Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Comparison of Mechanized Tunneling Costs in Iran with Other Countries

Masoud Esmaeilzadeh[1]✉, Ebrahim Keshavarz[2], Mohammad Golkhandan[3]

1. MSc, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi Uiversity, Tehran, Iran. E-mail: m.esmaeilzadeh2012@gmail.com
2. Expert of Fanavaran Tarh Jame Consulting Engineers, Tehran, Iran. E-mail: Ebrahimathe@gmail.com
3. Expert of Fanavaran Tarh Jame Consulting Engineers, Tehran, Iran. E-mail: mohammad.golkhandan71@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 23 October 2024
Received in revised form 4 December 2024
Accepted 20 December 2024

Keywords:
Mechanized Tunneling Costs, Costs Estimation, Pricing Schedule.

ABSTRACT

Estimating tunnel construction costs is one of the critical steps in project management. Several factors influence the total cost of a tunnel project, and the complexity and uncertainty in identifying these factors often lead to inaccurate cost estimates. Various analytical methods have been developed to estimate tunnel construction costs, but all have drawbacks. Utilizing real data from other projects can mitigate these shortcomings. In this research, we first discuss the growth of the tunneling industry and its impact on the development of economic infrastructure. We then review the historical research on tunnel cost estimation and the methodologies that have been developed in this area. The lack of a pricing schedule for tunnel construction in Iran, unlike in developed countries, results in inaccurate cost estimates for tunnel projects. This study examines both definite and probabilistic methods for estimating the cost of mechanized tunneling, based on the price schedule of "Dam Field 1403." We compare the cost of tunneling in Iran with other countries. The results indicate a 30% difference in the ratio of labor costs to the total project cost and a 92% difference in the cost per meter for mechanized tunnels in Iran compared to other countries. This discrepancy discourages private contractors from engaging in tunnel projects in Iran. Therefore, we propose the development of a comprehensive pricing schedule for tunneling to enhance the accuracy of cost estimation for tunnel projects in Iran.

Introduction

In recent years, the tunneling industry has been recognized as an indicator of economic development. Road and subway tunnels play a an important role in national and international communication infrastructures, while water conveyance tunnels are crucial for the supply of drinking water for agriculture and industry, thereby contributing to the sustainable development of regions. In developed countries, various strategies are employed to manage the risks and costs associated with underground projects. In Japan, for example, the contractual laws and division of responsibility distribute the total risk among the employer, the contractor, and the machine manufacturer (Shahriar et al., 2008).

In general, methods for estimating tunnel construction costs are divided into two main categories: deterministic and probabilistic. Deterministic methods provide a single value as the best estimate of tunnel construction costscost, but they do not take into account for uncertainties that may arise from unpredictable geological conditions or variable operating conditions. In contrast, probabilistic methods recognize the importance of risk analysis to calculate and quantify uncertainties. These methods estimate tunnel costs as a probability distribution function and provide a cost range (Ahmed, 2021).

Many studies have utilized deterministic methods to estimate tunnel costs. One notable example is the innovative approach by the California Department of Water Resources, introduced after evaluating the total cost of several water transmission tunnels in California in 1959. However, this model was only

Cite this article: Esmaeilzadeh, M., Keshavarz, E., Golkhandan., M. (2024). Comparison of Mechanized Tunneling Costs in Iran with Other Countries. Journal of Engineering Geology, 18 (4), 501-521. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1020101

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1020101

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

applicable in America and specifically for conventional tunneling methods.

Rostami et al. (2013) investigated and compared a model using multiple regression analysis to estimate costs, based on data from 272 tunnel projects with different drilling methods and geological conditions in Canada and the UnitedStates. The drilling methods included conventional methods (6.3%), hard rock mechanization (24.3%), mechanization in loose ground (32.9%), mixed ground (6.4%), and microtunneling (32.9%). Tunnels were categorized into water and sewage, road, railway, and subway tunnels. Costs were calculated based on the 2008 U.S. dollar index. In this study, the results for mechanized tunneling in hard rock were examined in particular.

Materials and Methods

Parameters affecting on tunnelling cost

The cost of constructing underground projects varies across different countries and depends on a number of factors. The impact of various factors on the total cost of tunneling can be categorized into five groups: very high, high, medium, low, and very low. Wages, the number of laborers, materials, consumables for the implementation of auxiliary structures, and the equipment used are among the most significant of these factors.

Tunnel cost estimation methods

The estimation of tunneling costs is based on the analysis of cost prices from real projects implemented. In this section, we utilize the results of two studies by Rostami et al. (2013) and Ahmed (2021). Comparing the methods of Rostami et al. (2013) with those of Ahmed (2021), it is evident that Rostami's method is closer to total costs. The results of this comparison are summarized here.

The tunneling industry in Iran, unlike other countries, does not have a specialized price list within its management and planning organization for tunneling. In order to solve this problem, Iran usually uses the price list of the basic unit for railway and airport runways or dam construction field announced by the same organization. In this study, the basic unit price list for dams, as published by Iran's Management and Planning Organization, was mainly used due to the factors of simplicity and adaptability.

Results and Discussion

This section compares the economic cost of mechanized tunneling per meter in Iran with other countries. In Iran, unlike elsewhere, the estimation of tunnel excavation costs is based on the basic unit price list for dam construction and is done in a non-specialized manner.

The unit price per meter for a tunnel, based on the 1403 basic unit price list for the dam construction field, was calculated for a mechanized hard rock tunnel with a diameter of 4.5 meters and an assumed length of 10,000 meters, as an example for water transportation tunnels. This estimate shows a 92% difference in the cost of mechanized tunneling for water transmission and subway tunnels, and an 88% difference for sewage tunnels in Iran compared to the global average. Additionally, labor costs in tunnel projects in developed countries typically constitute 40-60% of the total project cost (Bilgin and Acun, 2024). An analysis of an ongoing tunnel project in Iran shows that labor costs account for only 30% of the total cost.

Conclusions

The tunneling industry, as an indicator of economic development, has made significant progress in recent decades. This research examines various factors that influence the total cost of mechanized excavation for road, subway, and water transmission tunnels. It introduces both deterministic and probabilistic methods for estimating the total cost of mechanized tunnel construction, using the 1403 dam construction price list to compare the cost of tunnel excavation in Iran with that in other countries. Additionally, the ratio of labor costs to the total cost of tunnel construction was investigated using data from international projects and an

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

ongoing tunnel project in Iran. The results indicate a 30% labor cost difference and a 92% cost differential per meter for mechanized tunneling in Iran compared to other countries. This significant price difference can lead to stagnation, lack of competition, and underdevelopment in the tunne sector, hindering infrastructure development. The introduction of a specific price list for tunneling, taking into account the unique conditions and uncertainties of this sector, could address these problems. In addition, the adoption of new contractual principles based on risk sharing in underground activities would contribute to a fair distribution of costs and reduce funding disparities.

The tunneling industry as an indicator of economic development has made significant progress in the recent decades. In this research, while examining the various factors affecting the total cost of mechanized excavation of road, subway and water transmission tunnels, as well as introducing definitive and probable methods for estimating the total cost of mechanized tunnel construction, based on the price list of dam construction in 1403, the cost of tunnel excavation in Iran, it was compared with the cost of tunnel construction in other countries. Also, to check the ratio of labors costs to the total cost of tunnel construction, the information of international projects and one of the tunnel projects under construction in Iran were used. The results of this research show that the cost difference of 30% of labors and 92% of boring each meter of mechanized tunnel in Iran compared to other countries. The existence of this large price difference can cause the stagnation of lack of competition and development in the field of tunneling and as a result the lack of development of the country's infrastructure. The introductionand presentation of a special price list for the field of tunneling, taking into account the specific conditions of this secto rand the existing uncertainties, can be a solution in this respect. The use of new contractual principles based on the sharing of risks in underground activities can also be of great help in the fairly distributing costs and reducing credit and allocation differences.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

ارزیابی و مقایسه هزینه تونل‌سازی مکانیزه در ایران و جهان

مسعود اسماعیل‌زاده[۱]✉، ابراهیم کشاورز[۲]، محمد گلخندان[۳]

۱. کارشناس ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: M.esmaeilzadeh2012@gmail.com
۲. کارشناس شرکت فناوران طرح جامع، تهران، ایران. رایانامه: Ebrahimathe@gmail.com
۳. کارشناس شرکت فناوران طرح جامع، تهران، ایران. رایانامه: Mohammad.golkhandandan71@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

کلیدواژه‌ها:
تونل مکانیزه، برآورد هزینه، فهرست‌بها.

چکیده

برآورد هزینه‌های احداث تونل یکی از مهم‌ترین اقدامات در جهت مدیریت پروژه است. عوامل متعددی بر روی هزینه تمام شده یک پروژه تونلی اثرگذار است. پیچیدگی و عدم اطمینان در شناسایی این عوامل موجب برآورد اشتباه از هزینه‌های پروژه می‌شود. روش‌های تحلیلی مختلفی جهت برآورد هزینه‌های احداث تونل توسعه داده شده است که همواره با معایبی مواجه بوده‌اند. استفاده از اطلاعات واقعی هزینه کرد سایر پروژه‌ها می‌تواند تا حد زیادی معایب روش‌های تحلیلی را رفع نماید. در این پژوهش ابتدا گسترش روزافزون صنعت تونل‌سازی و تأثیر آن در توسعه زیرساخت‌های اقتصادی بحث شده است. در ادامه سابقه پژوهش در مورد برآورد هزینه‌های تونل‌سازی و روش‌های توسعه داده شده در این زمینه ارائه شده است نبود فهرست‌بهای تخصصی پایه تونل‌سازی در ایران برخلاف سایر کشورهای توسعه‌یافته موجب برآوردهای اشتباه در هزینه کرد پروژه‌های تونل‌سازی می‌شود. در این پژوهش با بررسی روش‌های قطعی و احتمالی برآورد هزینه تمام شده احداث تونل مکانیزه، با استناد بر فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی سال ۱۴۰۳ هزینه حفاری تونل در ایران با سایر کشورها مقایسه شده است. نتایج این پژوهش مؤید اختلاف ۳۰ درصدی در نسبت هزینه‌های نیروی انسانی به هزینه کل پروژه و ۹۲ درصدی هزینه حفاری هر متر تونل مکانیزه در ایران در مقایسه با سایر کشورها می‌باشد، که این امر موجب عدم رغبت پیمانکاران خصوصی جهت فعالیت در پروژه‌های تونلی در ایران شده است. همچنین تهیه فهرست‌بهای جامع پایه تونل‌سازی به‌عنوان یک راهکار جهت افزایش دقت در برآورد هزینه‌های پروژه‌های تونلی پیشنهاد می‌گردد.

