نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)
دوره دهم، شماره ۲۶، سال ۱۳۹۴، صفحه ۶۹ تا ۸۲
Vol. 10, No. 26, 2015, pp.69-82

تخمین هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی هیدروسیکلون‌های استاندارد و فشار منفی

مهسا خوشفرمان برجی[۱]، احمدرضا صیادی*[۲]، محمدرضا خالصی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، mahsa.khoshfarman@modares.ac.ir
۲- * دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (نویسنده مسئول)، sayadi@modares.ac.ir
۳- دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، mrkhalesi@modares.ac.ir

(پذیرش ۳ اردیبهشت ۱۳۹۳)

چکیده

در مطالعات امکان‌سنجی و برنامه‌ریزی کارخانه‌های فرآوری، روش‌ها و ابزارهای سریع و قابل اعتماد که امکان تخمین هزینه را فراهم کنند نقش مهمی بعهده دارند. هیدروسیکلون‌ها به عنوان یکی از انواع طبقه‌بندی کننده‌های موادمعدنی به‌سبب کارآیی بالایی که به‌ویژه در یک مدار بسته با آسیا دارند، از اهمیت زیادی برخوردارهستند. در این تحقیق، سعی شده مدلی جدید و کارآمد جهت تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی این تجهیزات ارائه شود. این مدل در قالب توابع هزینه تک و چندمتغیره توسعه داده شده‌است. در این راستا، متغیرهای فنی مؤثر بر هزینه مورد بررسی قرارگرفته و نحوه ورود صحیح آن به‌مدل با آزمون-های آماری مناسب سنجیده شده‌است. در تابع رگرسیون تک‌متغیره، قطر و یا ظرفیت دستگاه و در تابع چندمتغیره، هر دو متغیر به‌صورت همزمان به‌عنوان متغیر مستقل مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌منظور از بین‌بردن همبستگی بین متغیرهای مستقل در تحلیل چند متغیره، از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شده‌است. این تکنیک با بهره‌گیری از روابط خطی جدید بین متغیرهای اولیه، اقدام به‌حذف همبستگی بین متغیرهای مستقل ورودی به‌مدل می‌نماید. درادامه کارآیی هریک از این توابع با استفاده از میانگین نرخ خطای مطلق و بررسی باقیمانده‌ها ارزیابی شده‌است. به‌طور میانگین میزان خطای ۶/۷۵ و ۴/۰۸ درصد به‌ترتیب برای رگرسیون تک و چندمتغیره بدست آمده که میزان قابل قبولی در مطالعات امکان‌سنجی کارخانه‌های فرآوری است. همچنین توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل، گواهی برکارآیی مدل‌های ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی

تخمین هزینه، هیدروسیکلون، رگرسیون، آنالیز مؤلفه‌های اصلی

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

طبقه‌بندی مواد ازجمله مراحل مهم عملیات خردایش در کارخانه‌های فرآوری محسوب می‌شود. در فرآیند طبقه بندی، عمل جداسازی ذرات کوچک‌تر از مدار موجب کاهش هزینه‌های مربوط به‌ساخت (تأسیسات پیچیده‌تر و بزرگ‌تر) و همچنین مصرف انرژی شده و سهم عمده‌ای در افزایش کارآیی دستگاه‌های مدار خردایش ایفا می‌کند. ازجمله مهم‌ترین و پرکاربردترین دستگاه‌های طبقه‌بندی‌کننده مواد، هیدروسیکلون‌ها هستند که به‌طور معمول دریک مدار بسته با آسیا فعالیت می‌کنند [۱،۲].

دو دسته عمده هیدروسیکلون‌ها شامل هیدروسیکلون‌های استاندارد (فشار مثبت) و هیدروسیکلون‌های فشار منفی هستند. اساس کار هیدروسیکلون استاندارد استفاده از نیروی گریز از مرکز [1] ناشی از دوران مواد در داخل دستگاه است که افزایش سرعت ته‌نشینی را موجب می‌شود. بدنه اصلی هیدروسیکلون از ظرفی استوانه-مخروطی شکل تشکیل شده‌است که در آن بار ورودی تحت فشار (فشار مثبت) از طریق لوله ورودی و به‌طور مماس به‌داخل آن جریان‌یافته و سبب ایجاد یک حرکت گردابی داخل آن می‌شود. در نتیجه در امتداد محور آن ناحیه‌ای با فشار کم (استوانه‌ای از هوا) به‌وجود می‌آید که معمولاً از طریق دهانه ته‌ریز به هوای خارج اتصال‌دارد. در نهایت مواد تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز ناشی از این حرکت گردابی و نیروی مقاومت سیال [2] و برمبنای ابعاد و چگالی دانه‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. دانه‌های با سرعت بیش‌تر (درشت‌تر یا سنگین‌تر) به ته‌ریز هدایت‌شده و باقی‌مانده مواد که نتوانسته‌اند بر نیروی مقاومت سیال غلبه‌کنند به سرریز منتقل می‌شوند [۲، ۳].

عملکرد اصلی هیدروسیکلون فشارمنفی نیز همانند هیدروسیکلون استاندارد است، با این تفاوت که با نصب یک پمپ مکشی [3] اضافی در بخش ته‌ریز و ایجاد یک مغزه هوای مصنوعی [4] به‌افزایش کارآیی هیدروسیکلون کمک قابل توجهی خواهد شد. ایجاد این فشار منفی در حین عملکرد دستگاه موجب کاهش فشار تخلیه سیکلون [5] و مصرف انرژی می‌شود. همچنین ازجمله مزایای دیگر استفاده از این روش، کاهش آب موجود درمحصول ته‌ریز [6] و افزایش عمر پمپ خوراک‌دهنده به هیدروسیکلون است. در نهایت می‌توان گفت هدف اصلی، بهره‌گیری از این روش برای کاهش هزینه‌های فرآیند جداسازی است [۴].

برای هر هیدروسیکلون می‌توان متغیرهای فنی خاصی را برشمرد که بر حد جدایش مواد اثرگذار خواهند بود. اما اساسی‌ترین متغیر هیدروسیکلون قطر آن است و با افزایش آن، حد جدایش افزایش می‌یابد. همچنین ظرفیت هر هیدروسیکلون از جمله پارامترهای مهمی محسوب می‌شود که درحالت کلی با افت فشار داخل هیدروسیکلون متناسب است [۵،۲]. لازم به‌ذکر است جنس هیدروسیکلون‌هایی که توسط سازندگان مختلف ساخته می‌شوند بسیار متنوع است، اما اکثر آن‌ها از بدنه [7] فلزی ساخته شده‌اند و در داخل آن‌ها پوشش مناسب و قابل تعویضی نصب شده است. رایج‌ترین این پوشش‌ها، پوشش لاستیکی است. این نوع پوشش سبک، ارزان‌قیمت، نشکن و با قابلیت ساینده‌گی کم و تعویض آسان است [۲]. در این مقاله هر دو نوع هیدروسیکلون مورد بررسی، دارای بدنه فولادی و جنس پوشش لاستیکی هستند. شکل۱ نمایی از هیدروسیکلون استاندارد را نشان می‌دهد.

