مهندسی ارزش بر اساس رفتارنگاری تونل طی مرحلهٔ حفاری (مطالعهٔ موردی تونل حکیم)

مجید طارمی*؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
مازیار حسینی؛ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب،
سید مهدی پورهاشمی، مجید صادقی؛
سازمان مهندسی و عمران شهر تهران

تاریخ: دریافت ۹۳/۱۰/۲٤ **پذیرش** ۹٤/۱۲/۱۲

چکیده

مهندسی ارزش به‌عنوان یکی از راهکارهای مناسب در شناسایی فرصت‌های بهبود طراحی و اجرای پروژه‌های تونل‌زنی شهری است. با به‌کارگیری فنون مهندسی ارزش این امکان فراهم می‌شود که به‌صورت تیمی، با دیدی خلاق، در محدودهٔ زمانی کوتاه، ابعاد مختلف پروژه بررسی شود که در نهایت ظرفیت‌های بهبود کیفیت، کاهش هزینه و کاهش زمان اجرا، شناسایی و عملیاتی شوند. در فاز اولیه طراحی تونل حکیم کلاس حفاری و نگه‌داری پیشنهاد شد. طی مراحل حفاری با استفاده از مشاهدات میدانی، نتایج رفتارنگاری و ابزاربندی و بررسی مدل‌های زمین‌شناسی، رفتار و طبقه‌بندی زمین مجدد بررسی و بازبینی شد و عملیات حفاری با کاربست مهندسی ارزش ادامه یافت. هدف از ارائه روی‌کرد مهندسی ارزش در این پروژه را حصول به هزینه‌های کمینه بدون کم‌ترین میزان کاهش در کیفیت، رضایت‌مندی کارفرما با حداقل ریسک، بهره‌گیری از خلاقیت و بهبود جنبه‌های عملیاتی و اجرایی در پروژه‌های تونل‌سازی شهری دانست که همگی آن‌ها به نحوهٔ مناسبی تأمین شد. پیاده‌سازی مهندسی ارزش در مرحلهٔ حفاری تونل حکیم باعث شد که در هزینه‌های ساخت حدود ۱۰ درصد صرفه‌جویی شود و عملیات حفاری تونل با حداقل چالش و مخاطرات و کیفیت مطلوب به اتمام برسد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

واژه‌های کلیدی: تونل حکیم، کلاس حفاری و نگه‌داری، رفتارنگاری، حفاری مرحله‌ای، مهندسی ارزش

* **نویسنده مسئول** majid.taromi@yahoo.com

مقدمه

تونل حکیم در امتداد بزرگراه حکیم در منطقه ۲۲ شهرداری تهران به‌روش تونل‌زنی جدید اتریشی و به‌طول کلی ۳۲۵۶ متر در حال ساخت است. این تونل در تپه‌های پارک جنگلی چیتگر به‌صورت دو تونل موازی (تونل‌های رفت و برگشت) در امتداد شرقی- غربی قرار دارد.

در مرحلهٔ اولیه طراحی با توجه به نتایج پژوهش‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، روباره تونل و تحلیل‌های عددی، کلاس حفاری و نگه‌داری برای ساخت تونل پیشنهاد شد. با توجه این که در روش تونل‌زنی جدید اتریشی مشاهدات حین حفاری و رفتارنگاری حین اجرا تأثیر به‌سزایی در انتخاب کلاس حفاری و نگه‌داری دارد، طی عملیات اجرایی با استفاده از این داده‌ها و و کاربست آن‌ها در تحلیل‌های عددی، مطابق با اصول مهندسی ارزش به تشخیص هزینه‌های غیرضروری در مراحل اجرایی و عملیاتی پرداختیم و با بررسی گزینه‌های مختلف و حذف یا اصلاح عناصری که برای کارکردهای مورد نیاز ضروری نبود، به رهیافتی منطقی در ایجاد ارتباط بین عوامل و پارامترهای تأثیرگذار در هزینه‌های تونل‌زنی پرداختیم و با جمع‌بندی آن‌ها، کلاس حفاری و نگه‌داری بهینه‌سازی شد. بنابراین می‌توان گفت که مهندسی ارزش در مرحلهٔ حفاری پروژه تونل حکیم، آزمون سیستماتیک عوامل مؤثر بر بهای تمام شده برای دست‌یابی به هدف، کیفیت و عملکرد مطلوب با حداقل ریسک، بیش‌ترین ایمنی و کاهش مخاطرات همراه با کم‌ترین هزینه در طول دوره حفاری بود. دستاورد مهندسی ارزش در تونل حکیم، ارائه راهکارهای مدیریتی و دیدگاهی خلاق به‌منظور یافتن بهترین موازنه بین هزینه و کیفیت بود که باعث شد در هزینه‌های مرحلهٔ حفاری حدود ۱۰ درصد صرفه‌جویی شود.

معرفی پروژه

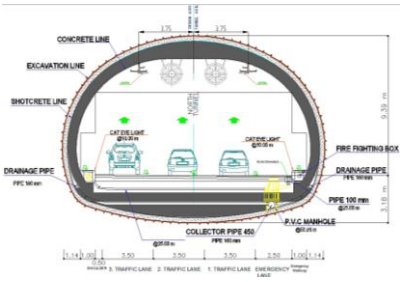
بزرگراه حکیم از بزرگراه‌های اصلی کلان‌شهر تهران است که به‌موازات بزرگراه همت از محدودهٔ شرق به غرب امتداد پیدا کرده است. در محدودهٔ منطقه ۲۲ حدفاصل بزرگراه آزادگان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

تا تقاطع ایران خودرو امتداد بزرگراه از جنوب دریاچه مصنوعی خلیج فارس عبور کرده و با گذر از اراضی پارک جنگلی چیتگر به بزرگراه لشگری متصل می‌شود (شکل ۱).

با توجه به اهمیت کاربری تفریحی- رفاهی پارک جنگلی چیتگر از یک سو و پیش‌بینی کاربری‌های دیگر از جمله دریاچه مصنوعی خلیج فارس و کاربری‌های اطراف آن و شهربازی واقع در شمال پارک چیتگر، لازم است تا بزرگراه حکیم در این محدوده، علاوه بر تسهیل دسترسی به مراکز مذکور حداقل اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی را در منطقه ایجاد کند. به این منظور تونل دوقلوی حکیم در امتداد بزرگراه حکیم در محدودهٔ عبور از پارک چیتگر در حال ساخت است. در شکل ۲ مشخصات کلی تونل حکیم نشان داده شده است.

شکل ۱. موقعیت تونل حکیم



شکل ۲. مشخصات کلی تونل

مهندسی ارزش

۱. معرفی و تاریخچه

مهندسی ارزش[1] روشی سیستماتیک، نظام‌یافته و مبتنی بر خلاقیت[2] و کارگروهی[3] برای حل مسئله، کاهش هزینه و بهبود عملکرد[4] و کیفیت پروژه‌ها، محصولات و فرآیندها است. مهندسی ارزش به‌کمک گسترهٔ وسیعی از دانش و تجربیات متخصصان و با تمرکز بر کارکردهای[5] پروژه، محصول یا فرآیند نتایج قابل اجرا برای بهبود را به‌سرعت ارایه می‌کند.

