نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۳- شماره‌ی ۱/تابستان ۱۳۹۳

برآورد مقدماتی هزینه‌های ساخت تونل‌های کوتاه راه در محیط‌های سنگی با کیفیت متوسط تا خوب

یادداشت فنی

میثم نجف‌زاده[۱]؛ احمد رضا صیادی[۲*]؛ جعفر خادمی حمیدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی استخراج معدن؛ گرایش بررسی‌های فنی و اقتصادی؛ دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار؛ گروه مهندسی معدن؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار؛ گروه مهندسی معدن؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۲/۱۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی

تونل‌های کوتاه راه
برآورد هزینه
تحلیل رگرسیون
ارتفاع روباره
RMR

چکیده

مدل‌های تخمین هزینه از جمله ابزارهای مهم در به‌روزرسانی اطلاعات اقتصادی، انجام مطالعات امکان‌سنجی، بودجه‌بندی و تامین منابع مالی پروژه‌های ساخت است. در این تحقیق مدلی برای برآورد مقدماتی هزینه‌ی عملیات ساخت تونل‌های کوتاه راه به روش حفر چالزنی-انفجار با استفاده از تحلیل رگرسیون تک و چند متغیره به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های پارامتریک، ارائه شده است. بدین منظور از داده‌های ۱۲ مقطع از تونل‌های راه شمال غرب کشور استفاده شده است. مدل‌سازی تک متغیره با متغیر توضیحی *RMR* نشان داده است از میان توابع مختلف، تابع نمایی با حداقل نرخ خطای مطلق ۱۳ درصد بهتر از سایر توابع است. مدل‌سازی چند متغیره با در نظر گرفتن شاخص رده‌بندی توده‌سنگ *RMR* و ارتفاع روباره به عنوان متغیرهای مستقل نیز نشان داده است تنها مدل رگرسیونی خطی معنادار بوده و با حداقل نرخ خطای مطلق تقریبی ۱۱ درصد از اعتبار مناسبی برخوردار است.

۱- پیشگفتار

عملیات تونل‌سازی از جمله مهم‌ترین پروژه‌های ساخت بوده و عموما به دو روش حفر سنتی (چالزنی- انفجار) و مکانیزه انجام می‌شود. مطالعات امکان‌سنجی، طراحی، انتخاب روش ساخت و در نهایت اجرای پروژه تابع عوامل متعددی به ویژه هزینه‌های ساخت است. پیچیدگی عملیات و کافی نبودن اطلاعات فنی و اقتصادی در مراحل اولیه‌ی مطالعات پروژه‌های تونل‌سازی، دسترسی به مدل‌های قابل اعتماد برآورد هزینه را ضروری می‌کند. مدل‌های متعددی در عرصه‌ی بین‌المللی در این زمینه توسعه داده شده‌اند که بیشتر آن‌ها در پروژه‌های داخل کشور قابل استفاده نیستند.

در این تحقیق، هدف، ارائه‌ی مدلی برای برآورد مقدماتی هزینه‌های حفر و پوشش‌گذاری تونل‌های کوتاه راه در محیط‌های سنگی با کیفیت متوسط تا خوب است که به روش چالزنی-انفجار اجرا می‌شوند. این مدل در قالب توابع رگرسیونی تک و چند متغیره به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های پارامتری مدل‌سازی ارائه شده است.

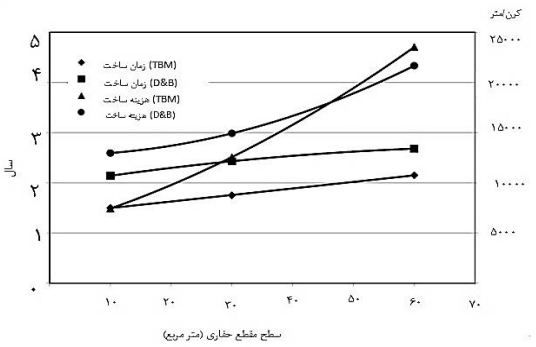
۲- سابقه‌ی تحقیق

برآورد هزینه‌های تونل‌سازی موضوع تحقیقاتی بسیاری از پژوهشگران بوده است. یکی از اولین مطالعات قاعده‌مند، مدل دانشکده‌ی منابع آب کالیفرنیا (*California*

* تهران؛ بزرگراه جلال آل احمد؛ پل نصر؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ صندوق پستی: ۱۴۳-۱۴۱۱۵؛ تلفن: ۸۲۸۸۳۵۴۶-۰۲۱، دورنگار: ۸۲۸۸۴۳۲۴-۰۲۱؛ رایانامه: sayadi@modares.ac.ir

Department of Water Resource) است که از قطر و شرایط زمین‌شناسی تونل به عنوان پارامترهای تاثیرگذار در هزینه‌ها استفاده شده است. این مدل تنها برای مناطق محدودی از ایالات متحده و فقط برای تونل‌های انتقال آب به روش حفر سنتی قابل استفاده بود، بنابراین مطالعات تکمیلی دیگری طی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۷۰ با هدف توسعه‌ی پایگاه اطلاعاتی و بهبود و گسترش دامنه‌ی کاربرد مدل انجام شد. در سال ۱۹۷۱ نیز مدلی کامپیوتری بر مبنای مدل‌های پیشین ارائه شد. این مدل ضمن برآورد هزینه‌ها، امکان ارزیابی تکنیک‌هایی را که تا آن زمان برای حفاری ارائه شده بود، فراهم می‌ساخت. در سال ۱۹۷۶، مدل هزینه‌ای تونل (*TCM*) به عنوان یک سیستم شبیه‌ساز کامپیوتری برای برآورد هزینه و زمان ساخت تونل‌های سنگی ارایه شد **[1]** و **[2]**.