شکل۱. نمای کلی یک هیدروسیکلون [۲]

تملک و استفاده از این تجهیزات بخش نسبتا قابل توجهی از هزینه‌های عملیات پرعیارکنی مواد معدنی را

www.SID.ir
Archive of SID

شامل می‌شود [۲]. علاوه بر این در هنگام طراحی و نصب کارخانه‌های فرآوری، بهینه‌سازی ناوگان تجهیزات با هدف کمینه‌سازی قیمت تمام‌شده عملیات طبقه‌بندی مواد مد نظر قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، دقت و اعتبار برآورد هزینه از عوامل کلیدی در موفقیت پروژه محسوب می‌شود. زیرا برآورد هزینه علاوه بر اینکه میزان هزینه‌ها را به‌منظور تحلیل‌های اقتصادی در اختیار می‌گذارد، ابزاری برای سهولت محاسبات تامین مالی پروژه و همچنین مدیریت هزینه‌ها در مراحل بعدی به‌شمار می‌رود [۶]. تخمین دست بالا یا دست پایین هزینه‌ها می‌تواند منجر به‌شکست پروژه گردد. در مراحل اولیهٔ بررسی پروژه‌های معدنی، تخمین مناسب و رضایت‌بخش هزینه‌ها کمتر امکان‌پذیر است زیرا ضمن اینکه داده‌های کافی در اختیار نبوده و گزینه‌های متعدد فنی نیز باید بررسی شوند، دسترسی به کارشناسانی که هم در مدیریت ماشین‌آلات و هم تخمین هزینه خبره باشند نیز به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. مضاف‌آنکه، فرایند تخمین زمان‌بر و پرهزینه است. بنابراین، دسترسی به ابزاری که امکان تخمین قابل اعتماد و سریع هزینه‌ها را فراهم آورد ضروری می‌نماید.

ابزارهای متعددی باتوجه به‌نوع پروژه مورد بررسی و میزان داده‌های در دسترس جهت توسعه مدل‌های تخمین هزینه قابل استفاده است [۷] . دراین میان روش‌های آماری مبتنی بر رگرسیون از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و با توجه به مبانی قوی ریاضی همچنان مورد توجه تخمین‌گرهای حرفه‌ای است [۸].

از دهه ۶۰ میلادی تاکنون، مدل‌های رگرسیونی متعددی در ارتباط با تخمین هزینه‌های پروژه‌های معدنی ارائه شده‌اند [۹-۱۴]. در اکثر این منابع، تخمین هزینه به‌صورت تک‌متغیره و نمایی برای هر سیستم، بخش یا دستگاه به‌طور خاص صورت گرفته است. این مدل‌ها روزآمد نبوده و استفاده از آن‌ها توام باخطای بالایی است. بدین جهت در سال‌های اخیر نیز تلاش‌های جدیدی جهت تخمین هزینه‌های مربوط به معدن و کارخانه فرآوری صورت گرفته‌است [۱۵-۱۷]. یکی از جدیدترین تلاش‌ها، ارائه مدلی پارامتری برای تخمین هزینه‌های تجهزات آسیا کنی است که ۶ گونه اساسی آسیاها را در بر می‌گیرد [۱۸].

هیدروسیکلون‌های استاندارد (فشارمثبت) و هیدروسیکلون‌های فشار منفی دو دسته عمده هیدروسیکلون‌ها را شامل می‌شوند. با توجه به حوزه عملکرد وسیع هیدروسیکلون در صنایع مختلف، بررسی‌های زیادی بر روی جنبه‌های فنی این دستگاه و همچنین متغیرهای مؤثر بر هزینه آن صورت پذیرفته است، اما در خصوص برآورد هزینه‌های آن‌ها کمتر تحقیق جدیدی در دسترس است[۱۹].

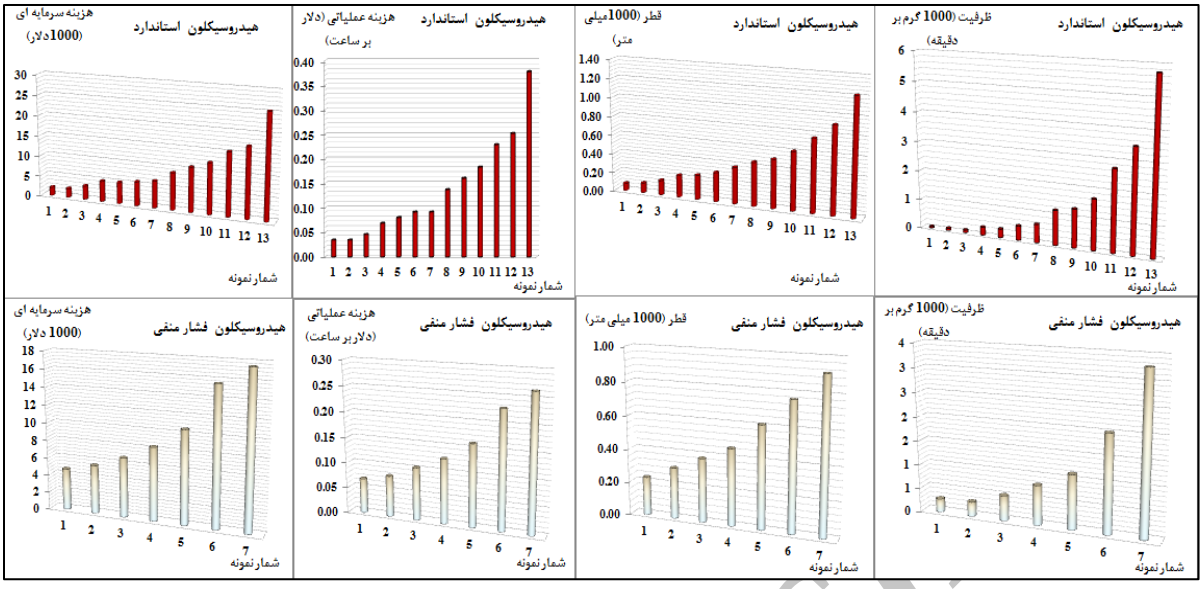
در این تحقیق، مدلی جدید برای تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی این تجهیزات در قالب توابع رگرسیون تک و چند متغیره ارائه شده‌است.

۲- داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱ داده‌ها

داده‌های فنی و اقتصادی مربوط به ۱۳هیدروسیکلون استاندارد و ۷ هیدروسیکلون فشارمنفی با بدنه فولادی جمع‌آوری شد [۲۰] (شکل ۲). این تجهیزات توسط سازندگان مختلف ماشین‌آلات تولیدشده و در معادن مختلف به ویژه ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخی از مشخصات فنی و دامنه هزینه‌های مرتبط در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. هزینه‌های سرمایه‌ای بر حسب دلار آمریکا و هزینه‌های عملیاتی بر حسب دلار آمریکا بر ساعت می‌باشند. اجزای هزینه عملیاتی عبارت‌اند از: هزینه‌های تعمیرات اساسی دوره‌ای [۸] شامل قطعات و دستمزد و هزینه‌های تعمیر و نگهداری [۹] شامل قطعات و دستمزد. سایر اقلام رایج نظیر انرژی، روغن و قطعات فرسودنی [۱۰] با توجه به‌نوع عملکرد هیدروسیکلون هزینه خاصی را به‌خود اختصاص نمی‌دهند. قابل ذکر است که هزینه دستمزد اپراتور دستگاه نیز لحاظ نشده است. در این تحقیق متغیرهای موثر بر هزینه، شامل قطر و ظرفیت بوده که در قالب یک مجموعه در تحلیل چند متغیره و به صورت تفکیک شده در تحلیل تک متغیره مورد استفاده قرار می‌گیرند.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. داده‌های تحقیق

