دهانه و توان دستگاه هستند.

جدول ۷: مقادیر بردار مشخصه

مؤلفه اول	مؤلفه دوم	
۰/۷۰۷	-۰/۷۰۷	سطح (متر مربع)
-۰/۷۰۷	-۰/۷۰۷	توان (کیلووات)

در ادامه سطر مربوط به هر متغیر اولیه در این ماتریس در ستون ضرایب B (ستون سوم از سمت راست) ارائه شده در جدول ۶ ضرب می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۱) می‌توان ضرایب اصلی مربوط به هر متغیر اولیه را بازیابی کرد. با توجه به این رابطه هر کدام از متغیرهای اولیه (توان و سطح ورودی دهانه) جهت استاندارد سازی از میانگین خود کسر و بر انحراف معیار تقسیم می‌شوند. سپس یک رابطه خطی از ضرب این مقدار در مقادیر حاصل از ضرب بردار ضرایب (B) و ماتریس بردار مشخصه حاصل می‌آید [۰]. توابع نهایی هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف به شکل رابطه ۴ قابل بیان هستند.

$$Cost = a \times OA + b \times P + d \quad (4)$$

که در آن:

OA: سطح ورودی دهانه

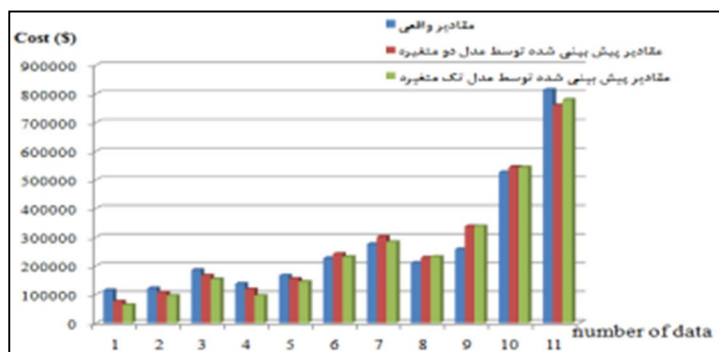
P: توان سنگ‌شکن

a و b ضرایب متناظر و d عرض از مبدأ می‌باشند.

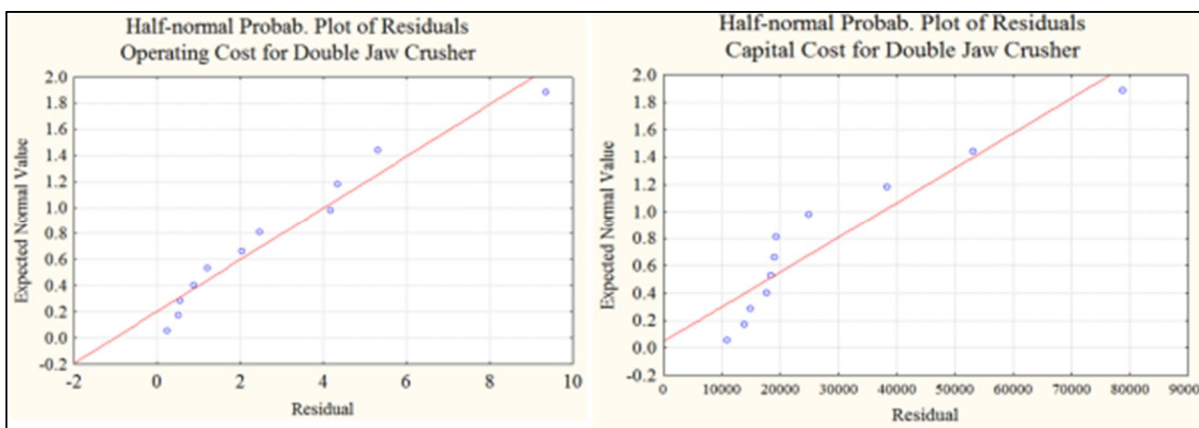
به عنوان مثال هزینه سرمایه‌ای و هزینه عملیاتی کل مربوط به سنگ شکن فکی با بازوی مضاعف به صورت روابط ۵ و ۶ نشان داده شده است.

هزینه در مرحله پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی را نشان می‌دهند. همچنین نمودار توزیع احتمال مقادیر باقی‌مانده حاصل از مدل‌های ارائه شده، دارای روند نسبتاً نرمالی بوده و مؤید کفایت مدل‌ها است (شکل ۵).

شکل ۴ میزان اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده را برای هزینه سرمایه‌های سنگ‌شکن فکی با بازوی مضاعف نمایش می‌دهد. مقادیر نسبتاً پایین خطای بدست آمده از مدل، قابلیت مدل جهت استفاده در تخمین



شکل ۴: مقایسه مقادیر حقیقی و پیش‌بینی شده هزینه سرمایه‌ای



شکل ۵: توزیع نرمال باقیمانده‌ها

بخش خردایش کارخانه در سه مرحله فرض شده است. در مرحله سنگ‌شکنی اولیه، استفاده از یک سنگ‌شکن فکی با توان ۹۰ کیلو وات و ظرفیت ۲۵۰ تن بر ساعت پیش‌بینی شده است. حداکثر اندازه ورودی به این سنگ‌شکن ۸۰۰ و حداکثر اندازه خروجی ۲۰۰ میلی‌متر است. اندازه ابعاد دهانه ورودی به سنگ‌شکن در حدود ۳۶×۲۰ اینچ یا $۹۱۴/۴ \times ۵۰۸$ میلی‌متر است.

هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی این دستگاه بر مبنای توابع رگرسیون چند متغیره در جدول ۱۰ ارائه شده است.

۸- تخمین هزینه‌های سنگ‌شکنی یک معدن فرضی

به منظور نشان دادن چگونگی کارکرد مدل، در این قسمت هزینه‌های سنگ‌شکنی اولیه یک معدن طلای فرضی طلا با استفاده از مدل برآورد می‌شود. تناژ ذخیره قابل استخراج (با توجه به عیار حد ۱ ppm طلا)، ۱۲.۵۱ میلیون تن با عیار میانگین ۴.۱۸ ppm طلا و نسبت باطله‌برداری نهایی ۱:۱۳.۵۷ فرض شده است. نرخ تولید سالانه معدن و کارخانه فرآوری به ترتیب ۷۵۰۰۰۰ تن کانسنگ و ۳۰۶۰ کیلوگرم طلا و همچنین ۱۲۷۵ کیلوگرم نقره به عنوان محصول جانبی است. عملیات بهره‌برداری از معدن ۱۷/۵ سال به طول خواهد انجامید.

جدول ۱۰: مقادیر هزینه برای سنگ‌شکن فکی معدن طلای فرضی

متغیرهای مستقل	هزینه
سطح ورودی دهانه، توان	هزینه سرمایه‌ای (دلار)
۲۴۴۱۵۳	هزینه عملیاتی (دلار بر ساعت)
۳۲	

۹- نتیجه گیری

عملیات سنگ‌شکنی یکی از بخش‌های اصلی خردایش مواد معدنی بوده و سهم قابل توجهی از هزینه تولید کارخانه‌های فرآوری را به خود اختصاص می‌دهد. طراحی و انتخاب تجهیزات سنگ‌شکنی در خلال مطالعات پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی پروژه‌های معدنی مستلزم دسترسی به ابزاری سریع و با دقت کافی است. مدل‌های متعددی تاکنون جهت تخمین هزینه‌های ماشین‌آلات فرآوری از جمله سنگ‌شکن‌ها ارائه شده‌اند. این مدل‌ها از یک طرف تک‌متغیره بوده و از تأثیر سایر پارامترهای مهم چشم‌پوشی شده است و از طرف دیگر بسیار قدیمی بوده و روزآمد سازی آن‌ها توأم با خطای زیادی است.

مدل ارائه شده در این تحقیق امکان تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف با استفاده از توابع رگرسیون تک و چند متغیره را فراهم می‌کند. توابع تک‌متغیره زمانی که اطلاعات کافی در دسترس نبوده و یا نیاز به انجام تخمین با دقت بالا نمی‌باشد، مناسب هستند. در حالیکه مدل چند متغیره با به‌کارگیری تئوری قوی ریاضی و تعریف مجموعه‌ای از متغیرهای توصیفی، امکان انجام یک تخمین دقیق‌تر را فراهم می‌کند. بر این اساس، در این تحقیق برای ساخت مدل‌های چند متغیره ابتدا با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی همبستگی بین داده‌ها حذف و سپس با انتخاب متغیرهای مناسب مدل نهایی ارائه شد. میزان خطا با توجه به معیار میانگین نرخ خطای مطلق نشان از دقت مناسب مدل تخمین دارد. همچنین به‌کارگیری مدل جهت تخمین هزینه‌های سنگ‌شکنی اولیه یک معدن طلای فرضی چگونگی کارکرد مدل را نشان می‌دهد.