از مطالعات مهم دیگر، برآورد هزینه‌های احتمالی تونل با استفاده از نرم افزار $SIMSUPER_5$ است **[3]**. این روش اصلاح شده‌ی روش *TCM* است. در سال ۱۹۹۹ مدلی برای تخمین هزینه و زمان دو نوع روش حفاری مکانیزه و سنتی بر اساس داده‌های ساخت ۲۵۰ کیلومتر تونل راه در نروژ و برخی دیگر کشورها توسعه یافت **[4]**. در این روش هزینه‌ی اقلام مختلف عملیات تونل‌سازی بر مبنای طول و قطرهای مختلف به صورت نمودارهایی ارایه شده است (**شکل ۱**).



شکل ۱- برآورد زمان و هزینه‌ی ساخت تونل در مدل برولند

در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۶، مدلی با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۴۹ مورد از ۲۳ مقطع از ۴۲ کیلومتر تونل حفر شده به روش سنتی در بزرگراهی در یونان در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۴ ارائه شد **[5]**. در این مدل از شاخص مقاومت زمین‌شناسی *GSI*، عمق روباره، فشار محیط زمین‌شناسی و مساحت مقطع حفر شده به عنوان متغیر مستقل برای برآورد سیستم‌های نگهداری اولیه و ثانویه استفاده و بر اساس آن میزان فولاد و سیمان به کار رفته، حجم بتن‌پاشی و متراژ پیچ‌سنگ محاسبه شده است. سپس از این پارامترها به عنوان متغیر مستقل در تعیین هزینه‌ی حفاری به عنوان متغیر وابسته استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۹ مدلی برای برآورد هزینه‌ی سیستم متروی شهری در ترکیه ارائه شد **[6]**. در این تحقیق، تکنیک‌های پارامتریک یعنی شبکه‌های عصبی و تحلیل‌های رگرسیونی خطی برای برآورد هزینه‌های ساخت در مطالعات امکان‌سنجی و طراحی پروژه‌ی متروی شهری بکار برده شده است. گوندوز و همکاران در سال ۲۰۱۱ به برآورد هزینه‌های سیستم حمل و نقل ریلی و سبک شهری و متروها با استفاده از روش‌های پارامتریک پرداختند **[7]**. این کار با اطلاعات مربوط به ۱۶ پروژه و ۱۷ پارامتر نظیر طول تونل‌ها و طول فضای باز و زیرسطحی با استفاده از روش‌های تحلیل رگرسیونی چند متغیره‌ی خطی و شبکه‌های عصبی ارائه شده است (گزاره‌ی (۱)).

$$Cost(US\$) = 52190 + 704LBF + 707LDF - 3860WR + 293SN + 325HPC \quad (۱)$$

در سال ۲۰۱۳ رستمی و همکاران به برآورد هزینه‌های تونل‌سازی بر پایه‌ی تجزیه و تحلیل‌های آماری چند متغیره داده‌های ۲۷۲ پروژه‌ی مختلف تونل‌سازی در آمریکا و کانادا پرداختند **[8]**. هدف اصلی، ارائه‌ی یک مدل برآورد هزینه برای ساخت تونل با کاربردهای مختلف در مراحل مقدماتی یک پروژه بوده است. توابع هزینه از نوع نمایی و بر حسب قطر و طول ارائه شده و آزمون مدل از راه مقایسه‌ی هزینه‌های واقعی با هزینه‌های پیش‌بینی شده، انجام شده است. به عنوان نمونه، تابع هزینه‌ی ارائه شده در خصوص ساخت تونل‌های بزرگراهی به روش سنتی چالزنی-انفجار مطابق گزاره‌ی (**۲**) است (تعداد داده‌ها ۱۲ مورد).

$$Cost(mUS\$) = 10\text{^}(1.51 + 1.02\log(L) - 0.374\log(D)) \quad (۲)$$

سابقه‌ی تحقیق در تخمین هزینه‌های تونل‌سازی در ایران چندان زیاد نیست. در سال ۱۳۸۰ تحقیقی برای برآورد هزینه‌های واحد حفاری و نگهداری اولیه در تونل‌های انتقال آب به روش حفر چالزنی- انفجار انجام شد **[۹]**. طی

این تحقیق پارامترهای موثر بر عملیات حفاری و نگهداری اولیه‌ی تونل در روند محاسبات لحاظ شده تا نتایج به دست آمده واقعی‌تر باشد. بررسی تاثیر عوامل عدم قطعیت در هزینه‌های تونل‌سازی پروژه‌ی تونل دشت ذهاب به روش مونت‌کارلو موضوع مطالعه‌ی دیگری است که بر آن اساس متغیرهای نرخ تورم، مدت زمان اجرا، و نرخ برابری یورو به ترتیب به عنوان متغیرهای با بیشترین تاثیر در این پروژه معرفی شدند [۱۰].