جدول ۱. مشخصات آماری هیدروسیکلون‌ها

			مشخصه‌های آماری			
			حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
هیدروسیکلون استاندارد	متغیرهای فنی	قطر (میلی‌متر)	۷۶	۱۲۲۰	۴۵۹	۳۴۱
		ظرفیت (گرم در دقیقه)	۴۷	۵۷۵۰	۱۳۹۰	۱۶۹۶
	هزینه	سرمایه‌ای (دلار)	۱۹۷۶	۲۵۲۶۸	۹۲۲۳	۶۸۵۱
		عملیاتی (دلار بر ساعت)	۰/۰۳۴۳	۰/۳۷۷۸	۰/۱۳۷۴	۰/۱۰۱۵
هیدروسیکلون فشار منفی	متغیرهای فنی	قطر (میلی‌متر)	۲۲۹	۹۱۴	۵۲۳	۲۵۱/۰
		ظرفیت (گرم در دقیقه)	۲۷۵	۳۲۷۷	۱۱۸۹	۱۰۹۹
	هزینه	سرمایه‌ای (دلار)	۴۷۱۵	۱۷۵۱۰	۹۸۴۵	۴۹۹۴
		عملیاتی (دلار بر ساعت)	۰/۰۶۹	۰/۲۶۳۳	۰/۱۴۷۲	۰/۰۷۴۶

تحلیل آماری داده‌ها همبستگی [11] شدیدی را بین متغیرهای مستقل نشان می‌دهد (جدول ۲). یکی از مفروضات اساسی در تحلیل رگرسیون خطی، نبود همبستگی بین متغیرهای مستقل است. زیرا وجود این همبستگی موجب خواهد شد تا هر متغیر به‌طور کاملاً مستقل روند تغییرات هزینه را بیان نکند[۲۱]. بنابراین قبل از تحلیل رگرسیون چندمتغیره باید به این موضوع توجه کرده و با استفاده از روش‌های مناسب آنرا حذف نمود [۲۲].

۲-۲ - رویکرد تحلیل آماری

در تحلیل رگرسیون تک متغیره، ضمن مشخص‌کردن مؤثرترین متغیر، روند تغییرات هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای نسبت به آن متغیر بررسی شده و تابع هزینه بدست می‌آید. ساختار مدل به‌ملاحظات آماری و تجربه محققین وابسته می‌باشد.

جدول۲. همبستگی متغیرهای مستقل هیدروسیکلون استاندارد

	قطر	ظرفیت
قطر	۱/۰۰	۰/۹۷۸۷
ظرفیت	۰/۹۷۸۷	۱/۰۰

در این راستا با توجه به صورت نمایی تابع هزینه

www.SID.ir

تجهیزات فرآوری مواد معدنی در تحقیقات پیشین [۱۲] و نتایج بررسی‌های آماری انجام‌شده در تحقیق پیش‌رو، مدل تک‌متغیره نمایی هزینه بر حسب قطر هیدروسیکلون مورد استفاده قرار گرفته‌است (رابطه ۱).

هیدروسیکلون‌ها به‌طور معمول در یک مدار بسته با آسیا کار می‌کنند بطوریکه عامل ظرفیت این دستگاه نیز بر کارآیی مدار تأثیر گذاشته و افزایش آن کاهش هزینه‌ها را بدنبال خواهد داشت. با این دیدگاه، امکان استفاده از عامل ظرفیت نیز به‌عنوان یک متغیر مستقل با استفاده از نرم‌افزار متلب [۱۲] بررسی شده و کارایی توابع هزینه بر حسب قطر و ظرفیت از لحاظ پارامترهای آماری مورد آزمون قرار گرفته‌اند.

(۱) ه

در این رابطه x بیانگر متغیر مستقل (ورودی مدل) و a و b پارامترهای مدل هستند.

روند مدل‌سازی رگرسیون چند متغیره در شکل ۳ ارائه شده است. در این روش به منظور رفع همبستگی بین متغیرهای مستقل و ساخت مناسب‌ترین مدل از دو روش بهره برده‌شد. در هر دو روش ابتدا با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی [۱۳]، همبستگی بین متغیرهای مستقل برطرف و سپس اقدام به‌ساخت مدلی خطی شده‌است.

در روش اول، متغیرهای مستقل بدون تغییر مانند رابطه ۲ وارد مدل می‌شوند. به این مدل در مقاله حاضر، مدل خطی اطلاق می‌شود.

$$\text{هزینه} = a * X_1 + b * X_2 + c \qquad (۲)$$

در این رابطه a و b به‌ترتیب پارامترهای مدل رگرسیون مربوط به‌قطر (X_1) و ظرفیت (X_2) بوده و c نیز عرض از مبدا است.

در روش دوم با توجه به پذیرفته‌شدن مدل نمایی تک-متغیره، متغیر مستقل قطر به‌صورت لگاریتمی وارد مدل هزینه‌ای دومتغیره همانند رابطه ۳ شده‌است. البته ورود متغیر ظرفیت نیز به‌صورت لگاریتمی مورد آزمون قرارگرفت که نتایج معناداری از این مدل حاصل‌نشد.

این مدل در مقاله حاضر، مدل چندمتغیره لگاریتمی نام داده شده است.

$$\text{هزینه} = a * \ln(X_1) + b * X_2 + c \qquad (۳)$$

شکل ۳. روند مدل‌سازی

Archive of SID
www.SID.ir

۲-۲-۱ روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی

در این روش تعداد مشخصی مؤلفه اصلی [14] به‌عنوان متغیر مستقل جدید جهت ورود به‌مدل ساخته خواهدشد. هرکدام از این مؤلفه‌ها به‌تنهایی شامل یک ترکیب خطی از متغیرهای مستقل اولیه می‌باشند و تلاش برآن است تا ماکزیمم واریانس قابل قبول از دسته اولیه را حفظ کنند. تعداد این مؤلفه‌ها با شمار متغیرهای اولیه برابر بوده و اعتبار هریک از آن‌ها باتوجه به‌معیار انتخابی به‌نام مقدار مشخصه [15] تعیین می‌شود. براساس این معیار، هرمؤلفه با مقدار مشخصه بالاتر، دارای اعتبار کافی جهت ورود به‌مدل خواهدبود. در ادامه پس از انتخاب مؤلفه‌های ورودی به مدل و برقراری ارتباط صحیح بین این متغیرهای جدید و متغیر-های وابسته (هزینه)، این متغیرهای استاندارد شده جهت استفاده از مقادیر خام، به‌حالت اولیه باز گردانده می‌شوند. برای این منظور از وزن‌های ماتریسی هر مؤلفه اصلی استفاده می‌شود که در قالب بردار مشخصه ماتریس همبستگی [16] ارائه می‌گردند و درادامه با بهره‌گیری از رابطه ۴ ضرایب مربوط به‌مؤلفه اصلی به‌حالت اولیه خود باز می-گردند [۲۰، ۲۳].

$$X \qquad (۴)$$

که در آن X ضریب رگرسیون نهایی، X_{dl} نتیجه ضرب بردار B در ماتریس بردار مشخصه، X_{ave} میانگین و S_x انحراف استاندارد متغیر مربوطه می‌باشند.

