

بررسی عملکرد ماشین حفاری مکانیزه (TBM) در حفاری قطعه اول تونل انتقال آب کرج - تهران

مجید تاجیک^{۱*}، محمد اروجی^۲، آرمان نوین^۳

پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۵

دریافت مقاله: ۸۹/۷/۱۸

چکیده

حفاری قطعه اول تونل انتقال آب کرج - تهران توسط TBM با قطر ۴/۶۶ متر در حالی انجام شد که ضریب بهره‌وری دستگاه در طول مسیر حفاری کاملاً متفاوت بود. براساس شرایط زمین‌شناسی، فاصله ماشین تا دهانه تونل و مهارت فردی پرسنل عملکرد ماشین حفاری در چهار بخش مساوی از تونل، مقایسه و ارزیابی گردید. بررسی فعالیت‌ها و تأخیرات ماشین حفاری نشان می‌دهد که نرخ تغییرات ضریب بهره‌وری علاوه بر پارامترهای فوق به میزان هم‌پوشانی فعالیت‌ها نیز بستگی دارد. ضریب بهره‌وری در بخش اول ۱۸/۳۰، بخش دوم ۲۲/۲۶، بخش سوم ۱۶/۰۹ و در بخش چهارم ۱۶/۰۸ به دست آمد.

کلید واژه‌ها: TBM، تونل انتقال آب، ضریب بهره‌وری، زمین شناسی، کرج، تهران

۱. کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی موسسه مهندسی مشاور ساحل tajikm1@gmail.com

۲. کارشناس عمران موسسه مهندسی مشاور ساحل

۳. کارشناس ارشد استخراج معدن موسسه مهندسی مشاور ساحل

* مسئول مکاتبات

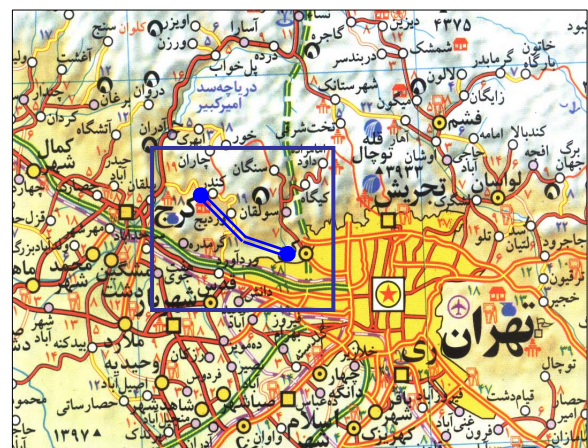
مقدمه

قطعه اول تونل انتقال آب کرج- تهران ("ET-K") با طول ۱۶۰۴۲ متر، بخشی از سامانه انتقال آب تهران است که به منظور انتقال آب شرب شهر تهران از سد امیرکبیر طراحی شده است. تونل مذکور با قطر حفاری ۴/۶۶ و قطر نهایی ۳/۹۰ متر جهت انتقال ۱۶ متر مکعب در ثانیه آب به صورت جریان آزاد طراحی شده است.

پوشش نهایی تونل شامل ۶ قطعه بتونی پیش ساخته^۴ با ابعاد مختلف و از نوع چرخشی^۵ است که با توجه به مسیر حرکت، موقعیت نصب آنها تغییر می کند.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پرتال خروجی تونل ET در شمال غرب تهران و شمال شهرک راه آهن و تراز ۱۵۶۰ متر از سطح دریا، در نظر گرفته شد که با سه قوس به ترتیب با طول های ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۵۰۰۰ متر و شیب ۰/۱۳۷ درصد تا نقطه "K" در تراز ۱۵۸۲ متر از سطح دریا امتداد دارد. نقطه "K" در کف دره ای در ابتدای جاده چالوس در نزدیکی روستای گندر واقع شده است.

حدود ۱۳۹ متر ابتدایی این قطعه به صورت نیمه مکانیزه و به کمک رودهدر^۶، ۱۸۰ متر انتهای آن به روش سنتی و مابقی طول آن با روش مکانیزه حفاری شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی پروژه

مشخصات ماشین

ابعاد و نحوه اجرای تونل به طور عمده تحت تاثیر شرایط زمین شناختی می باشد. از طرفی با توجه به اهمیت زمان اجرای پروژه، استفاده یا عدم استفاده از ماشین TBM می تواند تاثیرگذار باشد (Kasper & Meschke, 2006) بنابراین در این پروژه به منظور حفاری بخش مکانیزه تونل از ماشین حفاری تمام مقطع تونل^۷ ساخت شرکت هرکنشت آلمان، استفاده گردید (شکل ۲).



شکل ۲- کله حفار و سپر فولادی در TBM استفاده شده در تونل انتقال آب کرج- تهران

این نوع ماشین دارای دو پوسته فلزی موسوم به سپر^۸ است که از پشت کاترهد^۹ تا محل نصب آخرین سگمنت ادامه دارد و از ماشین و تجهیزات آن در برابر ریزش سنگ های اطراف تونل محافظت می کند. در بخشی از این پوسته که حد فاصل دیوارگیرها^{۱۰} و کاترهد قرار دارد، سپرها به صورت تلسکوپی روی یکدیگر قرار دارند. با این قابلیت به هنگام پیشروی دستگاه حفاری، با باز شدن سپر تلسکوپی تمام بخش های داخلی دستگاه در زیر پوسته فلزی قرار می گیرد. مهم ترین ویژگی این ماشین توانایی نصب قطعات بتونی پیش ساخته هم زمان با حفاری سینه کار، به واسطه وجود جک های دیوارگیر است. مشخصات کلی این دستگاه در جدول ۱ ارائه شده است.

