

پیش بینی زون‌های مچاله شونده در مسیر تونل قمرود و تمهیدات مناسب جهت کاهش مخاطرات

مصطفی شریف زادهⁱ؛ کورش شهريارⁱⁱ؛ احمد ترکمنی قطبⁱⁱⁱ

چکیده

تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۳ و ۴) به طول ۱۶/۵ کیلومتر یکی از اجزای اصلی سیستم انتقال آب از حوزه دز به سد گلپایگان است. وجود توده سنگ‌های بسیار ضعیف در مسیر تونل و نیز ارتفاع روباره زیاد در بعضی از مقاطع، باعث بروز پدیده مچاله شونده و اعمال بارهای زیاد از طرف زمین بر سپر دستگاه TBM و ایجاد ناپایداری در سینه کار تونل شده است. در این مقاله با شناسایی نواحی و زون‌های با پتانسیل مچاله شونده در مسیر تونل و تعیین شدت وقوع آنها، میزان ریسک ناشی از برخورد با این نواحی تعیین شده و با توجه به نوع مشکلات موجود، راهکارهای مناسب ارائه شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل ریسک نشان می‌دهد که حدود ۵۰ درصد از کل مسیر تونل را زون‌های با همگرایی زیاد و با ریسک بسیار بالا تشکیل می‌دهد. عبور از این زون‌ها با مشکلات زیادی همراه بود و در مترژهای قبل باعث توقفات طولانی مدت دستگاه شده است. در حال حاضر عملیات تونل‌زنی در این زون‌ها با استفاده از راهکارهای مناسب و بکارگیری نیروی کاری باتجربه با نرخ پیشروی قابل قبولی انجام می‌شود.

کلمات کلیدی

تونل‌زنی مکانیزه، ماشین حفر تمام مقطع (TBM)، زون‌های مچاله شونده، توقف دستگاه TBM

Prediction of Squeezing zones in Ghomroud Tunnel and Appropriate Measures for Hazards Mitigation

M. Sharifzadeh, K. Shahriar, A. Torkamani Ghotb

ABSTRACT

Ghomroud water conveyance tunnel (lot 3 and 4) with the total length of 16.5 km, is designed and constructed to transfer water from the Dez River to the Golpayegan dam reservoir. The rock mass classification indicates weak formation with highly fractured rocks and overburden is also high, so that this condition causes squeezing and tunnel convergence causing to a heavy loading on the TBM shield and instability of the rocks at the tunnel face. Based on this study, the sections with potential of squeezing hazards are predicted, impact and magnify of squeezing is determined and appropriate mitigation measures for normal tunneling operation are presented. Results demonstrate that about 50% of tunnel alignment consists of sections with high risk levels resulted from squeezing hazard. At present tunnel excavation using appropriate risk mitigation measures and experienced personnel with acceptable advance rate is performing.

Keyword:

i استادیار، دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

ii دانشیار، دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

iii دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

* آدرس: تهران - خ حافظ - شماره ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) - کدپستی: ۴۶۱۳-۱۵۸۷۵ - تلفن ۶۴۵۴۲۹۵۲ -

پست الکترونیکی: Sharifzadeh@aut.ac.ir

۲/۸ متر با دبی خروجی ۲۳ مترمکعب در ثانیه در نظر گرفته شده است. متراژ (۱۸۰۰۰ متر) تا (۲۴۵۵۰ متر) از این تونل به وسیله دستگاه TBM با سپر تلسکوپی در حال حفر است.

تعیین و ارزیابی مشکلات ناشی از مچاله شونده‌گی با استفاده از تحلیل ریسک تا به حال در تونل قمرود صورت نگرفته است و با توجه به وجود زون های مخاطره آمیز در مسیر تونل و احتمال بروز مشکلات متعدد در صورت مواجهه با آنها، استفاده از این روش می‌تواند زون‌های با شرایط زمین شناسی دشوار را تا حدودی مشخص سازد و به هنگام حفاری، قبل از برخورد با این زون‌ها راهکارهای مناسب در نظر گرفته شود. با توجه به این موضوع ابتدا وضعیت زمین شناسی مسیر تونل و پارامترهایی که در بروز پدیده مچاله شونده‌گی تاثیر دارند، بررسی می‌شود. سپس مچاله شونده‌گی در زون‌های مختلف تونل با استفاده از روش تجربی، پیش بینی و شدت بروز آن در زون‌هایی که مستعد این مخاطره هستند، تعیین می‌شود. با توجه به احتمال وقوع مچاله شونده‌گی و تاثیر آن بر عملیات حفاری و دستگاه، ریسک ناشی از همگرایی در زون‌های مختلف مسیر تونل به دست آمده و در پایان، مشکلات به وجود آمده در اثر بروز این شرایط در تونل قمرود بررسی و روش‌های مقابله با آن ارائه می‌شود.

