بررسی اشکال انحلالی سطحی و میزان توسعه آب زیرزمینی در ساختگاه قطعه ۴ تونل قمرود

وحید جودکی^۱ ، فرشاد کوهیانافضل^۲ ، علی عالیانوری^۳ ، رسول اجللوئیان^۴ و عبداله سهرابیبیدار^۵

کارشناسی ارشد، گروه سازههای زیرزمینی، شرکت مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران ۲دکترا، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران ۳استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران ۴استاد، گروه زمینشناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران تاریخ دریافت: ۲۰۲/ ۱۳۹۴ تاریخ پذیرش: ۲/۱ ۲۹۹۹

چکیدہ

نابي الم

قطعه ۴ تونل قمرود در پهنه سنندج- سیرجان قرار گرفته است. در این محدوده به دلیل وجود گسل های فراوان، نواحی خرد شده و همچنین گسترش قابل توجه حوضه آبریز جریانهای فرعی و اصلی در سطح زمین، تونل با خطر هجوم آب زیرزمینی روبهرو بوده است. از سوی دیگر به دلیل برخی محدودیتها مانند روباره زیاد تونل (در برخی نقاط تا حدود ۶۰۰ متر) و نبود امکان حفاری گمانههای اکتشافی تا تراز تونل، پیش بینی و بر آورد جریان آب زیرزمینی در مسیر حفاری تونل به سختی امکان پذیر بوده است. با وجود گسل های بسیار در مسیر قطعه ۴ تونل قمرود، برخورد دستگاه حفار تمام مقطع تلسکوپی (TBM Double Shield) با جریانهای پرفشار، می توانست ضمن هجوم مقادیر بالایی از آب به درون تونل، سبب تشدید ریزش تودهسنگ ها در پهنههای خرد شده و به دنبال آن توقف و انحراف دستگاه از مسیر صحیح حفاری شود. در این مقاله تلاش شده است با توجه به کمبود اطلاعات حاصل از گمانه ها و مطالعات زیرسطحی، میزان توسعه یافتگی جریان آب زیرزمینی در مسیر تونل بر پایه شوه ر قوارژی و عوارض سطحی منطقه، مورد بررسی قرار گیرد. مدلسازی های تحلیلی و پیمایش های صحرایی در منطقه نشاندهنده تطابق نسی ژنومورفولوژی منطقه با حجم جریان آب در مسیر حفاری تونل است. بر مورد بررسی قرار گیرد. مدلسازی های تحلیلی و پیمایش های صحرایی در منطقه نشاندهنده تطابق نسبی ژنومورفولوژی منطقه با حجم جریان آب در مسیر حفاری تونل است. بر این اساس با توجه به اندازه گیری های انجام شده در زمینه آب ورودی به تونل، حدود ۸۰ لیتر بر ثانیه آب به این بخش از تونل وارد شده است که با بررسی های ژنومورفولوژی منطقه با حجم جریان آب در مسیر مونلو ژی منطقه، این اساس با توجه به اندازه گیری های انجام شده در زمینه آب ورودی به تونل، حدود ۸۰ لیتر بر ثانیه آب به این بخش از تونل وارد شده است که با بررسی های ژنومورفولوژی منطقه، این اساس با توجه به اندازه گیری های انجام شده آن است که بررسی مورفولوژی و عوارض به میره توانسته است در راستای شناخت دقیق تر شرایط هیدروژنولوژی منطقه، انجام شده، همخوانی دارد و نتایج نشانده دره آن است که بررسی مولی زمین، توانسته است در راستای شناخت دقیق تر شرایط

> **کلیدواژهها:** تونل قمرود، TBM، ژئومورفولوژی، جریان آب زیرزمینی، مدلسازی تحلیلی. ***نویسنده مسئول:** وحید جودکی

E-mail: Joudaki_vahid@yahoo.com

1- پیشنوشتار

سامانه انتقال آب قمرود با هدف انتقال آب از سرشاخههای رودخانه دز (در جنوب شهرستان الیگودرز) به شهرهای ایران مرکزی (قم، کاشان، محلات، خوانسار، گلپایگان، خمین، دلیجان، سلفچگان و نیمور) اجرا شده است. مهم ترین سازه این طرح تونلی با طول حدود ۳۶ کیلومتر است که در مرحله اجرا به ۴ قطعه تقریباً مساوی تقسیم شد. در آینده نزدیک با رشد جمعیت و گسترش صنعت در شهرهای ایران مرکزی، این تونل به حیاتی ترین شریان انتقال آب کشور تبدیل خواهد شد (جودکی و همکاران، ۱۳۹۰). بیشتر این تونل به روش مکانیزه و با استفاده از ماشینهای حفار تمام مقطع (۱۳۹۱ پایان یافت.