- 7. Double Shield TBM (S323)
- 8. Shield
- 9. Cutter head
- 10. Gripper

- 4. Segment
- 5. Universal
- 6. Road Header

جدول ۱- مشخصات کلی TBM تونل انتقال آب

کرج- تهران

کاترهد و شیلد	
۴/۶۶	قطر کاترهد (متر)
۱۱	طول شیلد (متر)
۳۱	تعداد تیغه ^{۱۱}
۱۷	قطر تیغه (اینچ)
۱۲۵۰	قدرت الکتروموتورها (کیلووات)
۰-۱۱	سرعت چرخش کاترهد (دور بر دقیقه)
۱۶۹۰۰	حداکثر تراست (کیلو نیوتن)
سیستم پشتیبان و ترابری	
۱۶۰	طول سیستم پشتیبان (متر)
۱۷۰	وزن سیستم پشتیبان (تن)
۱۶	تعداد گنتری
۱۰	تعداد واگن
۸	ظرفیت هر واگن (مترمکعب)

۱- زمین شناسی مسیر تونل

محدوده تونل در دامنه جنوبی البرز مرکزی قرار دارد. البرز مرکزی یک ایالت ساختاری با ویژگی‌های منحصر به فرد و پیچیده است که در بخش جنوبی آن پهنه کرج- سولقان قرار دارد [مشاور ساحل؛ ۱۳۸۴]. این پهنه متعلق به زون ترشیاری جنوبی است و از دیدگاه چینه‌شناسی در برگیرنده مجموعه‌های رسوبی مختلفی از سازند کرج به سن ائوسن پسین تا میانی است (Gansser & Huber, 1962) این محدوده به طور کلی شامل تناوب‌هایی از توف، ماسه سنگ، کنگلومرای ریزدانه، بخش‌های سیلت استون، گدازه و حتی آگلومرا است که در قالب طبقات رسوبی چین‌خورده دیده می‌شود. گاهی توده‌های نفوذی و دایک‌های آذرین از میان

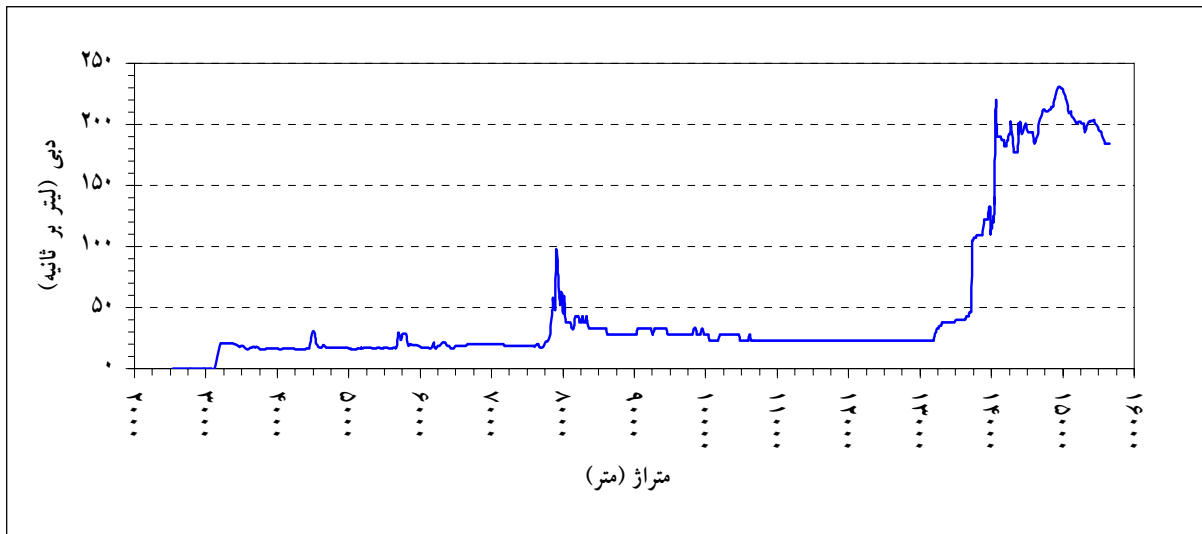
واحدهای رسوبی یا در راستای برخی از گسل‌ها بیرون‌زدگی دارند.

بخش ابتدایی مسیر تونل بین دو پهنه گسلی به نسبت بزرگ شمال تهران (پهنه راندگی کرج- فرحزاد) و پورکان- وردیج قرار گرفته است. این گسل‌ها با جهت شیب عمومی شمال - شمال شرقی بلوک‌های شمالی خود را رو به جنوب رانده‌اند. به این ترتیب گستره مورد نظر در یک پهنه فشاری کهن، میان دو راندگی بزرگ به دام افتاده و پذیرای دگرشکلی ناشی از جنبش‌های دراز مدت آنها است. [مشاور ساحل، ۱۳۸۳].