۲- وضعیت زمین شناسی مسیر تونل

مسیر تونل از دو سازند تشکیل شده است که بخش آهکی به سازند ژوراسیک و بخش شیل، اسلیت، فیلیت و ماسه سنگی مربوط به سازند ژوراسیک است. بخش زیادی از واحدهای زمین شناسی موجود در مسیر تونل (حدود ۸۰٪ درصد از سنگ‌های مسیر تونل) را توده سنگ‌های شیل، اسلیت، گرافیت شیبست تشکیل می‌دهد که این واحدها از شاخص کیفی پایینی برخوردار هستند. ارتفاع روباره نیز در طول مسیر از ۲۰۰ متر تا ۷۰۰ متر متغیر است. بنابراین می‌توان اینگونه بیان کرد که ممکن است بعضی از این سنگ‌ها تحت شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی موجود رفتار مچاله شونده‌گی از خود بروز دهند [۸] (شکل (۱) و جدول (۱)).

۳- ارزیابی مخاطرات زمین شناسی با استفاده از

تحلیل ریسک

مراحل اندازه گیری ریسک و تاثیراتی که روش کاهش ریسک خواهد داشت یکی از موضوعات مهم در حین اجرای فاز مهندسی در مراحل اولیه پروژه است. در مراحل ارزیابی ریسک

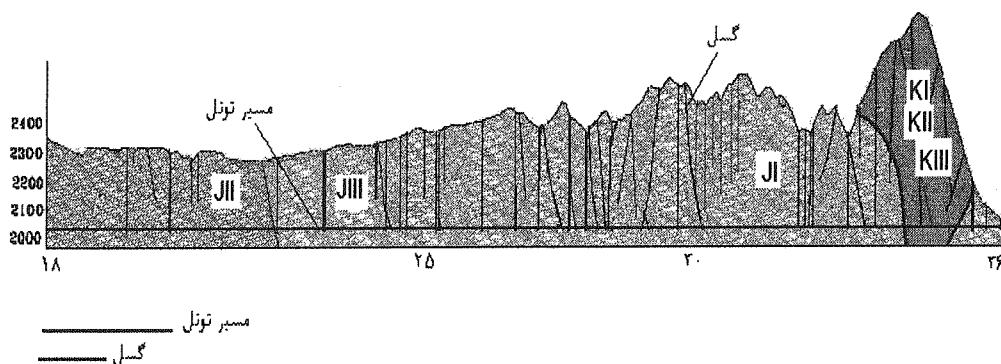
در سال‌های اخیر، استفاده از روش حفاری مکانیزه تمام مقطع (Tunnel Boring Machine) در ایران به دلیل مزایای بیشتر آن نسبت به روش چالزنی و انفجار اهمیت زیادی یافته است؛ اما از سوی دیگر شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی نامناسب، سابقه نه چندان طولانی اجرای این روش در ایران و سایر عوامل دیگر باعث شده است که حفر تونل با این روش با مشکلاتی همراه باشد و حتی در بعضی مواقع موجب شود که دستگاه متوقف شود. از جمله عوارض زمین شناسی تاثیر گذار بر عملیات حفاری وجود زون‌های مچاله شونده در مسیر تونل است. طبق تعریف انجمن بین المللی مکانیک سنگ^۱ مچاله شونده‌گی عبارت است از برش وابسته به زمان سنگ که به حرکت سنگ‌های درونگیر به سمت تونل منجر می‌شود [۶]. محققان زیادی از جمله انیشتین^۲ [۶]، بارلا^۳ [۳]، شانگ و همکاران^۴ [۹]، شریف زاده و همکاران [۲] هرکدام به نوعی تاثیر نامناسب زمین را بر روی عملیات تونل‌زنی مورد بررسی و اکثر آنها زون های مچاله شونده را به عنوان یکی از شرایط زمین شناسی نامناسب؛ که بر عملکرد دستگاه TBM و عملیات تونل‌زنی تاثیر زیادی دارد، معرفی کرده اند. پدیده مچاله شونده‌گی در سنگ، زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های محیطی حداکثر در سنگ دیواره از میزان باری که سنگ در حالت فشاری نامحصور می‌تواند تحمل کند، فراتر رود. تجربه نشان داده است که در تونل پدیده مچاله شونده‌گی در اثر تنش بالا تحت یکی از شرایط زیر به وجود می‌آید و باعث تغییر شکل می‌شود:

۱- ارتفاع روباره زیاد مانند عبور تونل از زیرکوه‌های مرتفع
۲- کاهش در مقاومت سنگ‌ها مانند تغییر در نوع سنگ یا شرایط سنگی با کیفیت پایین و ضعیف [۵].
به عقیده بارلا و پلیزا [۴] مهم ترین مشکلات به وجود آمده در حین حفاری مکانیزه با TBM تحت شرایط مچاله شونده‌گی عبارتند از:

۱- ناپایداری سینه کار، ۲- بروز مشکل در اعمال نیروی عکس العمل کافی به دلیل مشکل ایجاد شده در محل دیوارگیرهای ماشین تونل‌زنی بان، ۳- به علت سست و ناهمگن بودن زمین مسیر تونل، به هنگام پیشروی کنترل ماشین در مسیر واقعی آن با مشکل مواجه می‌شود.

تونل قمرود (قطعه ۳ و ۴) با ۱۶/۵ کیلومتر طول برای انتقال آب رودخانه دز به سد گلپایگان طراحی شده است. قطر تونل

از روش و مدت پایه ریزی شده استفاده می‌شود که احتمال هر



شکل (۱): زمین شناسی مسیر تونل قمرود (قطعه ۳ و ۴) به همراه موقعیت قرار گیری گسل ها

ه- مکرر^۱ است.

۲- فرض می‌شود که میزان پیامد ریسک یکی از پنج سطح:

الف- جزئی^۱، ب- متوسط^{۱۱}، ج- جدی^{۱۲}، د- مهم و اساسی^{۱۳}، ه- فاجعه آمیز^{۱۴} است.

۳- اندیس ریسک؛ که از ضرب کردن دو مقدار فوق به

دست می آید، دارای سطوح الف-پایین^{۱۵}، ب-متوسط^{۱۶}، ج- بالا^{۱۷}، د-بسیار بالا^{۱۸} (جداول (۲) و (۳)) خواهد بود.

با توجه به این توضیحات و جداول (۲) و (۳) می‌توان احتمال

رویداد و سپس ارزیابی تاثیرات آن را تعیین می‌کند. برای درجات مختلف ریسک و نیز میزان شدت و تاثیر آن امتیازاتی بین ۱ تا ۵ تعلق می‌گیرد. با ترکیب درجه احتمال و میزان تاثیر آن (ضرب این دو امتیاز) اندیس ریسکی بین ۱ تا ۲۵ برای هر حالت به دست خواهد آمد. ارزیابی مخاطرات شامل مراحل زیر است: ۱- اینگونه فرض می‌شود که احتمال وقوع ریسک یکی از پنج سطح: الف- غیر محتمل^۵، ب-بعید^۶، ج- احتمالی^۷، د-متنظره^۸

جدول (۱): خصوصیات واحدهای زمین شناسی مهندسی در

مسیر تونل قمرود [۸]

واحد	لیتولوژی	ویژگی	عمق (متر)	RM R	Q
KI	آهک مقاوم	توده ای تا متورق	۶۰۰	۵۴	۶/۲۷
KII	آهک رسی	نازک لایه تا متوسط لایه	۶۰۰	۴۱	۱/۶۷
KIII	واحدهای آهکی	زون خرد شده	۶۰۰	۲۱	۰/۸۸
J Ia	ماسه سنگ	مقاوم با دانه های کوارتز	۳۵۰	۴۷	۱/۳۲
J Ib	شیل و اسلیت	شپیستوز	۳۵۰	۳۰	۰/۵۵
J IIa	گرافیت شپیست	شپیستوز توسعه یافته	۲۰۰	۳۴	۰/۵۵
J IIb	کوارتز شپیست	شپیستوز	۲۰۰	۳۶	۰/۶۶
J IIc	کوارتزیت	رگه ای با ضخامت متغیر	۲۰۰	۵۴	۶/۶
J III	واحدهای دگرگونی	زون خرد شده	۴۵۰	۲۴	۰/۶۶

جدول (۲): احتمال و پیامد ریسک [۷]

توضیحات	نرخ احتمال	احتمال ریسک
احتمال رخ دادن رویداد بسیار بعید است	۱	غیر محتمل
احتمال رخ دادن رویداد برای یکبار بعید است	۲	بعید
احتمال رخ دادن رویداد برای یکبار وجود دارد	۳	احتمالی
احتمال رخ دادن رویداد بیش از یکبار وجود دارد؛ ولی متناوب نیست	۴	قابل انتظار
احتمال رخ دادن رویداد به صورت متناوب وجود دارد	۵	متناوب
توضیحات	نرخ پیامد	پیامد
رویداد باعث تأخیر یا آسیب رسیدن نمی شود	۱	جزئی
رویداد باعث آسیب رسیدن یا تأخیر جزئی تا دو روز می شود	۲	متوسط
رویداد باعث آسیب رسیدن یا تأخیر قابل جبران تا یک هفته می شود	۳	جدی
رویداد باعث آسیب رسیدن یا تأخیر قابل توجه و جبران پذیری بین یک تا دو هفته می شود	۴	مهم و اساسی
رویداد باعث آسیب رسیدن یا تأخیر غیر قابل جبران بیش از دو هفته می شود	۵	فاجعه آمیز

