

محاسبه ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه حفاری تمام مقطع TBM در سنگ‌های سخت مطالعه موردی: قطعه ۱ تونل انتقال آب قمروند

حسین شریعت علوی^{۱*}، رضا کاکایی^۲، مهدی زورآبادی^۳، بهزاد علیزاده صوری^۴، مهدی عبداللہی^۵

۱- کارشناس ارشد استخراج معدن، شرکت سایبر، شماره تماس: ۰۹۱۶۸۵۸۰۲۶۶ - ۰۹۳۵۸۰۰۲۶۲۸ E-mail: shariat600@yahoo.com

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

۳- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، شرکت علوم زمین پارس، E-mail: mehdi_zoorabadi@yahoo.com

۴- دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات E-mail: beh.alizadeh@gmail.com

۵- کارشناس عمران، شرکت سایبر E-mail: me_abdollahi@yahoo.com

(دریافت ۱۷ فروردین ۱۳۸۸، پذیرش ۲۹ آذر ۱۳۸۸)

چکیده

تونل قمروند به طول کلی ۳۵/۷ کیلومتر از جمله طرح‌های بزرگ ملی است. برای حفاری قطعه ۱ آن به طول ۱۱+۳۱۱ کیلومتر دستگاه TBM از نوع EPB انتخاب شده است. برای پیش‌بینی نرخ پیشروی و به تبع آن زمان تکمیل حفاری و هزینه‌ها، تخمین ضریب بهره‌وری بسیار حائز اهمیت است. ضریب بهره‌وری به صورت زمان خالص حفاری به کل زمان در دسترس در هر واحد زمین‌شناسی تعریف می‌شود. این ضریب تابعی از شرایط زمین، نوع ماشین، تأسیسات پشتیبانی، مدیریت پروژه و در نهایت تجربه کارکنان است. از مهمترین روش‌هایی که در جهان به منظور پیش‌بینی ضریب بهره‌وری استفاده می‌شود روش‌های NTH و CSM است. در این مقاله مدلی برای رسیدن به ضرایب بهره‌وری که به ضرایب بهره‌وری ایجاد شده در عمل نزدیک‌تر باشند ارائه شده است. سپس با استفاده از این ۳ روش ضرایب بهره‌وری در واحدهای مختلف زمین‌شناسی مسیر تونل پیش‌بینی شده و با داده‌های واقعی در ۴۵۷۰ متر که حفاری آن انجام شده مورد مقایسه قرار گرفته و زمان اتمام حفاری تونل نیز پیش‌بینی شده است. هدف از این مقاله ارائه مدلی برای تخمین دقیق‌تر ضرایب بهره‌وری و در نتیجه تصمیم‌گیری صحیح‌تر در مورد زمانبندی پروژه و پیش‌بینی درآمد و هزینه در پروژه‌های حفاری با TBM است.

کلمات کلیدی

تونل قمروند، حفاری مکانیزه، بهره‌وری، NTH، CSM، مدل جدید

۱- مقدمه

منطقه اجرای طرح بخشی از حوزه آبریز سرشاخه‌های دز واقع در استان لرستان و بخشی از حوزه قمرود واقع در استان‌های اصفهان و مرکزی است. از دیدگاه جغرافیایی گستره طرح در مختصات جغرافیایی $۴۹^{\circ}۱۳'$ تا $۴۹^{\circ}۵۳'$ طول شرقی و $۳۳^{\circ}۰۲'$ تا $۳۳^{\circ}۱۸'$ عرض شمالی واقع شده است. محل احداث تونل در استان لرستان، در فاصله تقریباً ۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان الیگودرز واقع شده است [۱].

۳- شرایط زمین‌شناسی عمومی مسیر تونل

مسیر تونل انتقال آب انوج به قمرود از دیدگاه تقسیمات زمین‌شناسی ایران در ناحیه دگرگونی سندانج- سیرجان واقع شده است. این ناحیه در شمال شرقی رو راندگی اصلی زاگرس قرار گرفته است، لیکن از نظر تاریخچه ساختاری به ایران مرکزی شباهت دارد ولی از سوی دیگر عدم فعالیت آتشفشانی سنوزوئیک و تشابه روند کلی این منطقه با زاگرس آنرا از ایران مرکزی متمایز می‌کند. بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، مسیر تونل از پیچیدگی‌ها و تغییرات زیادی برخوردار است به‌طوری‌که در این مسیر، یا زمین‌های نرم آبرفتی که شامل خاک ریزدانه اشباع که بخش اعظم آبرفت از نوع ماسه سیلتی رس‌دار تا سیلت ماسه‌ای رس‌دار است تا سنگ‌های نرم مانند شیل و شیست و اسلیت‌های زغالی و بالاخره سنگ‌های سخت‌تر مانند آهک و دولومیت‌های دگرگون شده و بعضاً سنگ‌های کوارتزی و متاولکانیک‌ها برخورد می‌شود. در تمام طول مسیر نیز خط پروژه در زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد که این خود بر پیچیدگی مسائل می‌افزاید. مقطع زمین‌شناسی تونل در شکل ۱ نشان داده شده است [۱].

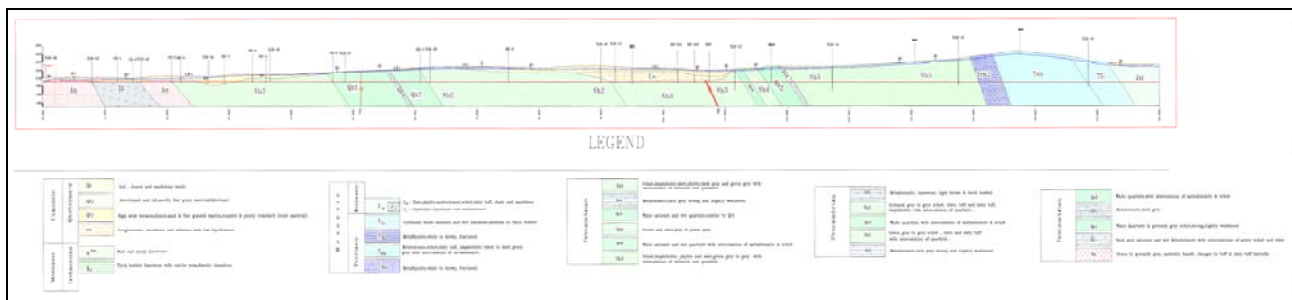
۴- مقایسه ماشین‌های حفاری مکانیزه

Double Shield TBM و EPB Single Shield TBM

مقایسه دستگاه‌های TBM تک سپره^۱ نوع EPB و TBM دو سپره^۲ از لحاظ عملکرد در ادامه آورده شده است.

تعداد برش‌دهنده‌های مورد نیاز، هزینه‌های آزمایشگاهی، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی همه از دوره ساخت پروژه و دوره ساخت پروژه از ضریب بهره‌وری و نرخ نفوذ تأثیر می‌پذیرد که تخمین این دو بسیار مشکل است. مقادیر پایین بهره‌وری در اثر حفاری در شیب، قوس‌ها و شرایط نامساعد زمین، مدیریت ضعیف و خرابی متعدد ماشین حاصل می‌شوند. از طرف دیگر مقادیر بالای بهره‌وری در تونل‌های نسبتاً مستقیم و دارای شیب کم که با مدیریت، تعمیرات و شرایط مساعد زمین همراه می‌شود بدست می‌آید. مواردی که موجب تأخیر در روند حفاری می‌شوند عبارتند از: زمان تعویض برش‌دهنده، تعمیرات زمان‌بندی شده و نشده، جلو راندن ماشین، توقف عملیات به‌خاطر نصب نگهداری یا مشکلات ترابری، قطع برق، مشکلات ناشی از تراوش آب، تعویض شیف و زمان نهار، تأخیرهای ناشی از کارگران و مسائل متفرقه دیگر. تمام این پارامترها باید برای تعیین واقعی بهره‌وری منظور شوند. از مهم‌ترین روش‌هایی که در جهان به‌منظور پیش‌بینی ضرایب بهره‌وری دستگاه‌های TBM استفاده می‌شود روش‌های NTH و CSM است. در این مقاله ابتدا میزان تأخیرها با استفاده از روش‌های NTH و CSM توضیح داده شده و مدلی برای رسیدن به ضرایب بهره‌وری واقعی تر ارائه گردیده است. سپس ضریب بهره‌وری در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل با استفاده از این سه روش و نیز زمان اتمام حفاری با در نظر گرفتن تأخیرهای هر یک از روش‌ها محاسبه شده است. در نهایت ضرایب بهره‌وری محاسبه شده با سه روش، با ضرایب بهره‌وری واقعی تا کیلومتر ۴۵۷۰ مسیر تونل که شامل ۱۰ واحد زمین‌شناسی است مقایسه گردیده است.