مطالعات گوناگونی توسط پژوهشگران پیرامون مباحث حفاری مکانیزه در تونل قمرود ارائه شده است که در مقالات جودکی و اجللوئیان (۱۳۹۲ و ۱۳۹۴) به شرح مخاطرات زمینشناسی تونل و معرفی پژوهشهای شاخص پژوهشگران دیگر در این زمینه پرداخته شده است.

شرایط زمین شناسی، هیدروژ نولوژی، ویژ کیهای دستگاه TBM و هماهنگی بخشهای مختلف دستگاه به هنگام اجرای عملیات بهطور مستقیم بر پیشروی آن تأثیر می گذارد (Barton, 2000). در صورتی که شواهد زمین شناسی نشانگر وجود جریانهای توسعه یافته آب زیرزمینی در مسیر تونل باشد، آن گاه باید دستگاه TBM متناسب با این شرایط طراحی شود و قابلیت رویارویی و کنترل جریانهای شدید را داشته باشد.

برخورد TBM با جریانهای شدید آب زیرزمینی در بسیاری از پروژههای تونلسازی گزارش شده است. در برخی از این تونلها با اعمال تدابیر لازم، عملیات حفاری با موفقیت و طبق زمانبندی برنامهریزی شده به پایان رسیده است و در برخی نیز به دلیل تناسب نداشتن ساختار دستگاه TBM با شرایط ژئوتکنیکی مسیر تونل و هجوم آب، عملیات حفاری با توقفهای مکرر و بسیار طولانیمدت همراه بوده است.

از جمله این موارد می توان به تونل سوم انتقال آب کوهرنگ (;Wenner and Wannenmacher, 2009) و تونل سرویس البرز ((Voral Wannenmacher, 2009) و تونل سرویس البرز ((Tseng et al., 2001) اشاره کرد. در عملیات حفاری تونل بزرگراه پینگ لین تایوان ((Tseng et al., 2001)) هجوم شدید و ناگهانی آب (جریان آب بیش از ۴۵ متر مکعب در دقیقه و با فشار بیش از ۲ مگاپاسگال) در مناطق گسلی و سنگهای خرد شده، سبب مدفون شدن ماشین تونلزنی تمام مقطع TBM شده است.

در قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود از دستگاه حفار تمام مقطع تلسکوپی ساخت شرکت ویرث (Wirth) آلمان استفاده شده است. ویژگی آشکار این نوع ماشین های حفار، کنترل آسانتر آب ورودی به تونل نسبت به ماشین های باز (بدون سپر) است. اما به دلیل وجود پهنه های گسلی فراوان، برخورد ماشین حفار با آب زیرزمینی، می توانست سبب تشدید ریزش های دیواره های تونل در نواحی خرد شده و به دنبال آن توقف و انحراف دستگاه TBM از مسیر صحیح حفاری شود.

مطالعات بسیاری از سوی پژوهشگران مختلف در زمینه وضعیت آب زیرزمینی در مسیر حفاری قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود انجام شده است (مهری، ۱۳۸۳؛ عالیانوری، ۱۳۸۴؛ حسنپور و ارومیهای، ۱۳۸۵؛ کتیبه و عالیانوری، ۱۳۸۵؛ عالیانوری و همکاران، ۱۳۸۸؛ جودکی، ۱۳۹۱؛ 2012 Aalianvari, et al. 2009، ۲۹۸۹؛ حودکی، ۱۳۹۱؛ دود اهمیت موضوع، کمبود الی انوری و همکاران، ۱۳۸۸، جاد کی، ۱۳۹۱؛ 2012 Aalianvari, 2009، برخی اطلاعات موجب شده است تا شناخت وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه با محدودیت هایی روبهرو باشد. در چنین شرایطی، بررسی دقیق مورفولوژی و عوارض سطحی زمین می تواند اطلاعات مفیدی برای افزایش دامنه مطالعات ساختگاهی و شناخت دقیق تر شرایط هیدروژئولوژی منطقه ارائه دهد.