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \quad (2)$$

در این رابطه؛ σ_{cm} : مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ، P_0 : میزان تنش برجا، H : ارتفاع روباره، γ : وزن واحد حجم است. جتوا شدت مچاله شونده را مطابق جدول (۵) بیان کرده است که می‌توان از آن برای تعیین شدت مچاله شونده در تونل قمرود استفاده کرد. N_c یا درجه مچاله شونده برای تونل مطابق با جدول ۶ به دست می‌آید.

از نمودار شکل (۲) و جدول (۶) اینگونه نتیجه گیری می‌شود:

در زون IIIc احتمال وقوع پدیده مچاله شونده وجود ندارد یا بعید است؛ زیرا ارتفاع روباره پیش بینی شده از مقدار واقعی بیشتر است. در زون‌های KI, IIa, IIb با توجه به کیفیت توده سنگ و ارتفاع روباره، احتمال وقوع پدیده مچاله شونده وجود دارد و شدت آن متوسط پیش بینی می‌شود.

در زون‌های KII, IIb, IIIa شدت مچاله شونده زیاد است و ممکن است در حین حفاری و در توقفات طولانی دستگاه مشکل ساز شود. در زون‌های KIII, IIII شدت این پدیده بسیار زیاد است و برای جلوگیری از توقف احتمالی دستگاه در زون IIII تمهیدات پیشگیرانه لازم است (زون KIII قبلاً حفر شده است).

۵- ارزیابی زون های مچاله شونده با استفاده از

تحلیل ریسک

با توجه به زون‌هایی که احتمال وقوع مچاله شونده در آنها می‌رود، اندیس ریسک تعیین می‌شود. مقادیر به دست آمده به صورت جدول (۷) است. ریسک‌های تعیین شده بر اساس ارتفاع روباره، کیفیت توده سنگ، وجود کانی‌های رسی در توده سنگ و وجود درزه‌های با امتداد عمود بر امتداد صفحات شیستوزیته می‌باشد. با استفاده از این جداول می‌توان زون‌هایی را که شدت مچاله شونده زیاد دارند (دارای ریسک بسیار بالا) را مشخص کرد (شکل (۳)). از این نمودار چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در حدود ۵۰ درصد از کل مسیر تونل را زون‌های مچاله شونده با ریسک بالا تشکیل می‌دهد که از جنبه‌های حفاری و نگهداری تونل قمرود بسیار حائز اهمیت هستند. زون IIII؛ که متشکل از سنگ‌های خرد شده است و ارتفاع روباره در این زون زیاد است، از نظر پایداری و بروز مشکلات ناشی از مچاله شونده اهمیت بیشتری دارد؛ بنابراین لازم است قبل از برخورد با این زون، پیش بینی‌های لازم انجام شود و تمهیدات لازم به منظور مقابله با مشکلات بکار

جدول (۳): اندیس ریسک [۷]

توضیحات	نرخ اندیس ریسک	اندیس ریسک
ریسک بدون هیچ کاهش قابل قبول است	۱-۴	پایین
ریسک نسبتاً قابل قبول است. کاهش آن ممکن است نیاز باشد	۵-۹	متوسط
ریسک در مرز قابل قبولی قرار دارد. تمهیدات برای حذف یا کاهش ریسک بایستی اعمال شود	۱۰-۱۵	بالا
ریسک قابل قبول نیست. تمهیدات برای حذف یا کاهش ریسک بایستی صورت گیرد	۱۶-۲۵	بسیار بالا

۴- پیش بینی مچاله شونده و تعیین شدت آن در تونل قمرود

برای پیش بینی پدیده مچاله شونده و شدت آن، روابط متعددی ارائه شده است که بعضی از این روابط از دقت قابل قبولی برخوردار هستند و می‌توانند برای پیش بینی این پدیده در تونل قمرود بکار روند. با مقایسه روش‌های تجربی مختلف و مقادیر به دست آمده اینگونه نتیجه گیری شد که رابطه تجربی سینگ و همکاران^{۱۱} (۱۹۹۲) برای پیش بینی پدیده مچاله شونده در تونل قمرود از دقت قابل قبول تری برخوردار است. این رابطه به صورت زیر است [۳]:

$$H = 350 Q^{1/3} \text{ [m]} \quad (1)$$

این رابطه معادله خطی است که برای تشخیص زمین مچاله شونده و غیرمچاله شونده بکار می‌رود. در این رابطه H : ارتفاع روباره یا عمق تونل (متر) و Q : کیفیت توده سنگ است.