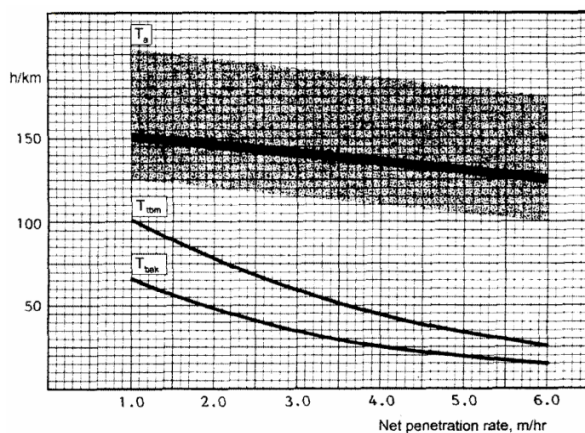
۲- موقعیت جغرافیایی تونل



شکل ۱: مقطع زمین‌شناسی قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب دز - قمرود [۱]

تعمیر و نگهداری و سرویس‌دهی TBM (T_{TBM}) و تجهیزات back-up (T_{back}): زمان مصرف شده برای تعمیر و نگهداری که به نرخ نفوذ بستگی دارد. این تأخیرات طبق شکل ۲ بدست می‌آید.

متفرقه (T_a): متفرقه شامل نگهداری معمولی سنگ در شرایط خوب سنگ، زمان مورد انتظار برای حمل و نقل، ریل گذاری و جاده، نقشه‌برداری یا حرکت دادن لیزر، آب، کابل الکتریکی، تهویه، تمیز کردن و چیزهای دیگر مثل تعویض شیفت و غیره است. T_a بر حسب ساعت بر کیلومتر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- تعمیر و نگهداری و تأخیرهای متفرقه به‌عنوان تابعی از نرخ نفوذ خالص [۴]

بهره‌وری ماشین به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۵] و [۶]:

$$u = \frac{100.T_b}{T_b + T_t + T_c + T_{ibm} + T_{bak} + T_a} \quad (1)$$

$$T_b = \frac{1000}{I} \quad (2)$$

$$T_t = \frac{1000.t_{tak}}{60.I_s} \quad (3)$$

$$T_c = \frac{1000.t_c}{60.H_h.I} \quad (4)$$

که در آن

I نرخ نفوذ خالص (m/hr)

I_s طول کورس (به طور نمونه ۱/۵ تا ۲ متر)

t_{tak} زمان گریپر زدن مجدد دستگاه (به‌طور نمونه ۴ تا ۵ دقیقه)

t_c زمان تعویض ابزار برشی (به‌طور نمونه ۴۵ تا ۶۰ دقیقه)

H_h متوسط عمر حلقه ابزار برشی (hr/cutter)

۴-۱- ماشین‌های حفر تونل تک سپره از نوع EPB دستگاه تک سپره EPB نیز نوعی ماشین single با ترکیبی بسیار پیچیده‌تر است زیرا توانایی حفر در سنگ نرم و زمین نرم و آبرفتی و سنگ سخت را دارا است. در این نوع ماشین، نیروی عکس‌العمل لازم برای جلو بردن کاترهد از تکیه دادن جک‌های تراست به پوشش تونل (سگمنت‌های نصب شده در آن) تأمین می‌شود. بنابراین سیکل کاری این ماشین، ناپیوسته است، یعنی هم‌زمان با حفاری نمی‌تواند سگمنت گذاری نماید.

۴-۲- ماشین‌های حفر تونل دو سپره

در این نوع ماشین در صورتی که زمین مقاومت مناسب را برای ایجاد رانش با کمک گریپر دارا باشد، ماشین می‌تواند به حفاری و سگمنت‌گذاری مستقل و هم‌زمان بپردازد (سیکل کاری پیوسته) و به همین دلیل سرعت حفاری ماشین‌های دو سپره به‌طور تئوریک دو برابر تک سپره است. در زمین‌های ریزشی و خرد شده که امکان گریپر زدن وجود ندارد، ماشین دو سپره دقیقاً همانند یک ماشین تک سپره پیشروی می‌کند؛ یعنی عمل حفاری با کمک ایجاد نیروی رانش توسط جک‌های انتهای سپر و سپس نصب سگمنت پس از جمع شدن بازوها و جک‌های هیدرولیکی انجام می‌شود.

۵- روش‌های موجود برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری و مدل ارائه شده

برای محاسبه ضرایب بهره‌وری در واحدهای مختلف زمین‌شناسی قطعه ۱ مسیر تونل از روش‌های NTH، CSM و مدل جدید ارائه شده استفاده شده که در ادامه به بحث در مورد آنها پرداخته شده است.

۵-۱- روش NTH

بهره‌وری ماشین، مدت زمان حفاری خالص هست که بر حسب درصدی از مدت زمان کلی تونل‌سازی است. مدت زمان کلی تونل‌سازی عبارتست از [۴]:

زمان حفاری (T_b): که به نرخ نفوذ بستگی دارد.

زمان گریپر زدن مجدد دستگاه (T_t): که بستگی به طول کورس دارد و معمولاً برای ۱/۵ تا ۲ متر میانگین ۴ تا ۵ دقیقه است. این تأخیر در دستگاه‌های Double Shield مطرح است.

زمان تعویض ابزار برشی و بازدید (T_c): که بستگی به عمر حلقه ابزار برشی و نرخ نفوذ خالص دارد. زمان مورد نیاز برای تعویض ابزار برشی ممکن است از ۳۰ تا ۶۰ دقیقه به ازای هر ابزار برشی تغییر کند.

۵-۲- روش CSM

این روش تأخیرهای پیش آمده در حین حفاری را به صورت زیر در نظر می‌گیرد [۷].

زمان مورد نیاز جهت تعویض برش‌دهنده می‌تواند به صورت درصدی از شیفت بیان گردد. برای سنگ‌های غیر ساینده این زمان حدود ۳٪ شیفت و برای سنگ‌های خیلی ساینده حدود ۲۰٪ است. تأخیر ناشی از تعویض برش‌دهنده می‌تواند برای یک متر حفاری نیز بیان شود. در سنگ‌های غیرساینده این زمان ۰/۰۵-۰/۰۲ ساعت بر متر (hr/m) و در سنگ‌های خیلی ساینده ۰/۲ ساعت بر متر (hr/m) است.

در قوس‌ها عمر برش‌دهنده کاهش می‌یابد. CSM معادله‌ای را جهت توصیف اثر قوس‌ها روی عمر برش‌دهنده ارائه کرده است.

$$f_2 = 1.23 / R \quad (5)$$

CSM از فاکتور اصلاحی f_2 که در عمر نرمال برش‌دهنده ضرب می‌شود، جهت بدست آوردن عمر برش‌دهنده در مناطق منحنی شکل استفاده می‌کند.

$$f_3 = (hr/m) = 0.030(hr/m) + 409(m.hr) / R^2 \quad (6)$$

فاکتور f_3 برای منظور کردن تأخیرهای ناشی از جلو راندن ماشین، توسط CSM به صورت زیر پیشنهاد شده است. این تأخیر نیز در مورد دستگاه‌های Double Shield مطرح است.

CSM برای منظور کردن تعمیرات خارج از برنامه زمان بندی، فاکتور تصحیح f_4 را به صورت زیر معرفی می‌کند.

f_4 برابر یک ساعت بازای ۱ ساعت حفاری با ماشین در مرحله آغازین حفاری (کارگران بدون تجربه)

f_4 برابر ۰/۳۲۴ ساعت بازای ۱ ساعت حفاری ماشین بعد از آغاز حفاری (کسب تجربه)

تعمیرات زمان بندی شده، بررسی کاترهد و روغن‌کاری، حدود ۰/۰۶۷ ساعت تأخیر در ۱ ساعت حفاری با TBM ایجاد می‌کند.

تأخیرات ناشی از عملیات نقشه برداری برای تونل‌های مستقیم، ۰/۰۳۳ ساعت بر متر حفاری شده از تونل است.

$$SurveyDelay(hr/m) = 0.0033 + 192 / R^2 \quad (7)$$

برای قوس‌ها تأخیر ناشی از نقشه برداری از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

R شعاع قوس به متر است.

