

مقایسه فنی اقتصادی استفاده از ماشین‌های حفاری تمام مقطع سپری برای حفاری قطعه دوم تونل قمرود

حسین شریعت علوی^۱، محمد عطایی*^۲، بهزاد علیزاده صوری^۳، مهدی صراطی^۴، مهدی زورآبادی^۵

- ۱- کارشناس ارشد استخراج معدن دانشگاه صنعتی شاهرود، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، shariatalavi.h@gmail.com
- ۲- استاد دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن و ژئوفیزیک، ataei@shahroodut.ac.ir
- ۳- دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، beh.alizadeh@gmail.com
- ۴- دانشجوی دکترا، دانشکده عمران، دانشگاه کوئینزلند، استرالیا m.serati@uq.edu.au
- ۵- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه نیوساوت ولز، استرالیا mehdi_zoorabadi@yahoo.com

(دریافت ۱۳ تیر ۱۳۸۹، پذیرش ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۱)

چکیده

تونل قمرود به طول کلی ۳۵/۷ کیلومتر بخشی از طرح بزرگ انتقال آب از سرشاخه‌های حوضه دز به شهر قم است. برای حفاری قطعه ۲ آن به طول ۶+۷۰۰ کیلومتر امکان استفاده از روش حفاری مکانیزه بررسی شده است. برآورد میزان مجاله شونددگی در مسیر قطعه دوم تونل قمرود نشان دهنده امکان رخ دادن پدیده مجاله شونددگی در مترهای زیادی از مسیر تونل است. در این مقاله به منظور انتخاب نوع دستگاه حفر تونل تمام مقطع بررسی فنی و اقتصادی بر روی عملکرد ۲ نوع سپر منفرد و سپر مضاعف (تلسکوپ) از لحاظ میزان پیشروی دستگاه حفر تونل تمام مقطع و مقابله با شرایط مجاله شونددگی صورت گرفته است. به منظور پیش بینی نرخ پیشروی در واحدهای زمین شناسی مسیر تونل، از روش NTH که بر اساس ۲۳۰ کیلومتر تونل‌سازی می‌باشد، استفاده شده است. میزان مجاله شونددگی با روش‌های تجربی، نیمه تجربی و تئوری- تحلیلی برآورد شده است و برای تخمین میزان همگرایی به منظور محاسبه میزان اضافه حفاری لازم برای غلبه بر پدیده مجاله شونددگی، نرم افزار Flac^{2D} مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از این مقاله بررسی فنی و اقتصادی بر روی نوع سپرهای دستگاه حفر تونل تمام مقطع در شرایط زمین‌های با قابلیت مجاله شونددگی است تا دستگاه مناسب انتخاب گردد ضمن این که امکان گیر افتادن دستگاه نیز در این مناطق به حداقل کاهش پیدا کند. با توجه به بررسی‌های فنی و اقتصادی صورت گرفته دستگاه حفر تونل تمام مقطع از نوع سپر مضاعف برای حفاری قطعه ۲ پروژه قمرود گزینه برتر تشخیص داده شده است.

کلمات کلیدی

تونل قمرود، حفاری مکانیزه، مجاله شونددگی، NTH، Flac^{2D}، سپر منفرد و مضاعف

۱- مقدمه

انتخاب مناسب دستگاه حفار مکانیزه و نوع سپر می‌تواند در موفقیت و کاهش هزینه‌های یک پروژه تأثیر بسزایی داشته باشد. در صورتی که شرایط زمین شناسی ایجاب کند که دستگاه حفار مکانیزه سپردار مورد استفاده قرار بگیرد در هنگام انتخاب نوع سپر و منفرد بودن و یا مضاعف بودن آن علاوه بر پارامترهایی همچون شعاع انحناء قوس مسیر تونل، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و اندیس کیفی سنگ (RQD)^۱، عملکرد دستگاه از لحاظ میزان پیشروی و رسیدن به برنامه زمان‌بندی طرح و مقابله با شرایط مچاله شونده^۲ در صورت مستعد بودن شرایط زمین شناسی برای این پدیده، بسیار مهم است.

پدیده مچاله شونده در توده سنگ‌های با قابلیت تغییر شکل پذیری و ویژگی‌های مقاومتی ضعیف و در شرایط روباره بالا رخ می‌دهد. یک تعدادی از ترکیبات سنگی که عبارت از گنایس، میکا شیست، کالک شیست، سنگ‌های رسی، رس شیلی، مارن رسی و ... می‌باشند، اگر شرایط بارگذاری برای آغاز مچاله شونده فراهم شود، مچاله شونده در آن‌ها رخ می‌دهد.

با توجه به این که قطعه ۲ تونل انتقال آب قمرود در مسیر خود از سنگ‌های شیستی، میکا شیست و آمفیبولیت شیست‌ها عبور می‌کند و ارتفاع روباره نیز در بعضی از این واحدها زیاد است، بنابراین بررسی مچاله شونده در مسیر تونل بسیار مهم است.

می‌توان دستگاه سپر منفرد^۳ انتخاب نمود و با توجه به کوتاه‌تر بودن طول شیلد آن‌ها نسبت به دستگاه‌های سپر مضاعف^۴ (تلسکوپ) میزان اضافه حفاری کمتری داشت یا این-که می‌توان دستگاه سپر مضاعف انتخاب کرد که دارای سرعت پیشروی بیشتری است، پروژه زودتر به اتمام می‌رسد و هزینه‌های آن کاهش می‌یابد از طرفی با توجه به بلند تر بودن شیلد آن‌ها میزان اضافه حفاری بیشتری صورت می‌گیرد، ضمن این-که قیمت دستگاه سپر مضاعف نیز گرانتر است. اما سؤالاتی که پیش می‌آید عبارتند از: در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف پروژه چقدر زودتر به پایان می‌رسد و چه مقدار صرفه-جویی در هزینه و زمان‌بندی می‌شود؟ در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف چه میزان اضافه حفاری بایستی صورت

بگیرد و چه هزینه‌ای در پی خواهد داشت؟ برای مقابله با شرایط مچاله شونده استفاده از کدام دستگاه خطر کمتری را در پی دارد؟ بنابراین باید بررسی فنی و اقتصادی در زمینه مطالب ذکر شده در بالا صورت بگیرد تا سپر بهینه انتخاب شود.

۲- شرایط زمین‌شناسی عمومی و مهندسی مسیر تونل در قطعه ۲

مسیر تونل از دیدگاه تقسیمات زمین‌شناسی ایران قسمتی از ناحیه سنندج- سیرجان است. این منطقه در شمال شرقی روراندگی اصلی زاگرس قرار گرفته است. منطقه سنندج- سیرجان از نظر تاریخچه ساختاری به ایران مرکزی شباهت زیادی دارد و دگرشیب‌های شدید دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک ایران مرکزی کم و بیش در این منطقه نیز دیده می‌شود که هیچکدام از آن‌ها در زاگرس وجود ندارد. نبود سازندهای آتشفشانی دوران سنوزوئیک و همچنین تشابه روند کلی این منطقه با روند زاگرس، آن‌را از ایران مرکزی جدا می‌کند. سنگ‌های دگرگونی این منطقه را با رخساره آمفیبولیت، گنایس، کیانیت و آمفیبولیت شیست و مرمر به پرکامبرین نسبت داده‌اند، ولی ممکن است بخش بالایی این رخساره‌ها تا پالئوزوئیک پیشین نیز ادامه داشته باشد [۱].