مقدمه

صنعت تونل‌سازی در سالیان اخیر به‌عنوان یک شاخص توسعه اقتصادی پذیرفته شده است. تونل‌های راه و مترو نقش عمده‌ای در زیرساخت‌های ارتباطی ملی و بین‌المللی ایفا می‌کنند. همچنین تونل‌های انتقال آب در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی و به‌طور خلاصه در توسعه پایدار مناطق مختلف حائز اهمیت هستند. در کشورهای توسعه‌یافته راهکارهای متنوعی جهت مقابله با مخاطرات و هزینه‌های پروژه‌های زیرزمینی اتخاذ می‌گردد. در کشور ژاپن به‌موجب قوانین قراردادی و تقسیم مسئولیت، کل ریسک بین کارفرما، پیمانکار و سازنده ماشین تقسیم می‌شود (Shahriar et al., 2008). فدراسیون بین‌المللی مهندسان مشاور (به‌اختصار فیدیک) در همکاری با انجمن بین‌المللی تونل و سازه‌های زیرزمینی، برای تخصصی‌تر شدن قراردادهای فعالیت‌های زیرزمینی و کاهش اختلافات و مشکلات موجود در این زمینه رویکرد جدیدی را جهت تقسیم ریسک بین کارفرما، مشاور

استناد: اسماعیل زاده، م.، کشاورز، ا.، گلخندان، م. (۱۴۰۳). ارزیابی و مقایسه هزینه تونل‌سازی مکانیزه در ایران و جهان. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۴)، ۵۰۱- ۵۲۱. https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1020101

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

و پیمانکار بر مبنای یک گزارش پایه ژئوتکنیک ارائه می‌نماید (Chapman et al., 2017).

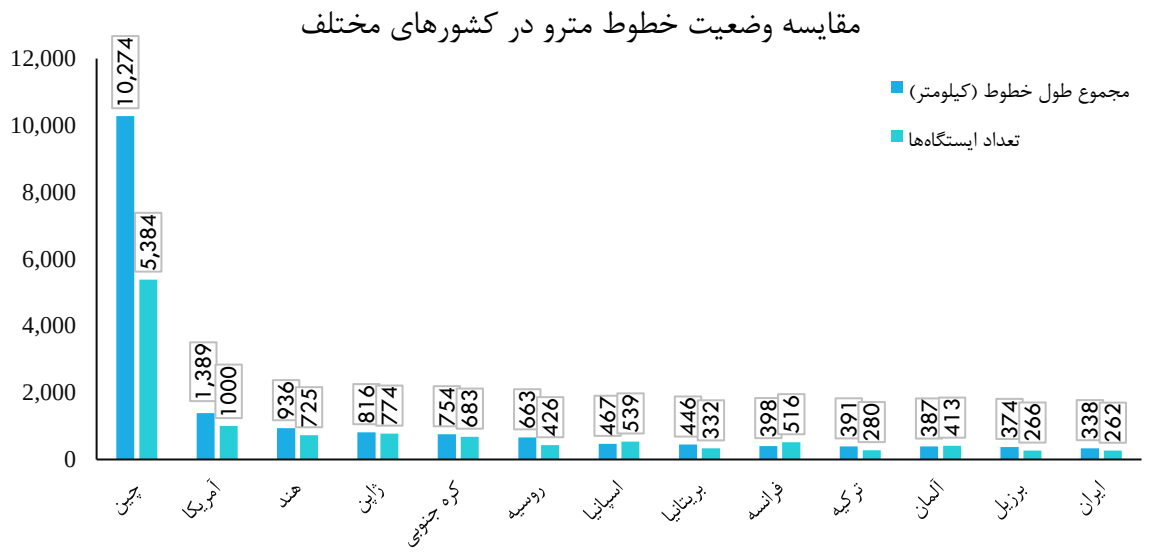
بهبود تأمین مالی در پروژه‌های تونل‌سازی به‌ویژه تونل‌سازی به روش مکانیزه موجب توسعه زیرساخت‌های شهری و امکان اجرای پروژه‌های تونل‌سازی خاص و بلندپروازانه‌ای در این کشورها گردیده. به‌عنوان‌مثال می‌توان به تونل شماره ۳ انتقال آب شهر نیویورک با طول بیش از ۹۶ کیلومتر (در حال ساخت)، خط ۱۵ مترو پاریس با طول ۷۵ کیلومتر (در حال ساخت)، خط ۳ و ۱۱ مترو شهر (Suzhou) در کشور چین با طول بیش از ۸۶ کیلومتر، تونل (Dahuofang Water Tunnel) در کشور چین با قطر ۸ متر و طول بیش از ۸۵ کیلومتر و موارد بی‌شمار دیگری ازاین‌دست اشاره نمود. در جدول ۱ و شکل ۱ تعداد و طول خطوط مترو در ایران و سایر کشورها مقایسه شده است (Bondyopadhyay, 2023).

جدول ۱. مقایسه وضعیت خطوط مترو در کشورهای مختلف (Bondyopadhyay, 2023)

Table 1. Number of metro lines and stations in diffrent countries (Bondyopadhyay, 2023)

ردیف	کشور	مجموع طول خطوط (کیلومتر)	تعداد خطوط	تعداد ایستگاه‌ها
1	چین	10,247	281	5,384
2	آمریکا	1,389	71	1,000
3	هند	936	39	725
4	ژاپن	816	47	774
5	کره جنوبی	754	35	683
6	روسیه	663	29	426
7	اسپانیا	467	23	539
8	بریتانیا	446	19	332
9	فرانسه	398	28	516
10	ترکیه	391	18	280
11	آلمان	387	24	413
12	برزیل	374	20	266
13	ایران	338	17	262

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]



شکل ۱. مقایسه تعداد ایستگاه‌ها و مجموع طول خطوط مترو در کشورهای مختلف

Fig. 1. Number of metro lines and stations in diffrent countries

به‌طورکلی روش‌های تخمین هزینه ساخت‌وساز تونل به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود: روش‌های قطعی (Deterministic) و احتمالاتی (Probabilistic). روش‌های قطعی مقدار واحدی را به‌عنوان بهترین تخمین از هزینه تونل‌سازی ارائه داده و عدم قطعیت‌های تخمین هزینه که ممکن است در شرایط پیش‌بینی‌نشده زمین‌شناسی و نیز شرایط متغیر در عملیات پدید آیند، را نادیده می‌گیرند. در مقابل روش‌های احتمالاتی با شناختن اهمیت تحلیل ریسک‌ها جهت محاسبه و کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها، تخمین هزینه‌های تونل را به‌عنوان یک تابع توزیع احتمال و یک محدوده هزینه ارائه می‌کنند (Ahmed, 2021).

مطالعات بسیاری با استفاده از روش‌های قطعی جهت تخمین هزینه تونل‌سازی صورت پذیرفته است. ازجمله این مطالعات می‌توان به روش ابداعی توسط دپارتمان منابع آب کالیفرنیا اشاره نمود که با ارزیابی هزینه تمام شده تعدادی از تونل‌های انتقال آب در کالیفرنیا، در سال ۱۹۵۹ ارائه گردید. هرچند این مدل صرفاً در امریکا و برای روش‌های مرسوم تونل‌سازی قابل کاربرد بود.

برالد (Bruland, 1999) مدلی را جهت تخمین عمر مفید و هزینه سایش ابزارهای دیسک‌کاتر ارائه نمود. نتایج این تحقیق نشان از تأثیر قابل‌توجه این دو پارامتر بر زمان و هزینه‌های نهایی حفاری توسط دستگاه حفاری مکانیزه (TBM) دارد. این مدل که بر اساس آمار ۲۵۰ کیلومتر از تونل‌های راه ساخته‌شده در نروژ و چند کشور دیگر ساخته‌شده، شرایط زمین‌شناسی را در مقایسه با دیگر پارامترهای حفاری بررسی نموده است.

سیدی و همکاران (Sayedi et al., 2015) مدلی را جهت تخمین هزینه‌های حفاری و نصب سیستم نگهداری بر اساس داده‌های ۱۲ تونل ساخته‌شده در ایران به روش‌های مرسوم حفاری و انفجار با نگاه ویژه به پارامترهایی نظیر امتیازدهی توده‌سنگ (RMR) منطقه و عمق قرارگیری هر تونل توسعه دادند.