برای مقادیر ناچیز تراوش آب، تأخیر وابسته به آن حدود ۰/۰۵۶ ساعت بر متر حفاری شده از تونل است. در شرایطی که تراوش آب حدود ۳-۴ متر مکعب بر دقیقه در یک متر تونل است، تأخیر ناشی از وجود آب حدود ۰/۰۸۵ ساعت بر متر حفاری شده از تونل است. در نرخ‌های تراوش بالاتر ($15m^3/min/m$) که عملیات تزریق نیز صورت می‌گیرد، این تأخیر تا ۲ ساعت بر متر حفاری شده از تونل می‌رسد. تأخیرات ناشی از سیستم ترابری می‌تواند با توجه به شیب تونل، جهت حفاری و سیستم ترابری مورد استفاده تعیین گردد در جدول ۱ برخی راهنمایی‌های کلی در این مورد آورده شده است.

جدول ۱: تأخیرات ناشی از سیستم ترابری [۷]

توصیف تونل	سیستم ترابری	تأخیر hr/m
آغاز حفاری مرحله تولید	کامیون	۰/۱۱۵
۱۵- تا ۱- درجه رو به پایین	نوار نقاله	۰/۰۷۱
۱- تا ۳+ درجه	واگن و ریل	۰/۰۵۵
۱۵+ تا ۳+ درجه رو به بالا	نوار نقاله	۰/۰۷۱

$$Utility\ Delays(hr/m\ of\ tunnel) = 0/030 + 0/0013G \quad (8)$$

تأخیرات ناشی از خدمات رسانی نیز به شیب تونل بستگی دارد و به صورت رابطه (۸) تعیین می‌شود. G شیب تونل و واحد آن درجه است.

تأخیرات ناشی از نصب پوشش موقت تابعی از کیفیت توده سنگ است. در روش CSM از رده بندی RMR برای تعیین تأخیر ناشی از نصب نگهداری استفاده شده که در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: تأخیرات ناشی از نصب پوشش [۷]

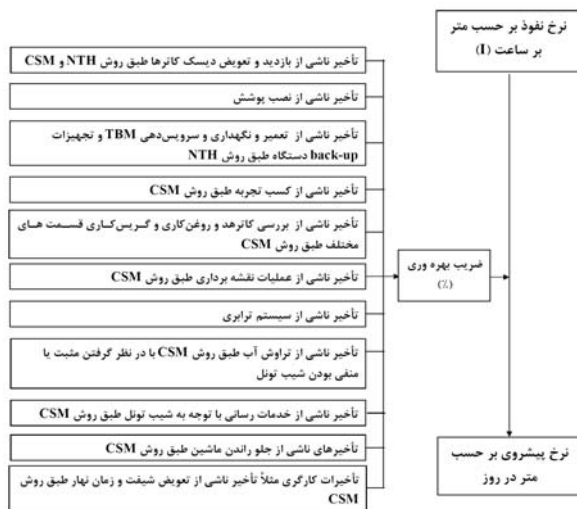
RMR	تأخیر (ساعت بر متر حفاری شده از تونل)
I	.
II	.
III	.
IV	۰/۰۲۸
V	۰/۰۴۳

تأخیرات کارگری مثلاً تأخیر ناشی از تعویض شیفت و زمان نهار نیز باید ارزیابی گردد. CSM منظور کردن حدود ۲٪ از کل زمان شیفت را برای این تأخیرها پیشنهاد می‌کند.

۵-۳- مدل ارائه شده جدید

با توجه به اینکه روش CSM تمامی تأخیرهای متفرقه را با دقت بیشتری شامل می‌شود بنابراین با بکار بردن ترکیبی از

مدل در نظر گرفته شده بدین منظور به صورت فلوجارتی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳: فلوجارت کلی مدل جدید ارائه شده

۴-۵- معایب روش‌های NTH و CSM به‌منظور تخمین ضریب بهره‌وری

روش NTH تأخیر ناشی از نصب سیستم نگهداری را در قالب تأخیرهای متفرقه که بسیار پایین تر از آنچه در واقعیت است در نظر می‌گیرد ضمن اینکه توضیح دقیقی در مورد تأخیر ناشی از نصب سیستم نگهداری و مقدار آن در این روش ذکر نشده است. تأخیرهای متفرقه‌ای که در روش CSM توضیح داده شده مقدار هر یک از آنها در روش NTH مشخص نیست و تأخیرات متفرقه کلی در نظر گرفته شده و مقدار آن بسیار پایین تر از واقعیت است. به عبارتی این روش راندمان و نرخ پیشروی بالایی را پیش‌بینی می‌کند. لازم به ذکر است که در تخمین ضریب بهره‌وری با استفاده از روش NTH مقدار تأخیر ناشی از نصب سگمنت ۲۰ تا ۲۵ دقیقه بازای هر سیکل حفاری که در عمل ثبت شده در نظر گرفته شده است.

روش CSM نیز برخی از تأخیرها از جمله تعمیرات دستگاه TBM و قسمت Back Up آنرا در نظر نمی‌گیرد که زمان قابل توجهی را در پروژه‌های حفاری با TBM به خود اختصاص می‌دهد و ضمناً زمان در نظر گرفته شده به‌منظور نصب سیستم نگهداری (سگمنت) با استفاده از این روش در مورد دستگاه‌های تک سپره که سیکل کاری آنها به‌صورت ناپیوسته است بسیار پایین است در صورتی که در واقعیت زمانی چندین برابر زمان در نظر گرفته شده صرف انجام این کار می‌شود.

تأخیرهای روش NTH و CSM با هم، یعنی تأخیرهای روش NTH و در نظر گرفتن تأخیرهای متفرقه با استفاده از روش CSM، مدلی جدید برای محاسبه ضرایب بهره‌وری در واحدهای مختلف زمین‌شناسی مسیر تونل ارائه شده است.

۵-۳-۱- تأخیرهای مدل

تأخیر ناشی از بازدید و تعویض دیسک کاترها طبق روش CSM و NTH تأخیر ناشی از تعمیر و نگهداری و سرویس‌دهی TBM و تجهیزات back-up دستگاه طبق شکل ۲ در روش NTH تأخیر ناشی از نصب پوشش (سگمنت) که در این رابطه هیچیک از روش‌های NTH و CSM مقدار صحیحی در نظر نمی‌گیرد زیرا روش NTH این تأخیر را لحاظ نکرده است و روش CSM نیز در ماکزیمم مقدار ۰/۰۴۳ ساعت بر متر حفاری شده از تونل در نظر می‌گیرد یعنی برای هر سیکل پیشروی در قطعه ۱ تونل که ۱/۳ متر است تنها ۳/۳۵ دقیقه در نظر می‌گیرد این در حالیست که بازای نصب کامل هر رینگ سگمنت زمانی در حدود ۲۰ تا ۲۵ دقیقه صرف می‌شود. البته در دستگاه‌های Double Shield هنگامی که دستگاه به‌صورت پیوسته حفاری می‌کند زمان این تأخیر صفر در نظر گرفته می‌شود.

تأخیر ناشی از کسب تجربه طبق روش CSM که این تأخیر شامل کسب تجربه لازم در هر زون زمین‌شناسی و همچنین کسب تجربه در مورد تعمیر و نگهداری و سرویس‌دهی TBM و تجهیزات back-up آن و بررسی کاترهد است.

تأخیر ناشی از بررسی کاترهد و روغن کاری و گریس کاری قسمت‌های مختلف طبق روش CSM

تأخیر ناشی از عملیات نقشه برداری طبق روش CSM تأخیر ناشی از سیستم ترازوی تا قبل از نصب سوئیچ کالیفرنیا ۰/۰۵۵ ساعت بر متر حفاری شده از تونل و بعد از نصب سوئیچ کالیفرنیا ۰/۰۳۵ ساعت بر متر حفاری شده از تونل لحاظ می‌شود.

تأخیر ناشی از تراوش آب طبق روش CSM با در نظر گرفتن مثبت یا منفی بودن شیب تونل تأخیر ناشی از خدمات رسانی با توجه به شیب تونل طبق روش CSM

تأخیرهای ناشی از جلوگیری از جلو راندن ماشین که در مورد دستگاه‌های Double Shield مطرح است.

تأخیرات کارگری مثلاً تأخیر ناشی از تعویض شیفت و زمان بهار طبق روش CSM

۵-۵- مزایای مدل جدید

مدل ارائه شده جدید که بصورت ترکیبی است تأخیرات ناشی از نصب سیستم نگهداری را بین ۲۰ تا ۲۵ دقیقه بازای هر سیکل حفاری با توجه به داده‌های ثبت شده در نظر می‌گیرد که این تأخیر در دستگاه‌های دو سپره هنگامی که شرایط زمین مساعد است و دستگاه به‌صورت پیوسته حفاری می‌کند صفر در نظر گرفته می‌شود. تأخیرات متفرقه‌ای که در روش CSM به‌طور کامل در نظر گرفته شده‌اند در این مدل لحاظ شده است. تعمیرات دستگاه TBM و قسمت Back Up آن نیز در این روش لحاظ شده‌اند. تأخیر ناشی از سیستم ترابری نیز با لحاظ کردن نصب و یا عدم نصب سوئیچ کالیفرنیا در نظر گرفته شده است. تأخیر ناشی از مثبت یا منفی بودن شیب تونل نیز در این روش به حساب آورده شده است.