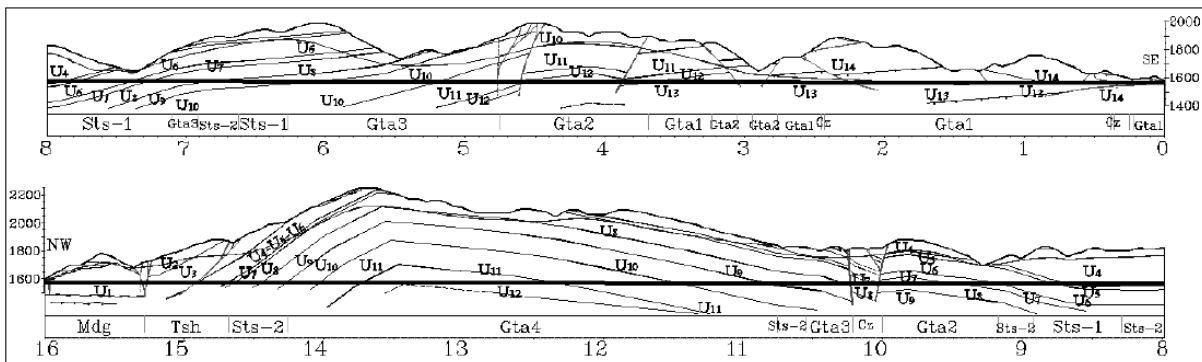
اغلب واحدهای سنگی در مسیر تونل به دلیل بافت دانه‌ریز از تراوایی ضعیفی برخوردار هستند و در کل از نظر تشکیل مخازن آب زیرزمینی ارزش هیدروژئولوژیکی چندانی ندارند. مسیر تونل را از نظر شرایط آب می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول از ابتدای تونل (از سمت ET) تا متر ۰۳+۰۷۰ است که در بالای سطح آب زیرزمینی قرار دارد. از متر ۰۳+۰۷۰ تا انتهای تونل (متر ۱۶+۰۴۲) حفاری در زیر سطح آب زیرزمینی انجام شده است که دبی آب خروجی از تونل به صورت تجمعی در شکل ۳ نشان داده شده است.

براساس بازدیدهای زمین‌شناسی منطقه و اطلاعات به دست آمده از گمانه‌های اکتشافی، در مجموع ۹ واحد زمین‌شناختی مهندسی در مسیر تونل قابل شناسایی و تفکیک از یکدیگر است که در بیشتر موارد عامل تفکیک این گونه‌ها، ویژگی‌های ژئومکانیکی آنها می‌باشد [نویسن، ۱۳۸۵]. در شکل ۴ ترتیب قرارگیری هر واحد زمین‌شناختی مهندسی در پروفیل مسیر تونل نشان داده شده است.

هر واحد زمین‌شناختی مهندسی متشکل از یک یا چند واحد زمین‌شناسی است که هر واحد زمین‌شناسی بیانگر خصوصیات سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی توده‌سنگ است. در جدول ۲ تعداد واحدهای زمین‌شناختی مهندسی شناسایی شده در مسیر تونل آورده شده است.



شکل ۳- تغییرات دبی آب خروجی از دهانه تونل



شکل ۴- پروفیل زمین شناسی مهندسی مسیر تونل [مشاور ساحل، ۱۳۸۴]

جدول ۲- واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل [Hassanpour et al., 2009]

واحد زمین شناسی	Ave. RMR	واحد زمین شناسی مهندسی
U11,12,13,14	۴۵	Gta 1
U11,12,13	۴۹	Gta2
U10,11,12	۶۴	Gta3
U10,11,12	۷۵	Gta4
U5,6,7,8,9	۵۷	Sts1
U5,6,7,8,9	۷۲	Sts2
U4	۶۳	Tsh
U1	۴۶	Mdg
واحدهای خردشده	۲۱	Cz

می‌شود (جدول ۳). هدف از این تقسیم‌بندی مقایسه و تحلیل عملکرد و بهره‌وری ماشین در شرایط زمین‌شناختی متغیر، همراه با افزایش طول تونل و مهارت فردی پرسنل می‌باشد. در جدول ۳ ستون توقف حفاری، به این معنی است که در آن روز علی‌رغم فعال بودن TBM، به دلیل تأخیرات فراوان، امکان حفاری تونل وجود نداشته و ضریب بهره‌وری صفر شده است. بنابراین لازم است که تعداد روزهای توقف حفاری بخشی از کارکرد ماشین محسوب شود. با این توضیح مدت کارکرد ماشین برای بخش‌های مختلف یکسان نبوده و در نتیجه انتظار می‌رود که نرخ پیشروی در هر بخش متفاوت باشد (شکل ۵).

برداشت‌های زمین‌شناسی از سینه‌کار نشان می‌دهد که تغییرات سنگ‌شناختی در مسیر تونل به قدری زیاد است که نمی‌توان پارامترهای مهندسی سنگ در هر واحد زمین‌شناختی را یکسان در نظر گرفت. زیرا یک واحد زمین‌شناختی با توجه به خصوصیات ناپیوستگی‌ها، درجه دگرسانی، دانه‌بندی، تخلخل و مقدار نشت آب در مترهای مختلف، خواص متفاوتی را از خود نشان می‌دهد.