1. Value Engineering
2. Creativity
3. Team Work
4. Performance
5. Function

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

بر اساس تعریف مؤسسهٔ بین‌المللی مدیریت پروژه[6]، مهندسی ارزش نگرشی خلاق به‌منظور بهینه‌سازی هزینه‌های چرخهٔ عمر، صرفه‌جویی در زمان، افزایش سود، بهبود کیفیت، افزایش سهم بازار، حل مشکلات و استفادهٔ بهینه از منابع است.

بر اساس تعریف سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، مهندسی ارزش کاربرد سازمان یافته فنون شناخته شده‌ای است که برای بررسی عملکرد محصول یا خدمتل، می‌شود و با استفاده از فکر خلاق به‌منظور تأمین کارکرد مورد نیاز برای تحقق اهداف طرح به‌طور مطمئن و با کم‌ترین هزینه دوران عمر و با حفظ و ارتقای کیفیت و حفظ ایمنی و ویژگی‌های زیست محیطی است [۱]، [۲].

مهندسی ارزش در جهان سابقه‌ای بیش از نیم قرن و در ایران سابقه‌ای بیش از یک دهه دارد. این تکنیک مدیریتی را ابتدا کارشناسان شرکت جنرال‌الکتریک ابداع کردند و چندین سال استفاده شد. دستاوردهای استفاده از مهندسی ارزش موجب آن شد تا وزارت دفاع و بخش حمل و نقل ایالات متحده آمریکا به‌کارگیری مهندسی ارزش را در دستور کار خود قرار دهند و اولین انجمن مهندسی ارزش در سال ۱۹٦۰ در واشنگتن تأسیس شد. در کشورهای انگلستان، ژاپن، استرالیا، کانادا و اسکاندیناوی این روی‌کرد به‌سرعت توسعه یافت و کنفرانس‌های زیادی برگزار شد [۳]. کشور ما نیز مهندسی ارزش را از اواخر دهه هفتاد در برخی صنایع آغاز کرد و در ابتدای دهه هشتاد در حوزهٔ حمل و نقل برون‌شهری وزارت راه و ترابری سابق (وزارت راه و شهرسازی) استفاده کرد. تدوین دستورالعمل ارجاع کار و انعقاد قرارداد با واحدهای خدمات مهندسی ارزش به‌وسیلهٔ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور در سال ۱۳۷۹ دورنمای روشن و امیدوارکننده‌ای را برای توسعهٔ فرهنگ و به‌کارگیری مهندسی ارزش و تدوین الزامات قانونی و رفع موانع دراین زمینه ترسیم شد. حمل‌ونقل شهری ایران نیز از نیمهٔ دوم دهه هشتاد با مهندسی ارزش آشنا شد و شهرداری تهران در سال ۱۳۸٦ طرح پیاده‌سازی مهندسی ارزش را در طرح‌های خود اجرا کرد [۳]، [٤].

6. PMI: Project Management Institute

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

۲. پیاده‌سازی مهندسی ارزش در پروژه تونل حکیم

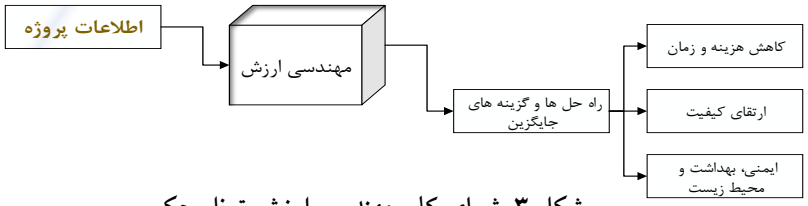
به‌کارگیری مهندسی ارزش در پروژه‌های ساختمانی و تونل‌زنی می‌تواند به ابزار بی‌چون و چرا برای مدیریت و کنترل زمان و هزینه تبدیل شود [۵]. در پروژه‌های تونل‌زنی به‌دلیل شرایط و ویژگی‌های متنوع و پیچیده منحصر به همان سازه، حدود به‌کارگیری یک یا چندین روش اصلاحی مهندسی ارزش، محدود به‌همان پروژه است. مهندسی ارزش در چهارچوب مدیریت پروژه، ضمن این‌که به تمامی اجزای طرح توجه می‌کند، هیچ بخشی از کار را قطعی و مسلم نمی‌داند. علاوه بر این امکانات صرفه‌جویی در هزینه‌های یک پروژه اجرایی نیز در مراحل مختلف آن تفاوت‌های بسیاری پیدا می‌کند. با آن که روش مهندسی ارزش را می‌توان در تمام مراحل یک پروژه اجرایی به‌کار گرفت، بیش‌ترین مزایایی آن زمانی حاصل می‌شود که در نخستین مراحل برنامه‌ریزی و طراحی به‌کار گرفت [٦].

با توجه به این‌که در فرآیند ساخت تونل‌های شهری، مرحلهٔ حفاری ریسک زیادی نسبت به سایر مراحل ساخت تونل دارد، کاربست مهندسی ارزش در آن از پیچیدگی و مخاطرات بیش‌تری نسبت به سایر مراحل دارد. لزوم توجه به مقوله مدیریت ریسک و مدیریت و مهندسی ارزش تأثیر به‌سزایی در موفقیت این پروژه‌ها دارد. مهندسی ارزش در مرحلهٔ حفاری تونل حکیم مجموعه‌ای از اقداماتی بود که با بازنگری و تحلیل اجزای کار، توانست اجرای کامل طرح را با کم‌ترین زمان و هزینه و ریسک حداقل، تحقق بخشد.

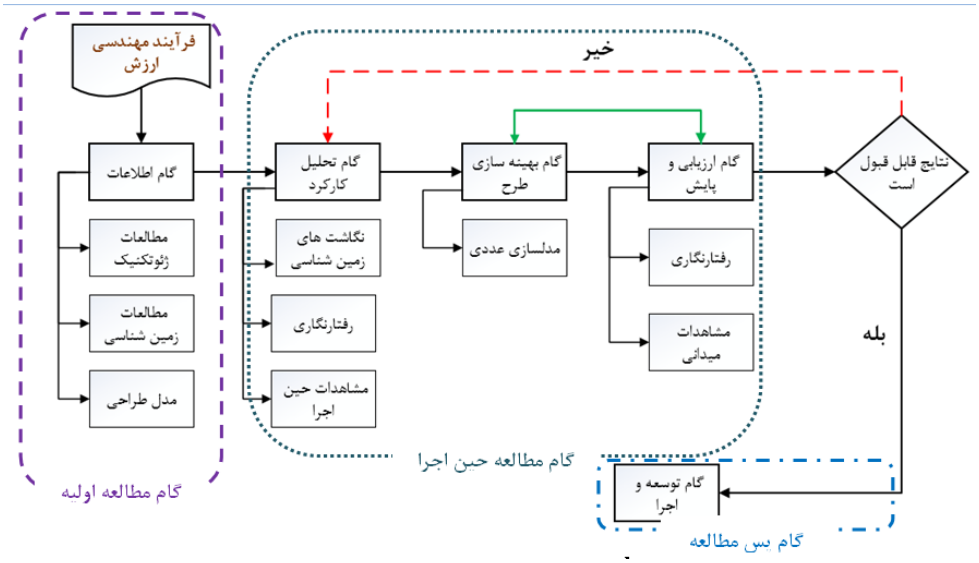
در مرحلهٔ حفاری تونل حکیم با دریافت اطلاعات پروژه شامل زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیک و رفتارنگاری، اطلاعات ورودی مورد نیاز مهندسی ارزش فراهم شده و پس از انجام آن، راه‌حل‌ها و گزینه‌های جای‌گزین به‌عنوان خروجی مهندسی ارزش به‌منظور کاهش هزینه، زمان و ارتقای کیفیت پروژه ارایه شد (شکل ۳).