۶- تخمین ضریب بهره‌وری برای واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل

واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۱) در جدول ۳ آورده شده است. به‌منظور تخمین ضریب بهره‌وری ابتدا بایستی مقدار نرخ نفوذ در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل پیش‌بینی شده که بدین منظور از روش NTH که بر اساس ۲۳۰ کیلومتر تونلسازی است استفاده شده است.

۶-۱- روش NTH برای محاسبه نرخ نفوذ

این روش به‌طور خلاصه در قالب فلوچارتی در شکل ۴ و پارامترهای مربوطه نیز در ادامه آورده شده است.

DRI^۳: شاخص نرخ حفاری است که برای تعدادی سنگ در شکل ۵ نشان داده شده است.

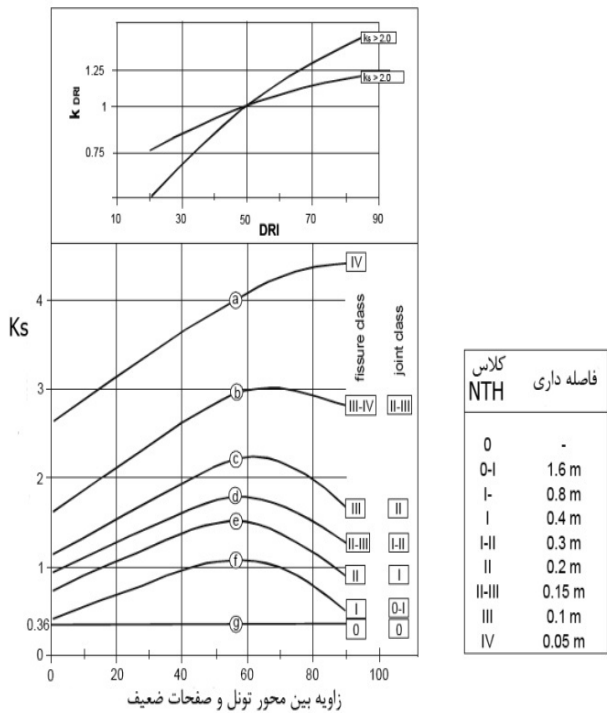
علاوه بر شکل ۵ روش آزمایشگاهی نیز برای تعیین DRI دقیق‌تر موجود است.

فاکتور شکستگی^۴ (K_S): اثر کلاس شکستگی و زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف را با هم ترکیب می‌کند که در شکل ۶ نشان داده شده است. فاکتور K_S در فرمولی برای محاسبه نرخ نفوذ استفاده می‌شود [۷].

جدول ۳: واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (قطعه ۱) [۱]

متراژ (m)	نام واحد	توده سنگ‌های مسیر تونل
۰-۳۵۰	An	آندزیت
۳۵۰-۸۰۰	GSch1	شیست متوسط با سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده
۸۰۰-۹۱۹	GSch2	شیست ضعیف با سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده
۹۱۹-۱۹۰۰	all	آبرفت (ماسه سیلتی رس دار تا سیلت ماسه ای رس دار)
۱۹۰۰-۲۳۰۰	GSch3	شیست، متاکوارتزیت، متاگرانودیوریت و متادیوریت همراه با زون‌های خرد شده نسبتاً زیاد
۲۳۰۰-۳۱۰۰	all	آبرفت (ماسه سیلتی رس دار تا سیلت ماسه ای رس دار)
۳۱۰۰-۳۲۵۰	GSch4	شیست دارای زون‌های شکسته و خرد شده به‌همراه متاکوارتزیت مقاوم
۳۲۵۰-۳۵۰۰	GSch5	شیست دارای زون‌های شکسته و خرد شده به‌همراه متاکوارتزیت مقاوم
۳۵۰۰-۳۶۵۰	GSch4	شیست دارای زون‌های شکسته و خرد شده به‌همراه متاکوارتزیت مقاوم
۳۶۵۰-۴۶۵۰	MQ	متاکوارتزیت مقاوم با میان لایه‌های شیست با مقاومت متوسط
۴۶۵۰-۶۳۰۰	ML	سنگ آهک متامورفیک و متادیوریت با کیفیت بالا به‌همراه میان لایه‌های شیستی
۶۳۰۰-۶۷۰۰	GSch6	شیست با کیفیت متوسط
۶۷۰۰-۷۴۵۰	GSch7	شیست با کیفیت پایین و بسیار خرد شده شبیه به آبرفت
۷۴۵۰-۸۷۰۰	GSch8	شیست با کیفیت متوسط به بالا
۸۷۰۰-۹۵۰۰	Sh3	شیست و اسلیت
۹۵۰۰-۹۹۰۰	QLa	گل‌سنگ، ماسه سنگ و کلنگلومرا
۹۹۰۰-۱۰۶۰۰	Shc	شیست و اسلیت زغال‌دار
۱۰۶۰۰-۱۰۸۸۶	Sh3	شیست و اسلیت
۱۰۸۸۶-۱۱۰۴۴	MDL4	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۱۱۰۴۴-۱۱۳۱۱	AS1	آمفیبولیت شیست

K_S که از شکل ۶ تعیین می‌شود، مربوط به سنگی با $DRI=49$ است و برای مقادیر دیگر DRI می‌بایست از یک فاکتور تصحیح دیگری به نام K_{DRI} استفاده کرد. برای تعیین K_{DRI} می‌توان از نمودار شکل ۶ استفاده کرد [۵].



شکل ۶: درجه بندی فاکتور درزه‌داری K_S به‌عنوان یک تابع از فاصله‌داری درزه‌ها و شکاف‌ها، تعدیل K_S برای دیگر مقادیر DRI نسبت به ۴۹ است [۹]

جدول ۴: نیروی عمودی مجاز روی ابزار برشی [۴]

ماکزیمم نیروی عمودی روی ابزار برشی (KN)	قطر ابزار برشی	
	in	mm
۱۴۰-۱۶۰	۱۴	۳۵۶
۱۸۰-۲۰۰	۱۵/۵	۳۹۴
۲۲۰-۲۴۰	۱۷	۴۳۲
۲۸۰-۳۰۰	۱۹	۴۸۳

برای قطرهای ابزار برشی متفاوت از ۴۸۳ mm و میانگین فاصله ابزارهای برشی متفاوت از ۷۰ mm، نیروی عمودی معادل با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود [۴].

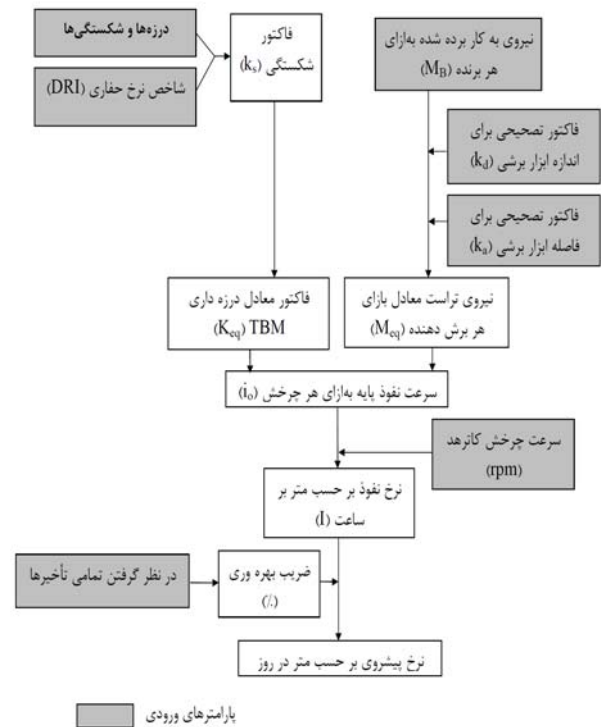
$$M_{eqv} = M_B \times K_d \times K_a \quad (KN / Cutter) \quad (10)$$

K_d فاکتور تصحیح قطر ابزار برشی، K_a فاکتور تصحیح فاصله بین ابزار برشی است.

