

بررسی و مقایسه مدل‌های رایج در پیش بینی عملکرد ماشین با استفاده از داده‌های واقعی در

قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس

علی اصغر قائدی وانانی^۱، جعفر حسن پور^{۲*}، اکبر چشمی^۳

دریافت مقاله: ۹۴/۰۹/۰۱ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۷/۳۰

چکیده

روش‌های مختلفی برای تخمین عملکرد ماشین‌های حفر تونل (TBM) برای هر منطقه معرفی شده‌اند؛ بنابراین ممکن است که استفاده آن‌ها در دیگر پروژه‌ها با شرایط زمین‌شناسی متفاوت، موجب خطاهایی شود. لذا ضروری است برای هر پروژه از مدل‌هایی استفاده شود که شرایط زمین‌شناسی مشابهی را با پروژه دارند. در این مقاله ابتدا با استفاده از داده‌های واقعی عملکرد ماشین در پروژه تونل سازی انتقال آب زاگرس، عملکرد ماشین به وسیله مدل‌های رایج، پیش‌بینی شده است. سپس نتایج به دست آمده از مدل‌های رایج از جمله مدل‌های تجربی NTNU، Palmestrom (1995) و مدل تئوریک CSM را با نتایج به دست آمده از مدل Hassn pour et al. (2009, 2011) که بر اساس داده‌های پروژه‌هایی با شرایط زمین‌شناسی مشابه توسعه داده شده است، مقایسه و اختلاف میان آن‌ها به صورت کمی تبیین گردیده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل تجربی حسن پور و همکاران به دلیل همخوانی بانک اطلاعاتی با پروژه‌های داخلی، نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را نسبت به دیگر مدل‌ها نشان می‌دهند. همچنین مدل‌های تجربی NTNU و RMI به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای زمین‌شناسی مختلف به ویژه پارامترهای درزه‌داری توده سنگ، نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به مدل CSM ارائه می‌دهند.

کلید واژه‌ها: تونل انتقال آب زاگرس، ماشین حفر تونل، مدل‌های تجربی، مدل تئوریک.

۱. کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تهران Ali.ghaedi2012@gmail.com

۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تهران hassanpour@ut.ac.ir*

۳. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تاکنون تلاش‌های زیادی برای معرفی روش‌هایی جهت پیش‌بینی عملکرد TBM و شناسایی و کمی نمودن اثر پارامترهای توده سنگ بر عملکرد ماشین انجام شده است. این مدل‌ها بر اساس نحوه تأمین داده‌های لازم برای توسعه آن‌ها به دودسته کلی شامل مدل‌های تجربی و مدل‌های تئوریک قابل تقسیم بندی هستند. مدل‌های تئوریک با توجه به مکانیسم شکست سنگ و بر اساس معادلات تعادل نیرو و انرژی در حین برش و با بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی توسعه یافته‌اند، درحالی‌که مدل‌های تجربی با بررسی همبستگی میان شرایط زمین‌شناسی با پارامترهای عملکرد واقعی ماشین در پروژه‌های تونل سازی مختلف پیشنهاد شده‌اند. جدول (۱) به معرفی تعدادی از این مدل‌ها و پارامترهای ورودی و خروجی آن‌ها می‌پردازد. مدل‌ها تئوریک اغلب دارای نقاط ضعفی نیز می‌باشند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌سازد. به‌عنوان مثال در مدل اولیه CSM تأثیر درزه‌ها در تعیین نرخ نفوذ ماشین در نظر گرفته نشده است. در نگارش‌های اصلاح شده این مدل تلاش‌هایی برای اضافه نمودن اثر درزه‌داری توده سنگ صورت گرفته است (Yagiz, Ramezanzadeh, 2005, 2002, حسن پور، ۱۳۸۸).

یکی از چالش‌های اصلی در گسترش مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM در نظر گرفتن اندرکنش بین TBM و توده سنگ است. برای مدل‌سازی بهتر پیچیدگی این اندرکنش برخی محققان آزمون‌ها و شاخص‌های جدیدی را گسترش داده‌اند که به صورت خاص برای پیش‌بینی عملکرد TBM در حفر تونل طراحی شده‌اند. آزمون‌های خاص شامل استخراج پارامترهای حفر پذیری، چال خوری و فرورفتگی برای ارائه پیش‌بینی کارآمد و مؤثر نرخ نفوذ کاتر با توجه به مجموعه شرایط اندرکنش سنگ- ماشین، مانند مدل NTNU به‌وسیله Bruland (1998) گسترش یافته‌اند. دیگر محققان یک گام فراتر رفته و برای بازآفرینی فرایند خردشدگی در محیط آزمایشگاه از طریق کاربرد دیسک کارترها تلاش کرده‌اند. استفاده از آزمون‌های برش خطی مانند آن‌هایی که به‌وسیله

Rostami (1997, 2008), Sato et al. (1991), Sanio (1985), Ozdemir et al. (1978) توصیف شده‌اند قابلیت مناسبی برای هماهنگی پاره‌ترهای صحرایی در جهت ارائه پیش‌بینی‌های دقیق‌تر عملکرد TBM رقم می‌زنند که تعیین آن‌ها فقط در چند آزمایشگاه خاص امکان‌پذیر است. درجایی که چنین آزمایش‌هایی امکان‌پذیر نیست پیش‌بینی عملکرد TMB مبتنی بر تعدیل داده‌های عملکرد حاصل از سایت‌هایی است که در آن سنگ با خصوصیات مقاومتی و جنس مشابه حفر شده است. این مدل‌ها (تعدیلات) خطاهای قابل توجهی در فرایند تخمین پیشروی به وجود می‌آورند. میزان و احتمال این خطاها به صحت و دقت مفروضات مدل‌ها، کیفیت و کمیت TBM مربوطه و داده‌های شرایط زمین بستگی دارند. استفاده از مدل‌های ساده آسان است؛ زیرا آنان فقط شامل چند پارامتر بنیادی و اساسی (مثلاً مقاومت تراکمی و کششی سنگ) هستند، هرچند که کاربرد محدودتری دارند. مدل‌های احتمالاتی روش‌های پیچیده‌تری برای تخمین عملکرد دارند. در مدل احتمالاتی فقط بر روی شباهت پروژه‌های تونل سازی با یکدیگر تأکید شده است و از اندرکنش میان سنگ و ماشین صرف نظر شده است. شاخص نرخ نفوذ صحرایی (FPI) به‌وسیله Nelson et al. (1983) معرفی شده و بعد از آن برای پیش‌بینی عملکرد TBM مورد استفاده قرار گرفته است. در جدیدترین مطالعات صورت گرفته در این زمینه، (2009, Hassanpour et al. 2011) نیز با بررسی داده‌های واقعی به دست آمده از چند پروژه تونل سازی در داخل و خارج از ایران به بررسی اثر پارامترهای مختلف زمین‌شناسی بر عملکرد ماشین با استفاده از شاخص نفوذ صحرایی (FPI) پرداخته و روابطی تجربی را برای پیش‌بینی عملکرد ماشین در شرایط مختلف زمین‌شناسی پیشنهاد نمودند. مدل جدیدی به‌وسیله Delisio and Zhao (2014) برای پیش‌بینی عملکرد TBM در شرایط بلوکی سنگ (FP_{blocky}) بر اساس مقاومت تک‌محوری (UCS) و شمار درز حجمی (J_v) گسترش پیدا کرده است. در ضمن Salimi et al. (2016a, b) روابط تجربی جدیدی برای پیش‌بینی عملکرد TBM (FPI) در قابل فاصله‌داری درزه و UCS ارائه داده‌اند.