فرآیند مهندسی ارزش در قالب سه گام عمده در مرحلهٔ حفاری انجام شد که به‌ترتیب عبارتند از: ۱. گام مطالعهٔ اولیه، ۲. گام مطالعهٔ حین اجرا و ۳. گام پس مطالعه. هریک از این سه گام به مراحل یا فعالیت‌های مهمی تقسیم می‌شوند که به تفکیک ارائه می‌شوند (شکل ٤).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]



شکل ۳. شمای کلی مهندسی ارزش تونل حکیم



شکل ٤. مراحل مهندسی ارزش در تونل حکیم

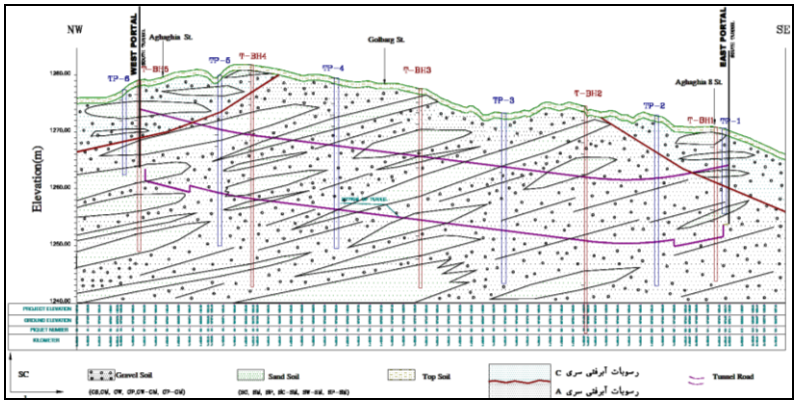
گام مطالعات اولیه

۱. مطالعات ژئوتکنیک

به‌منظور انجام بررسی‌های ژئوتکنیکی مسیر تونل حکیم، گمانه‌ای ماشینی به‌عمق ۳۰ متر و ٦ حلقه چاهک دستی به اعماق ۱۵ تا ۳۰ متر برای شناسایی لایه‌های زیرسطحی و انجام آزمایش‌های برجا حفاری شد. مقطع عرضی مسیر تونل و موقعیت گمانه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. هم‌چنین به‌منظور تکمیل و توسعهٔ بررسی‌ها، از گزارش‌های ژئوتکنیک مربوط به مسیر بزرگراه حکیم، دریاچهٔ شهدای خلیج فارس و شهرک امام رضا (ع) نیز استفاده شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

مقادیر پارامترهای ورودی خاک استفاده شده در مدل در جدول ۱ خلاصه شده است. دو نوع خاک برای طراحی در نظرگرفته شد. لایهٔ اول (لایهٔ شمارهٔ یک)، از سطح شروع شده و ۱ متر ضخامت دارد و لایهٔ دوم (لایهٔ شمارهٔ ۲)، ۷ متر ضخامت دارد.



شکل ۵. پروفیل زمین‌شناسی و موقعیت گمانه‌های حفاری شده در مسیر تونل حکیم

جدول ۱. پارامترهای خاک

پارامتر	واحد	لایهٔ شمارهٔ ۱	لایهٔ شمارهٔ ۲
زاویهٔ اصطکاک داخلی(CU)	deg.	۲۹	۳۳
چسبندگی (CU)	kg/cm^2	۰/۱۵	۰/۴۵
وزن مخصوص	kg/cm^3	۱۸/۵	۲۰
نسبت پواسون باربرداری/بارگذاری مجدد		۰/۲	۰/۲
مدول سختی سکانت	kg/cm^2	۵۵۰	۹۰۰
توان تأثیر سطح تنش روی سختی		۰/۵	۰/۵
سختی باربرداری	kg/cm^2	۱۶۵۰	۲۷۰۰

۲. پژوهش‌های زمین‌شناسی مهندسی

شهر تهران روی نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم زمین‌شناسی بنا شده است. بنابراین سن رسوبات حداکثر پنج میلیون سال است. این آبرفت‌ها با سیلاب‌هایی که در اواخر دوران سوم و هم‌زمان با برپایی ارتفاعات البرز از این ارتفاعات سرچشمه گرفته‌اند، در نواحی دامنه‌ای و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

پست برجا گذاشته شده است. طبقه‌بندی آبرفت‌های درشت‌دانه تهران موضوع تحقیق پژوهشگران مختلف بوده است. این رسوبات را اولین بار ریبن در سال‌های ۱۹۵۳-۱۹۶۶ بررسی شد. همه بررسی کنندگان کم و بیش تقسیم‌بندی انجام شده ریبن را بکار برده‌اند و تاکنون تغییر عمده‌ای در این تقسیم‌بندی انجام نگرفته است. ریبن نهشته‌های آبرفتی تهران را به چهار بخش بنام سازندهای C, B, A و D تقسیم کرد. سازند A قدیمی‌ترین و D جدیدترین سازند محسوب می‌شود [۷]، [۸] (جدول ۲).

موقعیت پروژهٔ تونل حکیم در بخش کوهپایه‌ای شمال تهران و در ناحیهٔ تپه‌های پارک جنگلی چیتگر واقع شده است. در بررسی‌ها و بازدیدهای صحرایی صورت گرفته، مشخص شد که رسوبات موجود در مسیر تونل به نهشته‌های سازند C (مسیر شیب‌راهه‌ها و بخش‌های ورودی تونل) و سازند A (در بیش‌تر مسیر تونل) تعلق دارند. هم‌چنین با بررسی عکس‌های هوایی در می‌یابیم که مسیر تونل در یک یال تاقدیس با چین‌خوردگی کم قرار دارد. این تاقدیس، تپه‌های چیتگر را شکل داده است. روند کلی این تاقدیس شمال-غرب، جنوب-شرق است (شکل ٦). نهشته‌های موجود در مسیر تونل عمدتاً شامل نهشته‌های شن و ماسه تمیز با درصد کمی ریزدانه هستند که سیمان‌شدگی ضعیف تا متوسط دارند. در مسیر تونل حکیم گسل بزرگی شناسایی نشده است. تنها یک گسل با شکستگی‌های کوچک با طول کم‌تر از یک متر مسیر تونل را در کیلومتراژ ۱۵۲۰ تا ۱۵۷۰ قطع کرده است. عمق آب‌های زیرزمینی در محدودهٔ تونل بیش از ۹۰ متر است.