قطعه ۲ تونل انتقال آب قمرود در طول مسیر گذر خود از نظر ریخت‌شناسی از نواحی مختلفی عبور می‌کند. تنوع لیتولوژیکی موجود در مسیر گذر تونل، ناپیوستگی و همبری‌های مختلف سنگی با مقاومت‌های متفاوت در برابر فرسایش، سبب رخنمون نواحی با ریخت‌شناسی گوناگون شده است. وجود سنگ‌هایی چون شیست، آمفیبولیت، اسلیت، کوارتزیت، متادولومیت، متاریولیت، متادیوریت و مرمرها و اختلاف لیتولوژیکی این سنگ‌ها در شکل‌گیری مورفولوژی گسترده طرح تأثیر بسزایی داشته‌اند. در تمامی طول مسیر نیز خط پروژه در زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد [۱].

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی، واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۲) و همچنین پارامترهای ژئومکانیکی برای واحدهای مختلف مسیر تونل در جدول آورده شده است [۱].

جدول ۱: واحدهای زمین‌شناسی مهندسی و پارامترهای ژئومکانیکی برای واحدهای مختلف مسیر تونل (قطعه ۲) [۱]

ϕ (deg)	(MPa)	مقاومت توده سنگ (Mpa)	مدول الاستیسیته (GPa)	Q	متوسط روباره (m)	UCS (MPa)	γ (gr/cm ³)	مترای (m)	واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل	توده سنگ‌های مسیر تونل
۳۹-۴۱	۰/۴	۰/۸۵-۲/۱	۳-۳/۳	۰/۹-۶/۷	۱۸۰	۶۴/۳	۲/۸	۱۱۳۱۱ الی ۱۱۴۵۱	MDL5	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۳۵-۴۰	۰/۲۵-۰/۳۵	۰/۶-۱/۴۴	۲/۵-۳	۰/۵-۴/۶	۲۰۰	۵۸/۳۳	۲/۹۶	۱۱۴۵۱ الی ۱۱۵۹۶	AS2	آمفیبولیت شیست
۴۱-۴۲	۰/۴۵	۱/۸۲-۴/۱	۵/۵-۵/۸	۱/۶-۵	۱۸۵	۶۴/۳	۲/۸	۱۱۵۹۶ الی ۱۱۹۷۱	MDL6	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۳۵-۴۰	۰/۲۵-۰/۳۵	۰/۶-۱/۴۴	۲/۵-۳	۰/۵-۴/۶	۲۰۰	۵۸/۳۳	۲/۹۶	۱۱۹۷۱ الی ۱۲۲۸۷	AS3	آمفیبولیت شیست
۴۱-۴۲	۰/۴۵	۱/۸۲-۴/۱	۵/۵-۵/۸	۱/۶-۵	۲۰۰	۶۴/۳	۲/۸	۱۲۲۸۷ الی ۱۲۳۴۵	MDL7	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۰/۵۱-۰/۹۷	۲-۲/۴	۰/۲-۱/۸	۲۹۰	۴۰/۲	۲/۸	۱۲۳۴۵ الی ۱۴۹۲۴	Sh5	شیست و اسلیت همراه با آمفیبولیت
۴۰-۴۵	۰/۴-۰/۵	۲/۸۵-۴/۵	۵/۵-۶	۳/۱-۱۲/۴	۳۳۵	۷۲/۱۲	۲/۷۳	۱۴۹۲۴ الی ۱۵۲۶۸	Trh1	متاریولیت
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۰/۷-۱/۴۴	۲/۵-۳	۳/۵-۱۲	۳۴۰	۵۷	۲/۸۱	۱۵۲۶۸ الی ۱۵۳۵۰	Tsh	آمفیبولیت شیست‌ها با میان لایه‌های نازکی از میکاشیست
۴۰-۴۵	۰/۴-۰/۵	۲/۸۵-۴/۵	۵/۵-۶	۳/۱-۱۲/۴	۳۸۰	۷۲/۱۲	۲/۷۳	۱۵۳۵۰ الی ۱۵۷۰۶	Trh2	متاریولیت
۳۵-۴۰	۰/۲۵-۰/۳۵	۰/۶-۱/۴۴	۲/۵-۳	۰/۵-۴/۶	۴۰۰	۵۸/۳۳	۲/۹۶	۱۵۷۰۶ الی ۱۶۴۳۲	As4	آمفیبولیت شیست
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۱/۱-۱/۸	۲/۵-۳/۶	۳/۴-۱۲/۴	۴۰۰	۷۰	۲/۸۲	۱۶۴۳۲ الی ۱۶۸۸۸	Md	متادیوریت
۴۰-۴۳	۰/۵-۰/۶	۳/۷-۷/۹	۶-۸	۶/۶-۵۹/۴	۲۷۰	۷۰/۵۵	۲/۸۱	۱۶۸۸۸ الی ۱۷۴۰۳	Tma	مرمر خاکستری و تیره
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۰/۵۱-۰/۹۷	۲-۲/۴	۰/۲-۱/۸	۲۶۰	۴۰/۲	۲/۸	۱۷۴۰۳ الی ۱۸۰۰۰	Sch1	شیست و اسلیت همراه با آمفیبولیت

۲- انتخاب نوع دستگاه حفاری مکانیزه برای قطعه ۲ تونل قمرود

کلیاتی از انواع دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع در زمین‌های سنگی در ادامه ارائه شده است.

۳-۱- انواع ماشین‌های تونل‌بری در زمین‌های سنگی

انواع ماشین‌های تونل‌بری شامل دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع بدون سپر (ماشین باز^۸)، دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع سپر منفرد و سپر مضاعف است.

۳-۱-۱- ماشین‌های تونل‌بری بدون سپر (دستگاه حفر تونل تمام مقطع باز)

ماشین تونل‌بری دیوارگیر نام دیگر ماشین‌های تونل‌بری بدون سپر است چرا که این ماشین در حین عملیات حفاری توسط دیوارگیرهایی به دیواره تونل تکیه می‌کند. صفحه حفار ماشین با چرخش به دور یک محور که منطبق بر محور تونل نیز است، به سینه‌کار حفاری فشار می‌آورد. تیغه‌های برشی (اغلب دیسکی) به داخل توده سنگ نفوذ کرده و ایجاد یک خراش بر روی سنگ کرده و تنش‌های برشی و کششی زیادی را به وجود می‌آورند. به محض این‌که تنش‌های وارده از سوی دیسک‌ها از مقاومت سنگ فراتر رود، ترک‌ها شکل می‌گیرند که از محل تقاطع این ترک‌ها تراشه^۹ های سنگی ایجاد می‌شوند.

این ماشین عمل حفاری و نصب سیستم نگهداری موقت را در صورت لزوم بطور همزمان انجام می‌دهد و به همین علت سرعت بالایی در اجرا دارد. در پروژه‌هایی که امکان حذف پوشش^۷ نهایی یا تأخیر در اجرای آن وجود دارد و شرایط سنگ نیز مناسب است این ماشین ارجح و انتخاب اول است [۶].

۳-۱-۲- ماشین تونل‌بری سپر منفرد

ماشین‌های حفر تونل سپر منفرد به صورت یک استوانه دارای پوشش است که در قسمت جلوی آن‌ها، صفحه حفاری و در قسمت عقب، دستگاه نصب‌کننده قطعات بتنی پیش‌ساخته و جک‌های جلو برنده قرار دارند.