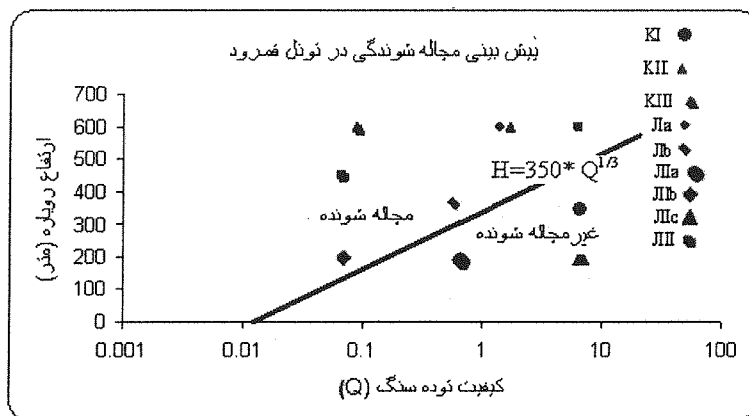
با قرار دادن مقادیر مختلف Q , H های مختلفی به دست می‌آید. اگر نقطه به دست آمده پایین این خط قرار گیرد، زمین غیرمچاله شونده و اگر بالای آن قرار گیرد، زمین مچاله شونده خواهد بود (شکل (۲)) یعنی:

$$H \gg 350 Q^{1/3} \text{ [m]} \quad \text{زمین مچاله شونده:}$$

$$H \ll 350 Q^{1/3} \text{ [m]} \quad \text{زمین غیرمچاله شونده:}$$

با استفاده از مقادیر به دست آمده Q و ارتفاع روباره (جدول (۴)) [۸]، روابط فوق بررسی شد تا نواحی مچاله شونده مشخص شود. برای تعیین میزان شدت مچاله شونده از رابطه جتوا و همکاران^{۲۰} (۱۹۸۴) استفاده می‌شود [۳]:

وقوع و تاثیر یا پیامد مربوط به زون‌های مچاله شونده را به عنوان یکی از مخاطرات زمین شناسی محاسبه و اندیس ریسک را برای آن تعیین کرد.



شکل (۲): نمودار پیش بینی پدیده مچاله شوندگی در تونل قمرود

جدول (۵): تعیین درجه و شدت مچاله شوندگی

[۳]

(N ₀)	نوع رفتار زمین
<0.4	مچاله شوندگی شدید
0.4-0.8	مچاله شوندگی زیاد
0.8-2.0	مچاله شوندگی متوسط
>2	غیر مچاله شوندگی

۶- روش های مقابله با مشکلات ناشی از مچاله

شوندگی در تونل قمرود

برای مقابله با مخاطرات ناشی از پدیده مچاله شوندگی روش های زیر بکار گرفته شد:

۱- تزریق مواد روان کننده بنتونیت یا گریس به پشت سپرها برای کاهش اصطکاک بین سپر و زمین اطراف: با تزریق این مواد اصطکاک بین سنگ های خرد شده اطراف و سپر کاهش یافته و احتمال گیر کردن سپر کاهش می یابد. تزریق مواد روان کننده از طریق دریچه هایی که در اطراف سپر ایجاد شده است، به محل مورد نظر صورت می گیرد. با استفاده از این روش نیروی پیشران لازم برای جلو راندن دستگاه به دلیل درگیر بودن کمتر سپر با دیواره اطراف کاهش می یابد. این روش در حال حاضر بنابه صلاحدید پرسنل اجرایی بکار گرفته نشده است؛ ولی ممکن است در مترژهای بعد و در صورت بروز مچاله شوندگی، از این روش استفاده شود.

۲- کاهش زمان تعمیرات و نگهداری و جلوگیری از توقفات ناخواسته، تخصیص زمان های خاص به عملیات تعمیر و نگهداری دستگاه، افزایش تعداد واگن های باربری در مواقع ضروری به منظور کاهش توقف عملیات و نگهداری سریع فضای

گرفته شود. عواملی همچون توقفات طولانی دستگاه و عملیات به خاطر تعمیر و نگهداری و سرعت پیشروی کم در این زون باعث خواهد شد که زمین اطراف به سرعت سپر دستگاه را تحت فشار قرار دهد و از ادامه عملیات جلوگیری کند.