بازبینی و تصحیح قرار گرفته است (Bruland, 1998). در مدل NTNU کلیه پارامترهای مربوط به توده سنگ در قالب یک پارامتر با نام فاکتور خردشدگی معادل یا K_{ekv} و کلیه پارامترهای مربوط به ماشین در قالب یک پارامتر تحت عنوان نیروی رانش معادل با علامت اختصاری M_{ekv} (برحسب kN/cutter) با هم ترکیب می‌شوند. رابطه اصلی در مدل NTNU که از تحلیل تعداد زیادی آزمون نفوذ کاترهد به دست آمده است، به شکل رابطه (۱) است:

$$i_0 \text{ (mm/rev)} = \left(\frac{M_{ekv}}{M_1} \right)^b \quad (1)$$

در رابطه بالا که منحنی نفوذ نامیده می‌شود، i_0 نرخ نفوذ دیسک کاتر در سنگ (برحسب mm/rev) هست. همچنین M_1 نیروی رانش بحرانی است که طبق تعریف نیرویی است که برای ایجاد یک میلی‌متر نفوذ در سنگ لازم است. این پارامتر و ضریب ثابت b به فاکتور خردشدگی معادل یا K_{ekv} وابسته می‌باشند. فاکتور خردشدگی معادل از ترکیب پارامترهایی نظیر نوع ناپیوستگی‌های سیستماتیک توده سنگ، درجه خردشدگی یا درزه‌داری توده سنگ، زاویه میان صفحات ناپیوستگی و محور تونل و شاخص نرخ چال خوری ماده سنگ با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$K_{ekv} = k_{s-tot} \cdot K_{DRI} \cdot K_{por} \quad (2)$$

همان‌طور که در بالا اشاره گردید، در مدل NTNU پارامترهای مربوط به ماشین در قالب یک پارامتر تحت عنوان نیروی رانش معادل با علامت اختصاری M_{ekv} با هم ترکیب می‌شوند.

این پارامتر از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$M_{ekv} = M_B \cdot K_a \cdot K_d \quad (3)$$

در رابطه (۳)، M_B نیروی رانش متوسط اعمال شده بر روی هر کاتر، K_d ضریب تصحیح برای قطر TBM و K_a ضریب تصحیح برای فاصله متوسط کاترها هست. در این مدل برای تعیین دو ضریب تصحیح مورد نظر نمودارهایی پیشنهاد شده‌اند (برولند ۱۹۹۸).

با توجه به اینکه هر مدل بر اساس شرایط زمین‌شناسی خاصی به وجود آمده است بنابراین ممکن است که استفاده آن‌ها در دیگر پروژه‌ها با خطاهایی در زمینه پیش‌بینی عملکرد ماشین همراه باشد. برای مثال بانک اطلاعاتی مربوط به مدل NTNU بر اساس سنگ‌های آذرین و دگرگونی هست و سنگ‌های رسوبی با شرایط خاصی از نظر لایه‌بندی، درزه و شکاف، در این مدل آزمون نشده‌اند. لذا ضروری است برای هر پروژه از مدل‌هایی استفاده شود که شرایط زمین‌شناسی مشابهی را با شرایط زمین‌شناسی پروژه دارند. در این مقاله ابتدا با استفاده از داده‌های واقعی عملکرد ماشین در پروژه تونل سازی انتقال آب زاگرس، عملکرد ماشین به وسیله مدل‌های رایج، پیش‌بینی شده است. سپس نتایج به دست آمده از مدل‌های رایج از جمله مدل‌های تجربی NTNU، پالمستروم و مدل تئوریک CSM را با نتایج به دست آمده از مدل Hassnpour et al. (2009, 2011) که بر اساس داده‌های پروژه‌هایی با شرایط زمین‌شناسی مشابه توسعه داده شده است، مقایسه و اختلاف میان آن‌ها به صورت کمی تبیین گردیده است. لازم به ذکر است که تمام آزمایش‌های مکانیک سنگی مورد نیاز برای استفاده از پارامترهای مدل NTNU، انجام شده‌اند؛ بنابراین هیچ کدام از مقادیر استفاده شده برای پارامترهای مدل مذکور به صورت تخمینی و یا فرضی نمی‌باشند.

۲. معرفی مدل‌های مورد استفاده

مدل‌های مورد استفاده در این مقاله به همراه شرح مختصری از آن‌ها در ادامه بحث معرفی شده است.

۱-۲. مدل تجربی NTNU

در میان روش‌های تجربی، مدل NTNU کامل‌ترین و پرکاربردترین مدل برای تخمین عملکرد ماشین‌های سنگ سخت محسوب می‌شود. اولین نگارش این مدل در سال ۱۹۷۹ در دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ NTNU ارائه شد (Blindheim, 1979) و تا سال ۱۹۹۸ با توجه به تکمیل شدن داده‌های بانک اطلاعاتی مربوطه توسط محققین مختلف، مورد

جدول ۱. برخی از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین و پارامترهای ورودی و خروجی آن‌ها (Hassanpour et al., 2011)

پارامترهای ورودی		پارامتر خروجی	روش
پارامترهای ماشین	پارامترهای توده سنگ		
نیروی پیشران، فاصله کاترها، عرض لبه کاترها، شعاع کاتر	مقاومت تک‌محوری و کششی	نرخ نفوذ (mm/rev)	CSM, Rostami (1997)
	مقاومت کششی و شاخص حفر پذیری توده سنگ	نرخ نفوذ (mm/rev)	CSM اصلاح شده، Cheema (1999)
نیروی پیشران، فاصله کاترها، اندازه و شکل کاترها، دور کاتر، توان کله حفاری	شاخص حفر پذیری ماده سنگ، تخلخل، فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها	نرخ نفوذ، نرخ پیشروی	NTNU, Bruland (1998)
متوسط بار کاترها، قطر ماشین	پارامترهای Q، مقاومت تک‌محوری، درصد کوآرتز، تنش و ...	نرخ نفوذ، نرخ پیشروی	Q _{TBM} , Barton (2000)
نیروی پیشران، فاصله کاترها، اندازه و شکل کاترها، دور کاتر، توان کله حفاری	مدول الاستیک، مقاومت تک‌محوری، حجم بلوک، زبری، طول و جهت‌داری درزه‌ها	نرخ نفوذ، نرخ پیشروی	Palmstrom (1995)
نیروی پیشران، سرعت چرخش کله، حفاری	مقاومت تک‌محوری، شاخص کیفی توده سنگ (RQD)	نرخ نفوذ، نرخ پیشروی	Hassanpour et al. (2009, 2010, 2011)

۲-۲. مدل تجربی Palmstrom (1995)

این روش که توسط پالمستروم در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است، از پارامترهای سیستم طبقه‌بندی RMI برای تعیین عملکرد TBM استفاده می‌کند. روش پالمستروم بر اساس مدل پیش‌بینی NTNU بنانهاده شده است، با این تفاوت که بجای استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی خاص که امکان انجام آن‌ها همیشه فراهم نیست، از روابط جایگزین استفاده می‌کند. به‌عنوان مثال شاخص نرخ چال خوری (DRI) با مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) جایگزین شده است. Palmstrom (1995) همچنین معتقد است که توزیع فضایی ناپیوستگی‌ها که تحت عنوان فاکتور خردشدگی (K_s) بیان می‌شود، در مدل NTNU به‌طور کامل تبیین نگردیده است و معتقد است که با

استفاده از حجم بلوک (Vb) در شاخص RMI می‌توان به

مقادیر مناسب‌تری برای K_s دست‌یافت. رابطه بین حجم بلوک و K_s برای درزه‌ها توسط Palmstrom (1995)

به‌صورت رابطه (۴) پیشنهاد شده است:

$$k_s = 1.6 C_0 Vb^{-0.33} \quad (4)$$

در رابطه بالا، C₀ ضریب مربوط به جهت‌داری صفحات ناپیوستگی نسبت به تونل است که مقدار آن از جدول (۲) برآورد می‌شود.

جدول ۲. تعیین ضریب مربوط به جهت‌داری صفحات ناپیوستگی نسبت به تونل (پالمستروم ۱۹۹۵)

زاویه میان محور تونل و صفحه	۰-۱۵	۱۵-۳۰	۳۰-۴۵	۴۵-۷۵	۷۵-۹۰
درزه	۱	۱/۲۵	۱/۵	۱/۷۵	۲
C_0	۱	۱/۲۵	۱/۵	۱/۷۵	۲

۲-۳. مدل تجربی (Hassanpour et al. (2009, 2011)

در مدل (Hassanpour et al. (2009, 2011) انطباق میان پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی مقاومت ماده سنگ (UCS) و شاخص کیفی توده سنگ یا (RQD) و پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین (نرخ نفوذ، شاخص نفوذ) با استفاده از روش‌های آماری تحلیل رگرسیون تک متغیره و چند متغیره در چهار پروژه تونل‌سازی بزرگ در ایران (تونل‌های انتقال آب کرج، زاگرس، قمروند) و تونل دوم نیروگاه ماناپوری در نیوزیلند مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت روابطی تجربی برای پیش‌بینی عملکرد ماشین پیشنهاد گردیده است. در جدول (۳) این روابط معرفی شده‌اند.