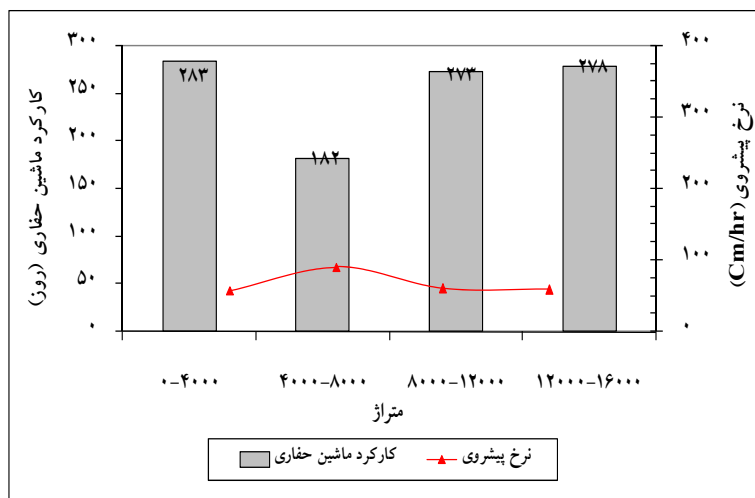
روند بررسی کارایی ماشین

در این تحقیق حفاری مکانیزه تونل ۱۵۷۰۲/۱۶ متر در نظر گرفته شده است که به چهار بخش تقریباً مساوی تقسیم

جدول ۳- تقسیم‌بندی تونل به چهار بخش مساوی

نام	مترای شروع	مترای نهایی	طول مسیر (متر)	مدت حفاری ماشین (روز)	تعطیلی کارگاه (روز)	توقف حفاری (روز)	کل توقف ماشین (روز)	کارکرد ماشین (روز)	مدت ساخت تونل (روز)
بخش اول*	۱۳۹.۲۳	۴۰۴۶.۲۱	۳۹۰۶.۹۸	۲۲۶	۱	۵۷	۵۸	۲۸۳	۲۸۴
بخش دوم*	۴۰۴۶.۲۱	۷۹۹۱.۰۴	۳۹۴۴.۸۳	۱۷۱	۱	۱۱	۱۲	۱۸۲	۱۸۳
بخش سوم*	۷۹۹۱.۰۴	۱۱۹۱۴.۶	۳۹۲۳.۵۶	۲۵۳	۰	۲۰	۲۰	۲۷۳	۲۷۳
بخش چهارم*	۱۱۹۱۴.۶	۱۵۸۴۱.۳۹	۳۹۲۶.۷۹	۲۶۸	۴	۱۰	۱۴	۲۷۸	۲۸۲
مجموع			۱۵۷۰۲.۱۶	۹۱۸	۶	۹۸	۱۰۴	۱۰۱۶	۱۰۲۲

* هر بخش به ترتیب به نام محدوده های ۰-۴۰۰۰، ۴۰۰۰-۸۰۰۰، ۸۰۰۰-۱۲۰۰۰ و ۱۲۰۰۰-۱۶۰۰۰ معرفی می‌شود.



شکل ۵- مقایسه مدت حفاری و نرخ پیشروی در هر بخش از تونل

از این موارد می‌تواند نرخ پیشروی را کاهش دهد. از آنجایی که در TBM همه اجزا باید قادر باشند با سرعت یکسان و متناسب با پیشروی کاترهد کار کنند، لذا نقص و کمبود در اجزای هر قسمت موجب تاخیر در سرعت پیشروی ماشین می‌شود (Friant et al., 2004). پارامترهای فوق خود تحت تأثیر فعالیت‌های دیگر قرار دارند که چالش یا تأخیر در اجرای هر فعالیت می‌تواند در نهایت، ضریب بهره‌وری را کاهش دهد.

در حفاری مکانیزه تونل معمولاً تأخیراتی که منجر به توقف حفاری می‌شوند با یکدیگر همپوشانی دارند. پس جهت مقایسه اثر تأخیرات بر عملیات حفاری، در هر ۲۴ ساعت عملکرد TBM، زمان هر مشکل و فعالیت به صورت جداگانه ثبت و مطابق رابطه ۱ بر حسب درصد بیان می‌شود.

$$\%d_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \times 100 \quad (1)$$

d_i = زمان هر تأخیر (فعالیت) در یک شبانه‌روز بر حسب ساعت

n = تعداد کل فعالیت‌ها و تأخیرات (در این تحقیق ۲۳ مورد است)

رابطه فوق بیانگر یک روش قیاسی است که در آن هر چه هم‌پوشانی فعالیت (تأخیرات) بیشتر باشد، سهم هر پارامتر (% d_i) کمتر می‌شود.

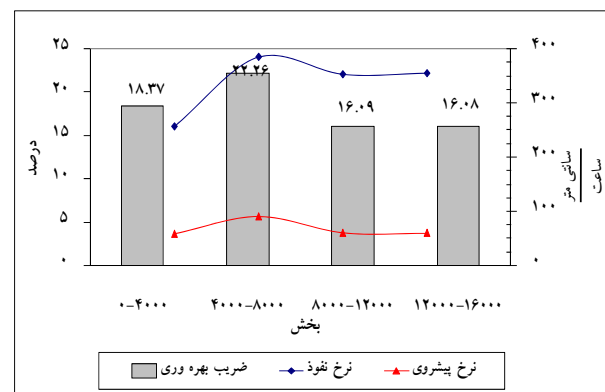
در جدول ۴ فعالیت و تأخیرات به وجود آمده در حین حفاری به تفکیک هر بخش نشان داده شده است. کاربرد اصلی این جدول، مقایسه پارامترهای هر بخش با یکدیگر و با بخش‌های دیگر تونل است.

درصد فعالیت انجام شده در هر گروه را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود تأخیرات زمین‌شناسی در بخش اول تونل نسبت به بخش‌های دیگر بیشتر است. از طرفی در بخش چهارم، تأخیرات مربوط به گروه تدارکات^{۱۲} و سیستم پشتیبان^{۱۳} افزایش یافته است.