در تحقیق دیگری در سال ۱۳۸۵ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اجرایی تونل انتقال آب البرز با استفاده از روش‌های حفاری مکانیزه و سنتی مقایسه شده است [۱۱]. در سال ۱۳۸۶ نیز به تحلیل حساسیت هزینه‌های ساخت تونل انتقال آب دشت ذهاب به روش حفاری مکانیزه بررسی و مشخص شد حساسیت هزینه‌ی ساخت به نرخ تورم بیشتر از سایر عوامل عدم قطعیت است [۱۲]. بررسی پیشینه‌ی تحقیق، بیانگر ضرورت توسعه‌ی مطالعات برآورد هزینه‌ی عملیات تونل‌سازی در کشور بوده و در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است.

۳- عوامل موثر بر هزینه‌های تونل‌سازی

با بررسی روند مدل‌سازی هزینه‌ی عملیات تونل‌سازی در مطالعات قبلی که در قسمت دوم این تحقیق مرور شد و کسب نظر برخی از متخصصین و مدیران در اجرا و حفاری تونل می‌توان عوامل موثر بر هزینه را در دسته‌های زیر جای داد که بسته به نوع تونل و همچنین شرایط موجود، تاثیر هر یک از این عوامل متفاوت است.

۱- پارامترهای ژئومکانیکی، زمین‌شناسی و مخاطرات زمین‌شناسی در مسیر تونل: مقاومت فشاری و کششی ماده سنگ، ارتفاع روباره، شاخص‌های رده‌بندی توده‌سنگ مانند اندیس کیفی سنگ *(RQD)*، امتیازدهی توده‌سنگ *(RMR)*، کیفیت توده‌سنگ *(Q)* و اندیس مقاومت زمین‌شناسی *(GSI)*، هوازدگی توده‌سنگ، نواحی گسلی، آب زیرزمینی، درصد کانی‌های ساینده مثل کوارتز، وضعیت تنش‌های برجا و کرنش دیواره‌ها و سقف تونل **[3]**، **[4]** و **[6]**.

۲- پارامترهای فنی تونل: شکل و اندازه‌ی مقطع تونل، طول تونل و شیب و قوس در مسیر تونل **[1]**، **[2]**، **[7]** و **[8]**.

۳- پارامترهای اقتصادی: روش‌های تامین منابع مالی، نرخ مبادله‌ی ارز و نرخ تورم [۱۰] و [۱۲].

۴- پارامترهای مدیریتی: سابقه‌ی اجرایی مدیران، مهارت منابع انسانی، پشتیبانی و تدارکات.

۴- روش تحقیق

روش‌های متعددی برای توسعه‌ی مدل‌های برآورد هزینه ارائه شده است. در مراحل پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی عموما از روش‌های پارامتریک استفاده می‌شود. در این روش همبستگی بین هزینه‌های واقعی و دیگر متغیرهای سیستم که ماهیت فنی یا اقتصادی دارد بررسی شده و یک یا چند رابطه‌ی هزینه (*CER*) ارائه می‌شود. رویکردهای متنوعی در این چهارچوب قابل استفاده است، اما بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که روش‌های تحلیل رگرسیونی به عنوان یکی از روش‌های اصلی برآورد هزینه‌ی پارامتریک به دلیل مبنای ریاضی قوی و سهولت استفاده از توابع هزینه بدست آمده، بسیار رایج است **[13]**، **[14]** و **[15]**. در این تحقیق نیز از این روش برای ارائه‌ی توابع هزینه استفاده شده است.

۴-۱- رگرسیون تک متغیره

در این روش، ضمن شناسایی موثرترین متغیر، روند تغییرات هزینه‌ها نسبت به آن متغیر با استفاده از داده‌های در دسترس بررسی شده و تابع هزینه در قالب رابطه‌ای ریاضی بین هزینه‌ها و مشخصه‌ها بدست می‌آید. ساختار مدل ارائه شده به تجارب پیشین در مدل‌سازی هزینه و همچنین به ملاحظات آماری داده‌ها و نتایج حاصله از اعتبارسنجی توابع وابسته است. در این تحقیق انواع توابع به صورت (ax^b)، (ae^{bx}) و ($ax+b$) به دلیل گستردگی کاربرد در سایر مدل‌های برآورد هزینه با هم مقایسه شده‌اند.

