

گزارش فنی

استفاده از مهندسی ارزش در انتخاب قوس با شعاع کم- تونل مکانیزه خط ۳ قطار شهری مشهد

سید رضا حسینی زاوه^{۱*}، حسن شایسته عظیمیان^۲، حسین میرحربابی^۳، حسن شمسی فراشاه^۴

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس، ۲- کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی دانشگاه فردوسی مشهد و دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت پروژه دانشگاه علم و صنعت، ۳- دکترای زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد ۴- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر (دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷)

چکیده

یکی از محدودیت‌های حفاری مکانیزه تونل در مقایسه با روش‌های حفاری سنتی، ایجاد قوس‌های تند است؛ علاوه بر این، در صورت توأم شدن قوس‌های دارای شعاع کم با معارضین سطحی و زیرسطحی، مشکلات و محدودیت‌های حفاری، دوچندان می‌گردد. به‌طور معمول برای عبور ایمن از این معارضین گزینه‌هایی نظیر تغییر مسیر، پیشنهاد بهسازی و طرح‌های حفاظتی در فاز قبل از اجرا در دسترس طراحان است. با توجه به طراحی اولیه پلان و پروفیل در تونل غربی خط ۳ قطار شهری مشهد، اجرای بخشی از مسیر با چالش‌های مهمی از جمله هم‌زمانی قوس ۳۰۰ متر با عبور از زیر ساختمان‌های اقامتی و تجاری بلندمرتبه در منطقه روبه‌رو بوده است. پس از مطالعات و بررسی‌های به‌عمل آمده، اجرای قوس با شعاع غیرمعمول ۲۷۰ متر در دستور کار قرار گرفت. برای پیشگیری از مشکلات حفاری در قوس تند، تمهیدات لازم به‌کارگیری شده است؛ برخی از این تمهیدات عبارت‌اند از اجرای طرح‌های حفاظتی ساختمان‌های جنوبی بلوار فردوسی و ساختمان زیبا سازه، تعویض براش و ابزارهای برشی، تعیین موقعیت درست کلید در رینگ، طرح چینش ویژه اینورترها و طراحی نوار نقاله که باعث حفاری باکیفیت مناسب در قوس گردید. از نظر مهندسی ارزش نیز انتخاب و اجرای قوس با شعاع ۲۷۰ متر، معادل ۲۰ میلیارد ریال صرفه‌جویی در پی داشته است.

کلیدواژه‌ها: تونل مکانیزه، قوس، مهندسی ارزش، کیفیت.

۱. مقدمه

حفاری تونل‌های دارای قوس تند با استفاده از TBM متداول نیست [۱]. حفاری تونل‌های مکانیزه در محدوده قوس‌های با شعاع کم همواره یکی از چالش‌های فنی و مهندسی پروژه‌های تونل سازی بوده است. در طراحی خطوط مترو شهری، معمولاً پذیرفته شده است که در شرایط قوس‌های تند با شعاع کم از توأم شدن شرایط نامساعد زمین‌شناسی و ساختمان‌های موجود در محدوده تأثیر اجتناب شود [۲ و ۳]. اگر چنانچه شعاع قوس کمتر از ۴۰ برابر قطر دستگاه حفار باشد، ریسک کیفیت و دشواری ساخت به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت [۴]. به‌طور کلی هر چه شعاع قوس کوچک‌تر باشد ریسک اضافه حفاری افزایش می‌یابد [۵]. بدیهی است که پیچیدگی حفاری در قوس‌های دارای شعاع کم در صورت توأم شدن با معارضین سطحی و زیرسطحی دوچندان می‌گردد. یکی از تهدیدات احداث سازه‌های زیرزمینی تأثیر آن بر سازه‌های سطح زمین می‌باشد که طیف گسترده‌ای از انواع نشست را شامل می‌شود [۶]. عبور از زیر

پی ساختمان‌های بلند، پل‌های بزرگ، مناطق مسکونی با تراکم زیاد، خیابان‌های اصلی شهری، بافت‌های تاریخی و دارای ارزش میراث فرهنگی، تونل‌های انرژی، تونل‌های فاضلاب، خطوط متروی در حال بهره‌برداری، تأسیسات شهری حساس از جمله معارضین موجود در محیط کلان‌شهرها می‌باشند. به‌طور معمول برای عبور ایمن از این موانع گزینه‌هایی نظیر تغییر مسیر و همچنین پیشنهاد بهسازی و طرح‌های حفاظتی در فاز قبل از اجرا در دسترس طراحان است.