همان‌طور که در رابطه (۱۳) ملاحظه می‌شود، با استفاده از پارامتر FPI، نرخ نفوذ ROP(m/h) نیروی پیشران یا Fn (kN/cutter) و سرعت چرخش کله حفاری یا RPM هم‌زمان در تحلیل‌ها وارد می‌شوند (۱۳).

$$FPI = \frac{60FnRPM}{1000ROP} \quad (13)$$

در مدل NTNU، لازم است تا فاکتور خردشدگی K_s به فاکتور خردشدگی معادل K_{ekv} تبدیل شود (روابط ۵ تا ۸). بقیه مراحل پیش‌بینی عملکرد TBM با این مدل، دقیقاً مانند مدل NTNU هست.

$$K_{ekv} = k_s \times K_{DRI} \quad (5)$$

$$k_{DRI} = 0.14 \sqrt{DRI} \quad (6)$$

$$DRI = E \times \sigma_c^{-0.6} \quad (7)$$

$$K_{ekv} = \frac{0.06C_0 \sqrt{E}}{JP \cdot \sigma_c^{0.3}} \quad (8)$$

پارامتر E نشان‌دهنده گروه سنگ است و مقادیر زیر را داراست:

- برای سنگ‌های غیر شیبستوز و سخت ($UCS > 40$)
E=1000
- برای سنگ‌های دگرگونی ($30 < UCS < 150$)
E=750
- برای سنگ‌های آرژیلیتی ($10 < UCS < 100$)
E=500

جدول ۳. روابط گسترش‌یافته توسط (Hassanpour et al. (2009, 2010, 2011)

منبع	R^2	روابط	رابطه	لیتولوژی	پروژه
Hassanpour et al. (2010)	۰/۵۲۳	$FPI = \exp(0.005UCS + 0.002RQD + 2.129)$	(۹)	پیروکلاستیک	تونل کرج
Hassanpour et al. (2009)	۰/۶۴۵	$FPI = \exp(0.004UCS + 0.008RQD + 2.077)$	(۱۰)	کربنات-آرژیلیت	تونل زاگرس
Hassanpour et al. (2010)	۰/۸۷۴	$FPI = \exp(0.004UCS + 0.023RQD + 1.003)$	(۱۱)	دگرگونی درجه پایین	تونل قمروند
Hassanpour et al. (2011)	۰/۷۸۵	$FPI = \exp(0.008UCS + 0.015RQD + 1.384)$	(۱۲)	عمومی	همه پروژه‌ها

فاصله‌داری دیسک کاترها و میزان نفوذ دیسک کاتر در سنگ و با فرض تشکیل تراشه‌ها بر اثر گسیختگی برشی در مجاورت دیسک کاترها، مدلی تئوریک را برای پیش‌بینی

۲-۴. مدل تئوریک CSM

نگارش اول این مدل توسط (Ozdemir, 1977 and Ozdemir and Miller, 1978) ارائه شد. این محققین با در نظر گرفتن اثر

تقریبی ۵۰ کیلومتر از حوالی روستای هیروی در جنوب شهرستان نوسود تا نزدیکی روستای ازگله در شمال شهرستان سرپل ذهاب ادامه می‌یابد. قطعه دوم این تونل به طول ۲۶ کیلومتر که در این تحقیق بخشی از آن مورد مطالعه قرار گرفته، جنوبی‌ترین بخش این تونل بوده و از رودخانه ليله تا روستای ازگله ادامه دارد. بخش جنوبی این قطعه از تونل توسط یک دستگاه ماشین حفار تمام مقطع از نوع سپر دوگانه با قطر ۶/۷۳ متر حفاری و سگمنت گذاری می‌گردد. ویژگی‌های تکنیکی اصلی این ماشین در جدول (۴) ذکر گردیده‌اند. در زمان نگارش این مقاله، اجرای این تونل از دو جبهه جنوبی و شمالی توسط یک دستگاه ماشین حفر تونل با ویژگی‌های مشابه در حال انجام می‌باشد و حدود ۱۵ کیلومتر از جبهه جنوبی و کمتر از ۲ کیلومتر از جبهه شمالی حفاری و سگمنت گذاری شده است.

نیروهای برش در دیسک کاترهای V شکل، توسعه دادند. در واقع این مدل روابطی را برای تخمین نیروی مورد نیاز برای نفوذ دیسک کاتر (با ویژگی‌های هندسی مشخص) در سنگ با یک نرخ ثابت ارائه می‌دهد. این مدل در دهه ۹۰ توسط رستمی و ازدمیر به‌روز گردید (Rostami, 1997 and Rostami, 1996). روابط ارائه‌شده توسط رستمی (۱۹۹۷) با فرض استفاده از کاترهای با سطح مقطع ثابت و بر اساس وقوع گسیختگی کششی در سنگ توسعه داده شده‌اند.

۳. معرفی پروژه

پروژه تونل انتقال آب زاگرس بخشی از طرح تأمین آب دشت‌های گرمسیری غرب کشور است. تونل مزبور با طول

جدول ۴. ویژگی‌های TBM (model S-157) مورد استفاده در بخش جنوبی (Hassanpour et al. 2009)

پارامترها	TBM (southwestern portal)
قطر ماشین (m)	۶٫۷۳
قطر کاتر (mm)	۴۳۲
تعداد دیسک کاترها	۴۲
پهنای لبه کاتر (mm)	۱۹
فاصله اسمی دیسک (mm)	۹۰
ماکزیمم نیرو روی کاتر (KN)	۳۵۰ اسمی
نیروی قابل دسترس کاترهد (KN/ Cutter)	۵۹۰
تعداد سیلندرهای تراست	۱۰
نیروی موتور پیشران (KW)	۳۵۰
تعداد موتور پیشران	۶
دور گردش کاترهد	۹-۰
گشتاور کاترهد (KN.m)	۲۹۶۷ (اسمی)، ۴۴۵۰ (اضافه بار)
حرکت TBM (m)	۰٫۸

و ناودیس‌های نزدیک و به هم فشرده‌ای تشکیل شده است که با روندی شمال غرب - جنوب شرق گسترش یافته‌اند. امتداد این تونل تقریباً بر روند ساختارهای موجود در منطقه عمود هست. واحدهای سنگی موجود در ۱۵ کیلومتر جبهه جنوبی تونل شامل واحدهای شیلی و آهک‌رسی از سازندهای پابده و

۳-۱. ویژگی‌های زمین‌شناسی مسیر تونل

بخش مورد مطالعه از مسیر قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس از نظر زمین‌شناسی، در ناحیه لرستان از زون کمربند چین‌خورده - رانده زاگرس قرار دارد. این ناحیه از طاق‌دیس‌ها