جدول (۳): اندیس ریسک [۷]

توضیحات	نرخ اندیس ریسک	اندیس ریسک
ریسک بدون هیچ کاهش قابل قبول است	۱-۴	پایین
ریسک نسبتاً قابل قبول است. کاهش آن ممکن است نیاز باشد	۵-۹	متوسط
ریسک در مرز قابل قبولی قرار دارد. تمهیدات برای حذف یا کاهش ریسک بایستی اعمال شود	۱۰-۱۵	بالا
ریسک قابل قبول نیست. تمهیدات برای حذف یا کاهش ریسک بایستی صورت گیرد	۱۶-۲۵	بسیار بالا

جدول (۴): پیش بینی نواحی مچاله شونده در تونل قمرود

واحد	ضخامت روباره (متر)	Q	عمق مچاله شوندگی
KI	۶۰۰	۶/۲۷	۶۴۲
KII	۶۰۰	۱/۶۷	۴۱۵
KIII	۶۰۰	۰/۰۸۸	۱۵۷
JIa	۶۰۰	۱/۳۲	۳۸۴
JIb	۳۵۰	۰/۵۵	۲۸۷
JIIa	۳۵۰	۰/۵۵	۲۸۷
JIIb	۲۰۰	۰/۶۶	۳۰۵
JIIc	۲۰۰	۶/۶	۶۵۳
JIII	۴۵۰	۰/۰۶۶	۱۴۳

ریزش کرده می‌تواند در کاهش تأثیر این پدیده مؤثر باشد. بعضی از این روش‌ها بخوبی بکار گرفته نشده است؛ مثلاً تخصیص زمان‌های خاص به عملیات تعمیر و نگهداری دستگاه و جلوگیری از توقفات که می‌تواند به دلیل توقفات یکباره دستگاه به خاطر ریزش و تأخیر زمانی بین حفاری و نصب قطعات سگمنتی به خاطر دیر رسیدن آنها به محل‌های نگهداری،

جدول (۶): تعیین شدت مجاله شونگی برای زون‌های مختلف تونل قمرود

واحد	H	γ	P_0	σ_{cm}	(No) درجه مجاله شونگی
KI	۶۰۰	۲/۷۱	۱۶/۲۶	۱۴/۸	۰/۹
KII	۶۰۰	۲/۷۱	۱۶/۲۶	۸	۰/۵
KIII	۶۰۰	۲/۷۱	۱۶/۲۶	۴/۷	۰/۳
JIa	۶۰۰	۲/۷۳	۹/۵۵۵	۱۶/۶	۱/۱
JIb	۳۵۰	۲/۷۲	۹/۵۲	۵/۹	۰/۶
JIa	۳۵۰	۲/۸	۵/۶	۴/۷	۰/۵
JIb	۲۰۰	۲/۸۱	۵/۶۲	۵/۲	۰/۹
JIc	۲۰۰	۲/۸	۵/۶	۲۷	4.8
JIId	۴۵۰	۲/۸۱	۱۲/۶۴۵	۴/۱	0.3

جدول (۷): تعیین میزان ریسک ناشی از پدیده مجاله شونگی در تونل قمرود [۱]

نام واحد	KI	KII	KIII	JIa	JIb
ارتفاع روباره	۴۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۳۵۰	۳۵۰
Q	۶/۲۷ (متوسط)	۱/۶۷ (ضعیف)	۰/۰۸۸ (خیلی ضعیف)	۱/۳۲ (ضعیف)	۰/۵۵ (خیلی ضعیف)
نرخ احتمال	-	۵	۵	۵	۵
پیامد ریسک	-	۳	۵	۲	۴
اندیس ریسک	-	۱۵	۲۵	۱۰	۲۰
توصیف ریسک	ریسکی وجود ندارد	ریسک بالا	ریسک بسیار بالا	ریسک بالا	ریسک بسیار بالا

ادامه جدول (۷): تعیین میزان ریسک ناشی از پدیده مجاله شونگی در تونل قمرود [۱]

نام واحد	JIa	JIb	JIc	JIId
ارتفاع روباره	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۴۵۰
Q	۰/۵۵ (خیلی ضعیف)	۰/۶۶ (خیلی ضعیف)	۶/۶ متوسط	۰/۰۶۶ (خیلی ضعیف)
نرخ احتمال	۵	۵	۰	۵
پیامد ریسک	۲	۲	۰	۵
اندیس ریسک	۱۰	۱۰	۰	۲۵
توصیف ریسک	ریسک بالا	ریسک بالا	ریسکی وجود ندارد	ریسک بسیار بالا