رستمی و همکاران مدلی را با استفاده از تحلیل رگرسیون چندگانه جهت تخمین هزینه بر اساس داده‌های موجود از هزینه‌های تمام شده ۲۷۲ پروژه تونل با روش‌های مختلف حفاری و شرایط متنوع زمین‌شناسی در کانادا و آمریکا را

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

بررسی و مقایسه کردند و آن‌ها را بر مبنای روش‌های حفاری شامل روش‌های مرسوم سنتی (۳/۶٪)، مکانیزه هارد راک (۲۴/۳٪)، مکانیزه در زمین‌های سست (۳۲٪/۹)، زمین‌های مختلط (۶٪/۴) و میکرو تانلینگ (۳۲٪/۹) و همچنین کاربرد هر تونل اعم از تونل‌های انتقال آب و فاضلاب، راه و راه‌آهن و مترو تقسیم‌بندی کردند. هزینه‌های تمام شده بر اساس شاخص دلار امریکا در سال ۲۰۰۸ محاسبه شده است. در ادامه به بررسی نتایج این تحقیق در رابطه با تونل‌های مکانیزه هارد راک پرداخته شده است (Rostami et al., 2013).

علی‌رغم نقش به سزای صنعت تونل‌سازی مکانیزه در توسعه تخصصی در زیرساختی کشور، این صنعت فاقد فهرست‌بهای باشد، به‌طوری‌که سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور می های پروژه‌های تونل‌سازی معمولاً جهت برآورد هزینه مکانیزه از فهرست‌بهای واحد پایه رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه و یا فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی (فاقد شود. استفاده از ای و بالاسری) استفاده می‌ضرایب منطقه فهرست‌بهای غیرتخصصی موجب اختلافات و اختلالات عمده گردد. این امر موجب های پروژه می‌در برآورد هزینه سوددهی پایین صنعت تونل‌سازی مکانیزه کشور در مقایسه با سایر صنایع فعال شده است. هدف از این پژوهش برآورد های مکانیزه با استناد بر فهرست‌بها هزینه حفاری تونل سدسازی ۱۴۰۳ با هزینه تمام شده بیش از ۱۰۰ تونل در کشورهای مختلف به تفکیک کاربری و مقایسه آن‌ها است.

مواد و روش‌ها

معرفی معیارهای اثرگذار بر برآورد هزینه‌های تونل‌سازی

به‌طورکلی هزینه تونل‌سازی به‌عنوان تابعی از عوامل متعدد همچون طول و ابعاد تونل، شرایط زمین‌شناسی، حمل‌ونقل مواد حفاری و همچنین موارد دیگری ازجمله مهارت و تجربه نیروی کار، توانایی و تجربیات پیمانکار، نوع تأمینات مالی، زمان‌بندی انجام پروژه و توانایی و ابعاد محل ساخت‌وساز می‌باشد. در جدول ۲ چند نمونه از هزینه‌های تونل‌های تازه احداث شده یا در حال احداث دوقلو با شعاع ۶ الی ۶/۷ متر در پروژه‌های مختلف بین‌المللی ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است هزینه‌های احداث تونل در کشورهای مختلف مقادیری متفاوت بوده است.

جدول ۲. هزینه احداث تونل در چند پروژه بین‌المللی (Munfah and Nicolas, 2020)

Table 2. Tunneling costs in some international projects (Munfah and Nicolas, 2020)

پروژه	سال احداث	هزینه (میلیون دلار امریکا / کیلومتر)
مترو توکیو	2008	250
مترو برلین	2009	204.3
مترو بارسلونا	2009	151.9
مترو خط ۷ نیویورک	2015	937.7
یو – لینک، سیاتل	2016	375
مترو خیابان دوم، نیویورک	2018	1,562.5
دسترسی شرقی، نیویورک	برنامه‌ریزی‌شده برای 2025	1,125-1,875
خط ۱ و ۲ پرپل، لس انجلس	برنامه‌ریزی‌شده برای 2025	500.0
اتصال منطقه‌ای، لس انجلس	برنامه‌ریزی‌شده برای 2021	575.0
متروی مرکزی سان‌فرانسیسکو	برنامه‌ریزی‌شده برای 2021	575.0
کراس ریل، لندن	برنامه‌ریزی‌شده برای 2021	312.5

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

پروژه	سال احداث	هزینه (میلیون دلار امریکا / کیلومتر)
مترو ملبورن	برنامه‌ریزی‌شده برای 2026	468.8
مترو سیدنی	برنامه‌ریزی‌شده برای 2024	468.8
متروی بزرگ پاریس، خطوط مختلف	برنامه‌ریزی‌شده برای 2030	193-281
مترو دوحه، خطوط مختلف	برنامه‌ریزی‌شده برای 2026	150-250
خط سئول شینبوندانگ	2011	87.5
مترو هانگژو	2012	143.7
مترو بمبئی، دهلی، کلکته	مختلف	62-93

هزینه تمام‌شده ساخت پروژه‌های زیرزمینی در کشورهای مختلف، متفاوت بوده و به عوامل متعددی بستگی دارد. در جدول ۳ تأثیر عوامل مختلف بر هزینه‌های تمام‌شده تونل در پنج گروه خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم، دسته‌بندی شده است. دستمزد و شمار نیروی انسانی، مواد و مصالح مصرفی، اجرای سازه‌های جانبی و تجهیزات به‌کارگیری شده، ازجمله مهم‌ترین این عوامل هستند.

جدول ۳. عوامل مؤثر بر هزینه تمام‌شده پروژه‌های تونل (Munfah and Nicolas, 2020)

Table 3. Major factors affecting on tunneling cost (Munfah and Nicolas, 2020)

چالش‌ها	نیویورک	سایر ایالات امریکا	اروپا	هند، چین، آسیای شرقی
چالش‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیک	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط
دستمزد نیروی کار و خدمات	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	خیلی کم
مواد و مصالح	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط
ریسک‌های ساخت‌وساز	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم
هزینه‌های جانبی	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم
ایمنی و محیط‌زیست	خیلی زیاد	خیلی زیاد	متوسط	کم
چالش‌های شرایط کلی بازار	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم
اخذ تائیدیه و مجوزها	خیلی زیاد	خیلی زیاد	متوسط	کم
دغدغه سهامداران	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	خیلی کم
تدارکات پروژه	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم
دانش ذینفعان در خصوص پروژه‌های زیرزمینی	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط
ریسک‌های اشتراکی مالک	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	متوسط
قوانین کار و کارگر	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	کم
نفوذ سیاسی بر پروژه‌های زیرساختی	زیاد	زیاد	کم	کم

همچنین هزینه‌های بالاسری غیرمستقیم مانند بیمه و غیره نیز در هزینه تمام‌شده مؤثرند. به‌طورکلی هزینه‌های غیرمستقیم ۱۵-۵ درصد هزینه تمام شده طراحی و ساخت یک پروژه را شامل می‌شوند (Rostami et al., 2013).

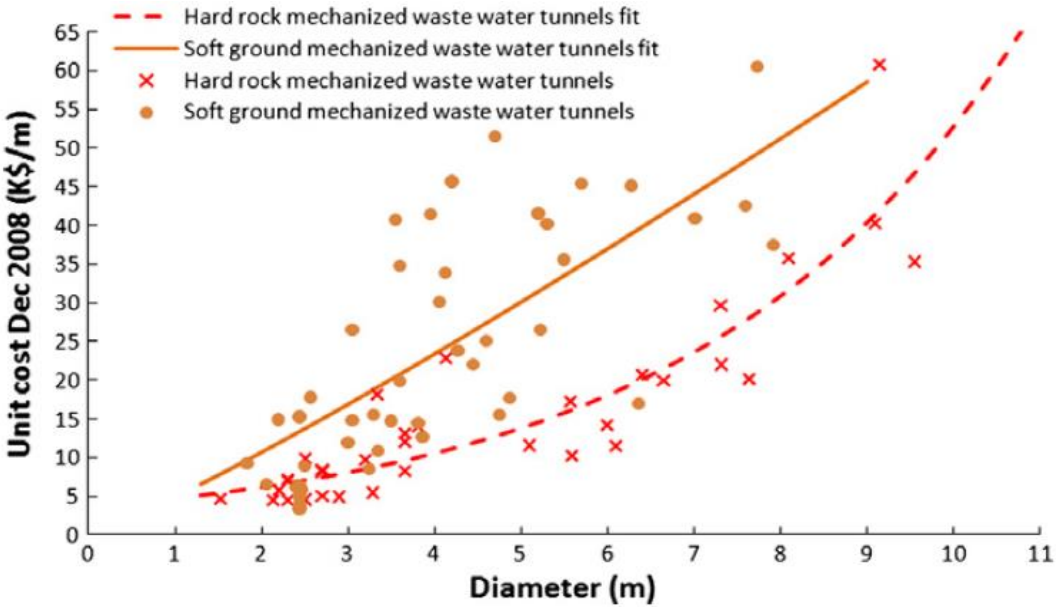
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

روش‌های برآورد و تخمین هزینه‌های تونل‌سازی

تخمین هزینه‌های تونل‌سازی با اتکا بر آنالیز قیمت‌های هزینه کرد در پروژه‌های واقعی اجرا شده صورت می‌پذیرد. در این بخش از نتایج دو پژوهش رستمی و همکاران (Rostami et al., 2013) و احمد (Ahmed, 2021) استفاده شده است که در آن داده‌های هزینه‌کرد تونل‌های اجرا شده تجزیه‌وتحلیل شده و با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره معادله هزینه ساخت تونل بر اساس واحد طول و نیز به‌صورت کلی به تفکیک کاربرد هر تونل استخراج و مورداستفاده قرار گرفته است.

در ادامه مطابق فرآیند معمول در تهیه برآورد و یا صورت‌های کارکرد پروژه‌های تونل‌سازی در کشور از فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی سال ۱۴۰۳ جهت تخمین هزینه تونل‌سازی در ایران استفاده شده است.

در شکل ۲ پراکندگی داده‌های مربوط به هزینه تمام شده چند تونل فاضلاب بر اساس قیمت واحد در مقابل قطر تونل برای پروژه‌های هارد راک نمایش داده شده است.