در حفاری مکانیزه نرخ پیشروی از دو پارامتر عمده حفاری و نگهداری تأثیر می‌پذیرد که برابر با حاصل ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره‌وری است. وجود مناطق ریزشی یا مناطقی که احتیاج به تحکیم دارد و نصب نگهداری (ماشین‌های سپرتکی)، باعث کاهش نرخ پیشروی می‌شود (Bruland & Nilsen, 1995).

نرخ نفوذ به صورت معمول با توجه به خواص ماده سنگ، مشخصات ماشین و ابزار حفاری تخمین زده می‌شود. البته فاصله، جهت و شرایط درزه‌ها نیز بر نرخ نفوذ تأثیر می‌گذارد (Rostami et al., 1996). به عبارت دیگر در شرایط یکسان ابزار حفاری، نرخ نفوذ بیانگر شرایط زمین شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ است. ضریب بهره‌وری شاخصی برای تعیین عملکرد ماشین است و به صورت نسبت مدت حفاری در یک شبانه روز به کل ساعات کاری محاسبه شده است. پارامترهایی از جمله نوع ماشین، مهارت پرسنل، شرایط زمین‌شناسی و... بر ضریب بهره‌وری تأثیرگذار هستند (Bruland & Nilsen, 1995).

با افزایش نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری، نرخ پیشروی افزایش می‌یابد که در بخش دوم تونل این سه پارامتر بالاترین می‌باشند (شکل ۶).



شکل ۶- رابطه بین ضریب بهره‌وری، نرخ نفوذ و پیشروی در هر بخش از تونل

تحلیل عملکرد ماشین

در این تحقیق منظور از یک مرحله پیشروی ماشین انجام عملیات سه گانه حفاری، نصب یک رینگ کامل (شش عدد سگمنت) و حرکت سیستم پشتیبان است که تأخیر در هر یک

12. Logistic

13. Back up

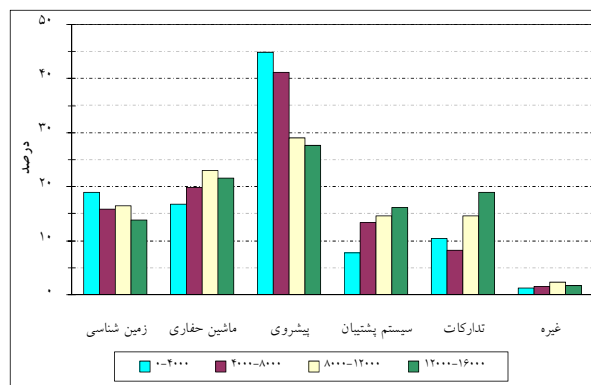
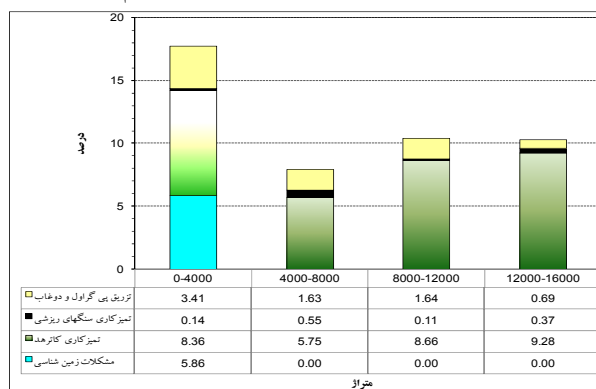
جدول ۴- فعالیت و تأخیرات مختلف ماشین در هر بخش از تونل بر حسب درصد

گروه اصلی	متر از حفاری				فعالیت و تأخیرات ماشین
	۱۲۰۰۰-۱۶۰۰۰	۸۰۰۰-۱۲۰۰۰	۴۰۰۰-۸۰۰۰	۰-۴۰۰۰	
زمین شناسی	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۵.۸۶	مشکلات زمین شناسی
	۹.۲۸	۸.۶۶	۵.۷۵	۸.۳۶	تمیزکاری کاترهد
	۰.۳۷	۰.۱۱	۰.۵۵	۰.۱۴	تمیزکاری سنگهای ریزشی
	۳.۲۶	۶.۰۵	۷.۸۳	۱.۰۷	تعویض دیسک کاتر
	۰.۶۹	۱.۶۴	۱.۶۳	۳.۴۱	تزریق پی گراول و دوغاب
	۰.۲۹	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۰	جریان آب به داخل تونل
	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۱۴	حفر چال شناسایی
ماشین حفاری	۱۳.۶۷	۱۳.۲۹	۱۱.۳۳	۴.۱۰	تعمیر و نگهداری
	۳.۷۳	۳.۹۵	۳.۶۴	۷.۱۷	مکانیکی و هیدرومکانیکی
	۲.۴۴	۲.۷۲	۲.۲۵	۱.۰۶	الکتریکی
	۱.۷۷	۳.۰۴	۲.۷۳	۴.۴۴	نقشه برداری
پیشروی	۱۳.۷۰	۱۳.۶۳	۱۷.۴۵	۱۵.۷۵	حفاری
	۱۲.۹۳	۱۴.۱۲	۲۱.۵۰	۲۴.۲۴	سگمنت گذاری
	۱.۰۵	۱.۲۷	۲.۲۱	۴.۸۹	جابجایی سیستم پشتیبان
سیستم پشتیبان	۰.۷۹	۱.۲۱	۰.۳۰	۱.۷۷	نصب ریل و جابجایی سوئیچ کالیفرنیا
	۲.۰۰	۲.۸۳	۳.۵۱	۲.۰۴	نوار نقاله
	۱۳.۳۷	۱۰.۵۰	۹.۶۱	۳.۹۷	انتظار ورود قطار
تدارکات	۱۳.۲۷	۶.۷۸	۰.۸۰	۰.۴۰	انتقال پرسنل
	۵.۰۵	۶.۴۵	۶.۱۹	۳.۸۰	تامین آب، برق و هوا
	۰.۲۲	۱.۰۲	۱.۰۲	۰.۴۶	از ریل خارج شدن یک آپ
	۰.۳۷	۰.۴۱	۰.۱۷	۰.۳۹	نبود مواد اولیه
	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۵.۳۸	حوادث پرتال در تأخیر قطار
غیره	۱.۷۳	۲.۳۳	۱.۴۹	۱.۱۷	صرف غذا، بازدید و ...
	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	مجموع فعالیت و تأخیرات (بدون همپوشانی)