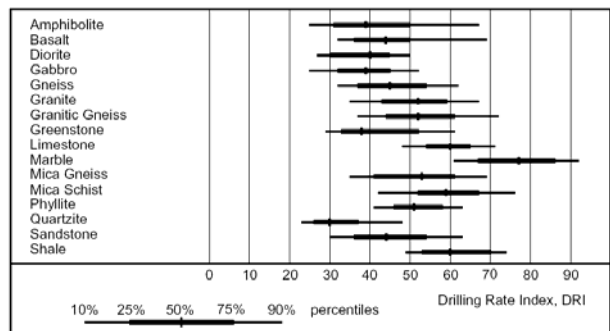
برای به‌دست آوردن فاکتورهای K_d و K_a می‌توان از روابط ۱۱ و ۱۲ استفاده کرد.

$$K_d = 2.35 - 0.0028 D_c \quad (11)$$

$$K_a = 1.35 - 0.005 S_c \quad (12)$$



شکل ۴: فلوجارت کلی روش NTH (After Bruland, 1998)



شکل ۵: DRI ثبت شده برای انواع مختلف سنگ [۵]

فاکتور شکستگی معادل $(K_{eqv})^5$: مشخصات توده سنگ را به‌عنوان فاکتور شکستگی K_S تنظیم شده برای مقدار DRI بیان می‌کند [۴].

$$K_{eqv} = K_S \times K_{DRI} \quad (9)$$

نیروی عمودی (تراست) $(M_B)^6$: نیروی عمودی ناخالص TBM که بر روی تعداد ابزار برشی تقسیم می‌شود. بنابراین محاسبه عملی نیروی تراست در این مدل، به معنی میانگین نیروی عمودی همه ابزار برشی روی کاترهد (KN/cutter) است [۴].

حداکثر میانگین نیروی عمودی ناخالص توصیه شده برای TBM با قطرهای مختلف ابزار برشی در جدول ۴ نشان داده شده است.

که S_c و D_c به ترتیب قطر و فاصله بین ابزار برشی بر حسب میلی متر می باشند.

نرخ نفوذ پایه $(i_o)^y$: بعد از بدست آوردن پارامترهای ذکر شده در بالا حال می توان i_o یعنی نرخ نفوذ پایه بر حسب میلی متر بازای هر دور چرخش را از رابطه ۱۳ محاسبه کرد [۹].
برای $K_{eq} < 3.5$ داریم:

$$i_o = F \times K_{eq}^G \quad (13)$$

$$F = 0.0015 M_{eq}^{1.5} \quad (14)$$

$$G = 30 K_{eq}^{-0.5} \times M_{eq}^{-0.8} \quad (15)$$

$$i_o = 0.03 M_{eq} \times K_{eq}^{0.18} \quad (16)$$

برای $K_{eq} > 3.5$ نیز می توان از رابطه تقریبی ۱۶ استفاده کرد.

نرخ نفوذ خالص (I) : نرخ نفوذ خالص تابعی از نفوذ پایه و سرعت چرخش کاترهد است [۴].

$$I = i_o \times rpm \times (60/1000) \quad (m/hr) \quad (17)$$

rpm: سرعت چرخش کاترهد بر حسب دور بر دقیقه

۶-۱-۱- محاسبه نرخ نفوذ در واحدهای مختلف زمین شناسی قطعه ۱ مسیر تونل

نرخ نفوذهای پیش بینی شده برای هر یک از واحدهای مسیر، با استفاده از روش NTH در جدول ۵ آورده شده است [۳] و [۵]. نرخ نفوذهای واقعی بدست آمده در ۱۰ واحد زمین شناسی ابتدای مسیر تونل که حفاری آن به اتمام رسیده است نیز در جدول ۵ نشان داده شده است [۲]. نتایج حاکی از این مطلب است که نرخ نفوذهای پیش بینی شده با استفاده از روش NTH تطابق خوبی با واقعیت دارد و نتایج آن مورد اطمینان است.

لازم به ذکر است که در طولی از مسیر تونل که از مناطق آبرفتی عبور می کند روش های NTH و CSM قادر به پیش بینی نرخ نفوذ نمی باشند زیرا Q (شاخص کیفیت توده سنگ) و درزه و ناپیوستگی برای این مناطق تعریف نمی شود، در نتیجه برای محاسبه نرخ نفوذ در این مناطق به صورت زیر عمل شده است.

در واحدهای آبرفتی میزان نفوذ واقعی حدود ۲۰ تا ۵۰ میلی متر در دقیقه است. در این نوع زمین ها به دلیل تأخیرات ناشی از محدود شدن سرعت حفاری (از آن جایی که در آبرفت ها، TBM به صورت روش بسته^۱ یا نیمه بسته^{۱۰} کار می کند) و به منظور کاهش میزان گشتاور^{۱۱} و جریان برق مصرفی، میزان نیروی عمودی کاهش می یابد و در مجموع پیشروی نیز کاهش می یابد [۸].

به عبارتی با در نظر گرفتن میانگین این مقدار یعنی ۳۵ میلی متر در دقیقه، آن گاه نرخ نفوذ معادل ۲/۱ متر بر ساعت می شود و با در نظر گرفتن ضریب بهره وری ۱۶ تا ۲۰ درصد، که بستگی به نوع خاک و میزان چسبندگی آن و مقدار نفوذ آب و میزان تجربه کارکنان دارد، مقدار نرخ پیشروی روزانه در واحدهای آبرفتی برابر با ۸/۰۶ تا ۱۰/۰۸ متر در روز خواهد بود. در عمل نیز مقدار نرخ پیشروی روزانه در حدود ۷-۱۰ متر در روز به دست آورده شده است. در جدول ۵ نیز نرخ نفوذ در واحدهای آبرفتی ۲/۱ متر بر ساعت و ضریب بهره وری به ترتیب ۱۷ و ۱۹ درصد در نظر گرفته شده است. بالا بودن ضریب بهره وری در واحد آبرفتی دوم به علت کسب تجربه لازم در زون آبرفتی اول است.

۶-۲- محاسبه ضرایب بهره وری با استفاده از روش های NTH و CSM و مدل ارائه شده جدید

در این قسمت با استفاده از روش های NTH، CSM و مدل ارائه شده جدید و تأخیرهای مطرح شده در هر یک از این روش ها، به تعیین ضریب بهره وری در هر یک از واحدهای زمین شناسی مسیر تونل پرداخته شد و نرخ پیشروی روزانه از حاصل ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره وری برآورد شده است که نتایج نرخ نفوذهای پیش بینی شده، نرخ نفوذهای واقعی تا متر ۴۵۷۰، ضرایب بهره وری و نرخ پیشروی های روزانه پیش بینی شده مسیر تونل در جدول ۵ آورده شده است.

با استفاده از ضرایب بهره وری و نرخ پیشروی های روزانه برآورد شده در جدول ۵ و با در نظر گرفتن ۳۰۰ روز کاری در سال (هر روز کاری شامل ۳ شیفت ۸ ساعته است که در روزهای جمعه بصورت یک در میان ۲ شیفت کاری تعطیل است و در یک شیفت حفاری انجام می شود و در هفته در ۲ شیفت کاری نیز عملیات تعمیر و نگهداری دستگاه طبق مدارک و کاتالوگ سازنده دستگاه TBM صورت می پذیرد. به عبارتی در هر ۲ هفته در ۶ شیفت و در هر سال در ۱۵۶ شیفت عملیات حفاری صورت نمی گیرد. مدت ۱۳ روز یعنی ۳۹ شیفت نیز به منظور چند روز اول تعطیلات در عید نوروز، برخی از تعطیلات رسمی کشور و بازدیدهایی که در طول سال

$$T_m = (1/3.03) \times 1650 \times 0.067 = 36.5 \text{ hr}$$

تأخیرات ناشی از عملیات نقشه برداری طبق رابطه ۷:

$$T_{Survey Delay} = 0.0033 \times 1650 = 5.45 \text{ hr}$$

تأخیر ناشی از سیستم ترابری با توجه به اینکه قبل از شروع به حفاری واحد ML سوئیچ کالیفرنیا در تونل نصب شده است.

$$T_t = 0.035 \times 1650 = 57.75 \text{ hr}$$

تأخیر ناشی از تراوش آب طبق روش CSM:

$$T_w = 0.085 \times 1650 = 140.25 \text{ hr}$$

تأخیرات ناشی از خدمات رسانی طبق رابطه (۸):

$$T_{Utility delays} = (0.030 + 0.0013 \times 0.0750) \times 1650 = 49.66 \text{ hr}$$

تأخیرات کارگری مثلاً تأخیر ناشی از تعویض شیفت و زمان نهار طبق روش CSM:

$$T_s = (1/3.03) \times 1650 \times 0.02 \times 8 = 87.16 \text{ hr}$$

تأخیرهای ناشی از جلو راندن ماشین که این تأخیر در مورد دستگاه‌های Double Shield مطرح است.