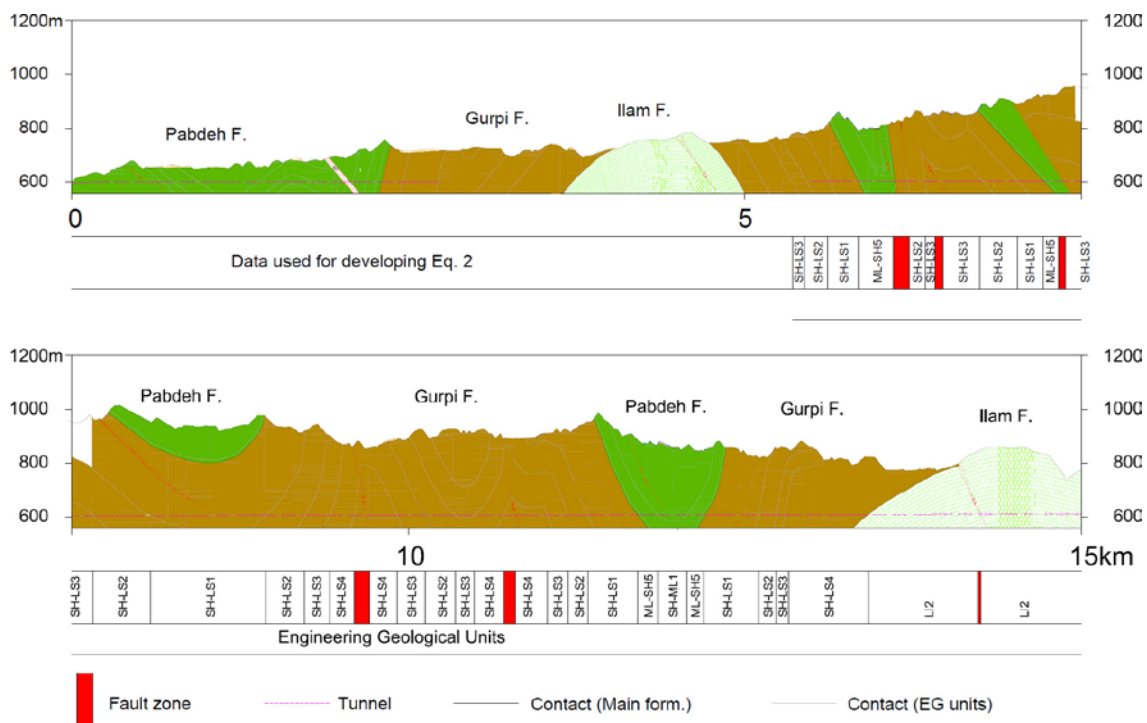
تونل (متر از ۰۰+۰۰۰ تا ۱۵+۰۰۰) شناسایی و تفکیک گردیده است. پارامترهای مورد استفاده مدل‌های در هر واحد در جدول (۵) درج شده است. با تکرار واحدهای فوق‌الذکر، تعداد ۴۱ زون از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل شناسایی و تفکیک شده است (شکل ۱).

گورپی مربوط به زمان‌های کرتاسه پسین و ترشیر پیشین (واحدهای PE_{Pd}^8 تا K_{Gu}^1) و لایه‌های عمدتاً آهکی کرتاسه می‌باشند (واحدهای K11 تا K15) می‌باشند (جدول ۵ و شکل ۱). در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، در مجموع تعداد ۹ واحد زمین‌شناسی مهندسی متفاوت در بخش مورد مطالعه

جدول ۵. ویژگی‌های واحدهای زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی در ۱۵ کیلومتر ابتدای تونل زاگرس (مهندسین مشاور ساحل،

(۱۳۸۶)

ویژگی‌های ژئومکانیکی واحدهای زمین‌شناسی - استفاده شده در مدل‌ها								
ردیف	واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد	توصیف توده سنگ	مقاومت تک‌محوری (Mpa)	RQD (%)	شاخص متوسط نرخ چال خوری (DRI) (%)	متوسط زاویه لایه‌ها به محور تونل	متوسط فاصله‌داری ناپوستگی (متر)
۱	SH-ML1	PE_{Pd}^{4a}	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار	۳۰	۷۰	۸	۴۵	۰/۱۲
۲	ML-SH5	PE_{Pd}^2	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار	۷۰-۸۰	۷۵	۶	۳۲.۵	۰.۲۸
۳	SH-LS1	K_{Gu}^5 K_{Gu}^{5a}	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار	۳۰	۶۰-۸۰	۵.۱	۳۰	۰.۲۰
۴	SH-LS2	K_{Gu}^4	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار	۳۵-۵۰	۵۰-۸۰	۵	۲۶	۰.۲۵
۵	SH-LS3	K_{Gu}^3	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار	۱۵-۳۰	۵۵-۷۰	۵	۳۵	۰.۲۰
۶	SH-LS4	K_{Gu}^1 K_{Gu}^{2a} K_{Gu}^2	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار	۲۵-۴۰	۵۰-۶۰	۵	۲۳	۰.۲۴
۷	LI2	Ki	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار	۱۰۰-۱۲۰	۸۰-۹۰	۴	۲۰	۰.۲۵
۸	CZ		زون خرد شده گسلی	۲۰-۵۰	۳۰-۴۵	۵	۳۸	۰.۱۱
۹	FZ		بسیار ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته و ناپایدار	۲۰-۳۰	۲۵-۳۵	۳	۴۵	۰.۰۶



شکل ۱. برش زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی در راستای تونل (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۶)

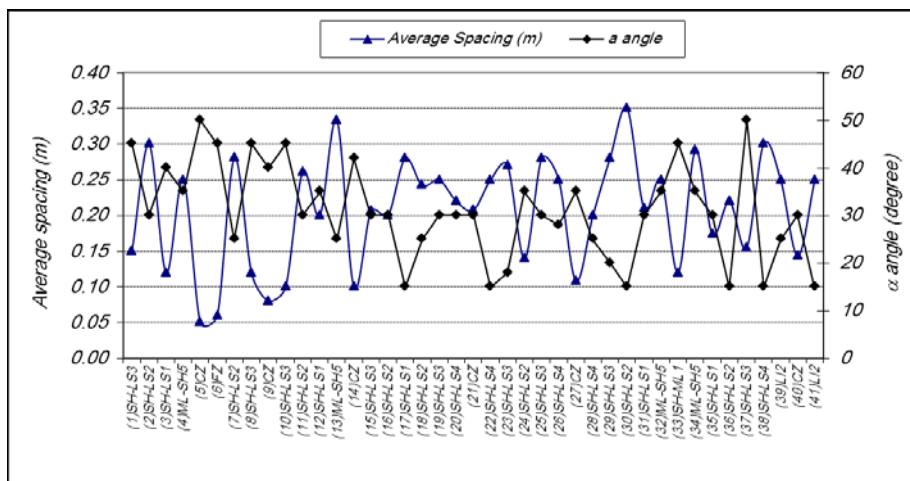
۴. ساماندهی بانک اطلاعاتی

بعد از جمع آوری اطلاعات صحرائی مورد نیاز، ساماندهی و ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب مهمترین فعالیت در مطالعات تحلیل عملکرد ماشین محسوب می شود. بانک اطلاعاتی تهیه شده در این تحقیق شامل اطلاعات زمین شناسی مهندسی توده سنگهای مسیر تونل و پارامترهای مربوط به دستگاه و عملکرد آن می شود که به منظور سهولت در تحلیل داده های ثبت شده در آن در صفحه گسترده Excel ایجاد گردیده است. بانک اطلاعاتی ایجاد شده به سه بخش جداگانه تقسیم شده است که عبارتند از: بخش اول؛ داده های واقعی زمین شناسی و محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی، بخش دوم؛ داده ها و پارامترهای عملکرد واقعی ماشین و بخش سوم؛ نتایج محاسبه عملکرد ماشین با استفاده از مدل های پیش بینی.

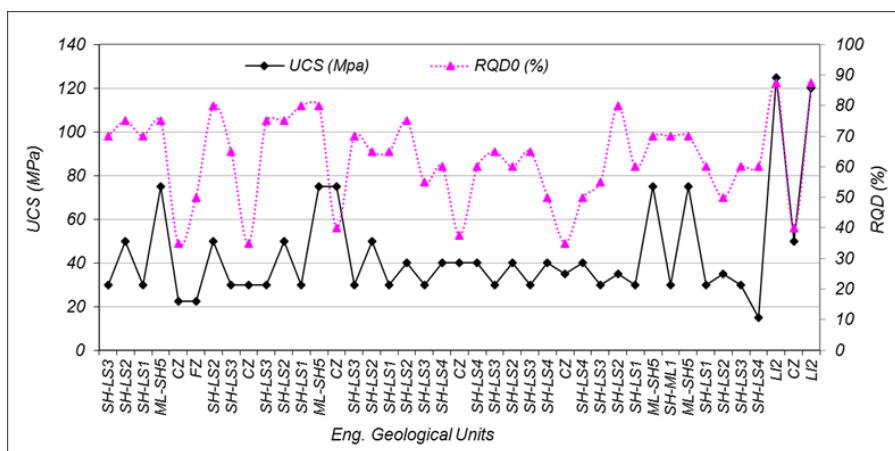
۴-۱. داده های واقعی زمین شناسی و ژئومکانیکی