زمین‌شناختی در بخش اول تونل، وجود زون‌های گسله و خرد شده است که به صورت متناوب در این بخش دیده می‌شود و عمدتاً در اثر ریزش توده‌سنگ منجر به توقف ماشین و یا کاهش نرخ پیشروی شده است (شکل ۸).

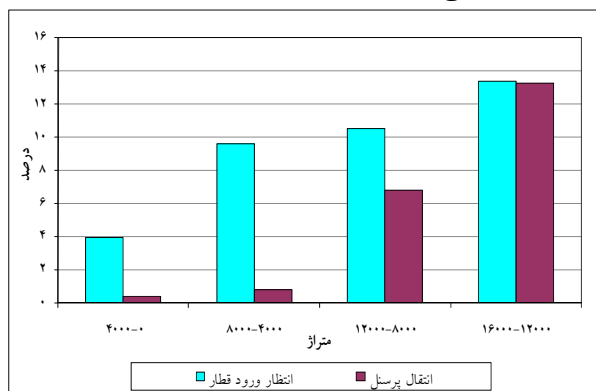
تغییر شرایط زمین‌شناختی در هر بخش تأثیر زیادی در کارایی ماشین خواهد داشت. داده‌ها و پارامترهای ثبت شده توسط دستگاه و اپراتور و مقایسه آنها با اطلاعات زمین‌شناختی برداشت شده از سینه‌کار نشان می‌دهد که برجسته‌ترین چالش

می شود با افزایش متر از تونل، مشکلات سیستم ترابری بیشتر شده که اثر مستقیم آن در تأخیرات انتقال پرسنل و انتظار ورود قطار نمایان است. پس رشد چشمگیر دو پارامتر اخیر منجر به کاهش ضریب بهره‌وری ماشین در بخش چهارم شده است.



شکل ۷- توزیع زمانی تأخیرات و فعالیت‌های مربوط به حفاری تونل در هر بخش

شکل ۸- توزیع زمانی تأخیرات مربوط به گروه زمین‌شناسی



شکل ۹- افزایش تدریجی تأخیرات مربوط به سیستم ترابری

در گروه ماشین حفاری^{۱۸} اکثر تأخیرات در رابطه با تعمیر و نگهداری^{۱۹} و مشکلات مکانیکی - هیدرومکانیکی است. بعد از عبور از بخش اول تونل، تأخیرات تعمیر و نگهداری بطور ناگهانی افزایش می‌یابد (شکل ۱۰) که دلیل آن تغییر برنامه زمانی تعمیر و نگهداری است. در بخش اول تونل، تعمیر و نگهداری ماشین حفاری مطابق با برنامه منظم انجام نشده است و معمولاً به محض برخورد به یک مشکل، گروه تعمیرات اقدام به رفع مشکل کرده است. ولیکن در سایر مترهای تونل بر اساس برنامه زمانی همواره ساعتی از شبانه‌روز جهت تعمیر و نگهداری ماشین حفاری و بازدید از کاترهد در نظر گرفته شده است.

وجود ریزش‌های متوالی در مترهای ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ می‌تواند برای TBM خطر آفرین باشد. بنابراین اپراتور جهت عبور ایمن از این زون‌ها پارامترهای حفاری از جمله سرعت چرخش کاترهد و نیروی رانش^{۱۴} را کاهش می‌دهد که منجر به افت شدید نرخ نفوذ می‌شود. به رغم اینکه ضریب بهره‌وری ماشین به دلیل اینکه زمان زیادتری را صرف حفاری می‌نماید، افزایش می‌یابد. پس با وجود اینکه در بخش اول، ضریب بهره‌وری بیشتر از بخش سوم و چهارم است اما کاهش نرخ نفوذ، باعث افت نرخ پیشروی شده است.

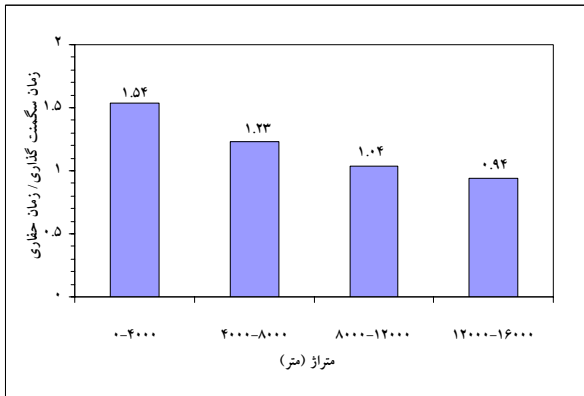
بر اساس جدول (۴) عمده تأخیرات گروه تدارکات مربوط به انتقال پرسنل^{۱۵} و حوادث پرتال است. کمبود لوکوموتیو و عملکرد ضعیف سیستم ترابری، منجر به افزایش تأخیرات تعویض شیفت در مترهای بیشتر شده است.