۲-۲-۲- ارزیابی کارآیی توابع

به‌منظور ارزیابی کارایی توابع به‌دست آمده، می‌توان از روش میانگین نرخ خطای مطلق [17] استفاده نمود. 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:

$$MAER = [\Sigma|(C_e - C_a)/C_a| \times 100]/n \qquad (۵)$$

که در این رابطه C_e، C_a و n به‌ترتیب هزینه‌های تخمین زده‌شده، هزینه‌های واقعی و تعداد داده‌ها می‌باشند. البته بررسی روند نرمال‌بودن باقیمانده‌های هر مدل به‌وسیله نمودار هیستوگرام و تابع احتمال نرمال نیز روشی مناسب جهت اطمینان از صحت نتایج بدست آمده است. توزیع متقارن باقیمانده‌ها پیرامون میانگین صفر در نمودار هیستوگرام و هم‌چنین پراکندگی مناسب اطراف خط ۴۵ درجه موجود در نمودار احتمال نرمال نشان دهنده توزیع نرمال باقیمانده‌ها و در نتیجه اعتبار مدل ساخته شده می-باشد [۲۳].

۳- نتایج

۳-۱- رگرسیون تک‌متغیره

با اعمال روش رگرسیون تک‌متغیره، روند تغییرات هزینه برحسب قطر (میلی‌متر) و ظرفیت هیدروسیکلون (گرم بر دقیقه) بررسی شد. بر این اساس توابع هزینه به‌تفکیک سرمایه‌ای، عملیاتی و اقلام اصلی هزینه عملیاتی برای هر دو نوع هیدروسیکلون به‌دست آمد که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

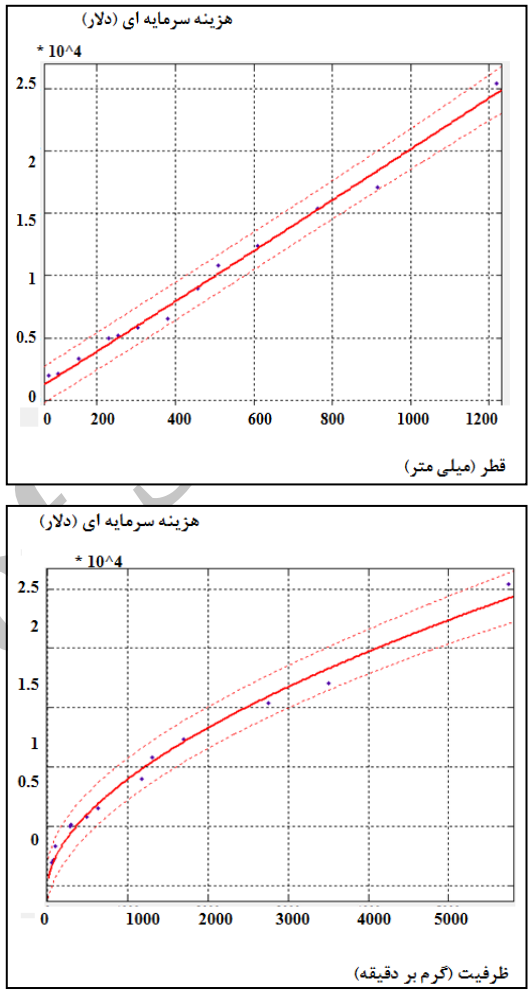
۳-۱-۱- توابع هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی

در شکل ۴، روند تغییرات هزینه سرمایه‌ای هیدروسیکلون استاندارد نشان داده شده است. توابع هزینه و پارامترهای آماری مربوطه نیز مطابق با رابطه ۱ در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در این روابط، نماد D نشان‌دهنده قطر و C نشان‌دهنده ظرفیت هیدروسیکلون می‌باشند. متذکر می‌شود که برای هر دو نوع سیکلون انواع توابع مختلف از جمله خطی، چند جمله‌ای و نمایی در محیط نرم‌افزار[12] مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مشخص شد که ضرایب مربوط به تابع نمایی در سطح اطمینان ۹۵٪ از اعتبار بالاتری برخوردار بودند. نتایج این آزمون برای هزینه‌های مربوط به-هیدروسیکلون فشارمنفی نیز مشابه با نوع استاندارد است. در این جدول، R^2 ضریب‌تعیین [18] است که بیانگر میزانی از واریانس متغیر وابسته‌است که توسط مدل رگرسیون مورد نظر قابل بیان است. همچنین "آر ام اس ای" [19] اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌شده را نمایش می‌دهد [۲۱، ۲۲].

همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل ساخته‌شده براساس قطر از معناداری بالاتری برخورداراست، اما استفاده از پارامتر ظرفیت نیز نتایج قابل قبولی را در اختیار قرار می‌دهد.

Archive of SID
www.SID.ir

بنابراین درصورت عدم دسترسی به‌پارامتر قطر دستگاه به‌ویژه در مراحل اولیه طراحی، می‌توان از پارامتر ظرفیت جهت انجام تخمین هزینه استفاده‌کرد.



شکل۴. روند تغییرات هزینه هیدروسیکلون استاندارد

۳-۱-۲- اقلام هزینه‌های عملیاتی

بررسی‌های انجام‌شده بر روی داده‌های موجود نشان می‌دهد که هزینه تعمیر و نگهداری هیدروسیکلون به‌طور میانگین ۶۶ درصد و هزینه تعمیرات اساسی حدود ۳۴ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی را شامل می‌شود. این امر اهمیت هزینه نگهداری هیدروسیکلون را در حین چرخه عملیاتی مدار خردایش نشان می‌دهد. تفاوت بین این دو دسته هزینه در ابعاد مختلف هیدروسیکلون استاندارد و فشارمنفی در شکل ۵ قابل مشاهده است. نمودار الف به‌هیدروسیکلون استاندارد و نمودار ب به هیدروسیکلون فشارمنفی اشاره می‌کند.

توابع مربوط به‌این دو نوع هزینه نیز برای هرکدام از انواع هیدروسیکلون‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

۳-۱-۳- تبدیل به‌مقیاس[۲۰]

در خلال مطالعات پیش‌امکان‌سنجی هزینه‌های پروژه یا یک ماشین بر حسب یک ظرفیت عملیاتی مشخص برآورد می‌شود. در برخی از شرایط به علت تغییر پارامترهای طراحی و در نتیجه تغییر ظرفیت لازم است که عملیات تخمین هزینه تکرار شود، فرایندی که می‌تواند زمان‌بر و پرهزینه باشد. در این ارتباط درصورت در دست‌داشتن ضرایب تبدیل به‌مقیاس می‌توان هزینه مورد نظر را به‌آسانی و با دقت قابل قبولی طبق رابطه ۶ برآورد نمود [۲۴].

$$\text{هزینه۲} = \text{هزینه۱} \times \left(\frac{\text{ظرفیت۲}}{\text{ظرفیت۱}}\right)^{Se} \qquad (۶)$$

در این رابطه، "هزینه۲" بیانگر هزینه مورد نظر، "هزینه۱" بیانگر میزان هزینه در دسترس، Se میزان ضریب تبدیل به‌مقیاس هزینه هیدروسیکلون بر حسب ظرفیت آن است. این ضریب بر مبنای میزان توان (b) در تابع تک متغیره هزینه (رابطه ۱ و جدول ۳) بدست می‌آید.