۳. مدل طراحی

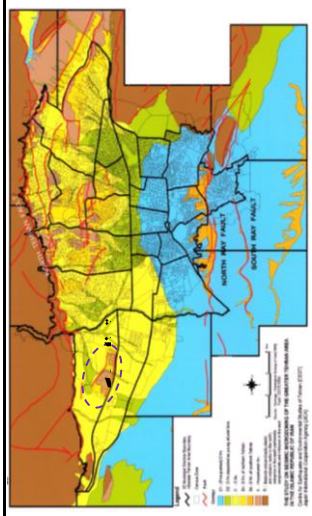
در روش تونل‌زنی جدید اتریشی یکی از نکات اساسی تعیین الگو و ترتیب حفاری است، که میدان تغییرمکان زمین، تحت تأثیر آن قرار دارد. الگوی حفاری به عوامل مختلفی چون شکل مقطع تونل، دهانهٔ تونل، نوع خاک محل، سطح آب زیرزمینی و... بستگی دارد. بنابراین پس از بررسی نیازهای سیستم نگه‌داری، ترتیب حفاری و نگه‌داری تقسیم‌بندی شد. ترکیب نوع حفاری و نگه‌داری با در نظر گرفتن موارد بالا و با توجه به آن‌چه در شکل ۷ نشان داده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

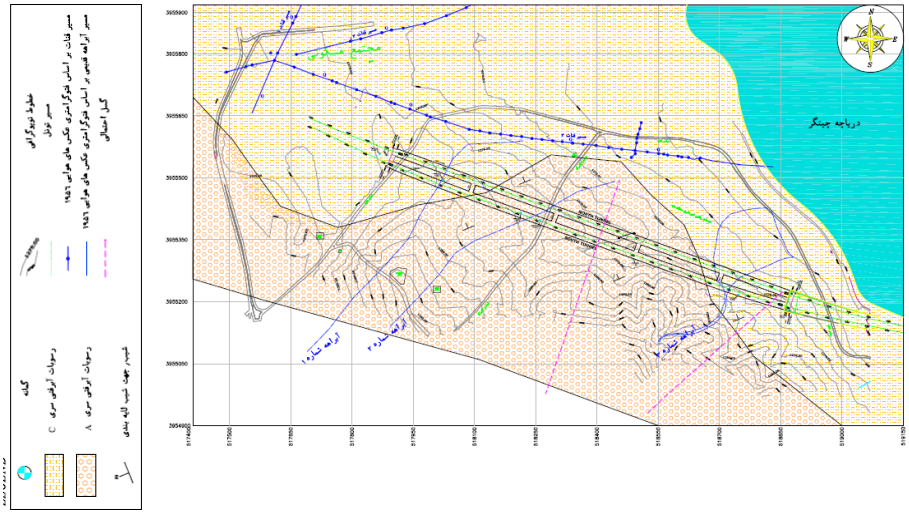
شده است، انجام شد. ساخت مرحله‌ای و اجرای پیوسته پوشش بتنی نیز منطبق بر مراحل واقعی ساخت و با در نظر گرفتن شرایط تنش اولیه در نرم‌افزار Plaxis مدل‌سازی شد [۱۰].

جدول ۲. مقایسهٔ سازندهای گستره تهران براساس طبقه‌بندی ریبن (راست) [۸] و نقشهٔ زمین‌شناسی شهر تهران (چپ) [۹]

سن	مقایسهٔ سازندها			
	A ۵ میلیون سال	**B** ۷۰۰،۰۰۰ سال	**C** ۵۰،۰۰۰ سال	**D** ۱۰،۰۰۰ سال
سیمانی شدن	سیمان‌شده و سخت‌شده	متغیر ولی عموماً دارای سیمان ضعیف	سیمان ضعیف‌تر از A و سخت‌نشده	سیمان نشده
دانه‌بندی	از حد رس تا دانه‌هایی به قطر ۱۰ تا ۲۵ سانتیمتر	بسیار متغیر با قطعات چند متری	از حد رس و سیلت تا حداکثر دانه به قطر ۲۰ سانتی‌متر	از حد رس تا قطعات سنگی بزرگ‌تر از یک متر
شیب لایه‌ها	دارای شیب حداکثر تا ۹۰ درجه	به‌صورت دگر شیب روی آبرفت A و دارای شیب کم‌تر از ۱۵ درجه	افقی	افقی
ضخامت	حداکثر ۱۲۰۰ متر	حداکثر ۶۰ متر (به سمت جنوب کم می‌شود)	حداکثر ۶۰ متر	کمتر از ۱۰ متر
حوضه رسوبی	سیلابی	یخچالی- سیلابی	سیلابی-رودخانه‌ای	سیلابی - رودخانه‌ای
منشاء	عمدتا سنگ‌های توفی و شیلی (سازند کرج ۹۰٪ و مابقی بقیه سنگ‌ها)	سازند کرج، سازند A	سازند کرج، سازند A و سازند B	سازند کرج، سازند A، سازند B و سازند C
مسافت حمل‌شده	حداکثر ۱۶ کیلومتر	حداکثر ۲۲ کیلومتر	حداکثر ۳۰ کیلومتر	بیشتر از ۵۵ کیلومتر



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]