شکل (۳): ریسک موجود و برخورد با زون های مچاله شونده در تونل قمرو

همگرایی، جا زدن قطعات سگمندی با مشکل مواجه شده است و نیروی اعمالی برای جا زدن آنها افزایش یافته است (گاه تا ۴۰۰ بار فشار چک بایستی اعمال شود) که این فشار خود باعث ایجاد ترک و گسترش آنها در قطعات قبلی می‌شود. در بعضی مواقع نیز انتقال نادرست قطعات سگمندی از بیرون به داخل تونل باعث شکستگی کناره های آنها شده است که این امر می‌تواند به هنگام نصب قطعات، باعث ایجاد خرد شدگی بیشتر در آنها شود. از جمله راهکارهایی که به زمان و هزینه زیادی نیاز ندارد، آموزش حمل و انتقال قطعات بتنی برای پرسنل مربوطه و نیز آموزش نصب درست این قطعات در اینگونه موارد است. روشی که می‌تواند بکار رود این است که با نصب قاب‌های فولادی با ضخامت مناسب و پرکردن سریع پشت سیستم نگهداری، جابجایی صورت گرفته به حداقل برسد و بتن موجود در بین قاب‌ها و دیواره تونل باعث کاهش این تأثیر می‌شود.

۵- در بعضی از مترها با افزایش فشارهای محصور کننده در اطراف سپر جلویی، میزان نیروی بازدارنده اعمال شده به سطح خارجی سپر، افزایش و پیشروی دستگاه حفاری کاهش یافت. این عامل باعث پایین آمدن نرخ نفوذ، کاهش توان و گشتاور صفحه حفار و نیز افزایش نامتعارف فشار سیلندره‌های سگمندی شد. در این حالت به محض درگیری سپر با سنگ‌های اطراف و توقف ماشین، بلافاصله از طریق دریچه های واقع در بدنه سپر، کارگران به پشت سپر رفته و با استفاده از روش دستی سنگ‌های درگیر شده را از سپر جدا و به بیرون دستگاه منتقل می‌کنند؛ سپس در پوسته خارجی سپر از مواد روان کننده؛ مانند گریس یا بنتونیت استفاده شد تا از اصطکاک به وجود آمده تا حد امکان جلوگیری شود. پس از این کار، ماشین مجدداً شروع به کار می‌کند و پس از پشت سرگذشتن این زون بلافاصله قطعات سگمندی نصب و با پر کردن سریع پشت آنها از جابجایی بیشتر سنگ‌های دیواره یا

۳- افزایش اضافه حفاری و عمل تعریض مقطع تونل با بستن گیج^{۲۱} صفحه حفار؛ با تعریض قطر تونل، طول مدت عملیات حفاری دستگاه در اینگونه زمین‌ها، بیشتر شده و درگیری کمتری بین سپر و دیواره تونل به وجود می‌آید. علی‌رغم قابل پیش بینی بودن این پدیده بر اساس روش‌های متداول (بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی متر)، برای دستگاه TBM تنها اضافه حفاری معادل ۶۴ میلیمتر در نظر گرفته شده است که این امر باعث می‌شود به دلیل طول زیاد سپر، در بعضی موارد قبل از اینکه دستگاه به طور کامل از زون شدیداً مچاله شونده عبور کند مجدداً به دلیل همگرایی زمین متوقف شود. البته تاکنون بجز موارد معدودی با انجام اضافه حفاری مقطع لازم برای عبور سپر دستگاه فراهم و دستگاه بدون هیچ مشکلی از این زون‌ها عبور کرده است. از طرفی این نکته را بایستی در نظر داشت که با انجام اضافه حفاری، میزان مواد پرکننده (شن نخودی) و نیز مواد تزریقی (دوغاب) به پشت سگمندی ها افزایش می‌یابد. همچنین ممکن است علاوه بر مچاله شوندگی، ریزش در سینه کار و دیواره تونل نیز رخ دهد و با بیرون کشیدن برش دهنده‌ها به منظور اضافه حفاری، مواد سست شده در دیواره و سقف تونل تحریک و ناپایداری به وجود آمده گسترش یابد [۲].