۴-۲- رگرسیون چند متغیره

شکل کلی توابع رگرسیون چند متغیره به صورت چند جمله‌ای خطی است که در گزاره‌ی (۳) نشان داده شده است.

$$Y_i = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n + \varepsilon_0 \qquad (۳)$$

البته از سایر توابع نظیر لگاریتمی و نمایی نیز برای مدل‌سازی استفاده شده است که نتایج بدست آمده معنا دار نبودند و تنها رابطه‌ی معنادار، تابع چند جمله‌ای خطی بوده است. برای ساخت مدل‌های چند متغیره، از نسخه‌ی ۷

نرم‌افزار آماری *Statistica* استفاده شده است.

برای بررسی معنی‌داری کلی مدل از روش آزمون t ،F و مقدار p استفاده شده است. در آزمون F فرض صفر بودن همزمان تمامی ضرایب رگرسیون بررسی می‌شود. پس از بررسی معنی‌داری کلی تابع، معنی‌داری هر یک از ضرایب متغیرهای مستقل با آزمون t بررسی می‌شود. در آزمون‌های t و F مبنای مقایسه، عددی است که در سطح معناداری تعریف شده و با لحاظ درجه‌ی آزادی رگرسیون مورد نظر از جدول مربوط به هر توزیع به دست می‌آید. اما راه ساده و سریع‌تر برای رد یا پذیرش فرض مورد بررسی، استفاده از مقدار p است.

۴-۳- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی هر دو نوع توابع هزینه‌ی تک متغیره و چند متغیره از میانگین نرخ خطای مطلق استفاده شده است **[16]**. در این روش میانگین اختلاف هزینه‌های واقعی و هزینه‌های تخمین زده شده بر اساس درصدی از مقدار هزینه‌ی واقعی ارزیابی می‌شود. این مقدار از گزاره‌ی (۴) قابل محاسبه است **[17]**.

$$MAER = \frac{\sum\left(\frac{Ce - Ca}{Ca}\right) * 100}{n} \qquad (۴)$$

۵- داده‌های تحقیق

برای انجام تحقیق از اطلاعات هزینه‌ای، زمین‌شناسی، فنی و مکانیک‌سنگی مربوط به ۱۲ تونل از تونل‌های راه اصلی میانه سد شهریار استفاده شده است که با استفاده از روش سنتی حفر شده‌اند. نگهداری اولیه به روش بتن‌پاشی با توری فلزی و پیچ‌سنگ و نگهداری دائمی به روش بتن درجا انجام شده است. سطح مقطع حفاری تمام تونل‌های مورد استفاده از نوع نعل اسبی و یکسان است. طول تونل‌ها نیز از ۱۱۱ متر تا ۵۴۰ متر متغیر بوده **(جدول ۱)** که عمدتا در دسته تونل‌های کوتاه توصیف می‌شوند. هزینه‌ها بر مبنای قیمت‌های پایه‌ی سه‌ماهه‌ی چهارم سال ۱۳۸۸ بر حسب ریال است.

این جدول نشان می‌دهد *RMR* محاسبه شده برای سنگ‌های مقطع تونل‌ها از ۳۵ تا ۶۱ متغیر بوده به طوری‌که براساس این شاخص، نوع سنگ‌های مسیر تونل جزو سنگ‌های با مقاومت متوسط هستند. کمترین و بیشترین ارتفاع روباره نیز به ترتیب ۲۴ و ۹۲ متر است، که این امر نشان می‌دهد تونل‌های مورد بررسی جزو تونل‌های کم عمق هستند.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌ها

	متغیرهای مستقل			متغیر وابسته (میلیون ریال بر متر)		
	روباره (متر)	طول (متر)	RMR	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی کل
حداقل	۲۴	۱۱۱	۳۵	۲۲٫۳۴	۲۴٫۰۶	۵۱٫۹۷
میانگین	۵۴	۳۲۵	۴۶	۲۳٫۷۰	۲۶٫۲۱	۵۴٫۹۸
حداکثر	۹۲	۵۴۰	۶۱	۲۳٫۹۰	۲۸٫۹۵	۵۸٫۸۲
انحراف استاندارد	۲۵	۷۴	۹	۰٫۵۶	۰٫۱۶	۰٫۲۳
تعداد داده	۱۲					

۶- مدل‌سازی

همانطور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، در این تحقیق از روش رگرسیونی با توابع تک متغیره و چند متغیره برای برآورد هزینه استفاده شده است.

۶-۱- انتخاب متغیرهای مستقل

از آنجا که در مرحله‌ی مطالعاتی یک پروژه‌ی ساخت تونل، دسترسی به همه‌ی پارامترهای موثر بر هزینه‌ها بسیار مشکل و گاهی اوقات غیر ممکن است، بنابراین در اینجا پارامترهای با تاثیرگذاری بیشتر و در عین حال با دستیابی آسان‌تر در نظر گرفته شده است. این پارامترها شامل شاخص رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ مسیر تونل *(RMR)* و ارتفاع روباره است. با توجه به یکسان بودن سطح مقطع تمامی تونل‌های مورد بررسی، پارامتر قطر تونل لحاظ نشده است. تغییرات هزینه‌های تونل‌سازی در طول تونل‌های موجود زیاد محسوس نبود، بنابراین هزینه‌های حفاری و نگهداری به ازای هر متر طول تونل محاسبه و به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده‌اند.