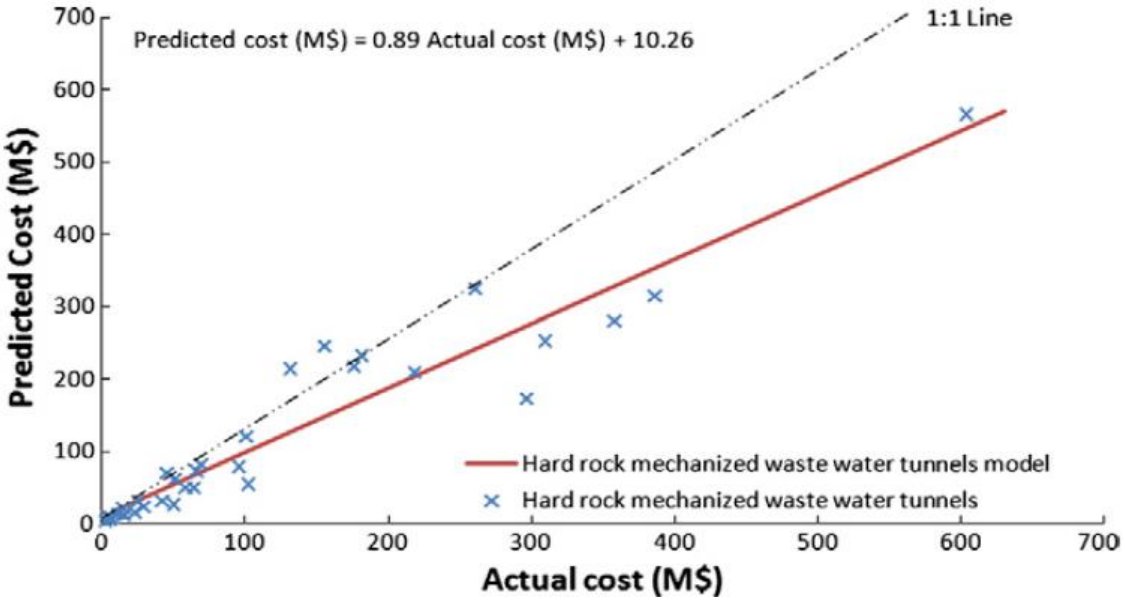


شکل ۲. هزینه واحد در برابر قطر برای تونل‌های فاضلاب حفرشده با دستگاه مکانیزه سافت گراند و هارد راک (Rostami et al., 2013)

Fig. 2. Unit cost against tunnel diameter for sewer soft and hard rock mechanized tunnels (Rostami et al., 2013)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]



شکل ۳. هزینه پیش‌بینی‌شده در مقابل هزینه تمام شده تونل‌های فاضلاب (Rostami et al., 2013)

Fig. 3. Predicted cost vs. the cost of mechanized sewer tunnels (Rostami et al., 2013)

شکل ۳ دقت هزینه تخمینی در مقایسه با هزینه‌های تمام شده تونل‌های فاضلاب هارد راک را بررسی می‌کند. در جدول ۴ خلاصه آنالیز هزینه‌های ساخت پروژه تونل به روش هارد راک و سافت گراند شامل روابط و ضرایب همبستگی، تعداد کیس‌ها و همچنین نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده آورده شده است. همان‌طور که مشخص است نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده برای تونل‌های هارد راک مقدار ۰/۸۹ و همچنین ضرایب همبستگی برای هزینه واحد ۸۰ درصد و هزینه کلی ۹۵ درصد بوده است.

جدول ۴. خلاصه نتایج هزینه‌ها و آنالیز رگرسیون چند متغیره برای تونل‌های فاضلاب حفرشده با دستگاه مکانیزه هارد راک (Rostami et al., 2013)

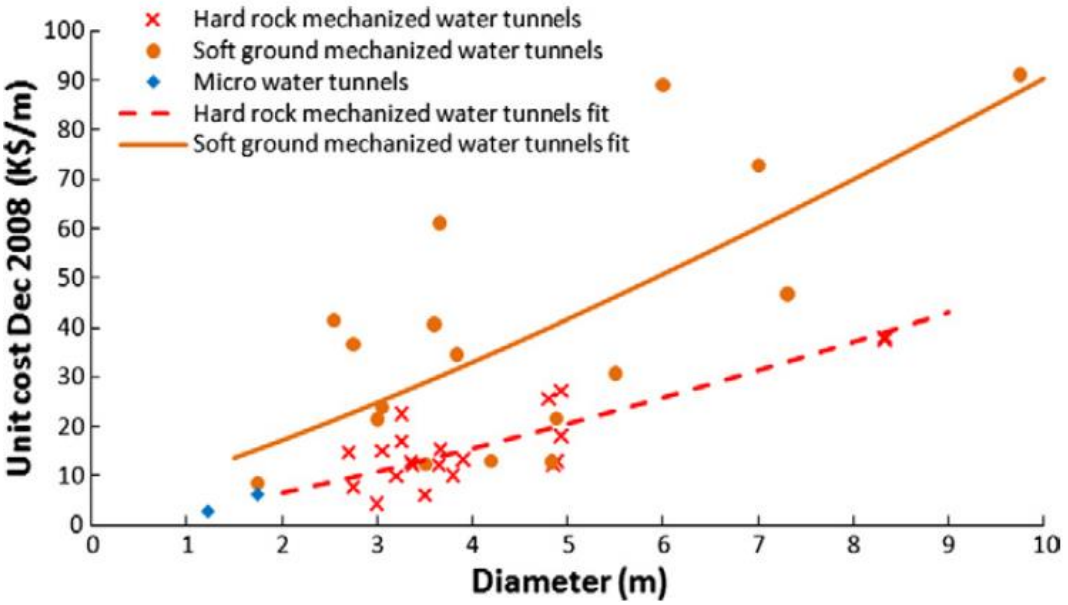
Table 4. Summary of results of costs and multivariate regression analysis for mechanized sewage tunnels (Rostami et al., 2013)

Application	Type of excavation	Number of data	$\frac{P_c}{A_c}$	R^2(%)	Equation of fitted curve/multi-variable regression equation
Waste water	Hard rock mechanized	34	0.89	80	Unit cost(k$/m)=3.618$exp^{0.268D}$
				95	Cost(M$)=10^(0.319+0.901log of length(km)+1.35 log of diameter(m))

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

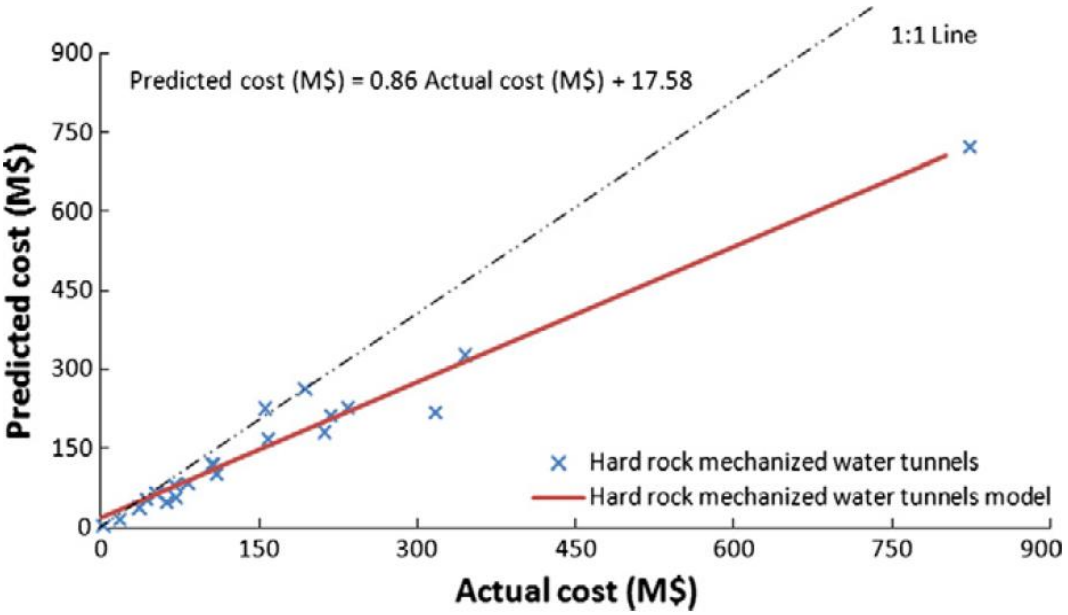
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]

[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]



شکل ۴. هزینه واحد در برابر قطر برای تونل‌های آب حفرشده با دستگاه مکانیزه سافت گراند و هارد راک (Rostami et al., 2013)

Fig. 4. Unit cost against diameter for mechanized soft and hrad rock tunnels (Rostami et al., 2013)



شکل ۵. هزینه پیش‌بینی‌شده در مقابل هزینه تمام شده تونل‌های انتقال آب توسط دستگاه هارد راک (Rostami et al., 2013)

Fig. 5. Predicted cost vs. the total cost of mechanized water coyevance hard rock tunnels (Rostami et al., 2013)

شکل ۴ نمودار پراکندگی هزینه‌های تمام شده تونل‌های انتقال آب با روش‌های مختلف حفاری، بر اساس قیمت واحد، را در مقابل قطر تونل نمایش داده است. شکل ۵ دقت هزینه‌های تخمینی در مقایسه با هزینه‌های تمام شده تونل‌های انتقال آب هارد راک را نشان داده است. در جدول ۵ خلاصه آنالیز هزینه‌های ساخت تونل‌های انتقال آب با روش هارد راک و سافت گراند شامل روابط و ضرایب