در این ماشین‌ها حرکت رو به جلو از طریق اعمال نیرو توسط جک‌های هیدرولیکی بر قطعات بتنی نصب شده در انتهای سپر صورت می‌گیرد زیرا این ماشین‌ها در شرایطی بکار می‌روند که توده سنگ در برگیرنده به قدری سست باشد که امکان استفاده از دیوارگیر برای تأمین نیروی رانشی (پیشروی) وجود نداشته باشد. قطعات بتنی که در داخل سپر نصب می‌شوند، با حرکت تدریجی سپر به همراه ماشین به سمت جلو، از ریزش دیواره‌ها جلوگیری کرده و محیط مناسب برای فعالیت کارگران، عبور و

مرور، خدمات‌رسانی به ماشین و همچنین حفاظت تجهیزات فراهم می‌شود. سرعت پیشروی این ماشین‌ها در زمین‌های سست و ریزشی، اغلب به سرعت نصب سیستم نگهداری درون سپر بستگی دارد. به همین دلیل لزوم نصب قطعات بتنی در عمل ممکن است زمان انجام یک سیکل کامل پیشروی را افزایش دهد [۶].

۳-۱-۳- ماشین‌های حفر تونل سپر مضاعف (تلسکوپی)

این ماشین دارای دو سپر جلو و عقب است و مجهز به دیوارگیر (مانند ماشین باز) و جک‌های هیدرولیکی رانشی (مانند ماشین سپر منفرد) است به همین دلیل است که این ماشین توانایی حفر تونل در زمین‌های ریزشی و زمین‌های با مقاومت مناسب را دارد.

در صورتی‌که زمین مقاومت مناسب را برای ایجاد رانش با کمک دیوارگیر داشته باشد، ماشین می‌تواند به حفاری و نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته مستقل و همزمان بپردازد (سیکل کاری پیوسته) و به همین دلیل سرعت حفاری ماشین‌های سپر مضاعف به طور تئوریک دو برابر سپر منفرد است.

در زمین‌های ریزشی و خرد شده که امکان دیوارگیری وجود ندارد، ماشین دو سپره به‌طور دقیق همانند یک ماشین تک سپره پیشروی می‌کند، یعنی عمل حفاری با کمک ایجاد نیروی رانش توسط جک‌های انتهای سپر و سپس نصب قطعات بتنی پس از جمع شدن بازوها و جک‌های هیدرولیکی انجام می‌شود. نقش سپرها محافظت از قسمت‌های در برگیرنده خود و نیز محافظت فضای نصب قطعات بتنی (سگمنت) و جلوگیری از جمع‌شدگی تونل است [۶].

۳-۲- لزوم استفاده از دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع سپردار در شرایط زمین‌شناسی پروژه قمرود (قطعه ۲)

برای حفر تونل‌ها در برخی از شرایط زمین‌شناسی باید از دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع سپر دار استفاده شود که این شرایط در ادامه آورده شده است:

- وجود آب در تونل که باعث ناپایداری سینه‌کار و دیواره‌های آن و آسیب به تجهیزات، قطعات الکتریکی و مکانیکی می‌شود.

- وجود ناپایداری در دیواره تونل که در این شرایط ماشین‌های سپری (سپر منفرد یا سپر مضاعف) به اندازه ماشین‌های باز به بروز ناپایداری دیواره‌های حفاری حساس نیستند، چرا که یک پوشش بتنی پیش‌ساخته یا فولادی در داخل سپر قابل نصب است. ماشین‌های سپری با تکیه به پوشش و مستقل از ناپایداری‌ها قادر به پیشروی هستند.

۴-۱- مقایسه پیش‌بینی عملکرد دستگاه حفر تونل تمام مقطع تونل انتقال آب قمرود (در ۲ حالت سپر منفرد و سپر مضاعف) از لحاظ فنی و اقتصادی

در این قسمت میزان پیشروی روزانه توسط دستگاه‌های سپر منفرد و سپر مضاعف در واحدهای مختلف مسیر به‌دست آورده شده و با هم مقایسه شده‌اند و از لحاظ این‌که با استفاده از کدام دستگاه زمان حفاری مسیر زودتر به پایان می‌رسد و در نتیجه هزینه‌ها کاهش می‌یابد مقایسه شده‌اند.

۴-۱-۱- مقایسه دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع در ۲ حالت سپر منفرد و سپر مضاعف از لحاظ فنی

محاسبات پیش‌بینی عملکرد دستگاه حفر تونل تمام مقطع در واحدهای مختلف زمین‌شناسی قطعه ۲ مسیر تونل با استفاده از روش NTH که از پرکاربردترین روش‌ها در پیش-بینی عملکرد ماشین‌های حفر تونل تمام مقطع است و از نتایج این روش به خوبی می‌توان برای پیش‌بینی عملکرد دستگاه حفر تونل تمام مقطع و تعیین برنامه زمان‌بندی برای واحدهای مختلف زمین‌شناسی مسیر تونل استفاده کرد صورت گرفته است [۲].

واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۲) در جدول آورده شده است. مقدار نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت و نرخ پیشروی روزانه بر حسب متر بر روز، در واحدهای مختلف مسیر تونل با استفاده از روش NTH در حالت سپر منفرد و سپر مضاعف در جدول نشان داده شده است.

- عبور از نواحی گسلی در عملیات تونل‌سازی در حالت کلی بیان‌گر یک رویداد مشکل‌ساز بوده و اغلب با نرخ پیشروی پایین همراه است. انواع و گستره ناپایداری‌هایی که ممکن است در چنین موارد رخ دهد شامل ریزش سینه‌کار تونل و همزمان با آن امکان جریان پرفشار آب به داخل تونل، هجوم مواد دانه ریز آب‌دار، تشکیل حفراتی در قسمت تاج تونل و یا در جلو ماشین است.

- در تونل‌های عمیق که امکان افتادن قطعات سنگی و بلوک‌های جدا شده در اثر انفجار سنگ و پوسته پوسته شدن وجود دارد.

حال با توجه به مطالب بیان شده در بالا و با توجه به شرایط زمین‌شناسی قطعه ۲ تونل قمرود نیاز بود که دستگاه حفر تونل تمام مقطع از نوع سپر دار برای حفاری این قطعه از مسیر تونل انتخاب شود.

۴- بررسی نوع سپرهای دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع از لحاظ عملکرد و کاربرد آنها در زمین‌های با قابلیت مجاله شوندگی

به‌منظور انتخاب صحیح و بهینه نوع سپر دستگاه حفر تونل تمام مقطع برای تونل قمرود نیاز است که عملکرد این ۲ نوع دستگاه (سپر منفرد و سپر مضاعف) از لحاظ پیشروی، زمان‌بندی و هزینه و همین‌طور بحث مجاله شوندگی از ۲ دیدگاه فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گیرد تا بتوانیم بهتر به انتخاب نوع سپر بپردازیم.