۱۰- منابع

- [۱] بنیسی، صمد؛ (۱۳۸۸)؛ مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی؛ تهران؛ انتشارات دانشگاه هرمزگان، چاپ سوم.
- [۲] نعمت‌اللهی، حسین؛ (۱۳۸۷)؛ *کانه آرایی*؛ تهران، انتشارات دانشگاه تهران، جلد اول، چاپ پنجم.
- [3] Wills, B.A., Tim, N.; 2005; *Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to The Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, 2nd edition. Elsevier Ltd.
- [4] Gupta, A., Yan, D.S.; 2006; *Mineral processing and operations an introduction*, Elsevier B.V.
- [5] Bidanda B.; 1998; "Development of an intelligent castability and cost estimation system", *International Journal of Production Research*, Vol. 36, Issue: 2, pp. 547-568.
- [6] Akintoye A., Fitzgerald E.; 2000; "A survey of current cost estimating practices in the UK", *Construction management and economics*, Vol. 18, pp. 161-172.
- [7] Sayadi, A.R., Lashgari, A. and Basiri M.H.; 2010; "Loading and Hauling Equipments Maintenance cost estimation in surface Mining", *The 1st international workshop and congress on eMaintenance*, 22-24 Jun, Lulea, Sweden.
- [8] Sayadi, A.R., Lashgari, A. and Paraszczak, J.; 2012; "Hard-rock LHD cost estimation using single and multiple regression based on principle component analysis", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 27, pp. 133-141.
- [9] Sayadi, A.R., Lashgari, A., Fouladgar, M.M. and 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.
- [10] Boehm, B.W.; 1984; "Software Engineering Economics", *IEEE Translation on Software Engineering*, pp. 4-21.
- [11] Zhang, Y.F., Fuh, J.Y.H. and Chan, W.T.; 1996; "Feature-based cost estimation for packaging products using neural networks", *Comput Ind.*, Vol. 32, pp. 95-113.
- [12] Shehab, E.M., Abdalla, H. S.; 2001; "Manufacturing cost modeling for concurrent product development", *Rob. Comput.-Integr. Manufact.* Vol. 17, No. 4, pp. 341-353.
- [13] Shehab, E.M., Abdalla, H.S.; 2002; "A design to cost system for innovative product development", *Proc. Inst. Mech. Eng., Part B*, Vol. 216, No. 7, pp. 999-1019.
- [14] Ben-Arieh, D., Qian, L.; 2003; "Activity-Based cost management for design and development stage", *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 83, pp. 169-183.

- [28] O'Hara, T.A., Suboleski, C.S.; 1992; "Costs and cost estimation", SME mining engineering handbook, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, United State, Volume 1., Chapter 6.3, pp. 405-424.
- [29] Camm, T.W.; 1994; "Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations", Mining Engineering, Vol. 46, No. 6, pp. 559-562.
- [30] 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.
- [31] Venter, J.J.; 1997; "A Novel Approach to Circuit Synthesis in Mineral Processing", Mineral Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 287-299.
- [32] 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.
- [33] Info Mine; 2012; Mining Cost Service Indexes. <<http://www.infomine.com>>.
- [34] Timm, N. H.; 2002; Applied Multivariate Analysis, s.l.: Springer-Verlag New York, Inc.
- [35] Kaiser, H.F.; 1960; "The application of electronic computers to factor analysis", Educ. Pschol. Meas. Vol. 20, pp. 141-151.
- [36] Gujarati; 2004; Basic Econometrics, Fourth Edition, The McGraw-Hill Company.
- [37] Montgomery, C., George, C.R.; 2002; Applied statistics and probability for engineers, Third edition, Douglas, Arizona state university.
- [15] Cavalieri, S., Maccarrone, P. and Pinto, R.; 2004; "Parametric Vs Neural network models for the estimation of production costs: A case study in the automotive industry", Int. J. Prod. Econ., Vol. 91, No. 2, pp. 165-177.
- [16] Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. and Seneviratne, L.; 2006; "Product cost estimation: Technique classification and methodology review", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, pp. 563-575.
- [17] Huang X.X.; 2011; "The adaptation of Product Cost Estimation Techniques to Estimate the Cost of Service", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 25, Issue (4-5), pp. 417-431.
- [18] Bowers, W., Hunt, D.R.; 1970; "Application of mathematical formula to repair cost data", Transactions of the ASAE, Vol. 13, pp. 806-809.
- [19] Gwang-Hee, K., Sung-Hoon, A. and Kyung-In, K.; 2004; "Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning", Building and environment, Vol. 39, pp. 1235-1242.
- [20] Prasad, L.; 1969; "Mineral Processing Plant Design and Cost Estimation", pp. 3-15.
- [۲۱] صیادی، احمدرضا؛ کیانی؛ ۱۳۸۵؛ "ارائه نرم‌افزاری به منظور برآورد هزینه‌های سرمایه‌ای ماشین‌آلات معادن روباز"، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، سال پانزدهم، ش ۶۰، ص ۱۶۶ تا ۱۷۷.
- [22] Stebbins, S.A.; 1987; "Cost estimation handbook for small placer mines", US Bureau of Mines Information Circular 9170, pp. 94.
- [23] Mular, A. L.; 1982; "Mining and mineral processing equipment costs and preliminary capital cost estimations", Montreal Canadian Mining and Metallurgy Institute (CIM), Vol. 25, pp. 255.
- [24] Mular, A.L., Poulin, R.; 1998; CAPCOSTS: A handbook for estimating mining and mineral processing equipment costs and capital expenditures and aiding mineral project evaluations, CIM Special Vol. 47, pp. 319, Canadian Mineral Processors Division of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal.
- [25] Redpath, J. , CANMET S. Ltd; 1986; "Estimation of preproduction and operating costs of small underground deposits", Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.
- [26] USBM; 1987; US Bureau of mines cost estimating system handbook, Mining and beneficiation of metallic and nonmetallic minerals expected fossil fuels in the United States and Canada, United States Bureau of Mines, Open file report 10-87, Denver, Colorado.
- [27] O'Hara, T.A.; 1980; Quick guide to the evaluation of ore bodies, CIM Bulletin, pp. 34-43.