آقای مایلز (۱۹۷۲) ابداع‌کننده مهندس ارزش، آن را بدین صورت تعریف می‌کند: تحلیل ارزش، یک روش خلاق و سازمان‌یافته است که هدف آن شناسایی هزینه‌های غیرضروری است؛ هزینه‌هایی که کیفیت، کارایی و طول عمر محصول را افزایش نمی‌دهند، به چشم نمی‌آیند و موردعلاقه مشتری نیز نیستند [۷].

انجمن مهندسی ارزش آمریکا، مهندسی ارزش را بدین صورت تعریف کرده است: روشی سیستماتیک برای بهبود ارزش کالاها یا محصولات و خدمات با استفاده از بررسی عملکرد است. ارزش نسبت عملکرد به هزینه است؛ بنابراین ارزش را می‌توان با بهبود

* نویسنده مسئول: S.rezahassani@gmail.com@gmail.com

ساختمان‌های جنوب بلوار فردوسی عبور می‌کند. با توجه به مخاطرات عبور از زیر ساختمان‌های متعدد (دارای زیرزمین و چاه‌های فراوان جذبی)، امکان‌سنجی طرح جایگزینی قوس با شعاع کمتر از ۳۰۰ متر در دستور کار قرار گرفت.



شکل (۲). پلان اولیه مسیر با شعاع قوس ۳۰۰ متر

پس از طراحی گزینه‌های پلان و پروفیل با شعاع‌های ۲۶۰ و ۲۷۰، بر اساس نتایج جداول امتیازدهی، قوس با شعاع ۲۷۰ متر نسبت به قوس با شعاع ۳۰۰ متر حائز امتیاز بیشتری گردید (شکل ۳).



شکل (۳). عکس هوایی از مسیر شعاع قوس ۲۷۰ متر

در ادامه برخی از مزایا و معایب قوس‌های با شعاع ۳۰۰ و ۲۷۰ متر ارائه شده است:

➤ مزایا گزینه ۱ (قوس ۳۰۰):

- ۱- راهبری و اجرای سگمنت گذاری راحت‌تر
- ۲- وجود تجربه قبلی اجرای تونل در خط ۲ قطار شهری مشهد
- ۳- سرعت و کیفیت اجرا مناسب‌تر
- ۴- شرایط مساعدتر برای رولینگ استاک و نوار نقاله

➤ معایب گزینه ۱ (قوس ۳۰۰):

عملکرد یا کاهش هزینه ایجاد نمود. حفظ عملکردهای اساسی در فرایند بهبود ارزش، یکی از اصول اولیه مهندسی ارزش است [۸]. به‌طور کلی اهداف مدنظر در این پژوهش که در بندها و سرفصل‌های جداگانه بررسی می‌شود، شامل موارد زیر است:

- انتخاب شعاع قوس مناسب با دیدگاه مهندسی ارزش
- مطالعات و مدیریت خطرپذیری عبور از مجاورت ساختمان‌ها

۲. تعریف مسئله

پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد به طول حدود ۲۸ کیلومتر حداقل‌های بلوار امیریه در غرب و شهرک ابودر در جنوب شرق شهر مقدس مشهد در حال احداث می‌باشد. احداث تونل این پروژه به‌وسیله دو دستگاه TBM از دو جبهه شرقی و غربی از محل شفت پشتیبان در مرکز مسیر آغاز شده است. شکل (۱) نمایی از مسیر خط ۳ قطار شهری مشهد و محدوده اجرای قوس را نشان می‌دهد. شایان ذکر است قوس موردبررسی در کیلومتر ۱+۳۰۶ تا ۱+۶۹۶ تونل غربی قرار دارد.



شکل (۱). مسیر حفاری تونل خط ۳ و موقعیت قوس ۲۷۰

عبور از قوس و هم‌زمانی آن با عبور از مجاورت و زیر ساختمان‌ها و قنات در زمان اجرا ممکن است با ایجاد ناپایداری در مستحذات سطحی و زیرسطحی همراه باشد. به‌منظور کنترل ناپایداری می‌توان ضمن رعایت فواصل مجاز (از طریق انتخاب شعاع قوس مناسب) از روش‌های بهسازی نیز استفاده نمود.