جدول ۵ مقادیر ضریب تبدیل به‌مقیاس هر دو نوع سیکلون را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که مقدار Se <۱ بیانگر وجود صرفه مقیاس و Se >۱ نمایانگر نبود صرفه مقیاس است [۲۴].

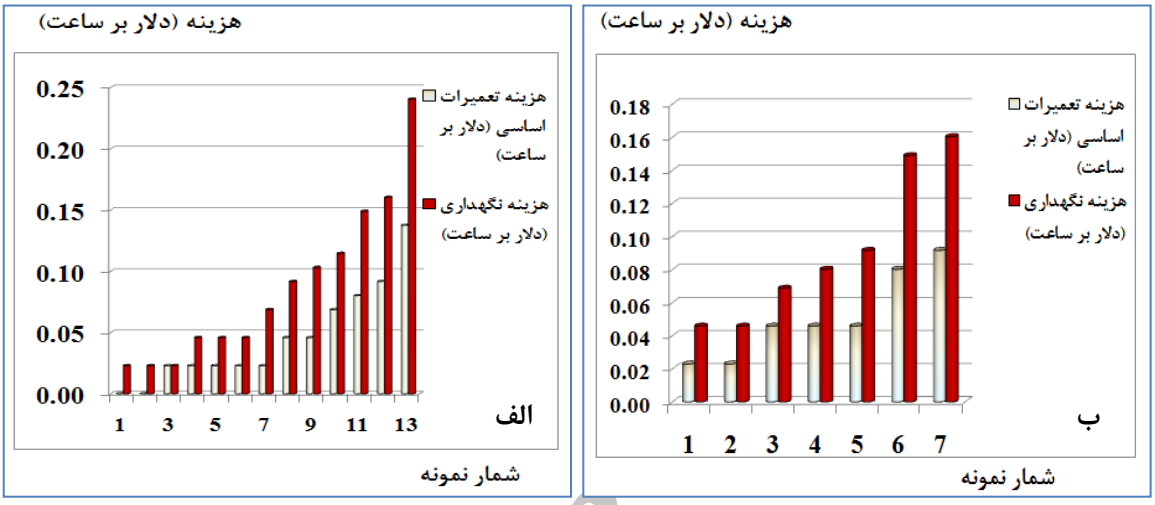
۳-۱-۴- رابطه بین قطر و ظرفیت هیدروسیکلون

شکل ۶ روند تغییرات نمایی قطر (D) را نسبت به ظرفیت هیدروسیکلون (C) نمایش می‌دهد. شناخت ارتباط بین این پارامترها، انتخاب صحیح دستگاه را در مراحل امکان‌سنجی پروژه تسهیل می‌کند. نمودار الف به هیدروسیکلون استاندارد و نمودار ب به هیدروسیکلون فشارمنفی اشاره دارد. جدول ۶ نیز تابع قطر نسبت به ظرفیت هیدروسیکلون را برای هر دو نوع نشان می‌دهد.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳. توابع هزینه تک‌متغیره

هزینه	هیدروسیکلون استاندارد			هیدروسیکلون فشارمنفی		
	آماره‌های مورد بررسی		تابع هزینه	آماره‌های مورد بررسی		تابع هزینه
	R^2	RMSE		R^2	RMSE	
سرمایه‌ای (دلار)	۰/۹۹۲	۶۴۹/۵۰۰	$Y = 17.96D^{1.017}$	۰/۹۸	۷۰۷/۳۰۰	$Y = 12.14D^{1.069}$
	۰/۹۹۰	۷۵۱/۷۰۰	$Y = 180.7C^{0.5658}$	۰/۹۷	۸۰۶/۱۰۰	$Y = 268.3C^{0.5215}$
عملیاتی (دلار بر ساعت)	۰/۹۸۹	۰/۰۱۱	$Y = 0.000271D^{1.015}$	۰/۹۹	۰/۰۰۸	$Y = 0.00018D^{1.069}$
	۰/۹۸۸	۰/۰۱۲	$Y = 0.0002714C^{0.5645}$	۰/۸۹	۰/۰۱۰	$Y = 0.0040C^{0.5219}$



شکل۵. مقایسه بین اقلام هزینه (الف هیدروسیکلون استاندارد و ب هیدروسیکلون فشارمنفی)

جدول ۴. توابع هزینه عملیاتی

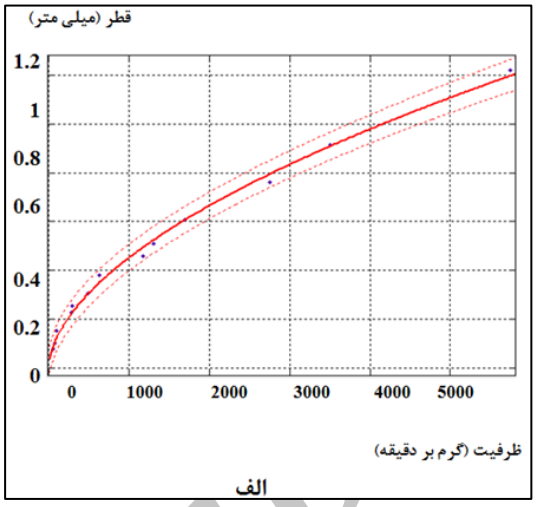
هزینه	نوع هیدروسیکلون	
	استاندارد	فشارمنفی
تعمیرات اساسی (دلار بر ساعت)	$Y = 296500D^{1.187}$	$Y = 688600D^{1.054}$
	$Y = 0.000402C^{0.6715}$	$Y = 0.001366C^{0.5231}$
تعمیر و نگهداری (دلار بر ساعت)	$Y = 0.0001612D^{1.025}$	$Y = 0.0001284D^{1.049}$
	$Y = 0.00165C^{0.5703}$	$Y = 0.0026C^{0.5141}$

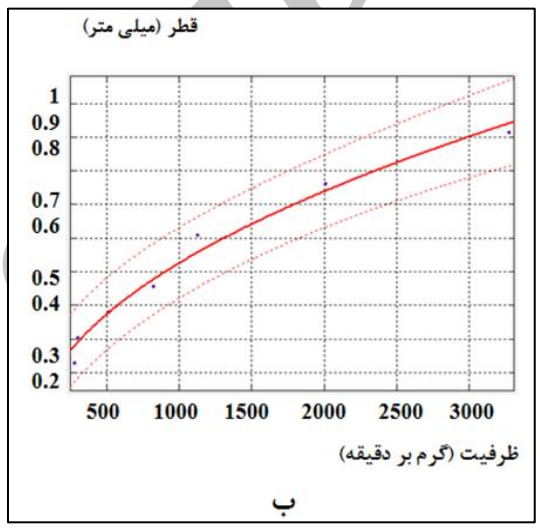
جدول۵. مقادیر تبدیل به‌مقیاس (Se) هزینه‌ها

قلم هزینه	نوع هیدروسیکلون	
	استاندارد	فشارمنفی
هزینه سرمایه‌ای	۰/۵۶۵۸	۰/۵۲۱۵
هزینه عملیاتی کل	۰/۵۶۴۵	۰/۵۲۱۹
هزینه تعمیرات اساسی	۰/۵۷۰۳	۰/۵۲۳۱
هزینه نگهداری	۰/۶۷۱۵	۰/۵۱۴۱