۶-۲- توابع رگرسیونی تک متغیره

توابع هزینه‌ی تک متغیره (ax^b)، (ae^{bx}) و $(ax+b)$ برای

ساخت مدل‌های تک متغیره در **جدول ۲** با هم مقایسه شده است. در این توابع از RMR به عنوان متغیر توضیحی استفاده شده است. مشاهده‌ی نتایج نشان می‌دهد تابع (ae^{bx}) از دیدگاه آماری، با توجه به R^2 بالا و MSE پایین برای داده‌های موجود مناسب‌تر است.

تغییرات هزینه‌ی حفاری و نگهداری تونل نسبت به RMR به ترتیب به صورت گزاره‌ی **(۵)** و **(۶)** بدست آمده است. به همین ترتیب تابع هزینه‌ی کل نیز مطابق با گزاره‌ی **(۷)** بدست آمده است. هزینه‌ها بر حسب میلیون ریال برای هر متر طول تونل است.

$$C_{EXC}(mRial/m) = 20.7 \times e^{(0.002RMR)} \quad (۵)$$

$$C_{SUP}(mRial/m) = 24.6 \times e^{(-0.006RMR)} \quad (۶)$$

$$C_{TOT}(mRial/m) = 48.2 \times e^{(-0.001RMR)} \quad (۷)$$

۶-۳- توابع رگرسیونی چند متغیره

شکل کلی توابع رگرسیون چند متغیره بکار رفته به صورت چند جمله‌ای خطی است. در **جدول ۳** و **جدول ۴** به ترتیب روابط بدست آمده برای برآورد هزینه‌های حفاری و نگهداری تونل‌سازی با استفاده از رگرسیون چند متغیره با متغیرهای توضیحی RMR و ارتفاع روباره (H) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده از آزمون‌ها مشاهده می‌شود، نتایج ارائه شده معنی‌دار هستند.

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تک متغیره

	$Y=ae^{bx}$		$Y=ax^b$		$Y=ax+b$	
	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری
R^2	۰٫۷۰	۰٫۷۳	۰٫۶۷	۰٫۶۹	۰٫۶۵	۰٫۶۶
RMSE	۱٫۲۵ ×۱۰^۵	۳٫۰۲ ×۱۰^۵	۳٫۲۵ ×۱۰^۵	۳٫۲۶ ×۱۰^۵	۳٫۱۱ ×۱۰^۵	۷٫۱۵ ×۱۰^۵
a	۲٫۰۷×۱۰^۷	۲٫۴۶×۱۰^۷	۱٫۵۷×۱۰^۷	۱٫۸۷×۱۰^۷	۵٫۱۸×۱۰^۴	-۱٫۶۱×۱۰^۵
b	۰٫۰۰۲۱۸	-۰٫۰۰۶۱۷	۰٫۱۰۱۸	۰٫۱۴۰۱۷	۲٫۰۷ ×۱۰^۷	۳٫۳۶ ×۱۰^۷

جدول ۳- نتایج بدست آمده برای هزینه‌های حفاری تونل

	ضریب B	آزمون t	p-level	آزمون F کل	p-level کل
عرض از مبدا	۲۰٫۵۷	۱۴٫۹۵	۰٫۰۰۰۱	۹۲٫۴	۰٫۰۰۰۱
RMR	۰٫۰۵۸	۲٫۱۶	۰٫۰۰۰۹		
ارتفاع روباره	۰٫۰۰۵۵	۲٫۷۱	۰٫۰۰۰۲		

جدول ۴- نتایج بدست آمده برای هزینه‌های نگهداری تونل

	ضریب B	آزمون t	p-level	آزمون F کل	p-level کل
عرض از مبدا	۳۲٫۷۰	۷۴٫۵۲	۰٫۰۰۰۱	۱۴۵٫۸	۰٫۰۰۰۱۱
RMR	-۰٫۱۱۹	۸٫۸۹	۰٫۰۰۰۸		
ارتفاع روباره	۰٫۰۰۰۸	۵٫۱۷	۰٫۰۰۰۷		

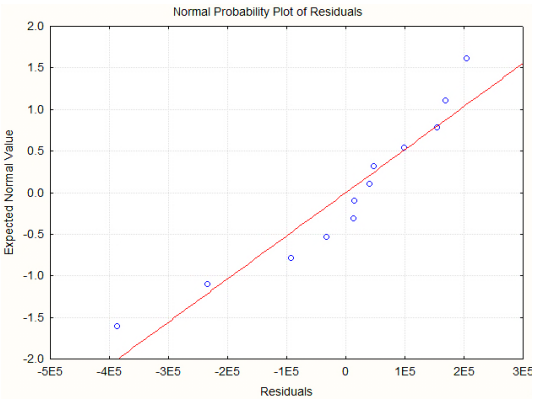
همان طور که مشاهده می‌شود، پایین بودن مقادیر p و بالا بودن مقادیر به دست آمده از آزمون t و F تحت فرضیه‌ی صفر (H_0) برای هر دو مولفه و عرض از مبدا، معنادار بودن این پارامترها را در هر سه تابع به خوبی نشان می‌دهد. همچنین با توجه به مقدار بالای به دست آمده از آزمون F کلی می‌توان نتیجه گرفت کل مدل رگرسیون از معناداری قابل قبولی برخوردار است. توابع چند متغیره هزینه‌های حفاری و نگهداری تونل در گزاره‌های **(۸)** و **(۹)** نشان داده شده است. تابع هزینه‌ی کل نیز در قالب گزاره‌ی **(۱۰)** ارائه شده است. در این روابط هزینه‌ها به صورت میلیون ریال به