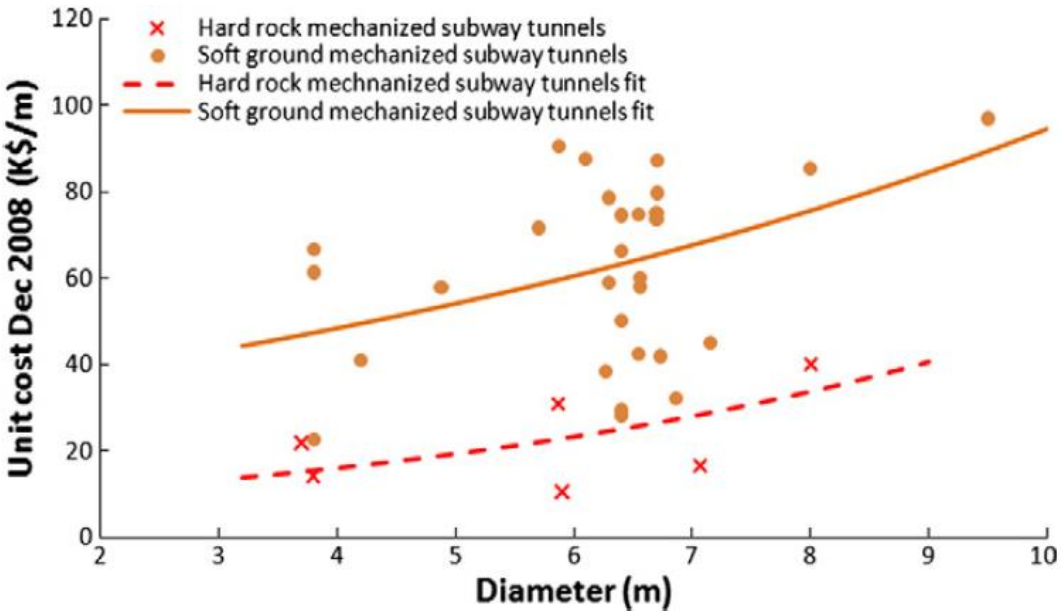
همبستگی، تعداد کیس‌ها، نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده، آورده شده است. همان‌طور که مشخص است نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده برای تونل‌های هارد راک ۰/۸۶ و ضرایب همبستگی برای هزینه واحد طول ۹۱ درصد و برای هزینه کلی ۹۸ درصد بوده است که نسبت قابل قبولی است.

جدول ۵. خلاصه نتایج هزینه‌ها و آنالیز رگرسیون چند متغیره برای تونل‌های آب حفرشده با دستگاه مکانیزه‌ی و هارد راک (Rostami et al., 2013)

Table 5. Summary of the results of costs and multivariate regression for mechanized water hard rock tunnels (Rostami et al., 2013)

Application	Type of excavation	Number of data	$\frac{P_c}{A_c}$	R^2(%)	Equation of fitted curve/multi-variable regression equation
Water	Hard rock mechanized	21	0.86	91	Unit cost(k$/m)=2.693$D^{1.262}$
				98	Cost(M$)=10^(0.553+0.866 log of length(km)+1.23 log of diameter(m))

در شکل ۶ نمودار پراکندگی هزینه‌های تمام شده تونل‌های مترو در زمین‌های مختلف بر اساس قیمت واحد در مقابل قطر تونل نمایش داده شده است. شکل ۷ دقت هزینه‌های تخمینی در مقایسه با هزینه‌های تمام شده تونل‌های مترو هارد راک را نمایش می‌دهد.

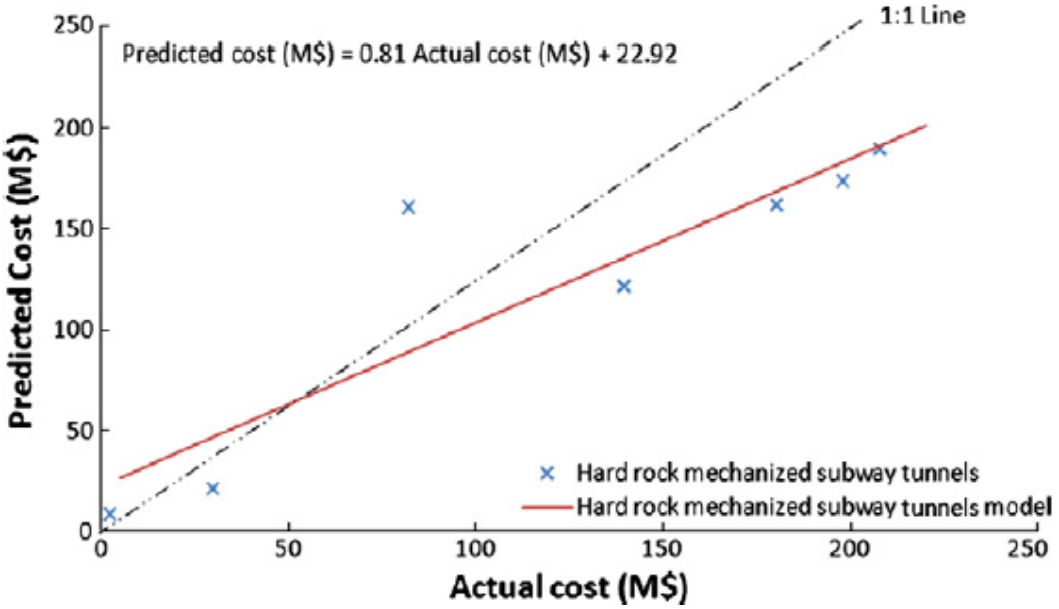


شکل ۶. هزینه واحد در برابر قطر برای تونل‌های مترو حفرشده با دستگاه مکانیزه سافت گراند و هارد راک (Rostami et al., 2013)

Fig. 6. Unit cost vs. diameter for mechanized subway soft and hard rock tunnels (Rostami et al., 2013)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]



شکل ۷. هزینه پیش‌بینی‌شده در مقابل هزینه تمام شده حفاری تونل‌های مترو توسط دستگاه هارد راک (Rostami et al., 2013)

Fig 7. Estimated cost vs. actual cost of mechanized subway tunnels (Rostami et al., 2013)

جدول ۶ خلاصه آنالیز هزینه‌های ساخت تونل‌های مترو به روش هارد راک و سافت گراند شامل روابط و ضرایب همبستگی، تعداد کیس‌ها، نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده است. همان‌طور که مشخص است نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده برای تونل‌های هارد راک مقدار ۰/۸۱ و همچنین ضرایب همبستگی برای هزینه واحد طول، ۳۴ درصد و هزینه کلی، ۶۸ درصد بوده است. دلیل همبستگی کمتر در این مورد می‌تواند مربوط به ابعاد و نیازمندی‌های ویژه تونل‌های مترو در هر پروژه باشد.

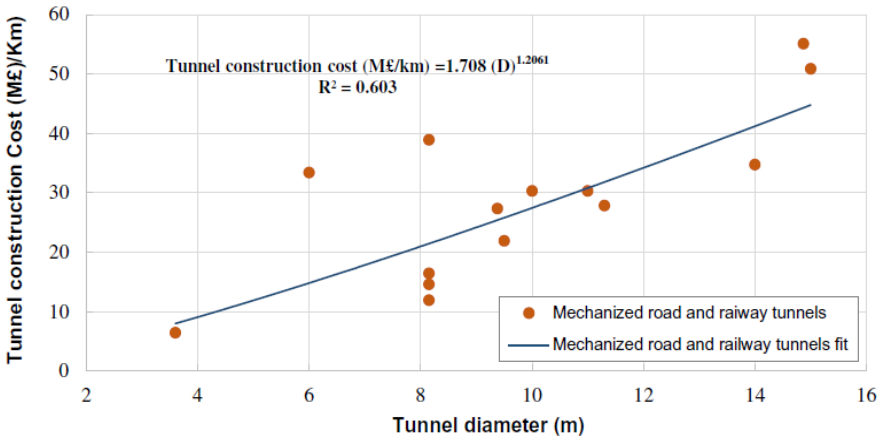
جدول ۶. خلاصه نتایج هزینه‌ها و آنالیز رگرسیون چند متغیره برای تونل‌های مترو حفرشده با دستگاه مکانیزه‌ی هارد راک (Rostami et al., 2013)

Table 6. Summary of the results of costs and multivariated regression analysis for subway mechanized tunnels (Rostami et al., 2013)

Application	Type of excavation	Number of data	$\frac{P_c}{A_c}$	R^2(%)	Equation of fitted curve/multi-variable regression equation
Metro	Hard rock mechanized	7	0.81	34	Unit cost(k$/m)=$7.672exp^{0.1849D}$
				68	Cost(M$)= -97.2 + 11.7 length(km) + 28.3diameter(m))

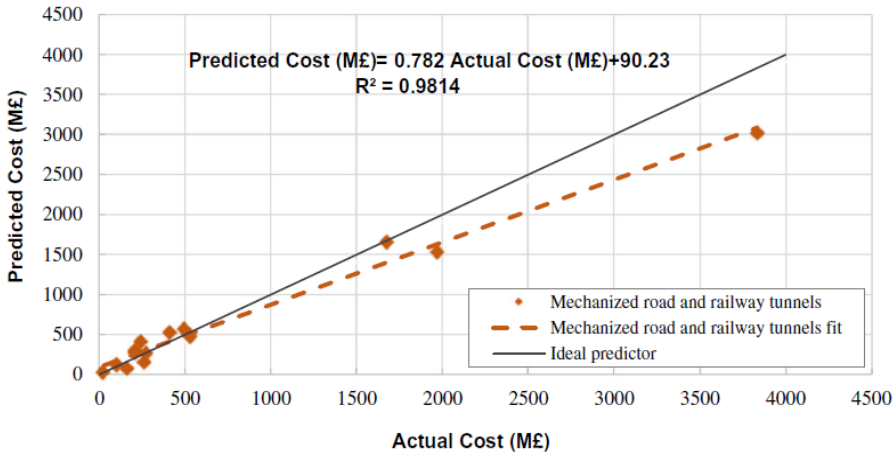
همچنین پژوهشی دیگری در سال ۲۰۲۱، با بررسی ۳۳ تونل (۲۵ تونل راه و راه‌آهن، ۵ تونل انتقال آب و ۳ تونل نیروگاهی) ساخته‌شده در غرب اروپا، و مقایسه هزینه‌های آن منجر به ارائه مدلی جهت تخمین هزینه‌های یک پروژه تونل‌سازی با توجه به سناریوها و روش‌های مختلف شده است. داده‌های جمع‌آوری‌شده هر پروژه شامل هزینه نهایی ساخت، طول و قطر تونل، موقعیت تونل، روش حفاری و کاربری نهایی تونل است که جهت حصول ارتباط بین متغیرها از رگرسیون چندگانه (Multiple Regression) بر