Archive

www.SID.ir





شکل۶. نمودار رابطه بین قطر و ظرفیت دو نوع هیدروسیکلون

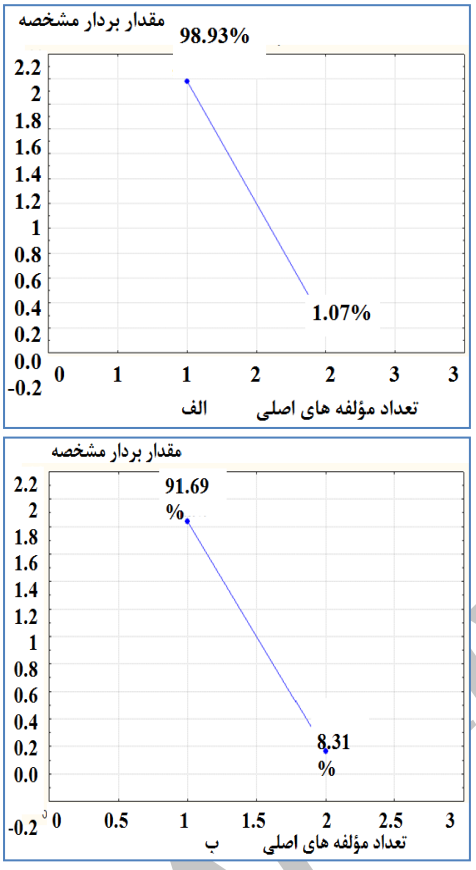
جدول۶. تابع قطر نسبت به ظرفیت

$D = a*C^b$		
نوع هیدروسیکلون	ضریب a	ضریب b
هیدروسیکلون استاندارد	۹/۷۵	۰/۵۶
هیدروسیکلون فشارمنفی	۱۷/۸۱	۰/۴۹

۳-۲- رگرسیون چندمتغیره

باتوجه به همبستگی بالای بین ظرفیت و قطر هیدروسیکلون که در جدول ۲ نشان داده شد، از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی[۱۳] جهت رفع همبستگی بین متغیرهای مستقل استفاده شده‌است. براساس این روش، دو مؤلفه – اصلی[۱۴] برای هر روش مدل‌سازی مد نظر قرار می‌گیرد.

تعداد مقادیر مشخصه هر مؤلفه به‌همراه سهم هرکدام در توصیف متغیر وابسته در شکل ۷ برای هیدروسیکلون استاندارد نشان داده شده‌است. نمودار الف و ب به ترتیب به مدل‌های خطی و چند متغیره لگاریتمی اشاره دارند. این نمودار به عنوان یک خروجی از نرم افزار "استتیستیکا"[۲۱] استخراج شده است.



شکل۷. سهم مؤلفه‌های اصلی در ساخت مدل دو متغیره

همان‌طور که مشاهده می‌شود محور افقی به تعداد مؤلفه‌های اصلی و محور عمودی به مقدار مشخصه مربوط به هر مؤلفه اشاره دارد. با توجه به اینکه ۲ مؤلفه اصلی در ساخت مدل به‌کار گرفته شده است، همان‌طور که انتظار می‌رود مؤلفه اول بالاترن مقدار مشخصه ممکن (عددی نزدیک به ۲) را به خود اختصاص داده است. به‌عبارت دیگر، مؤلفه اصلی اول (که شماره ۱ در محور افقی به آن اختصاص دارد) به‌میزان بیش از ۹۰ درصد و با مقدار مشخصه نزدیک به ۲ سعی در حذف همبستگی بین دو متغیر اولیه و بیان

www.SID.ir

مناسب یک رابطه خطی بین آن‌ها را دارد. مؤلفه دوم با توجه به نمودار مقادیر مشخصه‌ای کم‌تر از ۱ را دارا می‌باشد، اما به‌منظور دقت بیش‌تر و دست‌یابی به ماکزیمم واریانس قابل قبول، مؤلفه اصلی دوم نیز در مدل‌سازی استفاده می‌شود.

هر مدل ساخته‌شده با استفاده از این مؤلفه‌های اصلی، متغیر وابسته (هزینه) را با کمک داده‌های تولید شده [۲۲] که از لحاظ تعداد با داده‌های متغیرهای اولیه اصلی برابری می‌کنند، برآورد خواهدکرد [۲۵]. در واقع برای هر مولفه اصلی یک دسته داده (به‌تعداد داده های اولیه) تولید می‌شود به‌گونه‌ای که ضرایب ساخته شده به‌کمک این دسته داده‌ها، هیچ همبستگی را با هم نشان نمی‌دهند. ضرایب بدست‌آمده برای هر مؤلفه اصلی به‌همراه آزمون‌های انجام‌شده جهت بررسی معناداری ضرایب برای هزینه سرمایه‌ای دو مدل ساخته شده هیدروسیکلون استاندارد در جدول ۷ نشان داده شده‌است.

در این جدول نتایج حاصل از بررسی معناداری کل مدل تحت آزمون تحلیل واریانس [۲۳] یا آزمون اف[۲۴] در سطح معناداری ۰/۰۵ ارائه شده‌است. مقادیر نسبتاً بالای این کمیت درمقابل حداقل سطح معناداری مورد نظر [۲۵] نیز در این جدول قابل مشاهده بوده و نشان دهنده معناداری کلی تابع رگرسیون ارائه شده می‌باشد.

معناداری هرکدام از ضرایب نیز ازطریق آزمون معناداری ضرایب t سنجیده‌شده و کلیه ضرایب معتبر تشخیص داده شده‌اند. درادامه این ضرایب در ماتریس بردار ویژه ضرب شده و سپس با استفاده از رابطه (۴) برای استفاده مستقیم از متغیرهای مستقل اولیه استفاده می‌شوند. با توجه به این رابطه هر کدام از متغیرهای اولیه (قطر و ظرفیت) جهت استاندارد سازی از میانگین خود کسر و بر انحراف استاندارد تقسیم می‌شوند. سپس رابطه خطی به دست آمده در مقادیر حاصل از ضرب بردار ضرایب و ماتریس بردار مشخصه ضرب می‌شود.

جدول ۸ مقادیر ماتریس بردار مشخصه که بیان‌کننده رابطه بین متغیرهای اولیه و مؤلفه‌های اصلی برای هیدروسیکلون‌های استاندارد و فشارمنفی است را نمایش می‌دهد.

جدول ۹ نیز ضرایب نهایی مدل رگرسیون دو متغیره را در هر دو حالت هیدروسیکلون استاندارد و فشارمنفی را برای هر دو مدل نمایش می‌دهد. در این جدول D و C بیانگر قطر و ظرفیت هستند.