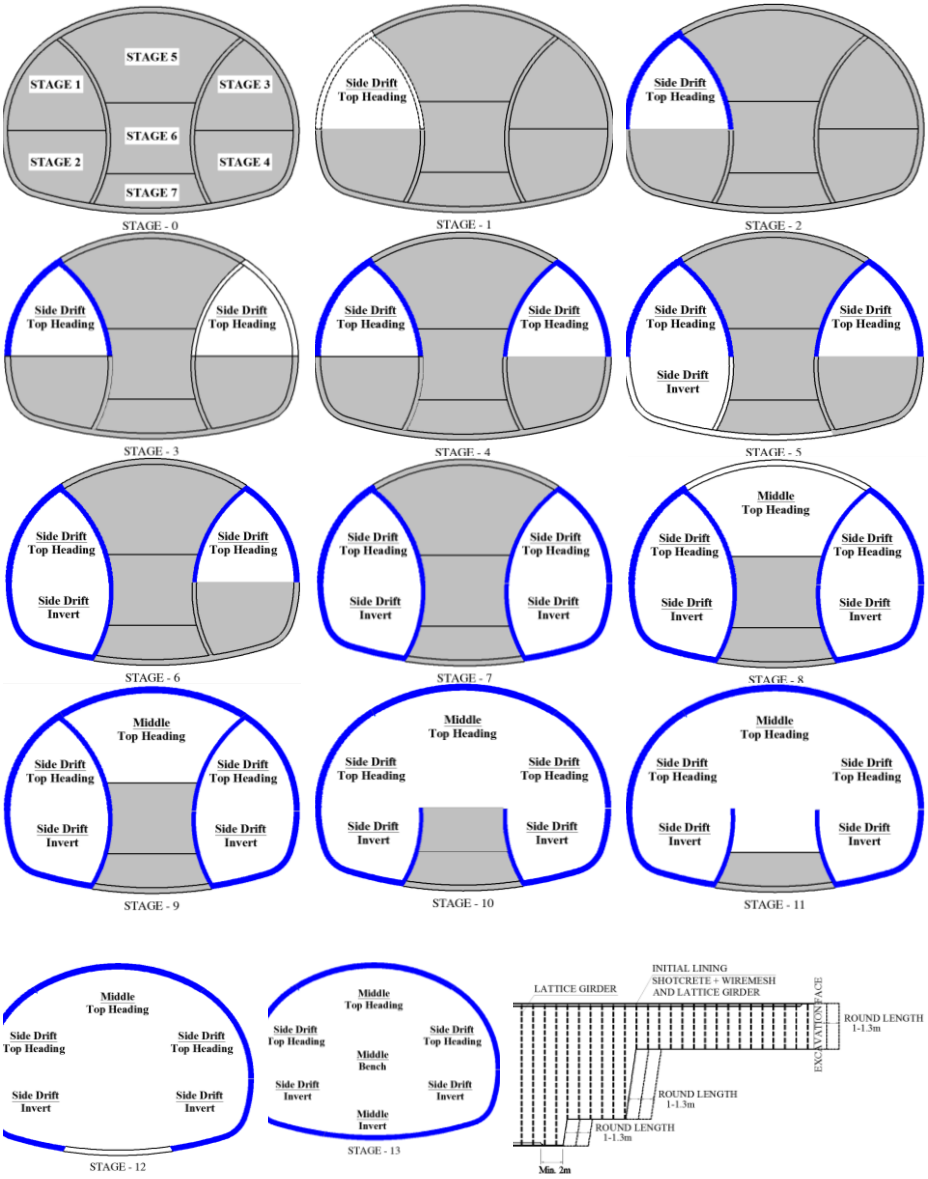
شکل ۶. پلان زمین‌شناسی مسیر تونل حکیم

پوشش موقت بتن پاششی اولیه استفاده شده در مدل شامل یک تیر با لتیس فولادی به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر بتن پاششی و دو لایه شبکه فولادی جوش شده (بالا و پایین) $\phi 8@150\times150$ است. لازم به ذکر است که برای کف‌بندهای موقت از ۲۵ سانتی‌متر بتن پاششی به‌همراه ۲ لایه شبکه فولادی جوش‌شده $\phi 8@150\times150$ استفاده می‌شود. در جدول ۳ مشخصات پوشش بتن پاششی مسلح ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات پوشش موقت بتنی

کمیت	واحد	دیواره‌های کناری	کف‌بند
ضخامت	mm	۳۵۰	۲۵۰
f'_c	MPa	۲۵	۲۵
f_y	MPa	۴۰۰	۴۰۰
E_c	MPa	۲۶۵۱۷	۲۶۵۱۷
EI	$kN-m^2/m$	۴۲۶۵۲	۱۵۵۰۰
EA	kN/m	۸۳۵۶۳۱۸	۵۹۶۸۷۹۹
W	kN/m	۸/۴	۶

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]



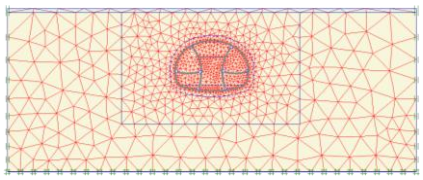
شکل ۷. مراحل حفاری در کلاس حفاری و نگه‌داری A

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

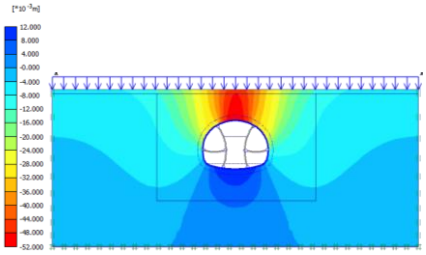
برای در نظر گرفتن شرایط مرزی و کاهش اثرات آن، محدوده پروژه دارای عرض ۱۰۰ متر و ارتفاع ٤۰ متر ارتفاع خاک روباره نیز ۸ متر در نظر گرفته شد (شکل ۸). پس از اعمال شرایط برجا، مراحل حفاری شبیه‌سازی می‌شود. مراحل حفاری مطابق شکل ۷ و شرایط زیر مدل‌سازی شد:

- فعال‌سازی بار سطحی.
- اعمال ضریب افزایش بار به میزان ۲ تن بر متر مربع.
- حفاری هر یک از مراحل مطابق با شکل ۷ با حذف اجزای داخل محدودهٔ خاک‌برداری و آزادسازی درصدی از تنش‌های نامتعادل‌کننده به‌منظور شبیه‌سازی اثر سه‌بعدی حفاری در مدل.
- ساخت پوشش اولیه در دیواره‌های بخش حفاری شده مرحلهٔ قبل با فعال کردن اجزای پوشش اولیه روی مرز خاک‌برداری

در شکل ۹ کنتور تغییر شکل قائم خاک نشان داده شده است. بیش‌ترین تغییر شکل خاک در تاج تونل مشاهده می‌شود. هم‌چنین بالازدگی کف به مقدار ۱۲ میلی‌متر نیز در مدل تحلیلی تونل قابل مشاهده است.



شکل ۸. مدل المان‌بندی شده در شرایط تنش اولیه (مرحلهٔ صفر)



شکل ۹. کنتور تغییر شکل‌های قائم درون توده خاک

تغییر شکل قائم (Uy)، حداکثر $-51.13*10^{-3}$ m

در جدول ٤ مقادیر حداکثر نشست بعد از مراحل مختلف حفاری و در جدول ۵ ضرایب ایمنی به‌دست آمده ارائه شده است. ضریب ایمنی کلی تونل ۱/٤۰ و میزان نشست حداکثر در بالای تونل ۵ سانتی‌متر به‌دست آمده است که مقادیر مناسبی هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

جدول ٤. بیشینه میزان نشست در سطح زمین بعد از هر مرحلهٔ حفاری

مرحلهٔ حفاری	مرحلهٔ ۱	مرحلهٔ ۳	مرحلهٔ ٥	مرحلهٔ ۷	مرحلهٔ ۹	مرحلهٔ ۱۲	مرحلهٔ ۱۳
میزان نشست (میلی‌متر)	٥/۱۲	۱۲/۳۷	۱٦/۷۹	۳۲/۱۱	۳۹/٤٦	٤٤/٥۹	٥۱/۱۳

جدول ٥. مقادیر ضریب ایمنی در مراحل مختلف حفاری

مرحلهٔ حفاری	مرحلهٔ ۲	مرحلهٔ ٤	مرحلهٔ ٦	مرحلهٔ ۸	مرحلهٔ ۱۰	مرحلهٔ ۱۱	پایداری کلی تونل
ضریب ایمنی	۱/٤۸	۱/٤۱	۱/٤۳	۱/۲۹	۱/٤٤	۱/۳۷	۱/٤۰

گام مطالعه حین اجرا

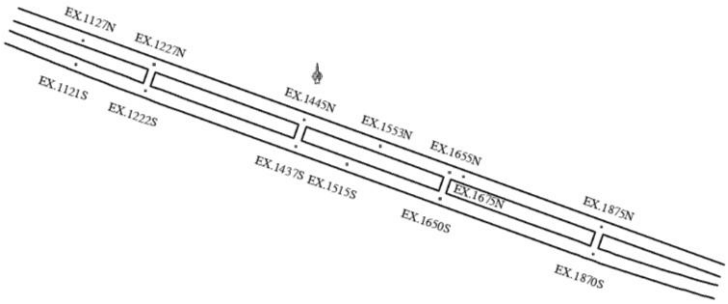
۱. گام تحلیل کارکرد

هدف از این گام اندازه‌گیری رفتار مدل و مشخصه‌های عملکردی به‌منظور انتخاب کارکردهای نامطبق بر ارزش برای تمرکز گام خلاقیت و درک جامع‌تر از پروژه با روی‌کرد بهینه‌سازی و بهبود محصول است.

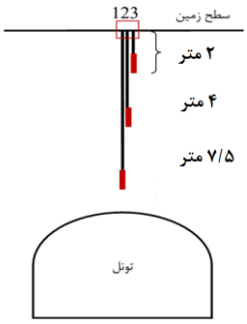
در گام تحلیل کارکرد مرحلهٔ حفاری پروژهٔ تونل حکیم، برای آگاهی از خصوصیات ژئوتکنیکی، کنترل پایداری و بهینه‌سازی سیستم‌های نگه‌داری موجود از نتایج نگاشت‌های زمین‌شناسی، رفتارسنجی، مشاهدات حین اجرا و تحلیل برگشتی به‌عنوان ابزاری برای تخمین مجدد داده‌های ورودی در حین اجرا و پس از احداث سازه استفاده شد.