بارزترین حوادث پرتال در تأخیر قطار مربوط به تخلیه مصالح^{۱۶} است. با این توضیح که در مترهای اولیه تونل، به دلیل فضای محدود پرتال و نزدیکی ماشین حفاری به محل تخلیه، امکان تخلیه مصالح هم‌زمان با عملیات حفاری وجود ندارد. بنابراین حوادث پرتال در تأخیر قطار فقط در بخش اول تونل دیده می‌شود.

در گروه سیستم پشتیبان نیز تأخیر تعویض لوکوموتیو^{۱۷} (انتظار ورود قطار) در بخش چهارم تونل به بیشترین مقدار خود رسیده است. بنابراین همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده

14. Thrust
15. Shift Change
16. Unloading
17. Train Exchange

18. TBM
19. Maintenance



شکل ۱۲- کاهش تدریجی زمان نصب سگمنت به حفاری با افزایش طول مسیر

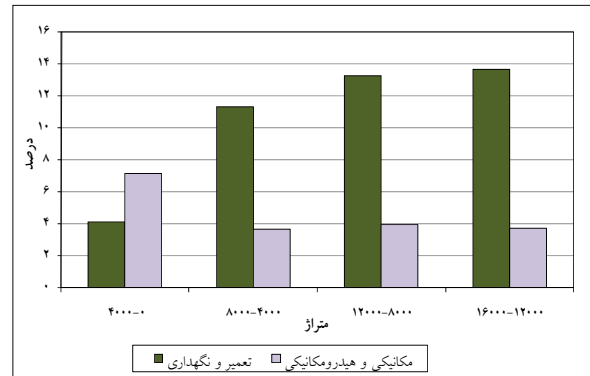
اگرچه در بخش دوم مهارت پرسنل کمتر از بخش‌های سوم و چهارم است، ولیکن در این بخش با وجود تأخیراتی از قبیل تعمیر نوار نقاله و تعویض دیسک کاتر، بهترین عملکرد ماشین دیده می‌شود که مهمترین دلایل بهبود عملکرد ماشین عبارتند از: ۱. شرایط زمین‌شناختی مناسب که شامل کیفیت مطلوب توده سنگ و نشت ناچیز آب از سینه‌کار می‌باشد. وجود مقدار جزئی آب در سینه کار، باعث کاهش مقاومت توده‌سنگ شده و نرخ نفوذ را افزایش می‌دهد. همچنین جنس توده سنگ و کیفیت مطلوب آن، درصد تولید مصالح ریزدانه را کاهش داده است که در نتیجه تأخیرات پرشدگی باکت‌ها کمتر می‌شود.

۲. بهبود مدیریت سیستم ترابری و افزایش تعداد قطارها که منجر به کاهش تأخیرات انتقال پرسنل شده است.

۳. بازدیدهای متوالی از کاترهد و تعمیر سیستم‌های مکانیکی و هیدرومکانیکی ماشین در دوره‌های منظم، منجر به کاهش تأخیرات در تعمیر و تعویض قطعات شده است.

در بخش چهارم تونل، شرایط زمین‌شناختی کاملاً متفاوت با بخش‌های دیگر است، زیرا چالش اصلی در این بخش افزایش ناگهانی نشت آب به داخل تونل می‌باشد (شکل ۳). اگرچه افزایش دبی آب به طور مستقیم تأثیر کمی بر عملکرد ماشین دارد، ولیکن می‌تواند زمان تمیزکاری کاترهد و تأخیرات مربوط به سیستم ترابری (انتقال پرسنل و انتظار ورود قطار) را افزایش دهد.

معمولاً وجود آب زیرزمینی باعث افزایش زمان تعویض تیغه می‌شود (Williams, 1997). با وجود این سرعت تعویض تیغه‌ها در بخش چهارم افزایش چشمگیری داشته است درحالی‌که تعداد تیغه‌های مصرفی در بخش‌های ۲ و ۳ و ۴

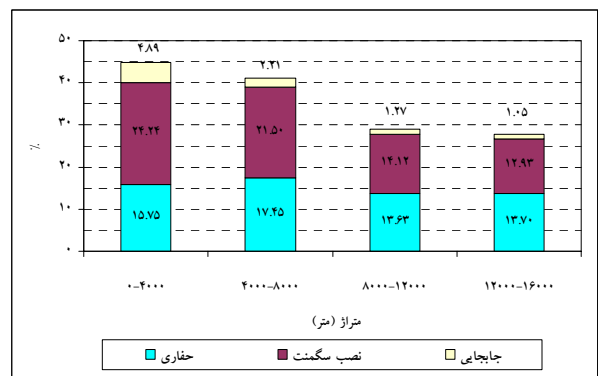


شکل ۱۰- نمودار روند تغییرات در پارامتر تعمیر و نگهداری؛ مکانیکی و هیدرومکانیکی

براساس شکل ۱۰ کاهش مشکلات مکانیکی و هیدرومکانیکی در مترژهای بیشتر می‌تواند با افزایش مهارت پرسنل رابطه مستقیم داشته باشد. به طوری که در بخش اول تونل، به دلیل عدم مهارت کافی پرسنل و سپری کردن دوره آموزشی برای ۲۱۳ روز، زمان تأخیرات مکانیکی و هیدرومکانیکی افزایش داشته است.