جدول ۲: نرخ نفوذ و نرخ پیشروی روزانه برای واحدهای مختلف قطعه ۲ مسیر تونل در حالت سپر منفرد و سپر مضاعف [۲]

نام واحد	NTH I با استفاده از روش (m/hr)		نرخ پیشروی روزانه (m/day)		زمان لازم برای یک متر پیشروی (h)	
	دستگاه سپر منفرد	دستگاه سپر مضاعف	دستگاه سپر منفرد	دستگاه سپر مضاعف	دستگاه سپر منفرد	دستگاه سپر مضاعف
MDL5	۴/۳۰	۶/۱۰	۱۵/۷۷	۲۰/۹۵	۱/۵۲	۱/۱۵
AS2	۲/۸۸	۴/۰۸	۱۴/۴۸	۲۰/۱۴	۱/۶۶	۱/۱۹
MDL6	۳/۹۴	۵/۵۹	۱۵/۹۶	۲۱/۱۲	۱/۵۰	۱/۱۴
AS3	۲/۸۸	۴/۰۸	۱۵/۵۱	۲۱/۵۳	۱/۵۵	۱/۱۱
MDL7	۳/۹۴	۵/۵۹	۱۵/۹۴	۲۱/۰۹	۱/۵۱	۱/۱۴
Sh5	۳/۸۱	۵/۳۹	۱۹/۵۱	۲۸/۰۴	۱/۲۳	۰/۸۶
Trh1	۳/۱۳	۴/۴۴	۱۴/۱۰	۱۸/۷۷	۱/۷۰	۱/۲۸
Tsh	۴/۰۰	۵/۶۷	۱۷/۲۲	۲۳/۳۲	۱/۳۹	۱/۰۳
Trh2	۳/۱۳	۴/۴۴	۱۴/۱۰	۱۸/۷۷	۱/۷۰	۱/۲۸
As4	۳/۹۰	۵/۵۳	۱۸/۲۷	۲۵/۴۶	۱/۳۱	۰/۹۴
Md	۳/۱۳	۴/۴۴	۱۷/۹۹	۲۶/۳۶	۱/۳۳	۰/۹۱
Tma	۳/۰۴	۴/۳۰	۱۸/۳۸	۲۷/۳۹	۱/۳۱	۰/۸۸
Sch1	۴/۶۲	۶/۵۵	۱۹/۸۹	۲۷/۸۰	۱/۲۱	۰/۸۶

زمان اتمام حفاری قطعه ۲ مسیر تونل قمرود در ۲ حالت سپر منفرد و سپر مضاعف در جدول آورده شده است.

جدول ۳: زمان اتمام حفاری قطعه ۲ مسیر تونل (۶۷۰۰ متر) با استفاده از مدل NTH در دو حالت سپر منفرد و سپر مضاعف

تعداد روز کاری برای اتمام حفاری تونل		مدت زمان لازم برای اتمام حفاری تونل	
سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد
۲۷۲	۴۱۰	۹ ماه	۱۵/۷ ماه

بنابراین می‌توان گفت که در حالت سپر مضاعف پروژه در طی مدت ۷ ماه زودتر از سپر منفرد به پایان می‌رسد. دلیل اصلی این اختلاف زمانی مربوط به تأخیر ناشی از نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته در دستگاه‌های سپر منفرد است و مقداری نیز از پارامترهای دستگاه مانند RPM (سرعت چرخش کاترهد) که در فرمول NTH نیز کاربرد دارد ناشی می‌شود زیرا سرعت چرخش در دستگاه‌های سپر مضاعف نسبت به سپر منفرد بیشتر است.

۴-۱-۲- مقایسه دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع در ۲ حالت سپر منفرد و سپر مضاعف از لحاظ اقتصادی

هزینه‌هایی که در ارتباط با یک پروژه حفاری مکانیزه می‌باشند را می‌توان در ۳ قسمت طبقه‌بندی کرد:

- هزینه‌های جاری که شامل دستمزد و مزایای کارگران، هزینه‌های ملزومات و هزینه‌های عملیاتی است. هزینه‌های جاری برای دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع در ۲ حالت سپر منفرد و سپر مضاعف و برای یک پروژه یکسان بوده و در مقاله حاضر از هزینه‌های جاری یکسال کاری در قطعه اول پروژه قمرود که با استفاده از دستگاه حفاری مکانیزه با سپر منفرد در حال حفاری است، میانگین‌گیری نموده و نتایج آن برای یک ماه کاری در جدول آورده شده است.
- هزینه‌های سرمایه‌ای که شامل خرید مصالح، قطعات، تجهیزات و لوازم یدکی مورد نیاز عملیات حفاری و تولید قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) است.
- هزینه تجهیز و برچیدن کارگاه

از میان ۳ مورد بالا در صورت زودتر به اتمام رسیدن پروژه در مورد ۱ صرفه‌جویی به‌عمل می‌آید.

جدول ۴: فهرست متوسط هزینه‌های جاری دستگاه‌های سپر دار در یک ماه

شرح حساب	هزینه (ریال)	شرح حساب	هزینه (ریال)
دستمزد و مزایای کارگران			
دستمزد کارگران دائم	۱,۱۷۱,۷۱۷,۶۴۴	کارمزد بانکی	۵۰۸,۷۶۶
دستمزد کارگران موقت	۱۰۴,۷۴۲,۰۰۰	خرید اوراق و سفته	۱۳,۳۳۳
اضافه کاری	۱,۰۹۵,۵۵۴,۲۷۴	هزینه‌های متفرقه ملزومات	۴۰,۷۲۲,۸۰۸
کمک عائله مندی	۸۵,۴۵۰,۷۵۲	مجموع هزینه‌های ملزومات	۷۳,۲۲۱,۸۵۳
کمک هزینه خواربار و بن	۴۲,۳۶۲,۲۳۵	تعمیرات ائانه و لوازم اداری	۵,۲۳۸,۳۹۸
عیدی و پاداش پایان سال	۲۳۴,۵۸۴,۶۶۲	پست و تلگراف و تلفن	۱۰,۱۴۲,۵۴۸
رفت و آمد	۱۲,۶۶۴,۰۰۰	اجاره ماشین آلات، وسائط نقلیه و سایر	۲۲۷,۱۵۵,۸۰۸
حق مسکن	۳۳,۹۲۰,۰۰۰	کرایه حمل	۳۳,۰۴۳,۸۰۰
صابون و شیر و لباس	۷۴,۶۲۷,۲۱۲	اجاره محل	۷,۲۸۵,۵۵۶
حقوق کارکنان حق الزحمه ای	۳۴,۱۳۵,۶۶۰	ابزار کار جزئی	۲۹,۰۳۸,۱۴۹
هزینه غذا	۵۷۱,۸۰۳,۳۲۶	سوخت ماشین آلات	۳۲,۵۱۲,۰۶۴
مأموریت	۸,۲۶۶,۸۵۳	سوخت وسائط نقلیه	۶,۲۱۳,۸۶۳
بیمه عمر و حوادث	۲۰,۷۱۰,۴۱۱	آب	۱۳,۰۰۰,۰۰۰
مزایای کارگران قراردادی	۳۶۴,۴۶۲,۱۰۵	برق	۱۱۶,۹۳۶,۸۳۲
هزینه بازخرید سنوات خدمت	۱۱۷,۲۳۱,۳۸۳	سوخت	۲,۸۵۰,۴۴۴
هزینه بازخرید مرخصی	۴۶,۲۵۰,۴۰۴	تعمیرات ساختمان	۱۶,۸۷۸,۶۸۲
سایر مزایا	۵۲۵,۷۳۰,۲۶۴	تعمیرات تأسیسات	۱,۳۰۸,۱۴۶,۵۹۰
مجموع دستمزد و مزایای کارگران	۴,۵۴۴,۲۱۳,۱۸۵	تعمیرات ماشین آلات	۲۸,۴۰۰,۰۰۰
		تعمیرات وسائط نقلیه	۹,۵۰۹,۶۸۱
		مواد مصرفی شیمیایی	۷۵,۰۰۰
هزینه‌های ملزومات و عملیاتی			
نوشت افزار و ملزومات	۱۹,۶۵۳,۸۷۶	بیمه وسائط نقلیه	۳,۰۳۹,۶۲۹
چاپ و مطبوعات	۵,۶۳۹,۳۵۱	بیمه ساختمان اداری	۱,۹۰۲,۰۸۲
چراغانی، پذیرایی و آبدارخانه	۵,۹۳۷,۶۰۸	هزینه‌های متفرقه عملیاتی	۱۱۴,۴۱۰,۷۲۲
باغبانی	۷۴۶,۱۱۱	مجموع هزینه‌های عملیاتی	۱,۹۶۵,۷۷۹,۸۴۸
جمع کل (ریال)		۶,۵۸۳,۲۱۴,۸۸۶	