برنامه رفتارنگاری شامل استفاده از کشیدگی‌سنج و پین‌های کنترل نشست سطحی در تونل بود. ایستگاه‌های کشیدگی‌سنج شامل ۱۱ ایستگاه بود که با توجه به حساسیت موضوع حفاری در محل دسترسی‌های عرضی در این نواحی پیش‌بینی شده بود (شکل ۱۰). به‌منظور کنترل نشست سطحی روی سطح زمین هفت پین کنترل نشست در فواصل تقریبی هر ۲۰ متر در امتداد هر یک از تونل‌ها نصب شد. پین شمارهٔ ۱ در محور تونل با نام SM و سه پین در سمت راست و در بخش شمالی به نام‌های SN1 تا SN3 و در بخش جنوبی با نام‌های SS1 تا SS3 به فواصل ٥ متر از یک‌دیگر نصب شدند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]



الف



ب

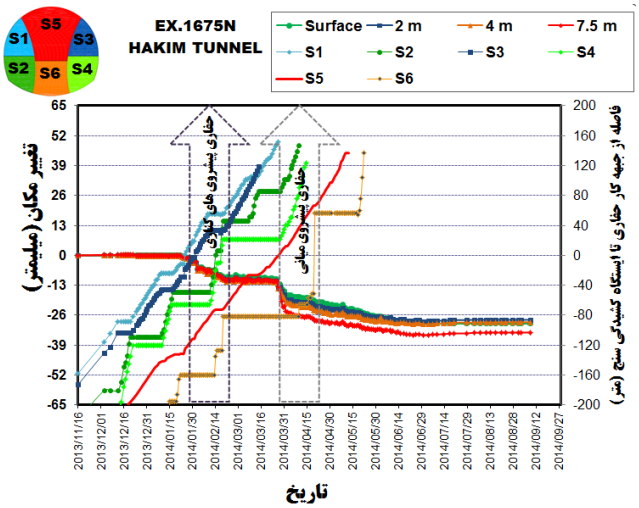
شکل ۱۰. الف) موقعیت نصب کشیدگی‌سنج‌ها در مسیر تونل، ب) مقطع عرضی نصب کشیدگی‌سنج

نتایج ایستگاه کشیدگی‌سنج ۱٦۷۵ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، در حفاری پیش‌روی‌های کناری و میانی بیش‌ترین مقدار نشست ثبت شده است. هم‌چنین شعاع ناحیهٔ تأثیر حفاری با توجه به این نمودار حدود ۱۵ متر (تقریباً برابر با قطر حفاری) برآورد می‌شود. بیش‌ترین مقدار نشست سطحی و عمقی در مرحلهٔ حفاری S5 (پیش‌روی میانی) و برابر ۳٤ میلی‌متر ثبت شده است که تطابق خوبی با نتایج تحلیل عددی دارد.

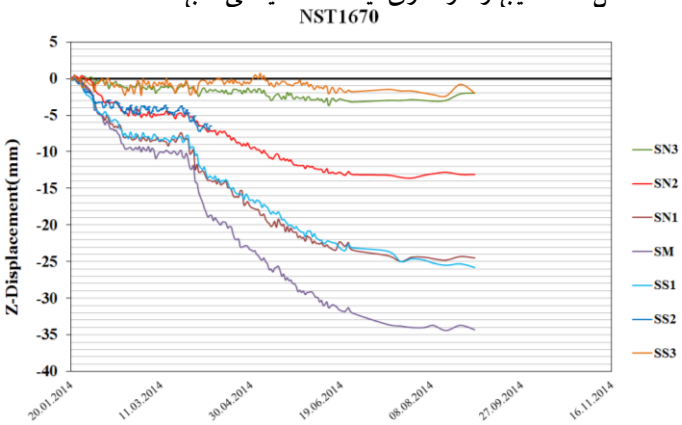
در شکل ۱۲ نتایج قرائت‌های مربوط به ایستگاه شمارهٔ NST 1670 ارائه شده است. این ایستگاه در نزدیکی ایستگاه کشیدگی‌سنج شمارهٔ ۱٦۷۵ قرار دارد. نتایج بررسی مقایسه‌ای بین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

کشیدگی‌سنج و نشست‌سنج انطباق نسبتاً مناسبی با یک‌دیگر دارند. بیش‌ترین مقدار نشست در این ایستگاه برابر ۳۵ میلی‌متر و در محور تونل (SM) است.



شکل ۱۱. نتایج رفتارنگاری ایستگاه کشیدگی‌سنج EX 1675 N



شکل ۱۲. نمودار کنترل نشست ایستگاه NST 1670

۲. گام بهینه‌سازی

یک کار گروه متشکل از مهندسان طراح، زمین‌شناس و ژئوتکنیک با جمع‌بندی اطلاعات به‌دست آمده و به‌کارگیری تکنیک‌های انگیزش ایده‌پردازی گروهی با تولید ایده‌های جای‌گزین، تحقق کارکردها را با هدف بهبود ارزش فراهم آوردند. برای این منظور، روش حفاری با حذف

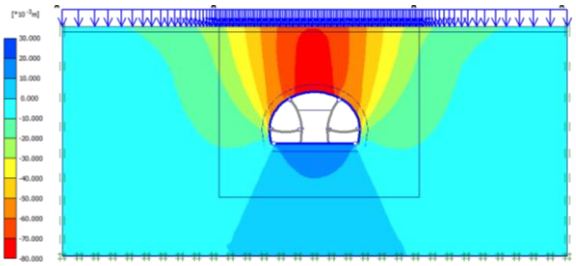
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

کف‌بندی، کاهش مراحل حفاری، افزایش فاصلهٔ بین مراحل حفاری به‌منظور جلوگیری از عدم تداخل تنش‌ها و گسترش ناحیه شعاع تأثیر حفاری (شعاع تأثیر حفاری مطابق داده‌های ابزار دقیق برابر ۱۵ متر به‌دست آمده بود) بهینه‌سازی شد (شکل ۱۳). مدل‌سازی عددی مراحل و روش حفاری جدید نیز مجددا انجام و ضریب ایمنی تونل در مراحل مختلف بررسی شد.

شکل ۱۳. مراحل حفاری در کلاس حفا ری و نگه‌داری B

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

شکل ١٤ کنتور تغییر شکل قائم خاک را نشان داده است. بیش‌ترین تغییر شکل قائم و افقی خاک در تاج تونل مشاهده می‌شود.



تغییر شکل قائم (Uy)، حداکثر $-80.80*10^{-3}$ m

شکل ١٤. کنتور تغییر شکل های قام درون تودهٔ خاک

در جدول ٦ بیش‌ترین میزان نشست سطح زمین بعد از هر مرحله حفاری نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود مقدار نشست با روند حفاری افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به این که مسیر تونل حکیم در پارک چیتگر واقع است و هیچ‌گونه سازه سطحی و مخاطرات ناشی از نشست و خرابی احتمالی ناشی از حفاری در آن وجود ندارد، مقادیر به‌دست آمده از نتایج تحلیل عددی مورد قبول است. تحلیل ضریب پایداری تونل پس از هر مرحله خاک‌برداری و اجرای پوشش موقت انجام گرفت و ضریب اطمینان پایداری در مراحل مختلف خاک‌برداری به‌شرح جدول ٧ بوده است و ضریب اطمینان کلی پایداری سازه پوشش موقت تونل ١/٤٣ است که ایمنی لازم را تأمین می‌کند.