روی داده‌های تونل‌های راه و راه‌آهن استفاده شده است. تمام مبالغ بر اساس مقدار معادل در نیمه اول سال ۲۰۲۱ تعدیل شده‌اند (Ahmed, 2021). شکل ۸ مقایسه بین قطر و هزینه واحد ساخت تونل‌های راه و راه‌آهن حفرشده توسط روش مکانیزه را نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۹ صحت تخمین هزینه‌ها در مقابل هزینه‌های تمام شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۸. هزینه واحد ساخت در برابر قطر برای تونل‌های راه و راه‌آهن حفرشده با دستگاه حفار مکانیزه (Ahmed, 2021)

Fig 8. Construaction unit cost vs. diameter for road and railway mechanized tunnels (Ahmed, 2021)



شکل ۹. رابطه بین هزینه پیش‌بینی‌شده در مقابل هزینه تمام شده تونل‌های راه و راه‌آهن حفرشده توسط دستگاه حفار مکانیزه (Ahmed, 2021)

Fig. 9. The relationship between the predicted cost and the finished cost of road and railway mechanized tunnels (Ahmed, 2021)

در جدول ۷ خلاصه آنالیز هزینه‌های ساخت تونل‌های راه و راه‌آهن شامل روابط و ضرایب همبستگی، تعداد کیس‌ها، نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده، آورده شده است. همان‌طور که مشخص است نسبت هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به هزینه‌های تمام شده برای تونل‌های مکانیزه مقدار ۰/۸۱ و همچنین ضرایب همبستگی برای هزینه واحد طول ۹۲/۶ درصد و هزینه کلی ۶۰/۳ درصد بوده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

جدول ۷. خلاصه نتایج هزینه‌ها و آنالیز رگرسیون چند متغیره برای تونل‌های راه و راه‌آهن حفرشده با دستگاه حفار مکانیزه (Ahmed, 2021)

Table 7. Summary of the results of costs and multivariated regression analysis for mechanized road and railway tunnels (Ahmed, 2021)

Tunneling method	Number of data	$\frac{P_c}{A_c}$	R^2	Equation of fitted curve/multi-variable regression equation
Mechanized	14	0.81	0.603	Unit cost(M£/m)=$1.708D^{1.206}$
			0.926	Cost(M£)= 287.197 + 27.281 (L) - 22.518(D)
L is tunnel length in (km), and D is tunnel diameter in (m)				

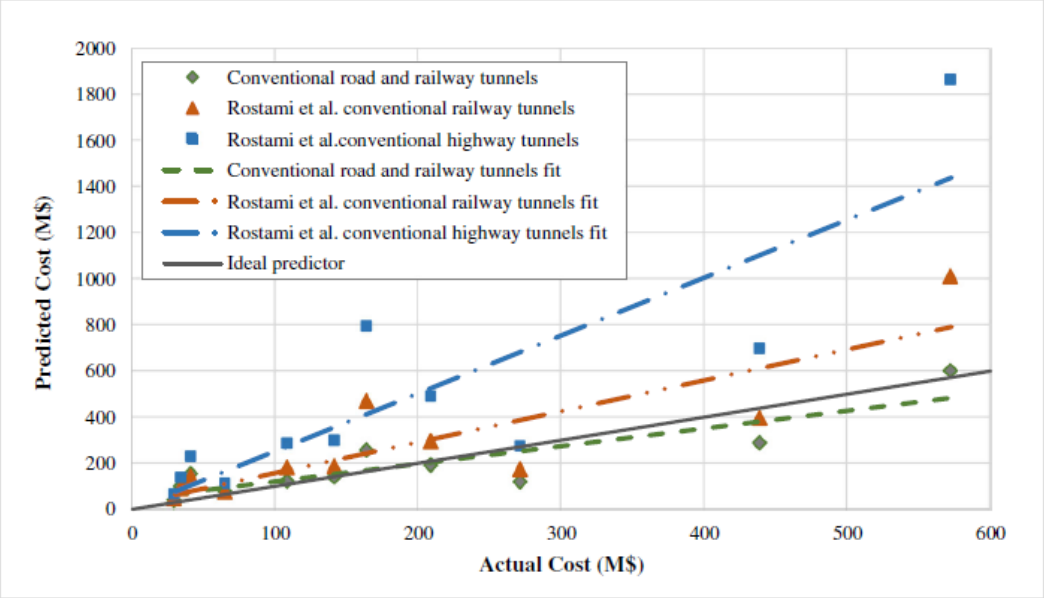
با مقایسه نتایج روش‌های رستمی و همکاران (Rostami et al., 2013) با احمد (Ahmed, 2021)، مشخصاً روش رستمی و همکاران تطابق بیشتری با هزینه‌های تمام شده دارد. خلاصه نتایج این مقایسه در جدول ۸ و شکل ۱۰ آورده شده است.

جدول ۸. مقایسه نتایج روش‌های رستمی و همکاران (Rostami et al., 2013) و احمد (Ahmed, 2021) برای تونل‌های راه و راه‌آهن حفرشده با دستگاه حفار مکانیزه

Table 8. Comprasion of the results of the methods of Rostami et al. (2013) with Ahmed (2021) for mechanized road and railways tunnels

Studies	Tunnel application	Tunneling method	Number of data	$\frac{P_c}{A_c}$	R^2	Equation of fitted curve/multi-variable regression equation
(Rostami et al., 2013)	Road	Conventional	12	2.514	0.95	Cost(M$/m)=10^(1.51+1.02 Log(L)+0.374 log(D)
	Railway	Conventional	13	1.343	0.77	Cost(M$/m)=10^(1.10+0.933 Log(L)+0.614 log(D)
		Mechanized-hard rock	7	0.241	0.68	Cost(M$)= -97.2 + 11.7 (L) + 28.3(D)
		Mechanized-soft ground	28	1.851	0.90	Cost(M$/m)=10^(1.23+1.05 Log(L) + 0.636 log(D)
(Ahmed, 2021)	Road and Railway	Conventional	11	0.768	0.798	Cost(M£)= 287.197 + 27.281 (L) - 22.518(D)
	Road and Railway	Mechanized	14	0.782	0.926	Cost(M$/m)=10^(0.337+0.894 Log(L) + 1.343 log(D)
L is tunnel length in (km), and D is tunnel diameter in (m)						

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]



شکل ۱۰. مقایسه نتایج روش‌های رستمی و همکاران (Rostami et al., 2013) و احمد (Ahmed, 2021) با توجه به رابطه بین هزینه پیش‌بینی‌شده در مقابل هزینه تمام شده تونل‌های راه و راه‌آهن حفرشده توسط دستگاه حفار مکانیزه و روش‌های متداول

Fig. 10. Comprasion of the results of the methods of Rostami et al. (2013) with Ahmed (2021) regarding the relationship between the predicted cost and the finished cost of mechanized road and railways tunnels

مطالعات بسیاری در دهه‌های اخیر جهت منظور نمودن موارد عدم قطعیت در شرایط زمین‌شناسی و روند ساخت‌وساز با به‌کارگیری روش‌های احتمالاتی جهت تخمین هزینه و زمان ساخت تونل صورت گرفته است. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها راهکارها برای تونل‌سازی (Decision Aids for Tunneling) بوده که توسط انستیتو تکنولوژی ماساچوست MIT و در طی چند سال توسعه داده شده و به‌طور موفقیت‌آمیزی در پروژه‌هایی در آسیا و اروپا استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از روش مونت‌کارلو و با استفاده از دو ماژول زمین‌شناسی و ماژول مربوط به ساخت، هزینه و زمان موردنیاز جهت ساخت تونل را با توجه به عدم قطعیت شرایط زمین‌شناسی و عوامل دیگر، برآورد می‌نماید. اگرچه روش‌های احتمالاتی جهت تخمین هزینه‌های لازم تونل‌سازی روش قدرتمند و با دقت بالایی محسوب می‌شوند اما نیاز به تحقیقات و اطلاعات بسیار دقیقی از شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی جهت حصول نتایج کمی از ریسک‌ها و شرایط پیش‌بینی‌نشده دارند. در عین‌حال روش‌های تعیینی علی‌رغم محدودیت‌هایی مانند تأکید بر پروژه‌ها یا محدوده و کشور خاص و یا روش خاص، متداول‌تر بوده و دارای دقت قابل قبولی در پروژه‌های مختلف بوده‌اند (Ahmed, 2021).