تأثیر منفی دوره آموزشی را می‌توان در گروه پیشروی نیز مشاهده کرد با این توضیح که در بخش اول اگرچه فعالیت گروه پیشروی^{۲۰} ماشین، بیشتر از بخش‌های دیگر تونل است ولیکن بیشترین زمان کار صرف سگمنت‌گذاری و جابه‌جایی^{۲۱} شده است و پارامتر حفاری^{۲۲} که رابطه مستقیم با ضریب بهره‌وری دارد کمتر از بخش دوم است (شکل ۱۱).

از مقایسه مدت زمان نصب یک رینگ با زمان یک کورس حفاری نیز می‌توان به افزایش مهارت پرسنل در نصب سگمنت پی برد. همانطور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود با پیشروی ماشین و افزایش طول تونل، نسبت فوق کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- توزیع زمانی پارامترهای مربوط به پیشروی ماشین

20. Advance
21. Re-stroke/Regrip TBM
22. Net boring

- علاوه بر تأثیر مستقیم شرایط زمین‌شناختی و دبی آب نشتی بر عملکرد ماشین حفاری، نباید از تأثیر آن بر سایر فعالیت‌های حفاری نادیده گرفته شود.
- با افزایش طول تونل، تأخیرات ترابری و مهارت پرسنل افزایش می‌یابد که تأخیرات ترابری در کاهش ضریب بهره‌وری و دیگری در افزایش ضریب بهره‌وری مؤثر است.
- کاربرد ابزار و تجهیزات مناسب در هر بخش از فعالیت‌های ماشین حفاری می‌تواند زمان تأخیرات را کاهش دهد که نمونه آن در مدت زمان تعویض تیغه‌ها در بخش چهارم دیده می‌شود.
- همپوشانی مشکلات ماشین حفاری منجر به افزایش نرخ پیشروی و در نتیجه بهبود عملکرد ماشین می‌شود که لازمه آن مدیریت عملیات حفاری می‌باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از آقای مهندس غلامرضا شمسی که این مقاله با مساعدت و راهنمایی ایشان تهیه شده است، تشکر و قدردانی می‌شود.

تفاوت چندانی ندارد. بررسی روند تعویض تیغه‌ها نشان می‌دهد که در بخش چهارم از ابزار و تجهیزات مناسب‌تری برای تعویض تیغه‌ها استفاده گردیده که در زمان کوتاه‌تر و روش ساده‌تر، امکان تعویض تیغه‌ها وجود داشته است (Cigla et al., 1999).

در بخش دوم تونل، به دلیل عدم بازدید دوره‌ای از کاترهد، تیغه‌های مرکزی و بخشی از کاترهد به شدت فرسایش یافت که فارغ از شرایط زمین‌شناختی منجر به افزایش تأخیرات تعویض دیسک کاتر شده است. در هر صورت با افزایش طول مسیر، عملکرد ماشین در بخش چهارم، کاهش ناچیزی نسبت به بخش سوم داشته است که مهمترین دلایل آن افزایش سرعت تعویض تیغه‌ها، کاهش تأخیرات ناشی از نصب سگمنت‌ها و تزریق پی‌گراول و همچنین عملکرد بهتر تدارکات می‌باشد.

نتیجه‌گیری

• چهار عامل اصلی افزایش طول مسیر، شرایط زمین‌شناختی، وجود آب و مهارت پرسنل را می‌توان در بهره‌وری ماشین حفاری در بخش‌های مختلف تأثیرگذار دانست.

منابع

- آرمان نوین، آ. ۱۳۸۵، پیش بینی نرخ نفوذ ماشین حفاری TBM در تونل انتقال آب کرج - تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
- موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۳، "گزارش زمین ساخت"، تهران، پروژه تونل انتقال آب کرج-تهران
- موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۴، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی"، تهران، پروژه تونل انتقال آب کرج-تهران
- Bruland, A. and Nilsen, B. 1995. Tunneling Performance Estimation Based on Drillability Testing. Rock and Mineral Engineering, pp.123
- Cigla, M., Yagiz, S., Ozdemir, L. 1999. Application of Tunnel Boring Machine in Underground Mine Development. Department of Mining Engineering, Colorado, USA
- Friant, J.E., Bauer, R.A., Gross, D.L., May, M., Lach, J. 2004. Pipestone Tunnel Construction Issues. Colorado School of Mine and Excavation Engineering Associates.
- Gansser A., Huber H. 1962. Geological Observation in the Central Elburz, Iran, Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen, 42.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamchichyan, M., Tavakoli, H.R. 2009. TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel. Rock Mechanics and Rock Engineering Journal, 43: 427-445
- Rostami, J., Ozdemir, L., Nilsen, B. 1996. Comparison between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. ISDT, Las Vegas NV.
- Kasper, T., Meschke, G. 2006. On the Influence of Face Pressure, Grouting Pressure and TBM Design in Soft Ground Tunneling, Tunneling and Underground Space Technology, 21(2):160-171
- Williams, O. 1997. Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, U.S. Army Corps Engineers, EM 1110-2-2901