در تونل غربی خط ۳ قطار شهری مشهد با توجه به موانع موجود در محدوده میدان جانباز و همچنین محدودیت‌های مربوط به اصول فنی طراحی پلان و پروفیل، با توجه به حداقل قوس معمول متروها (قوس‌های با شعاع حداقل ۳۰۰ متر) ادامه مسیر با چالش‌های مهمی از جمله هم‌زمانی قوس ۳۰۰ با عبور از زیر ساختمان‌های اقامتی و تجاری بلندمرتبه در منطقه روبه‌رو بوده است؛ لذا دو گزینه تغییر شعاع قوس و بهسازی برای عبور از این محدوده مطرح شد.

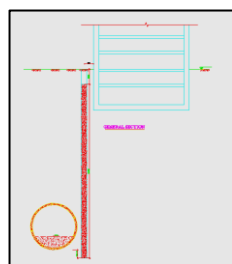
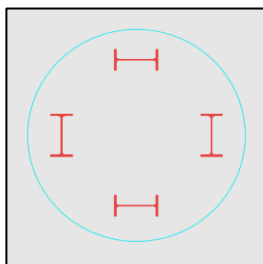
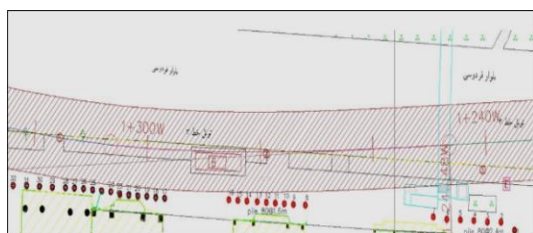
همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مطابق طرح اولیه با شعاع قوس ۳۰۰، در محدوده میدان جانباز مسیر از زیر

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در خصوص اجرای قوس ۲۷۰ و حساسیت موضوع به دلیل شعاع کم و سازه‌های مجاور، اعمال تمهیدات قبل از شروع حفاری در این محدوده ضروری است.

۳-۱. طرح‌های حفاظتی ارائه شده

۳-۱-۱. ساختمان‌های جنوبی بلوار فردوسی

با توجه به حساسیت و اهمیت سازه‌های مجاور قوس و با نظر کارفرمای پروژه اجرای طرح‌های حفاظتی برای رعایت جوانب احتیاط در دستور کار قرار گرفت. بر این مبنای طرح حفاظتی ارائه شده شامل ۳۲ شمع به عمق ۳۴ متر، ضخامت ۸۰ سانتی‌متر و فاصله مرکز به مرکز ۲ تا ۲/۵ متر (با توجه به موقعیت) به‌طور کامل اجرا شده است. شکل (۵) موقعیت شمع‌ها نسبت به تونل و همچنین گزینه‌های نوع شمع آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت محدودیت‌های مکانی و عدم امکان گنج گذاری در شمع‌ها، گزینه اجرای شمع با H Pile اجرایی شده است. نحوه و مراحل اجرای این طرح حفاظتی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵). موقعیت شمع‌های ساختمان‌های جنوبی بلوار فردوسی



شکل (۶). اجرای طرح حفاظتی ساختمان‌های جنوبی بلوار فردوسی

۳-۱-۲. ساختمان زیبا سازه

۱- عبور از زیر ساختمان‌های ۳ تا ۸ طبقه ضلع جنوبی بلوار فردوسی

۲- طول قوس بیشتر

۳- هم‌زمانی قوس قائم و افقی (هم‌زمانی قوس افقی ۳۰۰ و شیب ۵/۳٪)

۴- برخورد با انکراژ ساختمان پاژ

➤ گزینه ۲ (قوس ۲۷۰)

➤ مزایا:

۱- عدم عبور از زیر ساختمان‌های ۳ تا ۸ طبقه ضلع جنوبی بلوار فردوسی

۲- طول قوس کمتر

۳- عدم هم‌زمانی قوس قائم و افقی

۴- عدم برخورد با انکراژ ساختمان پاژ

➤ معایب:

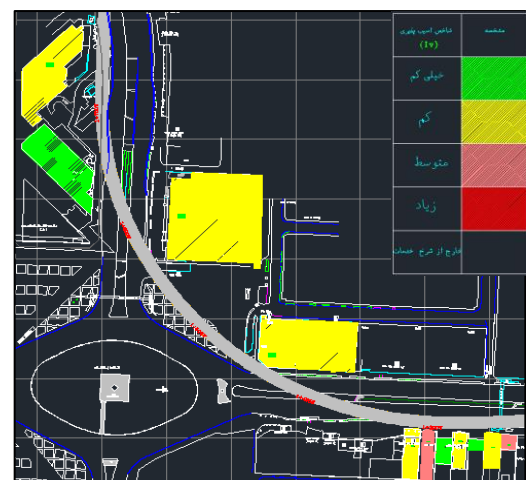
۱- راهبری و اجرای سگمنت گذاری سخت‌تر

۲- عدم وجود تجربه قبلی در سطح کشور

۳- شرایط نامساعدتر برای رولینگ استاک و نوار نقاله

۴- عبور قسمتی از تونل از زیر ساختمان پاژ (محوطه و پارکینگ)

در گزینه منتخب ساختمان‌های متعددی از جمله ساختمان‌های جنوبی بلوار فردوسی، ساختمان زیبا سازه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. بر اساس تحلیل و بررسی ریسک انجام گرفته، این ساختمان‌ها به‌غیر از ساختمان جنوب خیابان فردوسی در رده آسیب‌پذیری کم و خیلی کم قرار گرفته‌اند (شکل ۴).

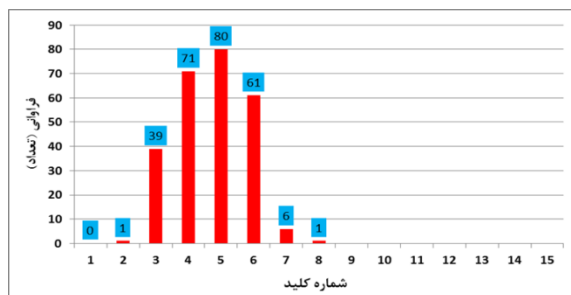


شکل (۴). نتیجه رده‌بندی ریسک ارائه شده توسط مشاور کارفرما

۳. ملاحظات اجرایی قبل از شروع حفاری قوس

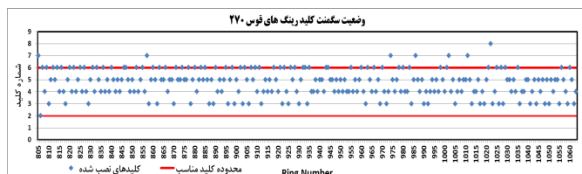
۴-۲-۱. کنترل انطباق مسیر تونل اجراشده با پلان و پروفیل مسیر

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، هدایت صحیح دستگاه بر روی انحنای مسیر طراحی شده است. وضعیت انحراف از مسیر در راستای افقی و قائم در زمان حفاری قوس ۲۷۰ (PPS دستگاه) نشان می‌دهد بیشتر مسیر هدایت دستگاه مشکلی نداشته است اما در انتهای مسیر، به دلیل خرابی جک‌های آرتیکولیشن و به هم ریختن آفست شیلد انتهایی، جهت جلوگیری از تماس سگمنت به شیلد مجبور به انحراف عمده مسیر حفاری به بیرون قوس به میزان ۷۴ میلی‌متر شده است (شکل ۱۵).

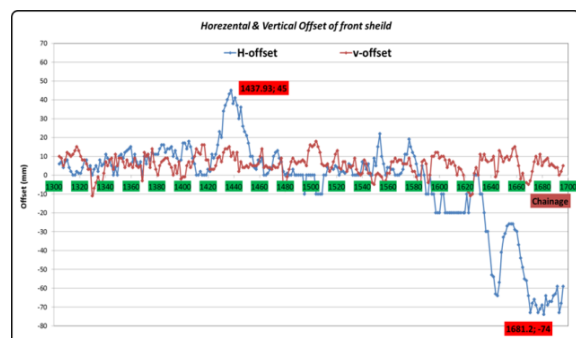


شکل (۱۳). فراوانی موقعیت نصب کلید در محدوده اجرای قوس ۲۷۰

شکل (۱۴) موقعیت نصب کلید در مسیر اجرای قوس را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴). محدوده مجاز موقعیت نصب کلید



شکل (۱۵). بررسی انحراف از مسیر در طول حفاری

۴-۲-۲. کیفیت رینگ

یکی از پارامترهای سنجش کیفیت اجرای قوس، بررسی میزان شکستگی رینگ‌ها در طول قوس می‌باشد.