بخش اول این بانک اطلاعاتی شامل اطلاعات زمین شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی در مقاطع مختلف می باشد که عبارتند از: اطلاعات مربوط به ویژگی های ماده سنگ (حاصل از جمع

بندی نتایج آزمون های آزمایشگاهی مانند UCS, DRI, CLI و...), خصوصیات درزه داری و پارامترهای مقاومتی توده سنگ مانند RQD, زاویه لایه بندی، فاصله داری دارزه ها، مقاومت فشاری توده سنگ. نتیجه محاسبه پارامترهای فوق برای هریک از واحدها در بخش اول بانک اطلاعاتی درج شده است. تغییرات برخی پارامترهای زمین شناسی مهندسی در واحدهای مختلف مسیر تونل در شکل (۲. الف- ب) ارائه شده است شکل (۲. الف) مقادیر فاصله داری و جهت داری دسته ناپیوستگی اصلی ۴۱ واحد زمین شناسی در مسیر تونل است که از این پارامترها برای محاسبه فاکتور خوردشدگی (Ks) در مدل NTNU و مدل پالمستروم استفاده شده است. شکل (۳. ب) مقادیر پارامترهای مربوط به RQD و مقاومت تراکمی (UCS) مورد استفاده در مدل های حسن پور (UCS, RQD), مدل پالمستروم و مدل CSM (UCS) است.



الف- مقادیر فاصله داری و جهت‌داری دسته ناپیوستگی اصلی



ب- مقادیر پارامترهای مربوط به RQD و مقامت تراکمی (UCS)

شکل ۲. تغییرات ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی در واحدهای زمین شناسی مهندسی

تفکیک شده در مسیر تونل

۴-۲-۱. عملکرد واقعی ماشین

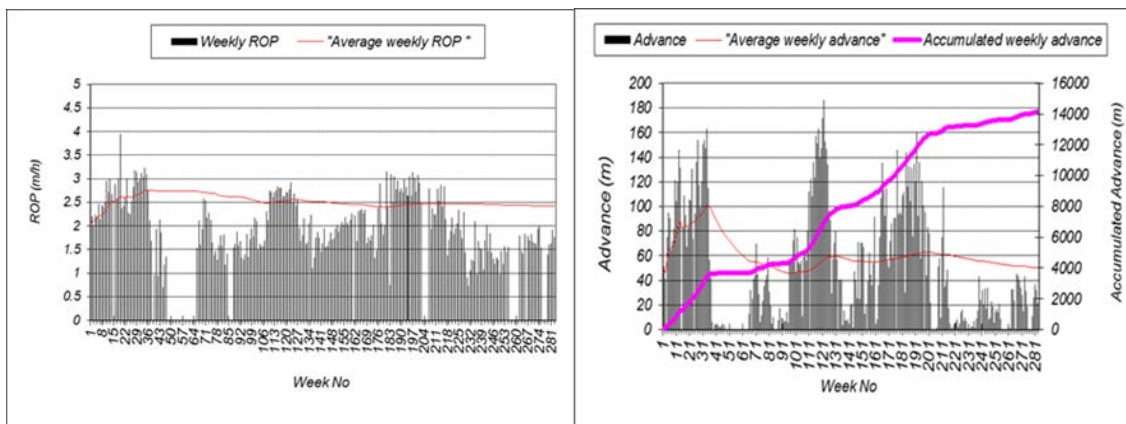
نمودارهای ارائه شده در شکل ۳ (الف، ب، ج، د) به ترتیب تغییرات متوسط پیشروی هفتگی، نرخ نفوذ، نرخ پیشروی هفتگی و ضریب بهره‌وری را در بخش حفاری شده تونل زاگرس (تا متر ۱۵۰۰۰) نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، ۱۵۰۰۰ متر از طول تونل در ۲۸۵ هفته با نرخ پیشروی متوسط ۶۰ متر در هفته (برحسب زمانهای عملیاتی) شکل (الف) و ۱۰ متر بر روز در هفته (بر اساس زمانهای کاری) شکل (ج) حفاری و سگمنت گذاری شده است. در این مدت متوسط هفتگی نرخ نفوذ بین ۲/۷ تا ۲/۴ متر بر ساعت در نوسان بوده است. متوسط نرخ نفوذ هفتگی نیز ۲/۵

۴-۲. پارامترهای واقعی عملکرد ماشین

در بخش دوم بانک اطلاعاتی تهیه شده؛ پارامترهای دستگاه نظیر متوسط نیروی پیشران متوسط دور گشتاور و توان کله حفاری در هر مقطع محاسبه و ثبت شده است. همچنین در این بخش اطلاعاتی نظیر طول مقطع حفاری شده و زمان صرف شده برای حفاری ثبت شده است. با استفاده از داده‌های فوق برخی از پارامترهای مربوط به عملکرد واقعی ماشین نظیر متوسط نرخ نفوذ دستگاه متوسط ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی ماشین و همچنین برخی پارامترها نظیر متوسط شاخص نفوذ برای واحدهای مختلف محاسبه و ثبت شده است.

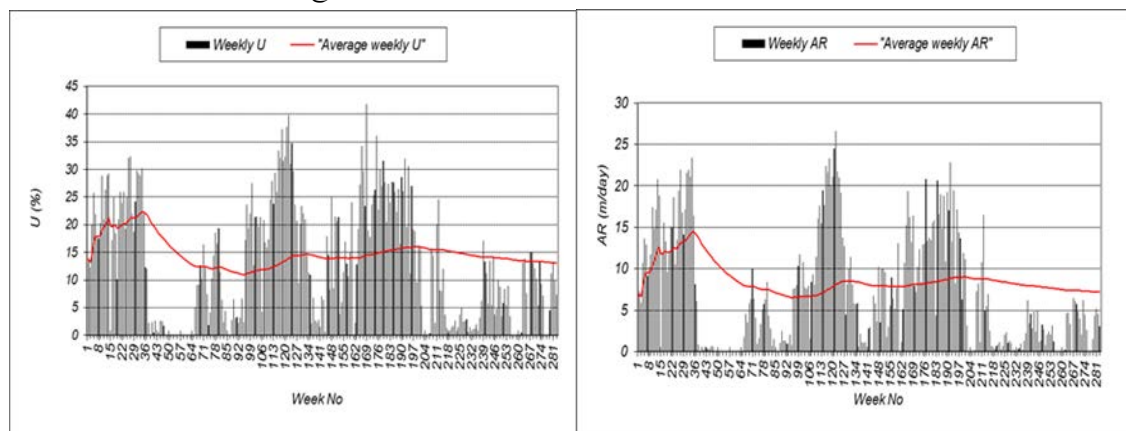
متر بر ساعت تعیین گردیده است (شکل ۳. ب). از هفته ۳۸ مترائ (۳۸۳۵) تا هفته ۶۵ مترائ (۳۸۶۳) یعنی به مدت ۲۸ هفته میزان پیشروی تونل بسیار کم بوده است. در این مدت به دلیل هجوم پیش بینی نشده آب و نشت گازهای سمی سولفید هیدروژن (H₂S) و متان به داخل تونل و ایجاد مشکلات اجرایی فراوان، عملاً فعالیت در تونل بسیار دشوار و در نهایت تعطیل گردید. این تعطیلی طولانی که طی آن تلاشهایی برای فائق آمدن بر این مشکل صورت گرفت، باعث افت شدید در متوسط نرخ پیشروی و ضریب بهره وری تونل گردیده است. همچنین درمترائ ۱۳۳۲۲ از هفته ۲۰۳ تا ۲۰۶، در مترائ ۱۴۳۰۸ از هفته ۲۵۵ تا ۲۶۱ و مترائ ۱۴۶۹۷ از هفته ۲۷۵ تا ۲۷۷. توقف‌های طولانی مدت وجود داشته است که باعث افت شدید در متوسط نرخ پیشروی و ضریب بهره وری تونل گردیده است. با توجه به شکل (۳. د) متوسط ضریب

بهروری هفتگی ۱۵ درصد بوده است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ (الف، ب، ج، د) به ترتیب تغییرات نرخ نفوذ (بر حسب میلی متر بر دور دستگاه)، شاخص نفوذ صحرائی، گشتاور ماشین و نیروی پیشران وارد بر هر دیسک کاتر را در مقاطع مختلف بخش حفاری شده، ۴۱ واحد زمین شناسی مهندسی تونل زاگرس (از مترائ ۵۴۰۰ تا مترائ ۱۵۰۰۰) نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود شکل (۴. الف-ب)، حداقل و حداکثر نرخ نفوذ و شاخص نفوذ متوسط در واحدهای مختلف زمین شناسی به ترتیب ۲ و ۱۲ میلی متر بر دور دستگاه و ۱۰ و ۲۲ کیلونیوتن بر کاتر بر میلی متر بر دور دستگاه می‌باشد. شکل (۴. ج-د) به طور متوسط نیروی پیشران ماشین در ۱۷ واحد اول بیشتر از دیگر واحدها و گشتاور ماشین در ۱۷ واحد اول در کمترین مقدار می‌باشد.