علاوه بر اختلاف هزینه ذکر شده با توجه به بیشتر بودن قیمت دستگاه سپر مضاعف نسبت به دستگاه سپر منفرد و در نتیجه سرمایه‌گذاری اولیه بالاتر، در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف استهلاک سرمایه‌گذاری نیز بیشتر خواهد بود. از طرفی مدت زمان حفاری نیز در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف کمتر خواهد بود که در استهلاک سرمایه‌گذاری تأثیرگذار خواهد بود. محاسبات

مقدار صرفه جویی در هزینه‌ها برای یک ماه در صورتی که حفاری یک ماه زودتر به پایان برسد معادل با ۶,۵۸۳,۲۱۴,۸۸۶ ریال است، بنابراین در صورتی که از دستگاه سپر مضاعف استفاده شود با توجه به این که حفاری طی مدت ۷ ماه زودتر به اتمام می‌رسد بنابراین مبلغ ۴۴,۱۰۷,۵۳۹,۷۳۶ ریال در هزینه‌ها صرفه‌جویی انجام می‌شود.

بر اساس شاخص‌های تعدیل قطعی سه ماهه چهارم سال ۱۳۸۷، میزان هزینه اضافی به منظور اجرای اضافه حفاری برای سپرهای منفرد و تلسکوپی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۴-۲-۱- مقایسه نوع سپرهای دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع از لحاظ کاربرد در زمین‌های با قابلیت مجاله شوندگی از لحاظ فنی

به منظور مقایسه سپرهای منفرد و تلسکوپی ابتدا امکان رخ دادن پدیده مجاله شوندگی و شدت آن در واحدهای مختلف زمین شناسی مسیرونل با استفاده از روش‌های موجود مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از روش همگرایی- همجواری^۱ و محاسبه میزان همگرایی ماکزیمم با استفاده از نرم افزار Flac^{2D} میزان اضافه حفاری لازم برای ۲ نوع سپر به منظور غلبه بر پدیده مجاله شوندگی محاسبه شده است [۷]، [۸].

۴-۲-۱-۱-۱- مقایسه شوندگی

یکی از معضلات مهم در امر تونلسازی و حفر فضاهای زیرزمینی با کاربری عمرانی یا معدنی، رخ دادن پدیده مجاله شوندگی در توده سنگ است.

طبق تعریف انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM)، مجاله شوندگی عبارت است از برش وابسته به زمان سنگ که منجر به حرکت سنگ‌های درون‌گیر به سمت تونل می‌شود. مجاله شوندگی به صورت همگرایی زیاد وابسته به زمان در طی حفاری تونل و پس از آن رخ می‌دهد. در اثر ایجاد و ترکیب تنش‌های القایی، تنش موجود از حد مقاومت برشی سنگ تجاوز کرده و توده سنگ به داخل فضای حفاری رانده می‌شود. بزرگی همگرایی تونل، نرخ جابجایی و وسعت ناحیه پلاستیک به شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، تنش‌های برجا و مقاومت توده سنگ، جریان آب‌های زیرزمینی، فشار آب منفذی و ویژگی‌های توده سنگ بستگی دارد. روش‌های حفاری و ترتیب انجام آن و نگهداری انجام شده، مهمترین فاکتور را در کنترل تغییر شکل‌های زمین ایفا می‌کند [۵].

نکته دیگری که باید مد نظر قرار گیرد امکان وقوع مجاله شوندگی در سنگ‌های مختلف است. پدیده مجاله شوندگی در توده سنگ‌های با قابلیت تغییر شکل‌پذیری و ویژگی‌های مقاومتی ضعیف و در شرایط روباره بالا رخ می‌دهد. استفاده از راکبالت و شاتکریت لایه ۲ در دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع بدون سپر و استفاده از یک پوشش بتنی مناسب در دستگاه‌های حفر تونل تمام

استهلاک با استفاده از فرمول ۱ صورت گرفته و در نتیجه اختلاف هزینه دو سپر در خصوص استهلاک سرمایه‌گذاری در جدول آورده شده است [۳].

$$L \quad (1)$$

که در آن

D: مقدار استهلاک سالیانه

P: قیمت دستگاه همراه هزینه‌های حمل و مونتاژ

SV: ارزش اسقاطی دارایی (فروش مجدد دستگاه)

n: عمر قابل بهره‌برداری (عمر استهلاک دارایی)

جدول ۵: اختلاف هزینه دو سپر در خصوص استهلاک سرمایه‌گذاری

پارامتر	واحد	سپر منفرد	سپر مضاعف
P	ریال	۱۲۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
SV	ریال	۳۶,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۴۵,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
n	سال	۱۳	۱۳
D	ریال در سال	۶,۵۷۰,۰۰۰,۰۰۰	۸,۲۱۲,۵۰۰,۰۰۰
هزینه استهلاک سرمایه‌گذاری پروژه	ریال در طول پروژه	۸,۵۹۵,۷۵۰,۰۰۰	۶,۱۵۹,۳۷۵,۰۰۰
اختلاف هزینه			۲,۴۳۶,۳۷۵,۰۰۰

۴-۲-۱-۱-۲- بررسی نوع سپرهای دستگاه‌های حفر تونل تمام

مقطع از لحاظ کاربرد در زمین‌های با قابلیت مجاله شوندگی

از لحاظ فنی و اقتصادی

میزان اضافه حفاری لازم به منظور غلبه بر پدیده مجاله شوندگی برای سپرهای منفرد و تلسکوپی در واحدهای بحرانی مسیرونل به‌دست آورده شده و سپس بر اساس فهرست بهای خاص سال ۱۳۸۳ و اضافه کردن تعدیل

هوک و مارینوس^{۱۲}، روش آیدان^{۱۳} است. روش تحلیلی-تئوریکی شامل روش بارلا است [۵]. با توجه به گستردگی مطالب در مورد این روش‌ها از ذکر آن‌ها در این مقاله خودداری شده و تنها به نتایج بدست آورده شده با استفاده از این روش‌ها بسنده شده است.

۴-۲-۱-۲- بررسی قابلیت مچاله شوندگی در قطعه ۲ تونل قمرود

واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۲) در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.

حال با توجه به روش‌های بررسی مچاله شوندگی پدیده مچاله شوندگی در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل مورد تحلیل قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

مقطع سپردار بهترین محافظ در مقابل تخریب و شکست پوشش تونل در شرایط مچاله‌شوندگی به حساب می‌آید [۹]. در صورت استفاده از دستگاه حفر تونل تمام مقطع برای حفاری تونل، اگر وقوع همگرایی در دیواره تونل بسیار سریع باشد و یا نرخ پیشروی ماشین تونل‌بری کم باشد، امکان گیر کردن ماشین وجود دارد. به‌طور کلی با افزایش نرخ پیشروی ماشین تونل‌بری، خطر گیر افتادن ماشین در زمین‌های مچاله‌شونده کاهش می‌یابد [۵].