جدول ٦. بیشینه میزان نشست در سطح زمین بعد از هر مرحله حفاری

مرحلهٔ حفاری	مرحلهٔ ١	مرحلهٔ ٣	مرحلهٔ ٥	مرحلهٔ ٧	مرحلهٔ ٩	مرحلهٔ ١٢	مرحلهٔ ١٣
میزان نشست (میلیمتر)	٨/٣٩	١٨/٨٥	٣٢/٤١	٣٨/٣٨	٤٥/٨	٦٧/٤٤	٨٠/٨

جدول ٧. مقادیر ضریب ایمنی در مراحل مختلف حفاری

مرحلهٔ حفاری	مرحلهٔ ٢	مرحلهٔ ٤	مرحلهٔ ٦	مرحلهٔ ٨	مرحلهٔ ١٠	مرحلهٔ ١١	پایداری کلی تونل
ضریب ایمنی	١/٥٠	١/٢٩	١/٣١	١/٣١	١/٤١	١/٢٧	١/٤٣

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

گام ارزیابی و پایش

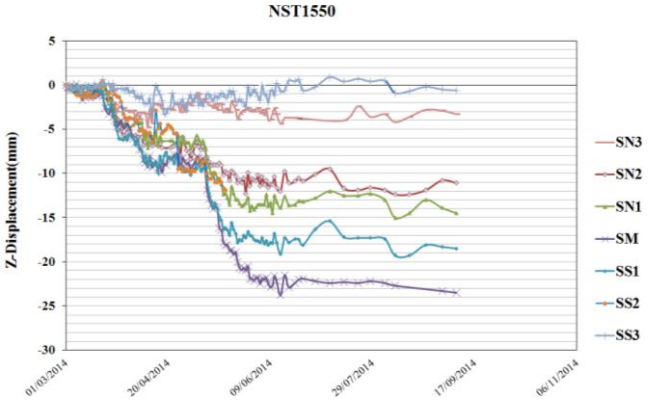
هدف از این گام بحث در مورد نحوهٔ تأثیر روش حفاری جدید روی پارامترهای عملکردی با استفاده از مقایسه نتایج به‌دست آمده از رفتارنگاری و مشاهدات حین اجرا و تحلیل‌های عددی بود. بنابراین با مقایسه نتایج پژوهش در مورد الزامات موفقیتی که طی گام‌های اطلاعات و تحلیل کارکرد تصویب شده بود و تهیه یک گزینه ارزش مستند با منظور نمودن قضاوت‌های ریسک و انجام تحلیل هزینه به سود، با تهیه یک طرح اجرایی به‌منظور تعریف مراحل اجرای حفاری، اهداف راهبردی کارگاه مشخص شد.

برای این منظور، با توجه به محدودیت‌های نصب کشیدگی‌سنج به‌منظور کنترل رفتار کلاس حفاری و نگه‌داری B، تنها داده‌های مربوط به قرائت‌های پین‌های کنترل نشست بررسی و نتایج تحلیل عددی ارزیابی شد. نتایج قرائت‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار نشست در پین شماره SM (حدود ۲٤ میلیمتر) است و کم‌ترین مقدار نشست مربوط به پین‌های کناری (SN3, SS3) است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر نشست کم‌تر از مقادیر به‌دست آمده از تحلیل عددی است. این موضوع به‌دلیل بیش‌تر بودن پارامترهای مقاومتی خاک نسبت به داده‌های ورودی در نرم‌افزار به‌منظور بالا بردن ایمنی و کاهش مخاطرات است. با توجه به نتایج رفتارنگاری و پایش سیستم نگه‌داری درمی‌یابیم که امکان بهینه‌سازی مجدد سیستم نگه‌داری نیز وجود دارد، اما با توجه به طول کم تونل، نرخ پیش‌روی بالا و بالا بردن ضریب ایمنی از این مورد صرف‌نظر شد (شکل ۱۵).

بنابراین در می‌یابیم که در این گام تیم مهندسی ارزش، کیفیت و ایمنی را برای توسعه راه‌حل‌های ارزش محور که قابلیت اجرایی بودن با حداقل ریسک را در پروژهٔ تونل حکیم تضمین می‌کرد، تولید و ارزیابی شد.

گام پس مطالعه

صرفه‌جویی در زمان و هزینه بدون کاستن از کیفیت در پروژه‌های عمرانی که مبالغ زیادی از بودجه‌های سالیانه را در کشورهای در حال توسعه یافته شامل می‌شود، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران این صنعت است.



شکل ۱۵. نمودار کنترل نشست ایستگاه NST 1550

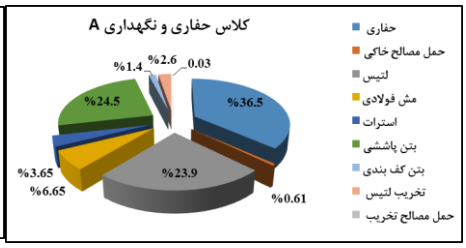
در پروژهٔ تونل حکیم با توجه به محدودیت‌های منابع مالی و روی‌کرد مدیریت شهرداری تهران، مهندسی ارزش به‌عنوان ابزاری پرقدرت برای مدیریت پروژه در کنترل هزینه‌ها و کاهش زمان انجام و هم‌چنین بهره‌برداری سریع این فن‌آوری و زمینه‌های اجرایی آن در راس امور تصمیم‌گیری معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران به‌عنوان کارفرمای طرح و سازمان مهندسی و عمران شهر تهران به‌عنوان مجری طرح قرار گرفت. این ادبیات از سوی مدیران مجموعه شهرداری تهران به‌عنوان راهی به‌سوی ایجاد تعادل بین هزینه‌ها و کارکردهای ساخت پروژه‌های تونل‌سازی شهر تهران نهادینه شد. هدف اصلی این روی‌کرد این است که با حفظ کارکردها، روش‌هایی را در اختیار مجریان طرح قرار دهد که هزینه‌های اضافی را حذف کرده و روش‌های کم‌هزینه‌تر را با کیفیت و کارکرد بیش‌تر جای‌گزین روش‌های قبلی کند.

با توجه به این که فرآیند ساخت تونل‌های شهری شامل مراحل مختلفی از امکان‌سنجی تا بهره‌برداری و نگه‌داری است، کاربست روش‌های فنی مهندسی ارزش باید به تناسب در هر یک از این مراحل لحاظ شود. اما از آن‌جاکه بیش‌تر موارد کاربست مهندسی ارزش در مرحلهٔ ساخت است، اعتقاد نداشتن پیمانکاران طرح و ساخت به این فرآیند و نداشتن انگیزه لازم برای مشارکت در آن می‌تواند موجب مشکلات بازدارنده از تحقق نتایج مهندسی ارزش شود. بنابراین اعمال مدیریت صحیح و تصمیم‌گیری‌های به‌موقع مجریان طرح‌های تونل‌سازی شهری و وجود انگیزه در سازمان مهندسی و عمران شهر تهران در تحقق به موقع این کار نقش به‌سزایی داشته است.