الف) پیشروی هفتگی

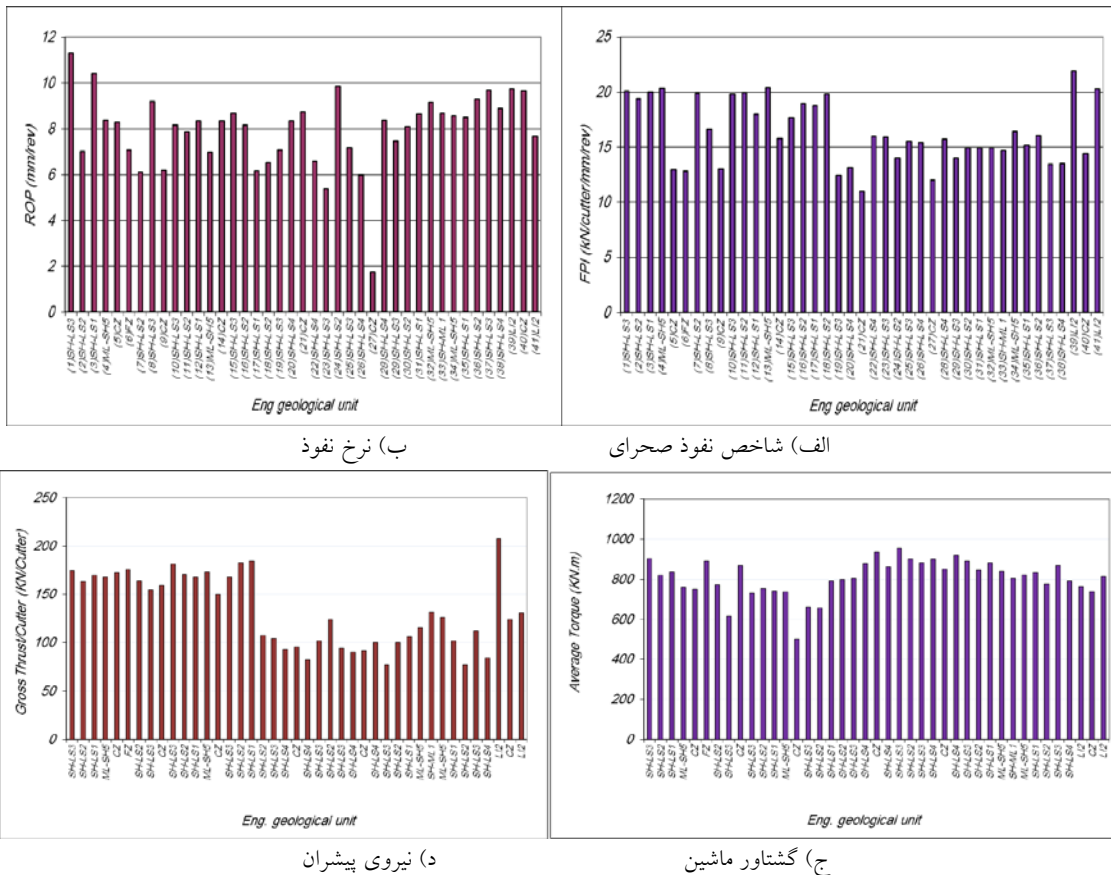
ب) نرخ نفوذ



ج) نرخ پیشروی هفتگی

د) ضریب بهره وری هفتگی

شکل ۳. تغییرات عملکرد ماشین در مسیر تونل انتقال آب زاگرس



شکل ۴. تغییرات پارامترهای ماشین در مسیر تونل انتقال آب زاگرس

با مقاومت تراکمی بالا (جدول ۵) LH2 و ML-SH5 به ترتیب ۲۱،۱ و ۱۸،۰۴ کیلونیوتن بر کارتر بر میلی متر بر دور دستگاه بوده است.

۴-۳. محاسبه عملکرد ماشین

در بخش سوم از این بانک اطلاعاتی، با استفاده از داده‌های مورد نیاز هریک از مدل‌ها پیش بینی نرخ نفوذ صورت گرفته است. قسمتی از بخش سوم بانک اطلاعاتی تهیه شده در شکل (۵) ارائه شده است.

در جدول (۶) به ترتیب بیشینه و میانگین نرخ نفوذ (متر بر ساعت) و شاخص نفوذ صحرایی (KN/Cutter/mm/rev) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین بیشینه نرخ نفوذ نسبت به تعداد تکرار واحدها (بیشتر از یک) در واحد CZ، ۴ متر بر ساعت به دلیل خورد بودن زون حفاری و سپس SH-LS3 به میزان ۳،۳۷ به دلیل مقاومت تک محوری نسبتاً پایین (جدول ۵) وجود داشته است. این در حالی است که بیشترین میانگین نرخ نفوذ نسبت به تعداد تکرار واحدها (بیشتر از یک) در واحدهای CZ و ML-SH5 به ترتیب ۲،۹۴ و ۲،۷۶ متر بر ساعت بوده است. همچنین بیشترین میانگین FPI در لایه‌های

جدول ۶. به ترتیب بیشینه و میانگین نرخ نفوذ (متر بر ساعت) و شاخص نفوذ صحرائی (KN/Cuter/mm/rev)

واحد زمین شناسی مهندسی	تعداد واحد	نرخ نفوذ (متر بر ساعت)		شاخص نفوذ صحرائی (kN/Cuter/mm/rev)	
		بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین
SH-ML1	1	2.81	2.81	14.69	14.69
SH-LS1	5	2.99	2.73	17.38	20.00
SH-LS2	8	3.00	2.57	17.88	19.93
SH-LS3	9	3.37	2.56	16.18	20.10
SH-LS4	5	2.83	2.23	14.76	16.00
ML-SH5	4	2.90	2.76	18.04	20.39
LI2	2	1.82	1.71	21.10	21.91
CZ	6	4.00	2.94	13.19	15.77
FZ	1.00	3.50	3.50	12.80	12.80

شکل ۵. قسمتی از بخش سوم بانک اطلاعاتی

NTNU Model											
b	M1	α angle	α angle Ln	Ks-tot	K _{DR}	K _{por}	K _d	K _a	Equivalent fracturing factor (K _{ekv})	Equivalent thrust (M _{ekv}) (kNC)	Basic Penetration (i ₀) (mm/rev.)
0.896	18.491	45	3.81	3.96	1.23614	1.7926	1.14	0.93	8.77	185.0	7.9
1.012	24.620	30	3.40	2.973	1.10381	1.7926	1.14	0.93	5.88	173.0	7.2
0.974	22.510	40	3.69	3.009	1.23614	1.7926	1.14	0.93	6.67	179.6	7.6
1.169	34.411	35	3.56	2.979	1.04988	1.1784	1.14	0.93	3.69	178.1	6.8
1.210	37.289	50	3.91	3.106	0.9	1.1784	1.14	0.93	3.29	183.2	6.9
1.176	34.927	45	3.81	3.063	1	1.1784	1.14	0.93	3.61	186.3	7.2
1.063	27.569	25	3.22	3.063	1.10381	1.4855	1.14	0.93	5.02	173.6	7.1

مدل حسن پور (2009، 2011)