با توجه به این‌که تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۲) در مسیر خود از سنگ‌های شیستی، میکا شیست و آمفیبولیت شیست‌ها عبور می‌کند و ارتفاع روباره نیز در بعضی از این واحدها زیاد بوده و تا ۴۰۰ متر نیز می‌رسد، بنابراین بررسی مچاله شوندگی در قطعه ۲ مسیر تونل بسیار مهم است. در زمینه پدیده مچاله شوندگی افراد مختلفی مطالعه کرده‌اند و روش‌هایی را ارائه داده‌اند که به سه گروه که شامل روش‌های تجربی، روش‌های نیمه تجربی و روش‌های تحلیلی، تئوریکی می‌باشد، تقسیم می‌شوند. روش‌های تجربی شامل معیار سینگ^۹ و همکاران، معیار گوئل^{۱۰} و همکاران است. روش‌های نیمه تجربی شامل روش جتوا^{۱۱} و همکاران، روش

جدول ۱- وضعیت مچاله شوندگی کلی و نتایج پیش‌بینی مچاله شوندگی در قطعه ۲ مسیر تونل با استفاده از روش‌های مختلف

نام واحد	روش سینگ	روش گوئل	روش جتوا	روش بارلا	روش هوک و مارینوس	روش آیدان	وضعیت مچاله شوندگی کلی
MDL5	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی کم	مشکل نگهداری اندک	NS	بدون مچاله شوندگی
AS2	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی	مچاله شوندگی کم	LS	مچاله شوندگی کم
MDL6	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی کم	مشکل نگهداری اندک	NS	بدون مچاله شوندگی
AS3	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی	مچاله شوندگی کم	LS	مچاله شوندگی کم
MDL7	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی کم	مشکل نگهداری اندک	NS	بدون مچاله شوندگی
Sh5	لهیده	لهیده	لهیدگی زیاد	مچاله شوندگی زیاد	مچاله شوندگی خیلی جدی	HS	مچاله شوندگی زیاد
Trh1	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی کم	مشکل نگهداری اندک	NS	بدون مچاله شوندگی
Tsh	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی زیاد	مچاله شوندگی جدی	FS	مچاله شوندگی متوسط
Trh2	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی	مشکل نگهداری اندک	LS	مچاله شوندگی کم
As4	لهیده	لهیده	لهیدگی زیاد	مچاله شوندگی زیاد	مچاله شوندگی خیلی جدی	HS	مچاله شوندگی زیاد
Md	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی متوسط	مچاله شوندگی زیاد	مچاله شوندگی جدی	FS	مچاله شوندگی متوسط
Tma	غیر لهیده	غیر لهیده	لهیدگی ملایم	مچاله شوندگی کم	مشکل نگهداری اندک	NS	بدون مچاله شوندگی
Sch1	لهیده	غیر لهیده	لهیدگی زیاد	مچاله شوندگی زیاد	مچاله شوندگی خیلی جدی	HS	مچاله شوندگی زیاد

NS: بدون مچاله شوندگی LS: مچاله شوندگی کم FS: مچاله شوندگی متوسط HS: مچاله شوندگی زیاد

روش همگرایی- همجواری و با در نظر گرفتن طول شیلد در ۲ حالت سپر منفرد و سپر مضاعف که به ترتیب ۱۲ متر و ۱۶ متر است، همچنین فاصله بین شیلد و دیواره تونل که ۲ سانتی متر است و با در نظر گرفتن ضریب ایمنی^{۱۷} معادل با ۲، به محاسبه فشار وارد شده از طرف زمین به سپر دستگاه حفر تونل تمام مقطع و میزان اضافه حفاری لازم پرداخته شد [۷]، [۸].

۴-۲-۱-۳-۱- محاسبات صورت گرفته در حالت استفاده از سپر منفرد و سپر مضاعف در واحد Sh5

منحنی‌های GRC و LDP واحد Sh5 (متراز ۱۴۹۲۴ - ۱۲۳۴۵) در شکل و شکل ۱ نشان داده شده است. میزان فشار وارده از طرف زمین بر سپر دستگاه حفر تونل تمام مقطع در حالت سپر منفرد و سپر مضاعف برای این واحد زمین‌شناسی، بازای اضافه حفاری‌های مختلف به منظور رسیدن به ضریب ایمنی مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده است. نقاط S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 و S_5 نشان دهنده محل تماس دیواره تونل با سپر دستگاه حفر تونل تمام مقطع بازای اضافه حفاری‌های مختلف است.

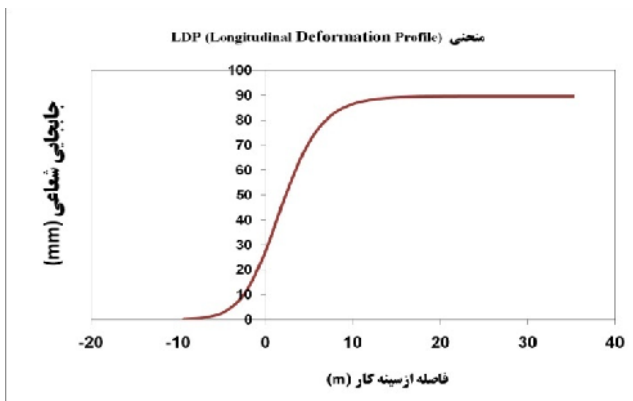
با توجه به جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که:

مسیر تونل در مترازهای ۱۴۹۲۴ - ۱۲۳۴۵ و ۱۶۴۳۲ - ۱۵۷۰۶ و همینطور ۱۸۱۱۰ - ۱۷۴۰۳ دارای پتانسیل مچاله شوندگی زیاد می‌باشد.

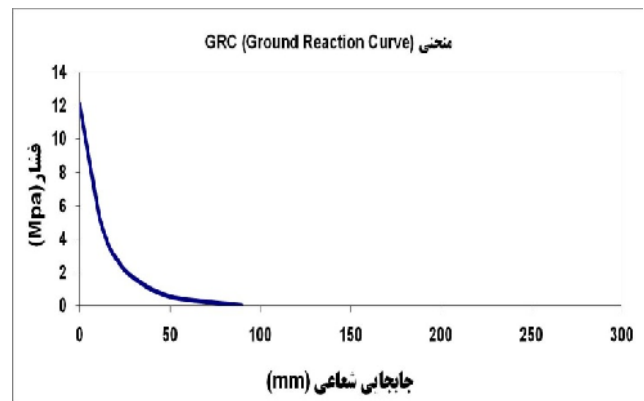
در مترازهای ۱۵۳۵۰ - ۱۵۲۶۸ و ۱۶۸۸۸ - ۱۶۴۳۲ مسیر تونل دارای پتانسیل مچاله شوندگی متوسط است. واحدهایی که در آن‌ها میزان مچاله شوندگی زیاد و متوسط است، بحرانی هستند که در این واحدها بایستی اضافه حفاری^{۱۴} به مقدار کافی انجام شود و امکان گیر کردن دستگاه حفر تونل تمام مقطع در این مسیرها بررسی شود.

۴-۲-۱-۳-۲- تعیین میزان اضافه حفاری مورد نیاز در واحدهای بحرانی مسیر تونل در حالت سپر منفرد و مضاعف

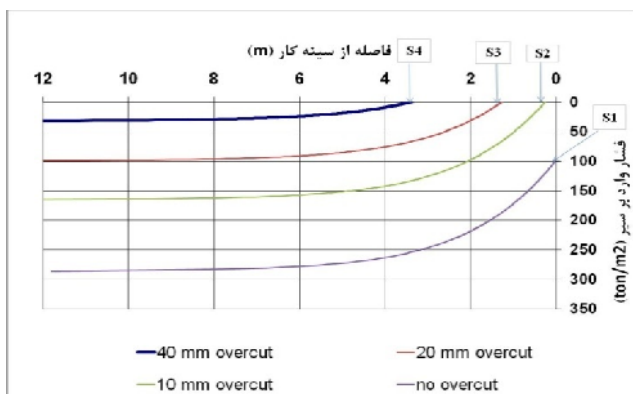
برای مشخص کردن میزان اضافه حفاری، ابتدا میزان جابجایی شعاعی ماکزیمم در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی قطعه ۲ مسیر تونل را با استفاده از نرم افزار FLAC^{2D} محاسبه شد، سپس با رسم منحنی‌های پروفیل تغییر شکل طولی (LDP^{۱۵}) و منحنی عکس‌العمل زمین (GRC^{۱۶}) در واحدهای بحرانی مسیر تونل و با استفاده از