جدول۷. نتایج تحلیل رگرسیونی بر پایه تحلیل آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای هزینه سرمایه‌ای هیدروسیکلون استاندارد

مدل‌ها	آماره‌ها		پارامترها		
	F-value	**P-level**	عرض از مبدا	ضریب مؤلفه ۱	ضریب مؤلفه ۲
چند متغیره خطی	۷۸۵/۷۲۱۹	۰/۰۰۰	۹۲۲۳/۴۴	۴۸۴۷/۰۷	-۲۶۹۹/۶۵
چند متغیره لگاریتمی	۸۸۶/۴۲۲۸	۰/۰۰۰	۹۲۲۳/۴۴	۵۰۰۳/۱۴	-۲۱۵۴/۸

جدول۸. مقادیر بردار مشخصه

	مؤلفه اول	مؤلفه دوم
قطر	۰/۷۰۷	-۰/۷۰۷
ظرفیت	-۰/۷۰۷	-۰/۷۰۷

جدول ۹. پارامترهای آماری مدل رگرسیون دومتغیره

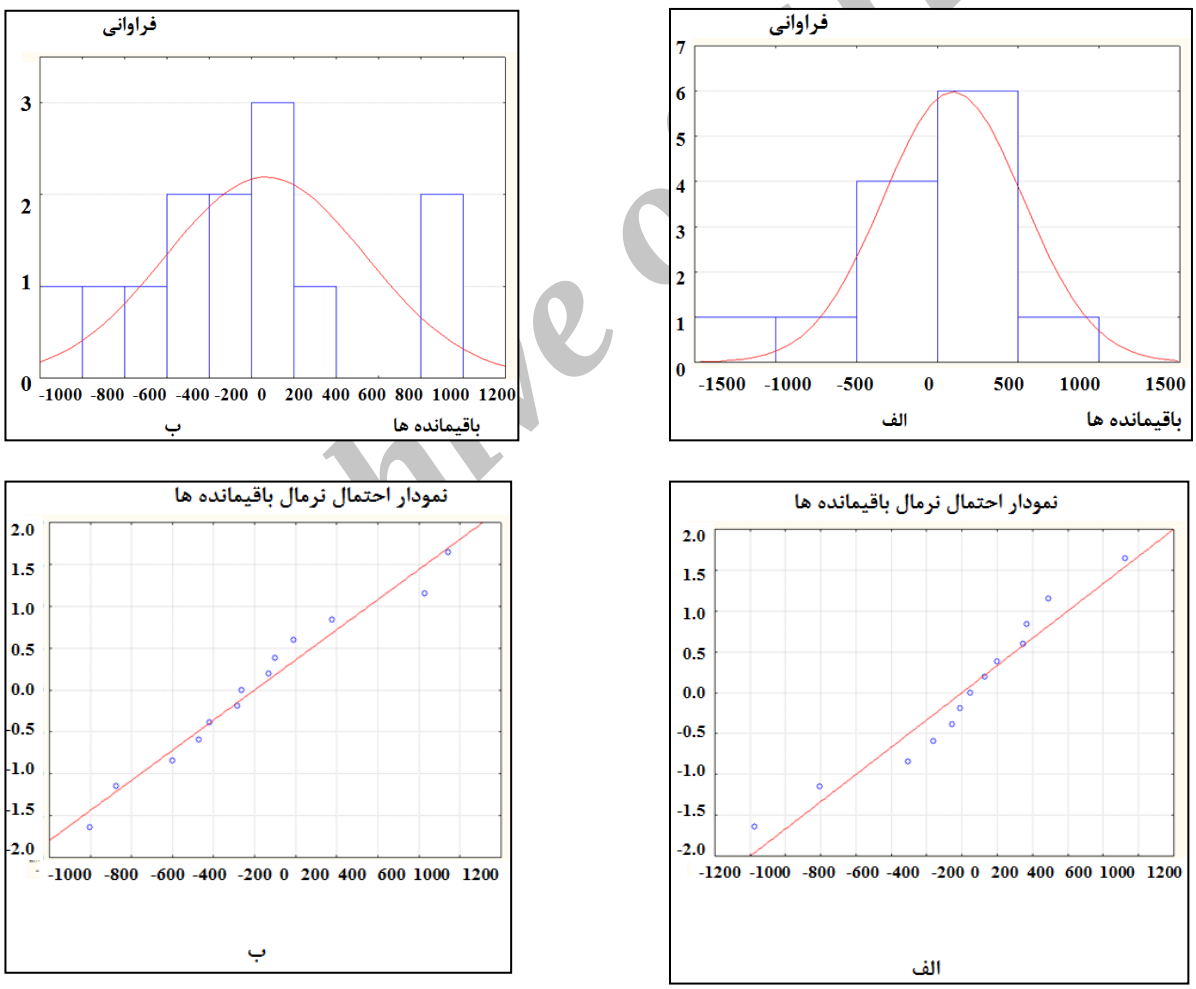
هزینه	نوع هیدروسیکلون	
	استاندارد	فشارمنفی
سرمایه‌ای	$Y = 793.92 + 15.65D + 0.89C$	$Y = 1950.93 + 9.95D + 2.27C$
	$Y = -8940.36 + 2399.34ln\,(D) + 2.98C$	$Y = -24105.82 + 5070.98ln(D) + 2.3C$
عملیاتی	$Y = 0.015 + 0.00022D + 0.000016C$	$Y = 0.029 + 0.00015D + 0.000034C$
	$Y = -0.1207 + 0.0334\,ln(D) + 0.000045C$	$Y = -0.3623 + 0.076\,ln(D) + 0.000035C$

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۳- بررسی کارآیی مدل

در اولین قدم جهت بررسی کارآیی مدل به بررسی نمودار هیستوگرام و تابع احتمال نرمال پرداخته شده است. شکل ۸ هیستوگرام باقیمانده‌ها و نمودار احتمال نرمال مدل هزینه سرمایه‌ای هیدروسیکلون استاندارد را در دو حالت خطی (نمودار الف) و لگاریتمی (نمودار ب) نشان می‌دهد. باتوجه به نکات ارائه شده در بخش ۲-۲-۲ توزیع نرمال‌تر مدل خطی در این حالت قابل مشاهده است. برای سایر توابع ارائه شده نیز این مقایسه انجام شده و نتایج مشابهی به‌دست آمده است.

جدول ۱۰ میزان میانگین نرخ خطای مطلق مربوط به-مدل‌های ارائه‌شده را نشان می‌دهد. میزان خطای کم‌تر توابع مربوط به مدل چند متغیره خطی، اعتبار بیش‌تر این مدل را تایید می‌کند. با پذیرفتن این مدل میزان میانگین خطای هزینه‌های هیدروسیکلون استاندارد و هیدروسیکلون فشار منفی به‌ترتیب ۶/۷۶ و ۴/۰۸ درصد است. این میزان از خطا برای مدل‌های ارائه شده قابل قبول بوده و کارآیی نسبتا خوب آن‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۹ میزان اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده هزینه‌های هیدروسیکلون استاندارد (بر اساس تابع چندمتغیره خطی) را نمایش می‌دهد.

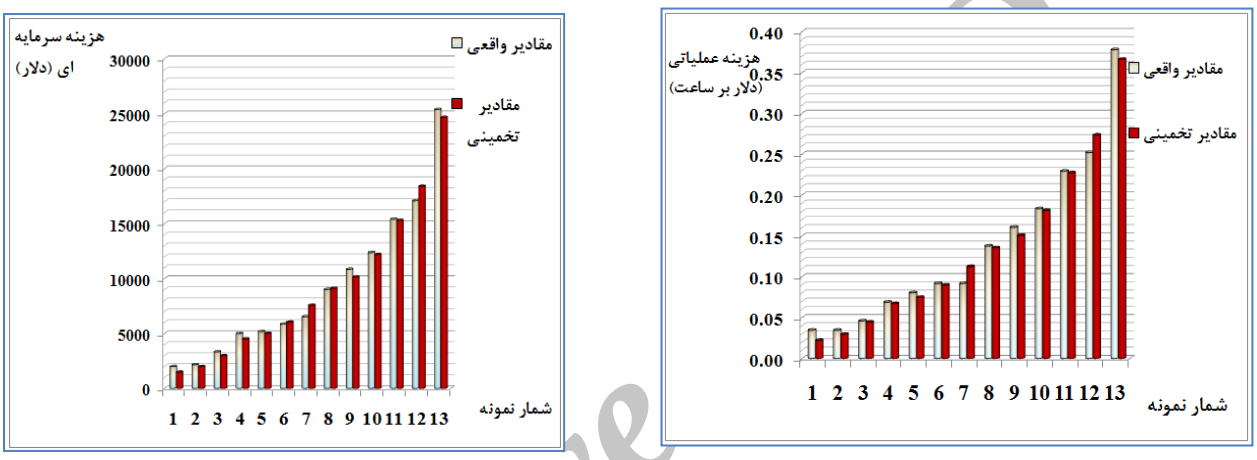


شکل۸. هیستوگرام باقیمانده‌ها و نمودار احتمال نرمال برای مدل‌های چند متغیره هزینه سرمایه‌ای هیدروسیکلون استاندارد

www.SID.ir

جدول ۱۰. میزان میانگین نرخ خطای مطلق توابع هزینه (درصد)