ازای هر متر طول تونل بیان شده است. نمودار توزیع احتمال باقیمانده‌ها در و نشان دهنده‌ی روند نسبتا نرمالی بوده و موید اعتبار توابع به دست آمده هستند.

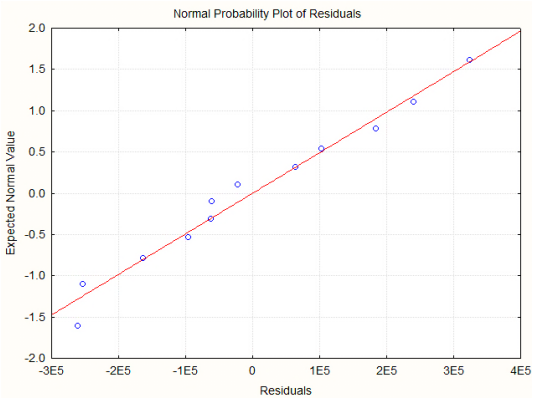
$$C_{EXC}(MR) = 20.577 + 0.0584RMR - 0.0005H \quad (۸)$$

$$C_{SUP}(MR) = 32.707 - 0.119RMR - 0.0008H \quad (۹)$$

$$C_{TOT}(MR) = 66.074 - 0.253RMR - 0.0005H \quad (۱۰)$$



شکل ۲- توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای تابع هزینه‌ی حفاری



شکل ۳- توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای تابع هزینه‌ی نگهداری

۷- آزمون مدل

مقادیر بدست آمده برای میانگین نرخ خطای مطلق (*MAER*) در **جدول ۵** ارائه شده است. این مقدار برای تابع هزینه‌ی انتخاب شده ($Y=ae^{bx}$) کمتر از ۱۴ درصد بوده و در نتیجه این توابع در مرحله‌ی مطالعات پیش‌امکان‌سنجی با خطای قابل قبول حدود ۲۰ درصد **[18]** از اعتبار کافی برخوردار است. علاوه بر این، دامنه‌ی اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده (**شکل ۴**)، بیانگر وجود سازگاری مناسبی است.

جدول ۵- مقادیر میانگین نرخ خطای مطلق (درصد)

تابع	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی کل
$Y=ax^b$	۱۴٫۵۶	۱۴٫۴۵	۱۴/۲۳
$Y=ae^{bx}$	۱۳٫۲۵	۱۲٫۸۶	۱۲٫۸۵
$Y=ax+b$	۱۴٫۴۳	۱۴٫۲۵	۱۴٫۱۰
$Y=ax_1+bx_2$	۱۱٫۰۴	۱۱٫۱۲	۱۱٫۳۷

شکل ۴- مقایسه‌ی مقادیر واقعی و تخمینی هزینه‌ها

۸- نتیجه‌گیری

عملیات تونل‌سازی بخش عمده‌ای از پروژه‌های عمرانی کشور را به خود اختصاص داده و مستلزم صرف منابع مالی قابل توجهی است. طراحی و انتخاب روش اجرا در خلال مطالعات پیش‌امکان‌سنجی پروژه‌های تونل‌سازی مستلزم دسترسی به ابزاری سریع و با دقت کافی است. مدل‌های موجود و قابل استفاده در کشور بسیار محدود بوده و توسعه آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

هدف این مقاله ارائه‌ی مدل تخمین هزینه‌ی

تونل‌سازی به روش حفر سنتی به عنوان یکی از شیوه‌های رایج در پروژه‌های تونل کشور است. بدین منظور، ضمن بررسی عوامل موثر بر هزینه، از روش رگرسیون به دلیل مبانی قوی ریاضی و کاربرد وسیع آن در برآورد هزینه استفاده شده است. توابع تک متغیره‌ی هزینه به صورت نمایی و توابع رگرسیون به صورت خطی ارائه شده است. متغیرهای مستقل شامل شاخص کیفیت توده‌سنگ (*RMR*) و ارتفاع روباره است. این مدل امکان تخمین سریع و دقیق هزینه‌های حفر و نگهداری تونل را برای انجام مطالعات پیش‌امکان‌سنجی پروژه‌های ساخت تونل فراهم می‌سازد.