۴. ملاحظات اجرایی حین اجرای قوس ۲۷۰

۴-۱. پوشش نهایی تونل

از چالش‌های مهم دیگر حفاری در قوس‌های تند، نصب سیستم نگهداری است که آن‌هم متأثر از موقعیت کلید است. چنانچه موقعیت کلید درست انتخاب نشود باعث درگیر شدن شیلد با سگمنت، خراب شدن برش‌ها، خروج مورتار، افزایش تراست، پله‌داری، فاصله‌داری، شکستگی سگمنت‌ها و تأخیر پیشروی می‌شود. این چالش نیز با استفاده از اپراتور مجرب و اندازه‌گیری مداوم گپ‌ها (فاصله پشت رینگ با نقاط مختلف رینگ) حل شده است.

از موارد مهم دیگر نحوه نصب سگمنت Invert در قوس است. جهت نصب صحیح و پیش‌بینی رواداری بسیار کم محل قرارگیری ریل‌های لوکوموتیو و گنتری‌های دستگاه و عدم برخورد گنتری با دیواره تونل در محل قوس، برای نصب اینورت‌ها تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفته شده است (ازجمله ایجاد فاصله عمده در بخش خارجی قوس). در شکل (۱۲) نحوه نصب سگمنت‌های Invert نشان داده شده است.



شکل (۱۲). ایجاد فاصله عمده بین سگمنت‌های Invert در سمت بیرونی قوس جهت ایجاد قوس یکنواخت در ریل‌ها

۴-۲. موقعیت نصب کلید

با توجه به بررسی‌های انجام شده موقعیت نصب کلید رابطه مستقیمی با میزان شکستگی‌های سگمنت دارد. با توجه به محاسبات تئوری برای عبور از این قوس می‌بایست گروه جک‌های ۲ تا ۶ انتخاب شود. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود بیشترین موقعیت نصب کلیدها گروه جک‌های ۳ تا ۶ است.

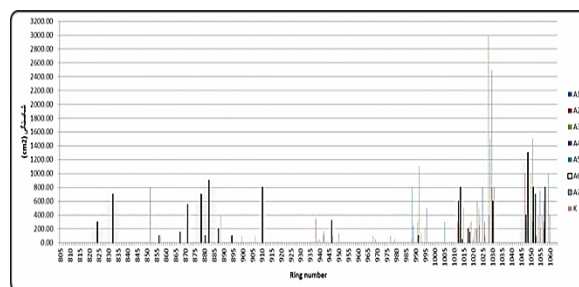
جدول (۱). ارزش‌گذاری ریالی رفع ریسک‌های ناشی از تغییر شعاع قوس (بر مبنای سه‌ماهه دوم سال ۹۶)

نوع خطرپذیری	ارزش ریالی صرفه‌جویی ناشی از حذف رفع خطرپذیری (ریال)	توضیحات
جابه‌جایی چاه‌ها	۱/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰	جابه‌جایی ۲۶ چاه
هزینه تخلیه و اسکان ساختمان‌ها	۲/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰	یک ماه با توجه به اینکه خسارت یک ماه عدم مسافر پذیری هتل هم باید لحاظ شود.
کلیم حقوقی ساختمان‌ها	۱/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰	دو نفر کارشناس حقوقی به مدت شش ماه
هزینه بیمه ساختمان‌ها	۱/۵۰۰/۰۰۰/۰۰۰	-
هزینه توقف دستگاه	۵/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰	حدود یک ماه هزینه کارکنان
مابه‌التفاوت هزینه طرح‌های حفاظتی ساختمان‌ها	۵/۵۰۰/۰۰۰/۰۰۰	با توجه به تزیین‌هایی که توسط پیمانکاران خاص انجام می‌شود.
هزینه کاهش طول مسیر	۴/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰	کاهش حدود ۱۲ متر از طول مسیر
مجموع	۲۰/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰	حدود ۲ میلیارد تومان