زمان کل تأخیرهای بدست آورده شده برابر است با:

$$T_{Delays} = 48.45 + 99 + 57.75 + 486.5 + 721.3 + 36.5 + 5.45 + 57.75 + 140.25 + 49.66 + 87.16 = 1789.77 \text{ hr}$$

در نتیجه بهره وری برابر خواهد بود با:

$$u = \frac{544.75}{544.75 + 1789.77} \times 100 = 23 - 1 = 22\%$$

۱ درصد از ضریب بهره‌وری به خاطر منفی بودن شیب تونل و مشکلات ناشی از آن کاسته شده است.

بعد از پیش‌بینی ضرایب بهره‌وری و نرخ پیشروی‌های روزانه توسط روش‌های NTH و CSM و روش جدید، برای مشخص شدن این‌که نتایج کدامیک از این روش‌ها دقیق‌تر است لازم است که مقدارهای برآورد شده با مقدارهای واقعی مقایسه گردد.

توسط مقامات رسمی کشور صورت می‌پذیرد در نظر گرفته شده است. بنابراین در طول سال در ۱۹۵ شیفت (۶۵ روز) عملیات حفاری صورت نمی‌گیرد) زمان لازم برای حفاری ۶۷۴۱ متر باقیمانده مسیر تونل و متوسط ضریب بهره‌وری مطابق جدول ۶ پیش‌بینی شده است.

درصد هر یک از تأخیرها در حالت در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای روش NTH و تأخیرهای متفرقه لحاظ شده در روش CSM (مدل ارائه شده جدید) در واحد زمین شناسی ML در شکل ۷ نشان داده شده و طریقه محاسبات نیز در واحد مربوطه در ادامه آورده شده است.

نرخ نفوذ محاسبه شده در واحد ML، ۳/۰۳ متر بر ساعت طبق روش NTH بدست آورده شده است.

زمان حفاری و تأخیرات لحاظ شده در واحد ML به طول ۱۶۵۰ متر به صورت زیر می‌باشد:

زمان حفاری:

$$T_b = (1/3.03) \times 1650 = 544.75 \text{ hr}$$

زمان مورد نیاز جهت تعویض برش‌دهنده‌ها می‌تواند طبق روش NTH و یا CSM به صورت زیر محاسبه گردد. H_h متوسط عمر حلقه ابزار برشی می‌باشد که با استفاده از روش NTH بدست آورده می‌شود و از ذکر جزئیات آن در این تحقیق صرف‌نظر شده است.

$$T_c = \frac{1000.t_c}{60.H_h.I} = \frac{1000 \times 55}{60 \times 10.31 \times 3.03} \times 1.650 = 48.45 \text{ hr}$$

$$T_C = 0.03 \times 1650 = 49.5 \text{ hr}$$

طبق شکل ۲ با توجه به اینکه نرخ نفوذ محاسبه شده ۳/۰۳ می‌باشد در نتیجه $T_{TBM}=60$ و $T_{back}=35$ بدست می‌آید که به صورت زیر زمان تأخیر ناشی از تعمیر و نگهداری و سرویس‌دهی TBM (T_{TBM}) و تجهیزات back-up (T_{back}) بدست می‌آید.

$$T_{TBM} = 60 / 1000 \times 1650 = 99 \text{ hr}$$

$$T_{back} = 35 / 1000 \times 1650 = 57.75 \text{ hr}$$

تأخیر ناشی از نصب پوشش:

$$T_l = (1650/1.3) \times (23/60) = 486.5 \text{ hr}$$

تأخیر ناشی از کسب تجربه طبق روش CSM:

$$T_e = (1/3.03) \times 1650 \times 1.324 = 721.3 \text{ hr}$$

تأخیر ناشی از تعمیرات، بررسی کاترهد و روغن‌کاری طبق روش CSM

جدول ۵: نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه پیش‌بینی شده در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های NTH، CSM و مدل ارائه شده جدید [۳]

مدل ارائه شده جدید		CSM روش		NTH روش		نرخ نفوذ (m/hr) نرخ پیشروی روش NTH	نرخ نفوذ (m/hr) نتایج واقعی	م(متر) ()	نام واحد زمین شناسی
نرخ پیشروی روزانه (m/day)	ضریب بهره وری (%)	نرخ پیشروی روزانه (m/day)	ضریب بهره وری (%)	نرخ پیشروی روزانه (m/day)	ضریب بهره وری (%)				
۱۵/۰۹	۲۵	۱۸/۹۰	۳۲	۲۴/۲۷	۴۰	۲/۶۳	۲/۵۰	۰-۳۵۰	An
۱۲/۴۱	۱۸	۱۶/۱۳	۲۴	۲۶/۲۶	۳۸	۲/۲۴	۲/۸۶	۳۵۰-۸۰۰	GSch1
۱۰/۰۹	۱۴	۱۳/۴۵	۱۹	۲۷/۰۷	۳۷	۲/۹۱	۳/۰۳	۸۰۰-۹۱۹	GSch2
۸/۵۷	۱۷	۸/۵۷	۱۷	۸/۵۷	۱۷	۱/۸	۲/۱۰	۹۱۹-۱۹۰۰	all
۱۶/۰۷	۲۳	۲۰/۳۱	۲۹	۲۶/۴۶	۳۷	۲/۹۸	۲/۹۷	۱۹۰۰-۲۳۰۰	GSch3
۹/۵۸	۱۹	۹/۵۸	۱۹	۹/۵۸	۱۹	۱/۹۵	۲/۱۰	۲۳۰۰-۳۱۰۰	all
۱۵/۹۶	۲۳	۱۹/۴۰	۲۸	۲۶/۲۸	۳۷	۲/۵۲	۲/۹۴	۳۱۰۰-۳۲۵۰	GSch4
۱۶/۰۵	۲۳	۱۹/۶۰	۲۸	۲۶/۴۲	۳۷	۲/۷۴	۲/۹۷	۳۲۵۰-۳۵۰۰	GSch5
۱۵/۹۶	۲۳	۱۹/۴۰	۲۸	۲۶/۲۸	۳۷	۲/۶۷	۲/۹۴	۳۵۰۰-۳۶۵۰	GSch4
۱۴/۹۴	۲۳	۱۸/۴۷	۲۹	۲۴/۸۰	۳۸	۲/۶۶	۲/۷۰	۳۶۵۰-۴۶۵۰	MQ
۱۶/۳۳	۲۲	۱۷/۸۲	۲۵	۲۶/۸۹	۳۷	حفاری نشده است	۳/۰۳	۴۶۵۰-۶۳۰۰	ML
۹/۸۱	۱۴	۱۳/۲۹	۲۰	۲۶/۱۱	۳۸	حفاری نشده است	۲/۸۴	۶۳۰۰-۶۷۰۰	GSch6
۱۱/۲۰	۱۲	۱۵/۸۸	۱۷	۳۱/۰۴	۳۲	حفاری نشده است	۴/۰۱	۶۷۰۰-۷۴۵۰	GSch7
۱۶/۲۹	۲۴	۱۴/۳۴	۲۲	۲۵/۷۹	۳۹	حفاری نشده است	۲/۷۸	۷۴۵۰-۸۷۰۰	GSch8
۱۶/۱۹	۲۲	۱۹/۸۷	۲۸	۲۶/۶۱	۳۷	حفاری نشده است	۳/۰۱	۸۷۰۰-۹۵۰۰	Sh3
۱۹/۵۶	۲۰	۲۴/۵۴	۲۶	۳۱/۱۶	۳۲	حفاری نشده است	۴/۰۱	۹۵۰۰-۹۹۰۰	Qla
۱۷/۹۸	۲۱	۲۲/۴۵	۲۷	۲۹/۰۳	۳۴	حفاری نشده است	۳/۵۳	۹۹۰۰-۱۰۶۰۰	Shc
۱۶/۱۹	۲۲	۱۹/۸۷	۲۸	۲۶/۶۱	۳۷	حفاری نشده است	۳/۰۱	۱۰۶۰۰-۱۰۸۸۶	Sh3
۲۰/۳۷	۲۰	۲۵/۲۸	۲۵	۳۲/۳۱	۳۱	حفاری نشده است	۴/۳۰	۱۰۸۸۶-۱۱۰۴۴	MDL 4
۹/۸۷	۱۴	۱۳/۴۸	۲۰	۲۶/۲۶	۳۸	حفاری نشده است	۲/۸۸	۱۱۰۴۴-۱۱۳۱۱	AS1