صنعت تونل‌سازی مکانیزه در ایران، فاقد فهرست‌بهای تخصصی در سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور بوده و جهت برآورد هزینه‌های تونل‌سازی معمولاً از فهرست‌بهای واحد پایه رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه و یا فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی، ابلاغ‌شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور استفاده می‌شود. با بررسی و مقایسه این دو فهرست‌بها، در این تحقیق با توجه به دو عامل سهولت و تطبیق‌پذیری بیشتر، از فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی ابلاغ‌شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشوری استفاده شده است، هرچند در برآورد هزینه‌ها اختلاف چندانی بین این دو فهرست‌بها دیده نمی‌شود. در ادامه بهای واحد هر متر تونل با توجه به آیتم‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی سال ۱۴۰۳ برای تونل مکانیزه هارد راک با کاربری انتقال آب به طول ۱۰،۰۰۰ متر، قطر ۴,۵ متر و در عمق بیش از ۲۵۰ متر به‌عنوان مثالی از تونل‌های حفاری‌شده انتقال آب در سطح کشور محاسبه شده و نتایج حاصل با مقادیر میانگین جهانی مقایسه شده است. جدول ۹ مشخصات مهم‌ترین مواد و مصالح مورداستفاده در ساخت این تونل را نشان می‌دهد. ردیف‌های متناظر با حفاری مکانیزه در فهرست‌بهای سدسازی در سال ۱۴۰۳ مطابق جدول ۱۰ محاسبه شده است.

جدول ۹. مقدار برخی از مهم‌ترین مصالح مورداستفاده در ساخت تونل

Table 9.Amount of some of important materials used in tunnel construction

آیتم	واحد	مقدار
سگمنت‌های موردنیاز	تعداد	7,692
وزن شن نخودی مصرفی در کل تونل	تن	24,650
وزن شن مصرفی در کل سگمنت‌های تونل	تن	25,345
وزن ماسه مصرفی در کل سگمنت‌های تونل	تن	22,175
آرماتور مصرفی در کل سگمنت‌های تونل	تن	3,760
حجم کل بتن سگمنت موردنیاز	مترمکعب	26,400
وزن سیمان دوغاب در کل تونل	تن	5,280
سیمان مصرفی در کل سگمنت‌های تونل	تن	11,200

جدول ۱۰. آیتم‌های به کار گرفته شده از فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی سال ۱۴۰۳ جهت تخمین هزینه‌های تونل‌ها

Table 10. Items used from the pricing schedule of dam construction in 1403 to estimate tunnels costs

شماره	شرح	واحد	بهای واحد (ریال)
014901	بارگیری مصالح حاصل از عملیات خاکی (خاک، سنگ، لجن و نظایر آن) و تخلیه	مترمکعب	196,000
015001	پخش مصالح حاصل از خاک‌برداری، پی‌کنی، کانال‌کنی و گودبرداری که در محل‌های تعیین‌شده دپو شده باش ند با هر ضخامت	مترمکعب	24,600
101722	حمل مصالح سنگی (کوهی) بتن از محل معدن تا محل تولید بتن	مترمکعب- کیلو متر	40,300
020106	حفاری تونل‌های با سطح مقطع حفاری ۴۰ مترمربع، در زمین سنگی، با استفاده از هر نوع دستگاه TBM	مترمکعب	17,791,000
020302	اضافه بها به ردیف‌های ۰۲۰۱۰۵ و ۰۲۰۱۰۶ به ازای هر مترمربع کمتر از ۴۰ مترمربع.	درصد	2%
020304	اضافه بها به ردیف‌های حفاری تونل با استفاده از دستگاه حفار TBM (ردیف‌های ۲۰۱۰۵ و ۲۰۱۰۶) در عمق بیشتر از ۲۵۰ متر، برای ۲۵۰ متر اول یک‌بار، برای ۲۵۰ متر دوم دو بارو به همین ترتیب برای طول‌های بیشتر.	درصد	1%
050102	تهیه، خم و برش، بستن و کار گذاشتن میلگرد آجدار از نوع AIII.	کیلوگرم	279,000
073001	تهیه و نصب قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) در تونل‌های حفاری‌شده با دستگاه TBM.	مترمکعب	43,675,000
090801	تخلیه آب از محل‌های اجرای کار به‌وسیله انواع پمپ با هر توان.	کیلووات ساعت	89,600
091001	تهیه وسایل و اجرای عملیات تهویه تونل‌های حفاری‌شده با دستگاه حفار TBM، برای دوره ساختمان.	مترمکعب	321,500
091101	اضافه بها به ردیف ۰۹۱۰۰۱، هرگاه فاصله از نزدیک‌ترین دهانه دسترسی بیش از ۲۵۰ متر باشد، به ازای هر۲۵ ۰ متر. برای ۲۵۰ متر دوم یک‌بار، ۲۵۰ متر سوم دوبار، و به همین ترتیب برای طول‌های بیشتر.	مترمکعب	7%
101802	حمل میلگرد	تن - کیلومتر	16,000
101804	حمل سیمان	تن - کیلومتر	16,000

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

بحث و بررسی

در تحقیق حاضر با توجه به بررسی‌ها و مقایسه‌ی روش‌های متخلف و همچنین صحت و همبستگی بالای ضرایب و نیز اختصاصی بودن روش حفاری و کاربری تونل‌ها در مدل رستمی (Rostami et al., 2013)، تصمیم به انتخاب معادلات این مدل و تخمین هزینه‌های تونل‌سازی گرفته شده است. به این منظور از معادلات در نظر گرفته شده برای حفاری مکانیزه هارد راک که برای کاربری‌های انتقال آب، فاضلاب و مترو در نظر گرفته شده استفاده شده است و هزینه بهای واحد و کلی تونل محاسبه گردیده است. با توجه به روابط ذکر شده در بخش‌های قبل، مقادیر هزینه‌ها به ازای هر متر طول و هزینه کل تونل محاسبه گردید (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. خلاصه مقادیر محاسباتی با استفاده از روش رستمی

Table 10. Summary of calculation values using Rostami method

هزینه احداث تونل	مقیاس	طول (متر)	قطر(متر)	آب	فاضلاب	مترو
	هزینه واحد طول (هزار دلار)	1	4.5	17,971	12,084	17,630
	هزینه کلی (میلیون دلار)	10,000		166,898	126,426	14,715

مقادیر محاسبه شده از فهرست‌بها به دلار و به ریال (با احتساب نرخ دلار ۶۰۰،۰۰۰ ریالی) و بدون احتساب ضریب بالاسری و با احتساب ضریب ۶ درصدی جهت عملیات تجهیز و برچیدن کارگاه محاسبه و در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲. خلاصه مقادیر محاسباتی با استفاده از فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی سال ۱۴۰۳

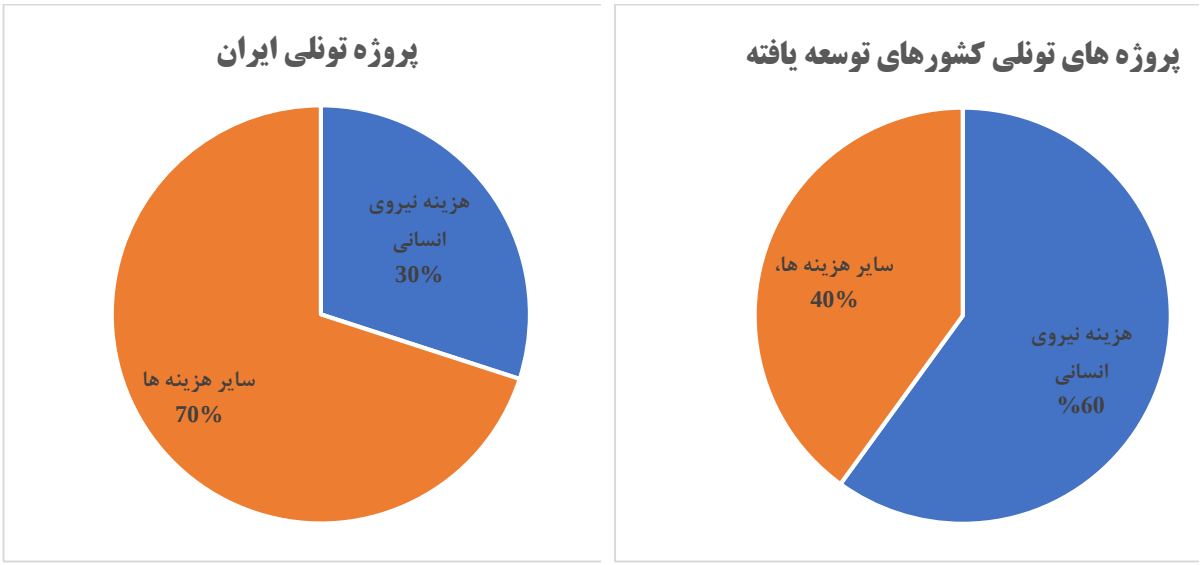
Table 11. Summary of calculated values using the pricing schedule of dam construction in 1403

هزینه احداث تونل	مقیاس	طول (متر)	قطر(متر)	ریال	دلار
	هزینه واحد طول	10,000	4.5	842,983,061	1,405
	هزینه کلی			8,429,830,608,724	14,049,717

هزینه‌های مرتبط به نیروی انسانی در پروژه‌های تونلی در کشورهای توسعه‌یافته معمولاً ۶۰-۴۰ درصد از کل هزینه پروژه را تشکیل می‌دهد (Bilgin and Acun, 2024). با بررسی هزینه‌های یکی از پروژه‌های تونلی مکانیزه در حال احداث در ایران، این نسبت برابر ۳۰ درصد از کل هزینه پروژه است. هزینه‌های نیروی انسانی در پروژه‌های داخلی نسبت به سایر پروژه‌های بین‌المللی سهم کوچک‌تری از هزینه‌ها را شامل شده است. همچنین متناسب با سایر هزینه‌ها در مبلغ کل کاهش داشته است و موجب کمتر شدن هزینه تمام شده کل شده است (شکل ۱۱). بر اساس مصوبه شورای عالی کار، حداقل دستمزد کارگران در سال ۱۴۰۳ به عدد ۰۰۰،۰۷۰،۱۱۱ ریال افزایش یافته است: هرچند این عدد نسبت به سال ۱۴۰۲، ۳۵ درصد افزایش یافته است اما معادل دلاری روند کاهشی داشته و در مقایسه با حداقل دستمزد در اکثر کشورهای جهان، مبلغ بسیار کمتری است. این عامل موجب شده هزینه‌های نیروی انسانی در پروژه‌های تونل‌سازی سهم کوچک‌تری از هزینه‌ی کل را شامل شود. با توجه به شرایط ویژه روش‌های مکانیزه حفاری تونل و استفاده از تجهیزات خاص، نیاز به نیروی انسانی با تخصص، تجربه و دانش ویژه در حیطه حفاری مکانیزه وجود دارد که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

این موضوع نیازمند افزایش هزینه‌کرد در حیطه منابع انسانی بوده و عدم پرداخت هزینه در این بخش موجب از دست رفتن نیروی انسانی متخصص در این حوضه و درنهایت کاهش بهره‌وری، ایجاد خسارت و افزایش هزینه در بلندمدت می‌گردد.