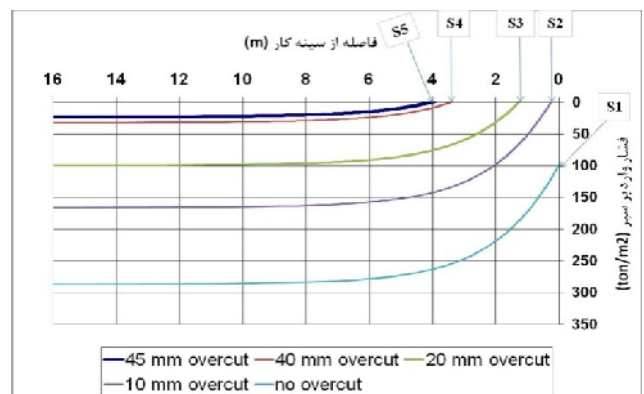
شکل ۱: منحنی LDP در واحد Sh5 (متراز ۱۴۹۲۴ - ۱۲۳۴۵)



شکل ۲: منحنی عکس‌العمل زمین در واحد Sh5 (متراز ۱۴۹۲۴ - ۱۲۳۴۵)



شکل ۳: میزان فشار وارده از طرف زمین بر سپر دستگاه حفر تونل تمام مقطع در ۲ حالت سپر منفرد (سمت چپ) و سپر مضاعف (سمت راست) برای واحد زمین‌شناسی Sh5 بازای اضافه حفاری‌های مختلف



با توجه به محاسبات انجام شده در مورد پدیده مچاله شونده‌گی احتمال رخ دادن این پدیده در مترژهایی از مسیر تونل زیاد است و شدت این پیامد نیز بسیار جدی است.

بنابراین خطر ناشی از پدیده مچاله شونده‌گی در مترژهایی از مسیر تونل بسیار زیاد بوده و با توجه به محاسبات انجام شده میزان فشار وارده به شیلد در حالت سپر مضاعف نسبت به سپر منفرد مقداری بالاتر است. از طرفی با توجه به این که سرعت حفاری در دستگاه‌های سپر مضاعف بسیار بیشتر از سپر منفرد است بنابراین توقفات به حداقل مقدار ممکن کاهش پیدا می‌کند و امکان رخ دادن پدیده مچاله شونده‌گی نیز بسیار کمتر می‌شود.

۴-۲-۲- مقایسه نوع سپرهای دستگاه‌های حفاری تونل تمام مقطع از لحاظ کاربرد در زمین‌های با قابلیت مچاله شونده‌گی از لحاظ اقتصادی

به منظور بدست آوردن اختلاف هزینه مقدار اضافه حفاری که در حالت سپر مضاعف حدود ۱۰ میلی‌متر بیشتر از سپر منفرد است بررسی زیر طبق جدول ۴: اختلاف ریالی ناشی از ۱۰ میلی‌متر اضافه حفاری بیشتر دستگاه سپر مضاعف نسبت به سپر منفرد [۴] صورت گرفته است.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود با افزایش میزان اضافه حفاری، مقدار فشار وارد شده از طرف زمین به سپر دستگاه حفاری تونل تمام مقطع کاهش پیدا می‌کند. سطح زیر هر یک از نمودارها برای محاسبه نیروی اصطکاکی که بر روی سطح بیرونی شیلد عمل می‌کند، استفاده شده است.

نتایج واحد Sh5 (مترژ ۱۴۹۲۴ - ۱۲۳۴۵) در دو حالت استفاده از سپر منفرد و سپر مضاعف در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول ۲: نتایج میزان اضافه حفاری لازم در واحد Sh5 (مترژ ۱۴۹۲۴ - ۱۲۳۴۵) دیده می‌شود در حالت سپر مضاعف نیروی اصطکاکی اعمال شده بر سپر مقداری بیشتر است و برای غلبه بر مشکل مچاله شونده‌گی در زون Sh5 با ضریب ایمنی معادل با ۲ بایستی در حدود ۱۰ میلی‌متر بیشتر اضافه حفاری انجام داد.

میزان اضافه حفاری لازم برای رسیدن به ضریب ایمنی معادل با ۲ در سایر واحدهای بحرانی مسیر نیز همانند واحد Sh5 در ۲ حالت سپر منفرد و سپر مضاعف در جدول ۳: میزان اضافه حفاری مورد نیاز در واحدهای بحرانی مسیر تونل در دو حالت مختلف آورده شده است و با انجام اضافه حفاری بدست آورده شده، می‌توان بر مشکل مچاله شونده‌گی و گیر کردن دستگاه حفاری تونل تمام مقطع در این واحدها غلبه کرد.

جدول ۲: نتایج میزان اضافه حفاری لازم در واحد Sh5 (مترژ ۱۴۹۲۴ - ۱۲۳۴۵)

میزان اضافه حفاری		بدون انجام اضافه حفاری یعنی با در نظر گرفتن فاصله بین شیلد و دیواره		۲۰ میلی‌متر اضافه حفاری		۴۰ میلی‌متر اضافه حفاری		۴۵ میلی‌متر اضافه حفاری	
سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف
۱۵۱۰۹/۴۶	۲۱۲۲۱/۱۹	۴۳۷۳/۰۵	۶۴۳۸/۹۱	۱۱۰۳/۳۳	۱۸۱۴/۷۷	نیازی نیست	۱۲۴۴/۹۳	نیازی نیست	نیازی نیست
۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۶۸	۰/۴۷	۲/۳۳	۱/۵۳	۲/۱۱	۲/۱۱	۲/۱۱	۲/۱۱

جدول ۳: میزان اضافه حفاری مورد نیاز در واحدهای بحرانی مسیر تونل در دو حالت مختلف

واحد زمین شناسی		Sh5		As4		Sch1		Tsh		Md	
سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف	سپر منفرد	سپر مضاعف
۳۵	۴۵	۲۰	۳۰	۲۰	۳۰	۱۰	۳۰	۱۵	۱۵	۱۵	۲۰

جدول ۴: اختلاف ریالی ناشی از ۱۰ میلیمتر اضافه حفاری بیشتر دستگاه سپر مضاعف نسبت به سپر منفرد [۴]

نوع دستگاه	شرح موضوع مطابق با فهرست بها	واحد	بهای واحد (ریال)	طول حفاری با قابلیت مچاله شوندگی (متر)	قطر حفاری	سطح مقطع حفاری (متر مربع)	بهای کل (ریال)	اختلاف ریالی
سپر منفرد	حفاری در هر نوع زمین با استفاده از دستگاه حفار تمام مقطع سپردار	متر مکعب	۱۵۲۶۴۵۲	۴۵۵۰	۴٫۶۸	۱۷٫۲	۵۵۹۰۰۷۳٫۵۵۵٫۲۶۱	۳٫۸۰۰٫۵۰۰٫۰۱۸
سپر مضاعف	حفاری در هر نوع زمین با استفاده از دستگاه حفار تمام مقطع سپردار	متر مکعب	۱۵۲۶۴۵۲	۴۵۵۰	۴٫۶۹	۱۷٫۲۸	۵۶۲٫۸۷۴٫۰۵۵٫۲۷۸	

۵- نتیجه گیری

دادن پدیده مچاله شوندگی بایستی ملاحظات و محاسبات فنی در انتخاب نوع سپر دستگاه صورت پذیرد تا از هرگونه گیرافتادن سپر دستگاه در مناطق مستعد پدیده مچاله شوندگی جلوگیری به عمل آید. زیرا در دستگاه‌های سپر مضاعف با توجه به بلند تر بودن طول شیلد آن مقدار اصطکاک بین شیلد و دیواره کمی بیشتر می‌شود که برای غلبه بر آن و جلوگیری از گیرافتادن سپر دستگاه نیاز به اضافه حفاری بیشتری خواهد بود.