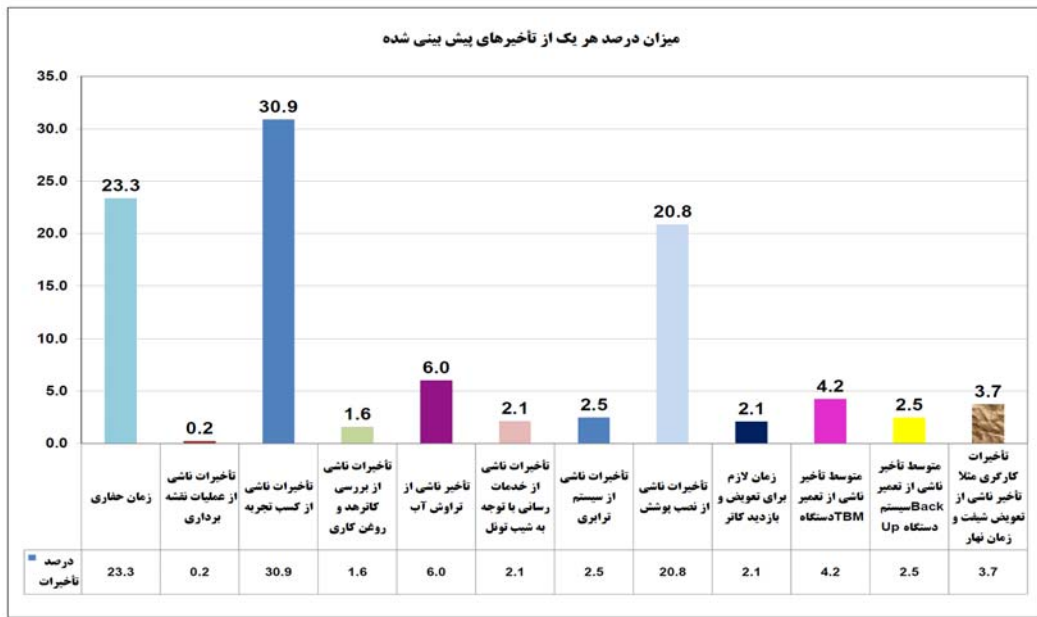
جدول ۶: متوسط ضریب بهره‌وری و زمان لازم پیش‌بینی شده برای حفاری ۱۱۳۱۱ متر و ۶۷۴۱ متر باقیمانده مسیر تونل با استفاده از روش‌های NTH و CSM و مدل ارائه شده جدید

مدت زمان لازم برای حفاری (ماه)	متوسط بهره‌وری برای ۶۷۴۱ متر باقیمانده تونل (%)	مدت زمان لازم برای حفاری ۱۱۳۱۱ متر (ماه)	متوسط بهره‌وری برای ۱۱۳۱۱ متر (%)	با در نظر گرفتن NTH تأخیرهای روش
۱۰	۳۵/۸۳	۲۳	۳۴/۵۴	با در نظر گرفتن CSM تأخیرهای روش
۱۷	۲۳/۷۷	۳۰	۲۴/۱	مدل ارائه شده جدید
۱۸	۱۹/۶۷	۳۵	۱۹/۷۹	

۷- نتایج واقعی حاصل از حفاری TBM در تونل قمرود

است، بنابراین امکان اعمال نیروی عمودی^{۱۲} کافی وجود نداشت (منظور از نیروی تراست نیرویی است که جک‌های تراست دستگاه که تعداد آنها ۱۰ جفت است بر سگمنت‌های نصب شده در مسیر تونل اعمال می‌کند تا امکان جلو بردن کاترهد دستگاه و انجام حفاری لازم صورت پذیرد)، از طرفی تجربه حفاری نیز در ابتدای مسیر پایین بوده است و در نتیجه نرخ پیشروی کاهش پیدا کرده است.

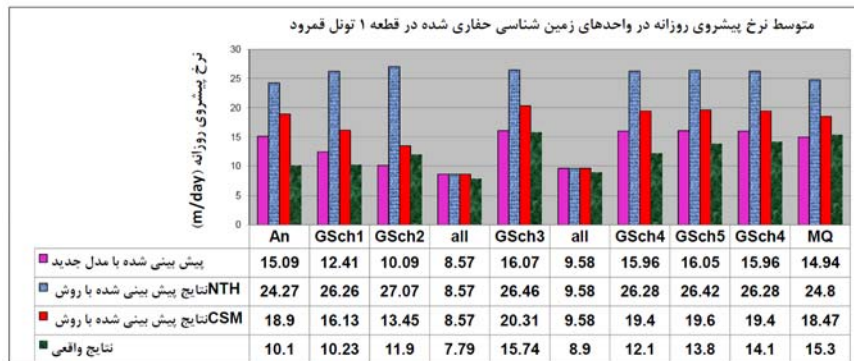
ماشین حفاری مکانیزه تونل قمرود تا تاریخ ۸۸/۶/۶ تا متر از پیشروی ۴۵۷۰/۴۲ پیشروی داشته که متوسط نرخ پیشروی روزانه TBM و بهره‌وری آن در این واحدهای زمین‌شناسی و نتایج پیش‌بینی بوسیله روش‌های مختلف در جدول ۷ و شکل ۸ و شکل ۹ آورده شده است. لازم به ذکر است که در واحد An از آنجایی که در ابتدای مسیر تونل قرار داشت و تعداد سگمنت‌های نصب شده در ابتدای مسیر تونل کم بوده



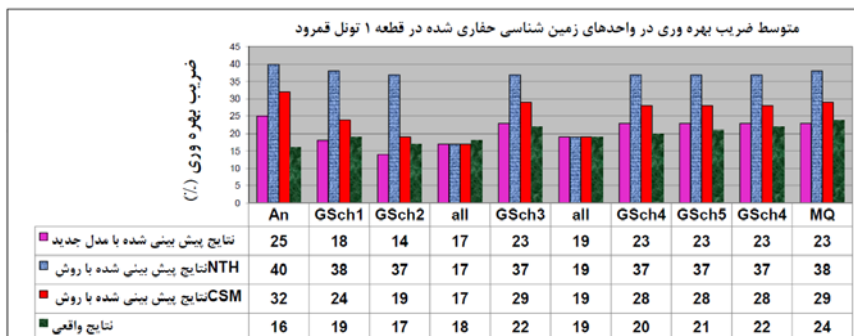
شکل ۷: درصد هر یک از تأخیرها در مدل ارائه شده جدید در واحد ML [۳]

جدول ۷: متوسط نرخ پیشروی روزانه و ضریب بهره‌وری واقعی و پیش‌بینی شده در مسیر تونل قمرود (قطعه ۱) [۲] و [۳]

واحد زمین‌شناسی مسیر تونل	متر از (m)	داده‌های واقعی		مدل ارائه شده جدید		روش NTH		روش CSM	
		متوسط نرخ پیشروی روزانه (m/day)	متوسط ضریب بهره‌وری (%)	متوسط نرخ پیشروی روزانه (m/day)	متوسط ضریب بهره‌وری (%)	متوسط نرخ پیشروی روزانه (m/day)	متوسط ضریب بهره‌وری (%)	متوسط نرخ پیشروی روزانه (m/day)	متوسط ضریب بهره‌وری (%)
An	۰-۳۵۰	۱۰/۱	۱۶	۱۵/۰۹	۲۵	۲۴/۲۷	۴۰	۱۸/۹۰	۳۲
GSch1	۳۵۰-۸۰۰	۱۰/۲۳	۱۹	۱۲/۴۱	۱۸	۲۶/۲۶	۳۸	۱۶/۱۳	۲۴
GSch2	۸۰۰-۹۱۹	۱۱/۹	۱۷	۱۰/۰۹	۱۴	۲۷/۰۷	۳۷	۱۳/۴۵	۱۹
all	۹۱۹-۱۹۰۰	۷/۷۹	۱۸	۸/۵۷	۱۷	۸/۵۷	۱۷	۸/۵۷	۱۷
GSch3	۱۹۰۰-۲۳۰۰	۱۵/۷۴	۲۲	۱۶/۰۷	۲۳	۲۶/۴۶	۳۷	۲۰/۳۱	۲۹
all	۲۳۰۰-۳۱۰۰	۸/۹	۱۹	۹/۵۸	۱۹	۹/۵۸	۱۹	۹/۵۸	۱۹
GSch4	۳۱۰۰-۳۲۵۰	۱۲/۱	۲۰	۱۵/۹۶	۲۳	۲۶/۲۸	۳۷	۱۹/۴۰	۲۸
GSch5	۳۲۵۰-۳۵۰۰	۱۳/۸	۲۱	۱۶/۰۵	۲۳	۲۶/۴۲	۳۷	۱۹/۶۰	۲۸
GSch4	۳۵۰۰-۳۶۵۰	۱۴/۱	۲۲	۱۵/۹۶	۲۳	۲۶/۲۸	۳۷	۱۹/۴۰	۲۸
MQ	۳۶۵۰-۴۶۵۰	۱۵/۳	۲۴	۱۴/۹۴	۲۳	۲۴/۸۰	۳۸	۱۸/۴۷	۲۹