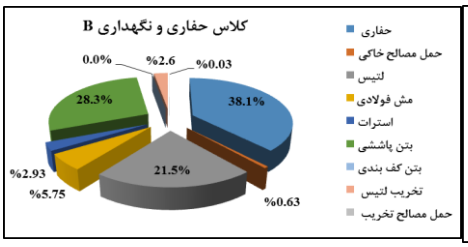
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

بنابراین با توجه به تجربیات مجموعه مدیریت شهری تهران در خصوص ساخت تونل‌های شهری، طی فرآیند ساخت تونل حکیم، روی‌کرد مهندسی ارزش در مراحل طراحی و ساخت با اهتمام بیش‌تری دنبال شد. این روی‌کرد از سوی مجری طرح تونل حکیم به پیمانکار طرح و ساخت تونل در خصوص لزوم انجام پژوهش‌های و داده‌های ژئوتکنیکی جامع و مفصل، تهیه مدل زمین‌شناسی و تحلیل و پیش‌بینی رفتار و طبقه‌بندی زمین به‌منظور تعیین روش حفاری و طبقه‌بندی سیستم نگه‌داری بر اساس این رفتار به‌عنوان یکی از الزامات اساسی مورد نیاز در بهینه‌سازی زمان و هزینه در تونل حکیم ابلاغ شد. لازم به ذکر است که موفقیت این روش مرهون آموزش‌های تئوریک و عملی هم‌زمان در محل عملیات و در ارتباط بودن نزدیک و دقیق مهندسان با مسائل و مشکلات در محل کار و اعمال راهنمایی‌های خاص و دقیق با بهره‌گیری از پرسنل با تجربه و دانش فنی و اجرایی زیاد محقق شد.

هدف از این گام حصول اطمینان از اجرایی شدن گزینه ارزش پذیرفته شده (روش حفاری جدید) و تحقق و تایید مزایای برنامه‌ریزی شده بررسی ارزش است. برای این منظور با پیگیری دستاوردهای ارزش منتج از گزینه ارزش با بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر هزینه پروژه، احجام، مقادیر و هزینه‌های مربوط به عملیات اجرایی و احداث بخش‌های مختلف هر دو کلاس حفاری و نگه‌داری مطابق با اسناد پیمان محاسبه و به‌صورت درصدی از کل مبلغ به دست آمد (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).



شکل ۱۶. هزینه‌های مربوط به عملیات اجرایی کلاس حفاری و نگه‌داری A

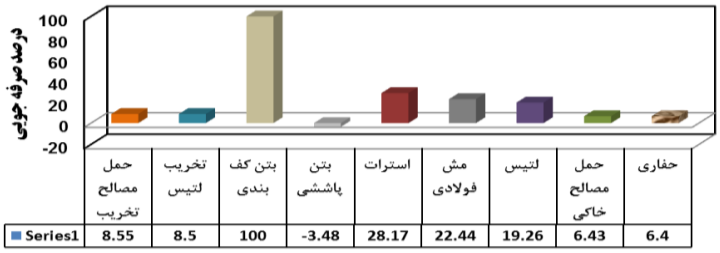


شکل ۱۷. هزینه‌های مربوط به عملیات اجرایی کلاس حفاری و نگه‌داری B

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در هر دو کلاس حفاری و نگه‌داری بیش‌ترین درصد هزینه مربوط به بخش حفاری و کم‌ترین مقدار مربوط به حمل مصالح تخریب پوشش موقت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

بتنی است. هم‌چنین در کلاس حفاری و نگه‌داری B، بتن‌ریزی کف‌بندها به‌دلیل عدم لزوم اجرای کف‌بندی حذف شده است. تنها در همهٔ فعالیت‌ها بتن پاششی حدود ۳/۵ درصد افزایش داشته است. به‌طورکلی حدود ۱۰ درصد در میزان کل هزینه‌های مربوط به حفاری و اجرای سیستم نگه‌داری صرفه‌جویی شده است که از لحاظ ریالی مبلغ چشم‌گیری است (شکل ۱۸).



شکل ۱۸. مقایسهٔ درصد صرفه‌جویی کلاس حفاری و نگه‌داری B نسبت به A

نتیجه‌گیری

گسترش مهندسی ارزش در پروژه‌های عمرانی در سطح کشور نشان از توان زیاد این روی‌کرد در کاهش هزینه و زمان و هم‌چنین بهبود کیفی پروژه‌ها باشد. این در حالیست که هر چقدر که این روی‌کرد در بخش طراحی مفهومی به‌طرف بخش اسناد ساخت پیش برود، هزینهٔ اعمال تغییرات، افزایش یافته و پتانسیل کاهش هزینه کم‌تر است. اما از آن‌جایی که پروژه‌های تونل‌زنی به‌ویژه در مناطق شهری همواره با ناشناخته‌ها و عدم قطعیت‌هایی همراه است، لزوم انجام پژوهش‌های کافی قبل و حین ساخت به‌منظور کاهش ریسک، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از شروع حفاری و در زمان ساخت، با نتایج به‌دست آمده از رفتارنگاری و بازبینی و واسنجی طرح پیشنهادی، گزینهٔ بهینه پیشنهاد و اجرا شد. با بهینه‌سازی کلاس حفاری و نگه‌داری، حدود ۱۰ درصد در هزینه پروژه صرفه‌جویی شد.

تقدیر و تشکر

از داوران محترم که با نظرات ارزنده خود ما را راهنمایی کردند، تشکر و قدردانی می‌کنیم. هم‌چنین از معاونت محترم فنی و عمرانی شهرداری تهران که ما را در ارائه مطالب یاری کردند، تشکر می‌کنیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]

منابع

۱. پایگاه الکترونیکی مرجع دانش مهندسی ارزش ایران (www.iranvalue.com)

۲. *دانش‌شهر مهندسی ارزش*، تألیف، محمد پوررضا، محمد هادی ذوالنوریان، سید عرفان عطر، انتشارات مرکز مطالعات و برنامهریزی شهر تهران.

۳. *مهندسی ارزش، طرح و برنامه‌ریزی برای ابداع*، تألیف، ریچارد پارک، ترجمه، سید مرتضی کشفیان ریحانی، مهوش گلشن، صدیقه امینایی.

4. "Value Methodology Standard and Body of Knowledge", SAVE International, june (2007).

5. Omigbodun A., Value engineering and optimal building projects, Journal of Architectural Engineering 7 (2) (2001) 40-43.

6. Dell'Isola A., Value Engineering: Practical Applications for Design Construction, Maintenance & Operations, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA (1997) xxii.

۷. بربریان م.، قرشی م.، ارژنگ‌روش ب و مهاجر اشجعی ا.، *پژوهش و بررسی ژرف و زمین‌ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه -گسلش در گستره تهران و پیرامون (پژوهش و بررسی لرزه زمین ساخت ایران زمین)*، سازمان زمین شناسی کشور .(۱۳٦٤)

8. Rieben E.H., "The Geology of the Tehran Plain", Am. J. Sci. Vol. 253 (1955) 617-639.

9. JICA "The study of seismic microzonation of the greater Tehran Area in the Islamic epublic of Iran. Draft final report in 3 Volumes. Japan International Cooporation Agency (JICA) and Center for Earthquake and Enviromental Studies of Tehran (CEST) Tehran Municipilaty", Pacific Consultant International (PCI) and OYO corporation (2000).

10. Brinkgreve R.B.J., Vermeer P.A. "Manual of Plaxis 3D Tunnel", Rotterdam: A.A. Balkema (2001).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.5.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.51]