طبق برآوردهای صورت گرفته در خصوص رخ دادن پدیده مچاله شوندگی در مسیر قطعه دوم تونل قمرود مشخص شد که در حدود ۴۵۵۰ متر از مسیر تونل دارای شرایط مچاله شوندگی متوسط تا زیاد است.

مطابق با محاسبات انجام شده با توجه به بلند تر بودن طول شیلد دستگاه سپر مضاعف نیاز به انجام اضافه حفاری بیشتری در حدود ۱۰ میلیمتر در مناطق با قابلیت رخ دادن پدیده مچاله شوندگی خواهد بود که هزینه ناشی از آن در حدود ۳٫۸۰۰٫۰۰۰٫۰۰۰ ریال است.

طبق محاسبات صورت گرفته در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف پروژه در حدود ۷ ماه زودتر به پایان می‌رسد و در هزینه‌های پروژه نیز به مقدار ۴۴٫۰۰۰٫۰۰۰٫۰۰۰ ریال صرفه‌جویی خواهد شد.

با توجه به بیشتر بودن قیمت دستگاه سپر مضاعف نسبت به دستگاه سپر منفرد و در نتیجه سرمایه‌گذاری اولیه بالاتر، در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف استهلاک

از آنجایی که مسیر قطعه دوم تونل انتقال آب قمرود در زیر سطح آب‌های زیرزمینی قرار دارد و احتمال هجوم آب به داخل تونل در قسمت‌هایی از مسیر وجود دارد و با توجه به این‌که مترژهای زیادی از مسیر تونل از زمین‌هایی با سنگ‌های ضعیف و ریزشی عبور می‌کند و نگهداری دیواره تونل امری اجتناب‌ناپذیر است، بنابراین استفاده از دستگاه حفر تونل تمام مقطع سپردار برای پروژه امری ضروری است.

به‌منظور انتخاب بهینه نوع دستگاه حفر تونل تمام مقطع برای حفاری قطعه دوم تونل قمرود مقایسه فنی و اقتصادی بر روی عملکرد ۲ نوع سپر منفرد و مضاعف از لحاظ میزان پیشروی دستگاه حفر تونل تمام مقطع و مقابله با شرایط مچاله شوندگی در این مقاله صورت گرفته است.

دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع با سپر مضاعف نسبت به دستگاه‌های حفر تونل تمام مقطع با سپر منفرد دارای سرعت پیشروی بیشتری می‌باشند که این موضوع منجر به اتمام سریعتر حفاری تونل و کاهش هزینه‌های پروژه خواهد شد.

با توجه به این‌که قطعه دوم تونل قمرود در مسیر خود از سنگ‌های شیستی، میکا شیست و آمفیبولیت شیست‌ها عبور می‌کند و ارتفاع روباره نیز در برخی مناطق زیاد بوده و به ۴۰۰ متر نیز می‌رسد، بنابراین با در نظر گرفتن احتمال رخ

مطابق با بررسی‌های صورت گرفته در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف جهت حفاری قطعه دوم تونل قمروود، حدود ۱۳ میلیارد ریال در هزینه‌های پروژه صرفه جویی خواهد شد.

در نهایت با توجه به دلایل فنی و در نظر گرفتن میزان اضافه حفاری مورد نیاز برای کاهش ریسک امکان گیر افتادن سپر دستگاه در زون‌های با قابلیت مچاله شونده و در ضمن کاهش برنامه زمان‌بندی و کاهش هزینه‌ها دستگاه حفر تونل تمام مقطع از نوع سپر مضاعف برای حفاری قطعه ۲ پروژه قمروود گزینه برتر تشخیص داده شده است.

سرمایه‌گذاری نیز بیشتر خواهد بود. از طرفی مدت زمان حفاری نیز در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف در حدود ۷ ماه کمتر است که در استهلاک سرمایه‌گذاری تأثیرگذار خواهد بود. محاسبات صورت گرفته و در نتیجه اختلاف هزینه دو سپر در خصوص استهلاک سرمایه‌گذاری در جدول آورده شده است که حاکی از صرفه‌جویی حدودی ۲،۵۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ریالی در پروژه در صورت استفاده از دستگاه سپر مضاعف را دارد.

نتایج مقایسه اقتصادی دستگاه سپر مضاعف نسبت به دستگاه سپر منفرد بطور خلاصه در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵: اختلافات ریالی و سود و زیان کلی بین دستگاه‌های با سپر منفرد و سپر مضاعف

نوع دستگاه	اختلاف حدودی ریالی از لحاظ قیمت دستگاه	اختلاف حدودی ریالی از لحاظ زودتر به اتمام رسیدن پروژه و کاهش هزینه‌ها	اختلاف حدودی ریالی از لحاظ میزان اضافه حفاری	اختلاف حدودی ریالی از لحاظ استهلاک سرمایه‌گذاری	سود و زیان کلی از لحاظ هزینه
دستگاه سپر مضاعف نسبت به سپر منفرد	-۳۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰	۴۴،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰	-۳،۸۰۰،۰۰۰،۰۰۰	۲،۵۰۰،۰۰۰،۰۰۰	۱۳،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰

مراجع

- [1]Geology and Rock mechanics Internal reports for Qomroud Water Transfer Tunnel, Lot2, 2003, Nahad Ab Consulting Engineers.
- [2]Shariat Alavi, H, 2008. Predicting TBM Performance in Qomroud Water Transfer Tunnel, Lot 1 & 2 . Msc Thesis Shahrood University of Technology.
- [3]Oskounejad, M.Mehdi, 1989. Engineering Economy, Amirkabir University of Technology Press.
- [4]Special Price List of 1383 in Qomroud Water Transfer Tunnel, Lot 1 & 2 and Adjusted Indexes of Last Three Months of 1387, <http://tec.mporg.ir>.
- [5] Barla.G,2001, "*Tunneling Under Squeezing Rock Conditions*", Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino.
- [6] ITA / AITES Working Group No. 14, 2000, "*Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*", www.ita-aites.org,PP:1-118.
- [7] Itasca Inc.,2001.FLAC. "*Fast Lagrangian Analysis of Continua*",Ver.4, User's Manual, *Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN*, <http://Itascacg.com>.
- [8]Farrokh,E,Mortazavi,A,Shamsi,G,2006. "*Evaluation of Ground Convergence and Squeezing Potential in the TBM Driven Ghomroud Tunnel Project*", *Tunnelling and Underground Space Technology*,21,pp.504-510.
- [9]Toan,N,2006. "*TBM and Lining Essential Interfaces*", *Tunnelling and Tunnel Boring Machines*,pp.1-199.

زیر نویس ها

-
- 1- Rock Quality Designation
 - 2- Squeezing
 - 3- Single Shield TBM
 - 4- Double Shield TBM
 - 5- Open TBM
 - 6 -Chip
 - 7 - Lining
 - 8 Convergence- Confinement
 - 9 Singh
 - 10 Goel
 - 11 Jethwa
 - 12 Hoek and Marinos
 - 13 Aydan
 - 14 over cut
 - 15 Longitudinal Deformation Profile
 - 16 Ground Reaction Curve
 - 17 Safety Factor