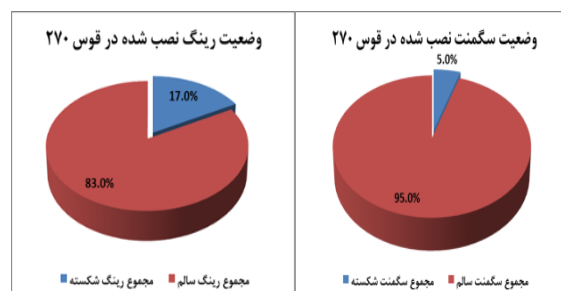
۷. نتیجه‌گیری

با توجه طراحی اولیه پلان و پروفیل در تونل غربی خط ۳ قطار شهری مشهد، اجرای بخشی از مسیر با چالش‌های مهمی از جمله هم‌زمانی قوس ۳۰۰ متر با عبور از زیر ساختمان‌های اقامتی و تجاری بلندمرتبه در منطقه روبه‌رو بوده است؛ به همین دلیل طرح قوس با شعاع ۲۷۰ متر پیشنهاد و اجرا گردید. با تمهیدات در نظر گرفته‌شده قبل از شروع حفاری قوس (از جمله اجرای طرح حفاظتی ساختمان‌های جنوبی بلوار فردوسی و ساختمان زیبا سازه، تعویض برآش و ابزارها، طراحی جدید نوار نقاله و ...) و در زمان اجرا (از جمله تعیین موقعیت درست کلید در قوس و طرح چینش اینورترها) حفاری قوس بدون مشکل خاص و با کیفیت مناسب به پایان رسید؛ همچنین از نظر مهندسی ارزش انتخاب و اجرای قوس با شعاع ۲۷۰ متر، معادل ۲۰ میلیارد ریال صرفه‌جویی در پی داشته است.

در شکل (۱۶) میزان شکستگی سگمنت‌های نصب‌شده و میزان فراوانی آن‌ها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان شکستگی سگمنت‌های نصب‌شده در محدوده قوس ۲۷۰، به میزان 3000 cm^2 و در بخش انتهایی قوس به دلیل خرابی جک‌های آرتیکولیشن بوده است. شکل (۱۷) نشان می‌دهد با وجود شعاع کم، در مجموع کیفیت قوس اجراشده مطلوب است.



شکل (۱۶). مساحت شکستگی سگمنت‌ها



شکل (۱۷). وضعیت کیفیت سگمنت‌ها و رینگ‌های

نصب‌شده در قوس ۲۷۰ متر

۵. کیفیت قوس اجراشده

قابل ذکر است در محدوده اجرای قوس، در تمام رینگ‌ها میزان فاصله‌داری و پله‌داری در محدوده مجاز بوده است (حد مجاز فاصله‌داری ۶ میلی‌متر و حد مجاز پله‌داری در قوس ۱۵ میلی‌متر بوده است).

۶. مزایای انتخاب قوس ۲۷۰ از دیدگاه مهندسی

ارزش

با انتخاب و حفاری قوس با شعاع ۲۷۰ متر (نسبت به اجرای قوس با شعاع ۳۰۰ متر) خطرهای متعددی از پروژه رفع و یا تعدیل‌یافته است. در مجموع ارزش‌گذاری ریالی حذف خطرپذیری‌های ناشی از این انتخاب معادل ۲۰ میلیارد ریال برآورد شده است (جدول ۱).

۸. مراجع

- [1] T. Thomas, "A Head of Curve in Bangkok," North American Tunnelling Journal, vol. June-July, p. 14, 2019.
- [2] S. Li, G. Gu, P. Li, M. Zhang, and G. Wang, "Numerical simulation of mechanical properties of the segments for a curved shield tunnel during construction stage: a case study," in IACGE 2018: Geotechnical and Seismic Research and Practices for Sustainability: American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2019, pp. 61-69.
- [3] S. Qiao, P. Xu, R. Liu, and G. Wang, "Study on the Horizontal Axis Deviation of a Small Radius TBM Tunnel Based on Winkler Foundation Model," Applied Sciences, vol. 10, no. 3, p. 784, 2020.
- [4] M. Sugimoto, A. Sramoon, S. Konishi, and Y. Sato, "Simulation of shield tunneling behavior along a curved alignment in a multilayered ground," Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol. 133, no. 6, pp. 684-694, 2007.
- [5] V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab, and S. Xu, Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control. Taylor & Francis, 2008.
- [6] M. Karimi, M. R. Arab, M. Eslami, and O. Roshani, "Interaction of cavities and underground structures on subsidence," Construction science and technology, vol. 1, no. 4, pp. 35-42, 2021. (In Persian)
- [7] L. D. Miles, Techniques of value analysis and engineering. Miles Value Foundation, 2015.
- [8] S. Standard, "Value Standard and Body of Knowledge," SAVE, United States of America, 2007.