هزینه	نوع مدل	نوع هیدروسیکلون	
		استاندارد	فشارمنفی
سرمایه‌ای	تک‌متغیره	۷/۴۳	۵/۲۳
	چندمتغیره خطی	۵/۰۴۸	۳/۵۱
	چندمتغیره لگاریتمی	۵/۸۸	۶/۴۷
عملیاتی	تک‌متغیره	۸/۴۴	۴/۰۷۵
	چندمتغیره خطی	۶/۱۱	۳/۵۲
	چندمتغیره لگاریتمی	۷/۲۱	۵/۴۱



شکل۹ تفاوت بین مقادیر واقعی و تخمینی هزینه‌های هیدروسیکلون استاندارد

۴- نتیجه‌گیری

هدف این مقاله ارائه مدل تخمین هزینه‌های هیدروسیکلون‌ها به‌عنوان یکی از مهم ترین و پرکاربردترین دستگاه‌های طبقه‌بندی کننده مواد است. بدین منظور، ضمن بررسی پارامترهای مؤثر بر هزینه از لحاظ نوع و نحوه ورود به مدل، از روش رگرسیون به‌دلیل مبانی قوی ریاضی و کاربرد وسیع آن در برآورد هزینه استفاده شده‌است. مدل تک‌متغیره هزینه به‌صورت نمایی و مدل رگرسیون چندمتغیره با بهره‌گیری از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی ارائه شده‌است. متغیرهای مستقل شامل قطر و ظرفیت هیدروسیکلون هستند. این مدل‌ها امکان تخمین سریع و با دقت کافی هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی را برای انجام مطالعات پیش‌امکان‌سنجی و امکان‌سنجی کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی فراهم می‌کند. خطای پایین مدل‌های ارائه‌شده که باتوجه به‌معیار میانگین نرخ خطای مطلق و ابزار آماری دیگر مورد آزمون قرارگرفته، مؤید این مهم است.

Archive
www.SID.ir

منابع

[1] Austin, L. G.; 1984; "P*rocess Engineering of Size Reduction: Ball Mill"*, Society of Mining Engineers of The American Institue of Mining and Petroleum Engineers Inc., 473-478.

[2] Wills B. A.; Tim N.; 2005; *"Will's mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*", 2th edition. Elsevier Ltd.

[3] King, R. P.; 2001; *"Modeling and simulation of mineral processing systems"*, *Butter worth-Heinemann*, 81-83.

[4] Wlodziniez J. T.; Wojciech, J.T.; 1990; "*United States Patent*", Patent number 4927298, May 22

[5] Nematollahi, H.; 2008, Mineral processing, Tehran university Publication, 5th Edition, pp 270-275.

[6] Akintoy, A.; 2000; "*Analysis of Factors Influencing Project Cost Estimating Practice*", Construction Management and Economics, 77-89.

[7] Niazi, A.; Dai, J. S.; Balabani, S.; Seneviratne, L.; 2006; "*Product cost estimation: Technique classification and methodology review"*, Journal of manufacturing science and engineering, Vol. 128, 563–575.

[8]Mason, A.K.; Smith, A.E.; 1997; "*Cost estimation predictive modeling: regression versus neural network"*, Eng Eco. 42(2), 137-162

[9] Camm, T.W.; 1994; "*Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations Mining Engineering"*, Vol. 46, No.6, 559–562.

[10] 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"*, Canadian mineral processors division of Canadian institute of mining, metallurgy and petroleum, Montreal, CIM Special Vol. 47, 319.

[11] O'Hara, T.A.; Suboleski, C.S.; 1992; "*Costs and cost estimation, SME mining engineering handbook"*, Society for mining, metallurgy and exploration, United State, Vol. 1, Chapter 6.3, 405-424.

[12] Pascoe, R.D.; 1992; "*Capital and operating costs of minerals engineering plants: a review of simple estimation techniques"*, Minerals engineering, Vol. 5, No. 8, 883-893.

[13] Prasad, L.; 1969; "*Mineral processing plant design and cost estimation"*, 3-15.

[14] 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, Denver, Colorado, Open file report 10-87.

[15] Sayadi, A.R.; Lashgari, A.; 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, 133-141.

[16] McNab, B.; et al.; 2009; "*Processing of magnetite iron ores-comparing grinding options"*, Perth, WA, 27-29 July.

[17] Loh, H. P.; et al.; 2002; "*Processing equipment cost estimation final report"*, Department of energy, United States, 5-39.

[18] Sayadi, A.R., Khalesi, M.R., Khoshfarman, M., 2013, A parametric cost model for mineral grinding mills, Minerals Engineering, in press.

[19] Grommers, H. E.; 2004; "C*omparison of small hydro cyclones based on total process costs"*, Mineral Engineering Journal 17, 581-589.

[20] Info Mine; 2012; "*Mining Cost Service Indexes"*, <http://www.infomine.com>.

[21] Timm,Neil, H.; 2002; " *Applied multivariate analysis"*, s.l: Springer-Verlag New York, Inc.

[22] Gujarati; 2004; "*Basic econometrics"*, Fourth Edition, The McGraw-Hill Company.

[23] Kaiser, H.F.; 1960; "*The application of electronic computers to factor analysis"*, Educ. Pschol. Meas. Vol. 20, 141-151.

[24] Remer; S. D.; 2008; "*An update on cost and scale-up factors"*, International journal production economics, 333-346

[25] Everitt, B.; Hothorn, T.; 2002; "*An introduction to applied multivariate analysis with R"*, Springer Sience Business Media, 61-100.

Archive of SID
www.SID.ir

پی نوشت

[1] . Centrifugal
[2]. Drag forces
[3] .Suction pump
[4]. Artificial air core
[5] .Cyclone pressure drop
[6]. Dewatering
[7] . Housing
[8] . Overhaul
[9] . Maintenance
[10] . Wear part
[11] . Correlation
[12] . MATLAB
[13] . Principal Component Analysis (PCA)
[14] . PC
[15] . Eigen value
[16] . Eigenvectors of correlation matrix
[17] . Mean Absolute Error Rate
[18] . Coefficient of determination (R-square)
[19] . Root Mean Square Error (RMSE)
[20] . Scale up
[21] . Statistica
[22] . PCI
[23] . Analysis Of Variance (ANOVA)
[24] . F-test
[25] . p-level

Archive of SID

www.SID.ir