در مدل‌های قبلی برآورد هزینه، از پارامتر قطر نیز استفاده شده است، اما تونل‌های مورد بررسی در این تحقیق سطح مقطع یکسانی دارند؛ بنابریان از این پارامتر صرف نظر شده است. پارامتر طول نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای موثر است. طول تونل‌های موجود از ۱۱۱ متر تا ۵۴۰ متر است و نتایج مدل‌سازی نشان داده است تغییرات طول تاثیر بسیار کمی بر روی هزینه‌ها دارد. در نتیجه، در روابط ارائه شده از شاخص کیفی سنگ و عمق روباره استفاده شده است.

بر اساس نتایج این پژوهش، از میان سه تابع تک متغیره‌ی مورد بررسی، تابع $Y=ae^{bx}$ با حداقل نرخ خطای مطلق ۱۳ درصد بهتر از توابع نمایی و خطی، هزینه‌های تونل‌سازی را برآورد می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد هزینه‌های حفاری با تغییرات *RMR* نسبت مستقیم دارد. در حقیقت افزایش کیفیت توده‌سنگ به معنی بهبود خواص مقاومتی ماده‌سنگ یا مشخصات ساختاری توده‌سنگ است که در هر دو مورد انتظار افزایش هزینه‌های چالزنی و انفجار برای شکست سنگ وجود دارد. هزینه‌ی نگهداری تونل نیز با *RMR* نسبت عکس دارد. علت این امر آن است که با افزایش کیفیت توده‌سنگ سیستم نگهداری کمتر یا سبک‌تری نیاز خواهد بود.

از مدل‌های رگرسیونی خطی، لگاریتمی و نمایی نیز برای مدل‌سازی با توابع چند متغیره استفاده شده است که بررسی معناداری روابط با آزمون‌های F،t و مقدار P نشان داده است تنها مدل‌های رگرسیونی خطی $Y=ax_1+bx_2$ معنادار است. اعتبارسنجی مدل به روش حداقل نرخ خطای مطلق بیانگر دامنه خطای ۱۱ تا ۱۳ درصد بوده که مقدار قابل قبولی در مطالعات پیش‌امکان‌سنجی است. لازم به ذکر است که مدل‌های تجربی در دامنه‌ی داده‌های مورد استفاده معتبر بوده و مدل حاضر نیز در تونل‌های کم عمق (با حداکثر عمق ۱۰۰ متر) در توده‌سنگ با کیفیت متوسط تا خوب (*RMR* بین ۴۰ تا ۶۰) قابل استفاده است.

۹- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
LBT	m	طول کل بالاست گذاری شده	LDF	m	طول راه مستقیم
WR	$Tonne$	وزن ریل‌ها	SN	-	تعداد بلوک‌های سیمانی تکیه‌گاه
HPC	$passenger/h$	ظرفیت	x	-	متغیر مستقل
Y	-	متغیر وابسته	c_0	-	عرض از مبدا
c_n	-	ضریب متغیرهای مستقل	ε_0	-	باقیمانده
c_e	$mRial$	هزینه‌ی برآورد شده	c_a	$mRial$	هزینه‌ی واقعی
n	-	تعدا داده	C_{EXC}	$mRial$	هزینه‌ی حفاری
C_{SUP}	$mRial$	هزینه‌ی نگهداری	C_{TOT}	$mRial$	هزینه‌ی کل

۱۰- منبع‌ها

[1] Lamb, T. J. (1971). *A Computer Model for Tunneling Costs*. MSc Thesis: Deptartment of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. http://hdl.handle.net/1721.1/52910.

[2] Moavenzadeh, F. & Markow, M. J. (1976). Simulation Model for Tunnel Construction Costs. *Journal of the Construction Division, 102*(1), 51-66. http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?6534.

[3] Einstein, H. H., Salazar, G. F., Kim, Y. N., & Ioannou, P. S. (1987) Computer Based Decision Support Systems in Underground Construction. *Proceeding of Rapid Excavation and Tunneling Conference*. ISBN-13: 978-0873350655.

[4] Bruland, A. (1998). *Hard Rock Tunnel Boring Advance Rate and Cutter Wear*. Doctoral Thesis: Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian Institute of Technology.

[5] Petroutsatou, C., Lambropoulos, S., & Pantouvakis, J. P. (2006). Road Tunnel Early Cost Estimates Using Multiple Regression Analysis. *Operational Research, 6*(3), 311-322. http://dx.doi.org/10.1007/BF02941259.

[6] Sonmez, R., & Ontepeli, B. (2009). Predesign Cost Estimation of Urban Railway Projects with Parametric Modeling. *Journal of Civil Engineering and Management, 15*(4), 405-409. http://dx.doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.405-409.

[7] Gunduz, M., Ugur, L. O., & Ozturk, E. (2011). Parametric Cost Estimation System for Light Rail Transit and Metro Trackworks. *Expert Systems with Applications, 38*(3), 2873-2877. http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.080.

[8] Rostami, J., Sepehrmanesh, M., Alavi, E., & Mojtabai, N. (2013). Planning Level Tunnel Cost Estimation Based on Statistical Analysis of Historical Data. *Tunnelling and Underground Space Technology, 33*, 22-33. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012.08.002.