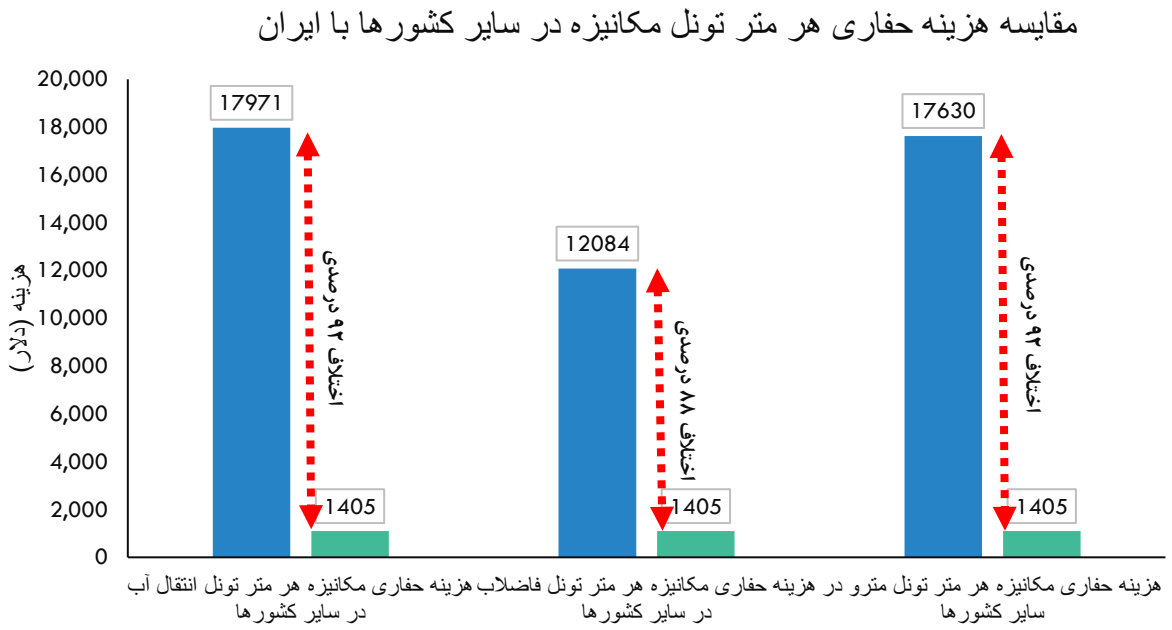


شکل ۱۱. مقایسه اختلاف هزینه نیروی انسانی

Fig. 11. Comprasion of the difference in the labor cost

در شکل ۱۲ مقایسه اقتصادی هزینه حفاری مکانیزه هر متر تونل مکانیزه به تفکیک کاربری هریک در ایران و سایر کشورها مقایسه شده است. برخلاف سایر کشورها برآورد هزینه‌های حفاری تونل در ایران با استناد به فهرست‌بهای واحد پایه رشته سدسازی و به‌صورت غیرتخصصی انجام می‌شود. این برآورد نشان از اختلاف ۹۲ درصدی هزینه حفاری تونل مکانیزه انتقال آب و تونل مکانیزه مترو و اختلاف ۸۸ درصدی تونل فاضلاب در ایران در مقایسه با میانگین هزینه تونل‌ها در سایر کشورها دارد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]



شکل ۱۲. مقایسه اختلاف هزینه حفاری مکانیزه هر متر تونل در سایر کشورها با ایران

Fig. 12. Comprasion of the difference in the cost of mechanized tunnelling in iran with other countries

نتیجه‌گیری

صنعت تونل سازی به‌عنوان یک شاخص توسعه اقتصادی در دهه‌های گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. در این پژوهش ضمن بررسی عوامل مختلف مؤثر بر هزینه تمام‌شده حفاری مکانیزه تونل‌های راه، مترو و انتقال آب، و همچنین معرفی روش‌های قطعی و احتمالی تخمین هزینه تمام‌شده احداث تونل مکانیزه، با استناد بر فهرست‌بها سدسازی سال ۱۴۰۳ هزینه حفاری تونل در ایران با هزینه حفاری تونلی مشابه در سایر کشورها مقایسه شده است. همچنین جهت بررسی نسبت هزینه‌های نیروی انسانی به کل هزینه احداث تونل، از اطلاعات پروژه‌های بین‌المللی و یکی از پروژه‌های تونلی در حال احداث در ایران استفاده شده است. نتایج این پژوهش بیانگر اختلاف هزینه ۳۰ درصدی نیروی انسانی و ۹۲ درصدی در حفاری و ساخت هر متر تونل مکانیزه در ایران در مقایسه با سایر کشورها بوده که این اختلاف نشان از عدم تناسب بهای واحد کارکردها، اختلاف در دستمزدها و به صورت کلی نبود یک فهرست‌بها تخصصی برای عملیات تونل‌سازی مکانیزه در کشور دارد. وجود این فاصله بزرگ قیمتی می‌تواند موجب رکود، ایجاد نشدن شرایط رقابتی بین پیمانکاران و عدم توسعه و به‌کارگیری روش‌های نوین حفاری و با بهره‌وری بالا در عرصه تونل‌سازی و در نتیجه عدم توسعه مناسب زیرساختی کشور گردد. نیاز به استفاده از نیروی انسانی متخصص در حوضه حفاری به روش مکانیزه نیاز به افزایش هزینه‌کرد در این حیطه دارد. معرفی و ارائه فهرست‌بها اختصاصی رشته تونل‌سازی با در نظر گرفتن شرایط خاص مربوط به این رشته و عدم قطعیت‌های موجود، می‌تواند موجب افزایش رقابت بین پیمان‌کاران، افزایش کیفیت ساخت، بهبود بهره‌وری، کاهش اختلافات و زمان تکمیل پروژه‌ها گردد. ارائه فهرست‌بها تخصصی برای تونل‌سازی به روش مکانیزه با توجه به انواع دستگاه‌های حفاری مکانیزه تونل و نیز تعدد آیتم‌ها و عملیات مرتبط با هریک، نیازمند تشکیل کارگروه‌های تخصصی و استفاده از افراد مجرب و صاحب‌نظر جهت تعیین بهای واحد هر آیتم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]

است. تعیین بهای واحد هر آیتم خود نیازمند بررسی و استعلام دقیق هزینه‌های عواملی مانند مواد و مصالح، ماشین‌آلات و تجهیزات، حمل و جابجایی و نیروی انسانی است.

استفاده از مبانی قراردادی نوین مبتنی بر تقسیم ریسک‌ها در فعالیت‌های زیرزمینی نیز می‌تواند کمک شایانی در تقسیم عادلانه هزینه‌ها و کاهش اختلافات اعتباری و تخصیصی گردد. همچنین برگزاری نشست‌های همفکری در انجمن‌های وابسته مانند انجمن تونل ایران با متخصصان و دست‌اندرکاران این صنعت می‌تواند علاوه بر تصمیم‌سازی در خصوص مدیریت فنی طرح و ساخت پروژه‌های تونل‌سازی به تهیه فهرست‌بهایی جامع، کمک شایانی نماید.

References

Ahmed, C. (2021). Early cost estimation models based on multiple regression analysis for road and railway tunnel projects. Arabian Journal of Geosciences, 14(11), 972.

Bilgin, N., & Acun, S. (2024). Practical Management of Tunneling with Tunnel Boring Machines. CRC Press.

Bondyopadhyay, B. (2023). Civil engeering 101: Beginners guide for metro rail system. Bluerose Publishers PVT, 384 p.

Bruland, A. (1999). Hard rock tunnel boring advance rate and cutter wear. Ph.D Thesis, Norwegian Institute of Technology (NTNU), Trondheim, Norway.

Chapman, D., Metje, N., & Stark, A., (2017). Introduction to tunnel construction. CRC Press. 425 p.

Rostami, J., Mahmoud, S., Ehsan, A.G., & Mojtabai, N. (2013). Planning level tunnel cost estimation based on statistical analysis of historical data. Tunnelling and Underground Space Technology, 33 (1), 22-33.

Sayedi, A.R., Hamidi, JK., Monjezi, M., & Najafzadeh, M. (2015). A preliminary cost estimation for short tunnels construction using parametric method. Engeering Geology for Society and Territory, 1:461–465.

Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Khademi Hamidi, J. (2008). Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficalt conditions. Tunneling and underground space technology, 23(3), 318-325.

Munfah, N., & Nicolas, P. (2020). Why tunnels in the US cost much more than any where else in the world, TBM Tunnel Business Magazine.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.2.4]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1020101]