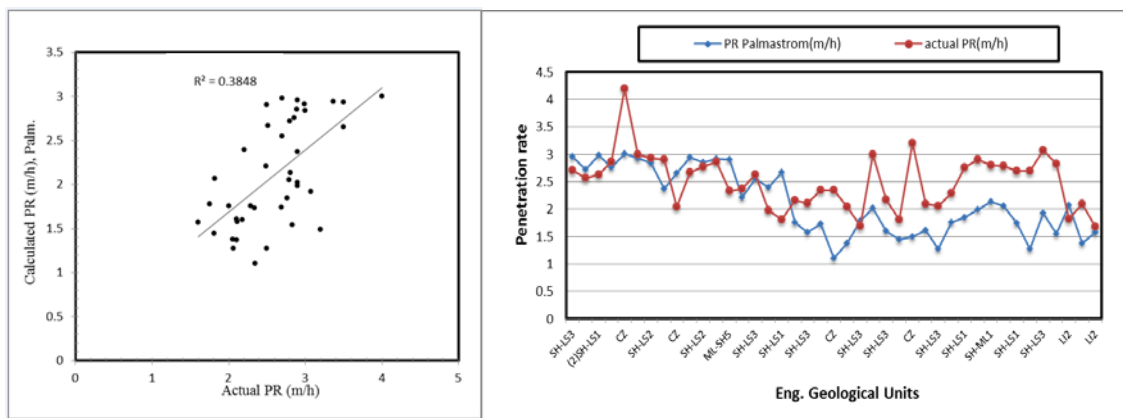
Geological	UCS (Mpa)	RQD(%)	FPI (فرمول عمومی)	فرمول زاکرس FPI	FN (KN/cutter)	دور دستگاه (RPM)	نرخ نفوذ (mm/rev)	PR (m/h) Hasan Pour
(1)SH-LS3	30	70	14.49784474	15.75251445	174.4647619	5.4	11.07535959	3.588416506
(2)SH-LS2	50	75	17.76091044	17.76091044	163.1928571	5.6	9.188315974	3.087274167
(3)SH-LS1	30	70	14.49784474	15.75251445	169.4090476	5.5	10.75441309	3.548956321
(4)ML-SH5	75	75	22.39863456	19.6288417	167.972619	5.85	8.557439181	3.003661152
(5)CZ	22.5	35	8.07683429	11.55363377	172.7888095	5.5	14.95536494	4.935270431
(6)FZ	22.5	50	10.11480306	13.02668571	175.7630952	5.6	13.49254133	4.533493886
(7)SH-LS2	50	80	19.76672562	18.48574695	163.7709524	5.695	8.859309436	3.027226034
(8)SH-LS3	30	65	13.45028103	15.13484952	154.8866667	5.305	10.23377645	3.257411045

۵. پیش‌بینی عملکرد ماشین با استفاده از مدل‌های انتخابی

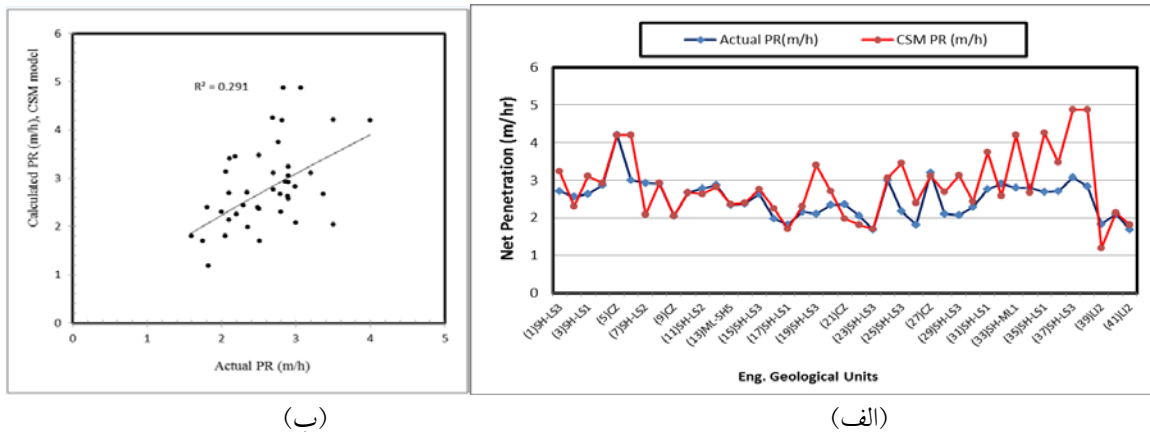
۵-۱. مدل NTNU

در شکل (۶. الف) نتایج محاسبه متوسط مقادیر پارامتر نرخ نفوذ ماشین در هر یک از واحدهای زمین شناسی مهندسی با استفاده از مدل NTNU ارائه و با عملکرد واقعی ماشین مقایسه شده است. شکل (۶. ب) نیز میزان همبستگی بین نرخ نفوذ مدل NTNU با مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در بسیاری از واحدهای زمین شناسی مهندسی به

در این بخش نتایج محاسبات نرخ نفوذ ماشین توسط مدل‌های رایج به منظور بررسی دقت و صحت هریک از مدل‌ها با عملکرد واقعی ماشین مقایسه و ارائه شده‌اند. در ادامه نتایج این محاسبات به تفکیک برای هر مدل‌ها ارائه می‌گردد.

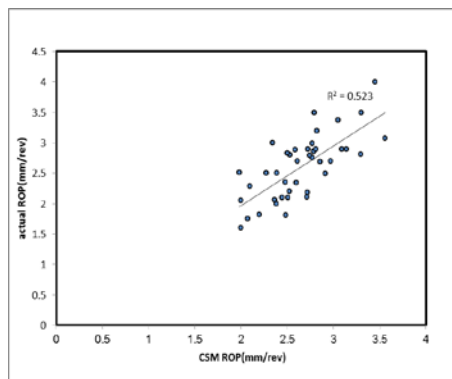


شکل ۷. الف) مقایسه نرخ نفوذ واقعی ماشین با نتایج حاصل از مدل پالمستروم، ب) میزان همبستگی بین نرخ نفوذ در مدل پالمستروم با مقادیر واقعی



(ب)

(الف)



(ج)

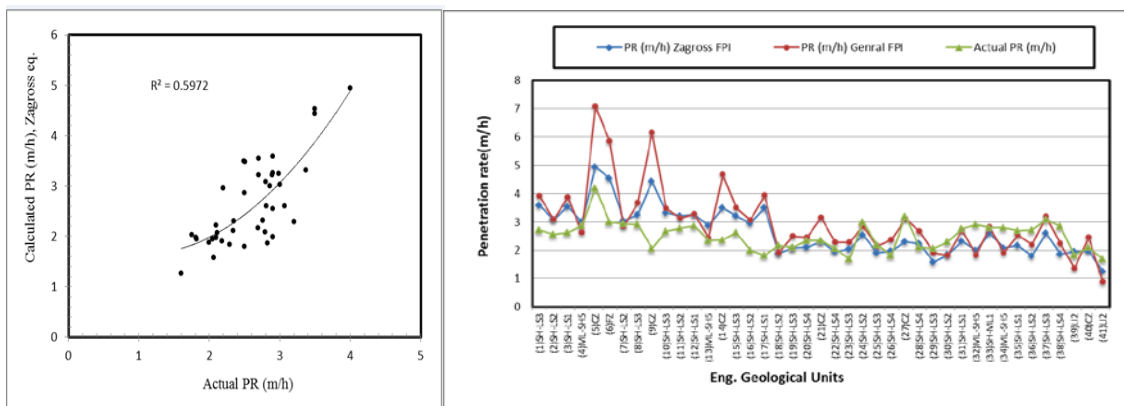
شکل ۸. الف) مقایسه نتایج محاسبه نرخ نفوذ واقعی ماشین با نرخ نفوذهای به دست آمده از مدل CSM؛ ب) همبستگی نرخ نفوذ حاصل از مدل CSM بر حسب (m/h) با مقادیر واقعی، ج) همبستگی نرخ نفوذ حاصل از مدل CSM بر حسب (mm/rev) با مقادیر واقعی

و رابطه (۱۲) عمومی توسعه داده شده، استفاده شده است. همان طور که در شکل (۹. الف) مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از رابطه (۱۰) پروژه زاگرس تطابق نزدیک و

۵-۴. مدل (Hasanpour et al. (2009, 2011)

برای محاسبه پارامترهای عملکردی ماشین با استفاده از مدل (Hasanpour et al. (2009, 2011) از رابطه (۱۰) تونل زاگرس

داده‌های مربوط به طول ۵/۶ تا ۱۵ کیلومتری این تونل را تجزیه و تحلیل کرده است. شکل (۹. ب) همبستگی بالا $R^2=60$ درصدی میان نرخ نفوذ واقعی و نرخ نفوذ پیش بینی شده با استفاده از رابطه زاگرس را نشان می‌دهد.