[۹] علیزاده، ح. (۱۳۸۰). برآورد هزینه‌ی واحد حفاری و نگهداری اولیه‌ی شاتکریت، شبکه‌ی فولادی و بولت‌زنی تونل. *پنجمین کنفرانس تونل ایران*. دانشگاه تهران. http://www.civilica.com/Paper-ITC05-010_2127792253.html.

[۱۰] همتی شعبانی، ع.، صیادی، ا. ر.، گشتاسبی، ک.، و امیری رودباری، ع. ر. (۱۳۸۵). بررسی تاثیر عوامل عدم قطعیت در هزینه‌ی پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو- مطالعه‌ی موردی تونل انتقال آب دشت ذهاب. *هفتمین کنفرانس تونل ایران*. دانشگاه شریف. http://www.civilica.com/Paper-ITC07-ITC07_081.html.

[۱۱] کنعانی‌مقدم، ح.، چنگانی، ح.، سالاری‌راد، ح.، و صالحی. ع. ر. (۱۳۸۵). بررسی مقایسه‌ای هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و اجرایی تونل سرویس البرز بر اساس دو روش حفاری سنتی (*D&B*) و حفاری مکانیزه (*TBM*). *هفتمین کنفرانس تونل ایران*. دانشگاه شریف. http://www.civilica.com/Paper-ITC07-ITC07_089.html.

[۱۲] صیادی، ا. ر.، گشتاسبی، ک.، همتی شعبانی، ع.، و امیری رودباری. ع. ر. (۱۳۸۴). تحلیل حساسیت هزینه‌های ساخت تونل انتقال آب دشت ذهاب. *بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین*. http://www.civilica.com/Paper-GSI24-GSI24_060.html.

[13] Smith, A. E., & Mason, A. K. (1997). Cost Estimation Predictive Modeling: Regression Versus Neural Network. *The Engineering Economist, 42*(2), 137-161. http://dx.doi.org/10.1080/00137919708903174.

[14] Sayadi, 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, 18*(3), 378-385. http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.692705.

[15] Sayadi, A. R., Lashgari, A., & Paraszczak, J. (2011). Hard-Rock LHD Cost Estimation Using Single and Multiple Regressions Based on Principal Component Analysis. *Tunnelling and underground space technology, 27*(1), 133-140. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2011.08.006.

[16] Rudenno, V. (1998). *The Mining Valuation Handbook: Australian Mining and Energy Valuation for Investors and Management*. Australian Print Group.

[17] Kim, G. H., An, S. H., & Kang, K. I. (2004). Comparison of Construction Cost Estimating Models Based on Regression Analysis, Neural Networks, and Case-Based Reasoning. *Building and Environment, 39*(10), 1235-1242. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.013.

[18] O'Hara, A., & Suboleski, S. C. (1992). Chapter 6.3: Cost and Cost Estimation. *SME Mining Engineering Handbook* (pp. 405-424), 2nd Edition, Volume 1.

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

Volume 3-Issue 1\Summer 2014

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Preliminary Construction Cost Estimation for Short Tunnels in Fair to Good Rock Mass Conditions

Technical Note

M. Najafzadeh[1]; A. R. Sayadi[2]; J. Khademi Hamidi[3]

1- M.Sc. Student; Mining Engineering Department; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University

2- Associate Professor; Mining Engineering Department; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University

3- Assistant Professor; Mining Engineering Department; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University

Received: 05 May 2012; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Short road tunnels
Cost estimation
Regression analysis
Overburden
Rock Mass Rating (RMR)

Extended Abstract

Cost estimation is one of the most critical tasks in pre-feasibility studies and planning of tunnel construction projects. This paper presented a cost estimation model for excavation and support of short tunnels using uni-variate (UVR) and multi-variate regression (MVR) techniques. Hence, a database consisting of two explanatory variables including RMR and tunnel depth along with tunnel support and excavation costs was compiled from 12 tunnel sections in the North-West of Iran. The statistical significance and validity of the obtained models was checked by using some statistical tests, which proved that this model provides the possibility of a fast and adequate cost estimation of the excavation as well as support cost of tunnels at the phase of pre-feasibility study in tunnel projects.

Introduction

In this research, the main purpose is to provide a reliable early cost estimating model for short tunnels which are constructed by drilling and blasting method. The structure of the proposed model is dependent on previous experiences in cost modeling as well as statistical considerations of data and the results of validation functions.

Methodology and Approaches

In this research, both uni-variable and multi-variable regression techniques were implemented because of their mathematical background and their wide applications in cost estimations.

Results and Conclusions

Based on the obtained results, among the three possible uni-variate functions, the form of $Y=ae^{bx}$, with a mean absolute error rate of 13% is better than others for estimation of the tunneling cost. The results showed that the costs of excavation increase with RMR. In addition, the cost of tunnel excavation showed a reverse relation with RMR. Linear, logarithmic and exponential regression techniques were applied for multi-variate modeling and it was concluded that only the linear regression model is significant. Validation of the model using MAER method indicated that the error changed in 11 to 13 percent provides an acceptable range in pre-feasibility study phase.