شکل ۸: مقایسه نتایج پیش بینی نرخ پیشروی TBM با داده‌های واقعی [۲] و [۳]



شکل ۹: مقایسه نتایج پیش بینی ضریب بهره‌وری TBM با داده‌های واقعی [۲] و [۳]

۸- نتیجه گیری

مدل ارائه شده جدید بسیار دقیق‌تر است. بنابراین می‌توان تخمین زد که حفاری تونل در طی مدت ۱ سال و ۶ ماه دیگر به پایان خواهد رسید. پیشنهاد می‌گردد که به منظور تخمین نرخ نفوذ دستگاه‌های TBM از روش NTH استفاده گردد زیرا طبق جدول ۵ و جدول ۸ تطابق خوبی با واقعیت دارد و برای تخمین ضریب بهره‌وری و پیش بینی عملکرد TBM و در نهایت تخمین زمان اتمام حفاری از مدل ارائه شده در این مقاله استفاده گردد. زیرا روش NTH بسیاری از تأخیرها از جمله نصب سیستم نگهداری و بسیاری تأخیرهای متفرقه توضیح داده شده را در نظر نمی‌گیرد در نتیجه راندمان و نرخ پیشروی بالایی را پیش‌بینی می‌کند. ضمن اینکه روش CSM نیز برخی از تأخیرها از جمله تعمیرات دستگاه TBM و قسمت Back Up آنرا در نظر نمی‌گیرد که زمان قابل توجهی را در پروژه‌های حفاری با TBM به خود اختصاص می‌دهد و ضمناً زمان در نظر گرفته شده به منظور نصب سیستم نگهداری (سگمنت) با استفاده از این روش در مورد دستگاه‌های تک سپره که سیکل کاری آنها به صورت ناپیوسته است بسیار پایین است در صورتی که در واقعیت زمانی چندین برابر زمان در نظر گرفته شده صرف انجام این کار می‌شود.

• طبق جدول ۸ با مقایسه نتایج واقعی به دست آمده از نرخ نفوذ، ضرایب بهره‌وری و نرخ پیشروی‌های روزانه با مقدارهای پیش‌بینی شده توسط روش ۳ مشاهده می‌شود که در حالت در نظر گرفتن تأخیرهای متفرقه با استفاده از روش CSM به همراه تأخیرهای روش NTH ضرایب بهره‌وری دقیق‌تر محاسبه شده و در نتیجه نرخ پیشروی روزانه پیش‌بینی شده به واقعیت بسیار نزدیک‌تر می‌شود.

• روش CSM نسبت به روش NTH به طور کامل‌تر و با دقت بیشتری به پیش‌بینی تأخیرهای متفرقه در محاسبه ضریب بهره‌وری پرداخته است. به طوریکه هنگامی که برای محاسبه ضریب بهره‌وری از ترکیب تأخیرهای روش NTH و تأخیرهای متفرقه لحاظ شده در روش CSM استفاده می‌کنیم، متوسط ضریب بهره‌وری حدوداً ۱۹/۷۹ درصد بدست می‌آید، در صورتی که با در نظر گرفتن تأخیرهای متفرقه با استفاده از روش‌های NTH و CSM متوسط ضریب بهره‌وری به ترتیب حدوداً ۳۴/۵۴ و ۲۴/۱ درصد می‌شود. نظر به اینکه در پروژه‌های مشابه به علت تأخیرهای پیش آمده و توقف‌های دستگاه، متوسط ضریب بهره‌وری در عمل برابر با ۱۷-۱۵ درصد برآورد گردیده است و در تونل قمرود نیز ۱۹-۱۸ درصد بوده است بنابراین در اینجا می‌توان گفت که

جدول ۸: متوسط زمان‌های حفاری، سگمنت گذاری و تأخیرات در هفته های مختلف در زون زمین شناسی (MQ (3650-4650) و [۲] و [۳]

عملکرد حفاری پروژه دز قمرود - قطعه ۱

متوسط زمان های حفاری، سگمنت گذاری و تأخیرات در هفته های مختلف در زون زمین شناسی (MQ (3650-4650)

درصد حفاری، سگمنت گذاری و هر یک از تأخیرات بصورت پیش بینی شده با استفاده از روش CSM	درصد حفاری، سگمنت گذاری و هر یک از تأخیرات بصورت پیش بینی شده با استفاده از روش NTH	درصد حفاری، سگمنت گذاری و هر یک از تأخیرات بصورت پیش بینی شده با استفاده از مدل ترکیبی	درصد حفاری، سگمنت گذاری و هر یک از تأخیرات بصورت واقعی	میانگین زمان حفاری و هر یک از تأخیرات بصورت واقعی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
					۹۰.۴	۷۷.۴	۱۰.۸	۶۹.۷	۱۱.۸	۹۲.۹	۱۲.۷	۱۱.۶	۱۴.۲
متراژ پیشروی در هفته (متر)													
نرخ پیشروی روزانه (متر بر روز)													
نرخ نفوذ (متر بر ساعت)													
زمان کل													
زمان حفاری (دقیقه)													
کل زمان تأخیرات (دقیقه)													
زمان نصب سگمنت (دقیقه)													
تأخیر ناشی از سیستم ترابری (انتظار لوکو) (دقیقه)													
تأخیر ناشی از عملیات نقشه برداری و کسب تجربه لازم (دقیقه)													
تأخیر ناشی از بازدید و تعویض دیسک کاترها (دقیقه)													
تأخیر ناشی از تعمیر و نگهداری و سرویس دهی TBM و تجهیزات back-up (نقص فنی کرین، از کور، اسکرور، قطع بری و مشکل الکترونیک، مشکل هیدرومکانیک) و maintenance دستگاه و تعویض داکت نپویه و لوله های پیمایز (دقیقه)													
کسب تجربه لازم (دقیقه)													
تأخیر ناشی از بررسی کارنهد و روغن کاری و گریس کاری قسمت های مختلف و کسب تجربه لازم (دقیقه)													
بالا بودن سطح آب و مشکلات ناشی از منفي بودن شیب توپل (دقیقه)													
تعویض شیفت و زمان نهار و شام (دقیقه)													
تأخیرات منفرقه (دقیقه)													
مقایسه راندمان واقعی با مقادیرهای پیش بینی شده													
مقایسه نرخ پیشروی واقعی با مقادیرهای پیش بینی شده													
راندمان حفاری در هفته (%)													

منابع

[7] Nelson, 1997, "Tunnel Boring Machine Performance Concepts and Performance Prediction", www.Sciencedirect.Com

[8] Carroll, J. O., 2004, "EPB Tunneling", Parsons Brinckerhoff Co. Spatial Publication.

[9] Palmstrom, A., 1995, "RMi Parameters Applied In Prediction of Tunnel Boring Penetration", A Rock Mass Characterization System For Rock Engineering Purposes, PhD Thesis, Oslo University, Norway.

[۱] گزارشات زمین‌شناسی و مکانیک سنگی قطعه ۱ تونل

انتقال آب قمرود، شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۴.

[۲] گزارشات حفاری مکانیزه قطعه ۱ تونل انتقال آب قمرود،

شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۸-۱۳۸۷.

[۳] شریعت علوی، حسین، ۱۳۸۷، پیش بینی عملکرد TBM

قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب دز - قمرود، پایان‌نامه

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه

صنعتی شاهرود.

پی‌نوشت

¹ Single Shield
² Double Shield
³ Drilling Rate Index
⁴ Fracturing Factor
⁵ Equivalent Fracturing Factor
⁶ Cutter Thrust
⁷ Basic Pene⁷ Cutter Thrust
⁸ tration Rate
⁹ Net Penetration Rate
⁹ Close mode
¹⁰ Semi-closed mode
¹¹ Torque
¹² Thrust Force

[4] ITA / AITES Working Group No. 14, 2000, "Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBM)", www.ita-aites.org, pp.1-118.

[5] Bruland, A., 1998, "Hard Rock Tunnel Boring, Doctoral Thesis", Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

[6] Bruland, A., 2002, "Prediction Model For Performance and Costs", The Norwegian University of Science and Technology.