شکل ۹. الف) مقایسه نتایج محاسبه نرخ نفوذ واقعی ماشین با نرخ نفوذهای به دست آمده از مدل، ب) همبستگی میان نرخ نفوذ

واقعی و نرخ نفوذ پیش بینی شده (Hasanpour et al. (2009, 2011) مدل

تجربی برای پیش‌بینی عملکرد TBM در هر مورد می‌بایست گستره کاربرد خاص مدل و شرایط زمین شناسی باشد که مدل اولیه و اصلی بر آن مبتنی است. این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌های محلی (Hasanpour et al., 2009, 2011) که پارامترهای زمین شناسی مشابهی از لحاظ پایگاه داده دارند و همزمان از پارامترهای موثری برای ورودی‌های مدل استفاده می‌کنند بهترین هماهنگی با عملکرد واقعی را دارا هستند. در این مورد خاص همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج به دست آمده از روابط تجربی (۱۰ و ۱۲) که بر اساس داده‌های ۵/۶ کیلومتر از پروژه زاگرس بوده‌اند، هماهنگی مناسبی با عملکرد TBM در ادامه پروژه دارند؛ بنابراین این مدل می‌تواند برای کل زون زمین شناسی زاگرس ارائه شود. آنجا که صخره‌های رسوبی متصل از ضعیف تا نسبتاً قوی مانده شیل، مارلستون، گل‌سنگ، ماسه سنگ و سنگ آهک انواع غالب سنگ هستند. این زون زمین شناسی گستره غربی و جنوب غربی ایران را تشکیل داده و در حال حاضر پروژه‌های

۶. نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی، تعیین دقت و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های مختلف پیش بینی عملکرد ماشین تمام مقطع با داده‌های واقعی پروژه تونل انتقال آب زاگرس انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های تجربی NTNU (۱۹۹۵) Palmstrom و Hasanpour et al. (2009, 2011) به دلیل در نظر گرفتن اندرکنش پارامترهای زمین شناسی توده سنگ نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به مدل تئوریک CSM که از پارامتر ماده سنگ استفاده کرده‌است، دارند. در نتیجه با توجه به این که مدل NTNU دارای فرایند محاسبه مشابه نرخ نفوذ، با مدل Palmstrom (۱۹۹۵) است اما دارای آزمایش‌های هزینه بر و تقریباً غیرقابل دسترس در کشور است، استفاده از پارامترهای مدل پالمستروم نتایج معتبر مشابهی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده به عنوان نتیجه اصلی این تحقیق تاکید می‌گردد که مقیاس و معیار اصلی انتخاب مدل

همچنین برای استفاده از آنها باید آزمایش‌های مکانیک سنگی مختلفی انجام شود که این کار موجب افزایش هزینه‌ها و زمان، برای پیش بینی عملکرد ماشین می‌شود؛ بنابراین در پروژه‌های داخلی استفاده از مدل حسن پور هم به دلیل پارامترهای ورودی ساده‌ای که دارد و هم به دلیل همخوانی بانک اطلاعاتی مدل با پروژه‌های داخلی توصیه می‌شود.

طولانی حفاری تونل در دست احداث یا در مرحله طراحی هستند. در نهایت نتیجه گیری می‌شود که پارامترهای ورودی مدل حسن پور و همکاران نسبت به مدل‌های تجربی NTNU و پالمستروم دارای سادگی و سهولت بیشتری برای استفاده می‌باشد. این در حالی است که پارامترهای ورودی مدل NTNU و پالمستروم دارای پیچیدگی‌های زیاد می‌باشند و

منابع

- حسن پور، ج.، ۱۳۸۸. بررسی تأثیر پارامترهای زمین شناسی مهندسی بر عملکرد ماشین حفار تمام مقطع و اصلاح مدل‌های پیش‌بینی، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۶. گزارشات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب زاگرس (قطعه دوم)، منتشر نشده.
- Barton, N., 2000. TBM Tunneling In Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam, 173.
- Bruland, A., 1998. Hard rock tunnel boring, vol.1-10, ph.D.thesis, Norwegian university of science and technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Blindheim, O.T., (1979) Boreability Predictions for Tunneling. Ph.D. Thesis, Department of Geological Engineering, Norwegian Institute of Technology, p. 406.
- Cheema, S., 1999. Development of a Rock Mass Boreability Index for the Performance of Tunnel Boring Machines. Doctoral Dissertation, Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA.
- Delisio A, Zhao, J., 2014. A new model for TBM performance in blocky rock conditions. Int J Tunn Undergr Space Technol 43:440-452
- Palmstrom, A. 1995. RMI-a rock mass characterization system for rock engineering purposes", chapter 7, PhD thesis, Oslo University, Norway.
- Farmer, I.W. and Glossop, N.H., 1980. Mechanics of disc cutter penetration, Tunnels and Tunneling 12(6), pp. 22-25.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, M., Bruland, A., 2009. Development new equations for performance prediction. Geo Mechanics and Geoengineering: An International Journal 4 (4), 287-297.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, M., Bruland, A., Tavakoli, H.R., 2010. TBM performance analysis in pyroclastic rocks, a case history of Karaj Water Conveyance Tunnel (KWCT). Journal of Rock mechanics and Rock Engineering 4, 427-445.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Zhao, J., 2011. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. Tunn Undergr Space Technol 26:595-603.
- Nelson, P., O'Rourke, TD., Kulhawy, FH., 1983. Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks. In: Proceedings, 24th US symposium on rock mechanics, Texas A&M, College Station, TX, p 227-237.
- Ozdemir, L., 1977. Development of Theoretical equations for predicting Tunnel boreability. phD, Thesis, T-1969, Colorado school of mines, Golden Co., 1977.
- Ozdemir, L., Miller, R.J. and Wang, F.D., 1978. Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machin Design," NSF APR73-07776-A03, Colorado Scool of Mines, Golen Co, USA.
- Ramezanzadeh, A., 2005. Performance analysis and Development of new models for performance prediction of hard rock TBMs in rock mass. phD. Thesis, INSA, Lyon, France (unpublished).
- Rostami, J., Ozdemir, L., Nilsen, B., 1996. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models. In: Proceedings, The Annual Conference of the Institution of Shaft Drilling Technology (ISDT), Las Vegas, p.11.

- Rostami, J., 1997. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure, Ph. D.thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, P. 249.
- Rostami, J., 2008. Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction. *Geomechanik und Tunnelbau*, Ernst & Sohn, (Austrian Journal of Geotechnical Eng.), January 2008.
- Salimi, A., Faradonbeh, R.S., Monjezi, M., Moormann, C., 2016a. TBM performance estimation using a classification and regression tree (CART) technique. *Int J Bull Eng Geol Environ*. doi:10.1007/s10064-016-0969-0.
- Salimi, A., Rostami, J., Moormann, C., Delisio, A., 2016b. Application of non-linear regression analysis and artificial intelligence algorithms for performance prediction of hard rock TBMs. *Int J Tunn Undergr Space Technol* 58:236–246.
- Sato, K., Gong, F., Itakura, K., 1991. Prediction of disc cutter performance using a circular rock cutting ring. In: *Proceedings, The first International Mine Mechanization and Automation Symposium*, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- Sanio, H.P., 1985. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 22, 153–161.
- Yagiz S., 2002. Development of rock fracture and brittle ness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines. PhD. Thesis, Department of Mining and Earth systems Engineering, Colorado school of Mines, Golden, Colorado, USA, p 289.