۴- در تونل قمرو ترک‌های افقی و موازی محور تونل در اغلب سگمندی‌ها مشاهده شد. علت این ترک‌ها همگرایی سریع تونل بود که در فاصله زمانی بسیار کوتاه پس از حفاری موجب از بین رفتن فاصله مورد نیاز برای جازدن این قطعات می‌شود. به صورتی که خوردن شن نخودی در دیواره های تونل به صفر می‌رسد و این امر موجب شده است تا فضای خالی در بالای قطعات پیش ساخته به وجود آید و توزیع تنش ناشی از همگرایی به صورت یکنواخت به دیواره قطعات بتنی اعمال نشود و در ادامه باز شدگی بیشتر ترک‌ها و حتی پوسته پوسته شدن آن را به دنبال داشته باشد. همچنین با شدت

۷- نتیجه گیری

[۷]

- پیش بینی زون‌های مچاله شونده و روش‌های مقابله با آن از جمله موضوعات بسیار مهم در حفر تونل است که در صورت عدم مقابله با آن مشکلاتی از قبیل تأخیر در عملیات و توقف دستگاه رخ می‌دهد.

[۸]

[۹]

- با توجه به وضعیت زمین شناسی مسیر تونل، در حدود ۵۰ درصد از سنگ‌های آن از نظر مچاله شونده در زون‌های با ریسک بالا قرار دارند. این میزان ریسک در ادامه عملیات حفاری باعث مشکلات متعددی می‌شود و هزینه‌های عملیاتی و زمان تکمیل پروژه افزایش می‌یابد.

[۱۰]

- روش اضافه حفاری برای عبور دستگاه از زون‌های مچاله شونده در تونل قمرود از کارآیی خوبی برخوردار است؛ اما در برخی مقاطع به دلیل شدت این پدیده، اضافه حفاری در نظر گرفته شده کافی نبوده و دستگاه ممکن است متوقف شود. - مشکل اصلی تأخیرات حفاری در تونل قمرود پس از عامل زمین، افزایش قابل ملاحظه تأخیرات مرتبط با تأمین و تعمیر قطعات مختلف پشتیبانی است که در این زمینه توصیه می‌شود در زمان‌های توقف دستگاه، به تعمیرات اساسی قطعات مختلف سیستم پشتیبانی اقدام شود.

۸- منابع

- [۱] ترکمنی قطب، احمد؛ "مخاطرات تونل‌زنی مکانیزه تمام مقطع (TBM) و راهکارهای مقابله با آن- مطالعه موردی تونل انتقال آب قمرود؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۵).
- [۲] شریف‌زاده، مصطفی؛ شهریار، کوروش؛ ترکمنی قطب، احمد؛ همتی شعبانی، علی؛ "اجرای تونل به روش مکانیزه با استفاده از TBM در توده سنگ‌های ضعیف (مطالعه موردی گیرکردن و توقف دستگاه TBM در تونل انتقال آب قمرود)، هفتمین کنفرانس تونل ایران-دانشگاه صنعتی شریف، صفحات ۹۹۵-۱۰۰۶ (۱۳۸۵).
- [۳] Barla, G., 2001, "Tunnelling under squeezing rock conditions", Eurosummer-School in Tunnel Mechanics, Innsbruck .
- [۴] Barla, G., Pelizza, S., 2000. "TBM tunnelling in difficult ground conditions". Geoen, Melbourne, Australia.
- [۵] Deere, D.U. 1981, "Adverse Geology and TBM Tunneling Problems." Proc.Rapid Excavation and Tunneling Conference, California, May, pp. 574-585.
- [۶] Einstein, H. H., 1996 "Tunnelling in Difficult

Ground-Swelling Behaviour and Identification of Swelling Rock", Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering". Vol. 29 No. 3, pp 113-124.
Gordon, T.Clark, Art Borst, 2002 "Addressing Risk in Seattle's Underground", MANAGING RISK IN UNDERGROUND ENGINEERING, TRANSPORTATION AND SOFTWARE DEVELOPMENT, PB Network, pp 34-37.
Sahel Consulting Engineering report, June 2005 SHL 2019 UNGR MTUN RM RP 003 DO.,
Shang, Y., Xue, J., Wang, S., Yang, Z., Yang, J. 2004. "A case history of tunnel boring machine jamming in an interlayer shear zone at the yellow river diversion project in China". Engineering Geology, 71, 199-211.
Sharifzadeh, M., Hemmati Shaabani, A., "TBM tunneling in adverse rock mass with emphasis on TBM jamming accident in Ghomroud water transfer tunnel", Van Cotthem, Charlier, Thimus & Tshibangu (ed), May 9-12, Liege, Belgium, pp. 643-647. 2006.

۱. ISRM	۸. Expected	۱۵. Low
۲. Einstein	۹. Occasional	۱۶. Medium
۳. Barla	۱۰. Minor	۱۷. High
۴. Shang et al	۱۱. Moderate	۱۸. Very High
۵. Improbable	۱۲. Serious	۱۹. Singh et al
۶. Remote	۱۳. Major	۲۰. jetwa et al
۷. Probable	۱۴. Catastrophic	۲۱. Gage