اولین گام مهم و هدفمند در زمینه مطالعه عوارض ژئومورفولوژی به اواخر قرن نوزدهم میلادی بر میگردد؛ زمانی که دانشجویی اهل صربستان (Cvijić, 1893)،

کی کورید

با بررسی اشکال انحلالی نتایج پژوهش های پایان نامه دکترای خود را در دانشگاه زمین شناسی و جغرافیای وین منتشر کرد و آن را پدیده کارست نام گذاری کرد. با گذشت زمان این مطالعات توسط پژوهشگران دیگر، ابتدا در اروپا و آمریکای شمالی و سپس در دیگر نقاط جهان گسترش یافت (2009, De Waele et al.) مطالعه پدیده های ناشی از انحلال و کارستی شدن سنگ ها در سطح، می تواند راهی برای بررسی میزان تکامل کارست در یک منطقه باشد (Ford and Williams, 2007). مشاهده اشکال انحلالی در مقیاس کوچک و بزرگ به همراه بررسی هیدرولوژی در یک منطقه، می تواند اطلاعاتی در مورد چگونگی گسترش سامانه های زیر سطحی کارست و آبخوان ها ارائه دهد (Veni, 1999). برای نمونه مشاهده پولژه ها نشانه ای از گسترش یافتگی کامل سامانه های کارستی در یک منطقه است (2011).

مطالعه موردی حاضر نیز با نگرش بر تونل قمرود، به دنبال پاسخ به این پرسش است که در مرحله مطالعات هیدروژنولوژیکی پروژههای تونلسازی، مشاهده و بررسی ژئومورفولوژی ساختگاه تا چه اندازه میتواند در شناخت شرایط آب زیرزمینی در هنگام حفاری مؤثر باشد.

۲- زمینشناسی منطقه

ساختگاه مورد مطالعه بر پایه تقسیمبندی کلی زمین شناسی ایران با توجه به شکل ۱، در پهنه زمین شناسی سنندج – سیرجان (آقانباتی، ۱۳۸۳) قرار گرفته است. ویژگی اصلی این پهنه وجود گسل خوردگیهای فراوان است. سنگهای موجود در این پهنه به دلیل تحمل جنبشهای زمین ساختی بسیار، درجه دگرگونی متوسط به بالا دارند. همین امر سبب ایجاد انبوهی از گسلها و پهنههای خرد شده و شکستگیهای بسیار و تورق و تبلور دوباره کانیها در سنگها شده است (Alavi, 1904; Stocklin, 1968).

در قطعه ۴ تونل قمرود، تشکیلات سنگ شناسی منطقه به دو دسته کلی تقسیم می شوند. تشکیلات کرتاسه شامل آهک های تودهای و دولومیت و تشکیلات ژوراسیک شامل اسلیت، شیل، شیست، گرافیت شیست، کوار تزیت و ماسه سنگ های دگر گون شده است. قطعه ۴ تونل قمرود به طول تقریبی ۹ کیلومتر است که در ۶ کیلومتر ابتدایی آن، به دلیل ارتفاعات و شرایط کوهستانی منطقه (و نیز به دلیل محدودیت روش های ژئوالکتریک در ژرفای زیاد)، مطالعه ژئوفیزیکی برای بررسی تشکیلات زمین شناسی صورت نگرفته است. در این شرایط حفاری گمانه های اکتشافی نیز با محدودیت روبه رو بوده است.

در این محدوده به دلیل ژرفای تونل، انجام مطالعات زیر سطحی محدود بوده است و گمانه های اکتشافی حفر شده در بیشتر مواقع به ترازی نرسیده اند که تونل در آن قرار گرفته است. به عبارت دیگر دستگاه های مغزه گیری که در عملیات اکتشافی در این پروژه استفاده شده اند، توانایی حفر گمانه های ژرف را ندارند. گمانه ها تا ژرفای حدود ۳۵۰ متر حفر شده اند؛ اما تونل در ژرفای بیشینه ۶۰۰ متری از سطح ارتفاعات قرار گرفته است (Sharifzadeh and Hemmati Shaabani, 2006). شکل ۲، مقطع زمین شناسی مهندسی تونل در ۶ کیلومتر ابتدایی را ارائه می دهد.

۳ – پیمایش سطحی و بررسی ژئومور فولوژی در تشکیلات آهکی کرتاسه ۷ عنصر لازم برای تشکیل و گسترش کارست شامل بارش های آسمانی، دما، فشار دیاکسید کربن، پستی و بلندی، وضعیت چینه شناسی و سنگ شناسی، ستبرای لایه های کربناته و موقعیت زمین ساختی است (White, 1988).

وجود بلندیهای آهکی، زمین ساخت منطقه و همچنین وجود آب کافی حاصل از بارندگیها می توانند عواملی تأثیر گذاری برای افزایش پتانسیل گسترش شکستگیها و ایجاد کارست در منطقه مورد مطالعه باشد. بنابراین شناسایی و بررسی پدیدههای یاد شده می تواند به شناخت پدیده کارست در منطقه و پیش بینی مخاطرات ناشی از جریانهای آب زیرزمینی در هنگام حفاری با TBM کمک فراوانی کند.

به منظور شناسایی و تعیین میزان کارستشدگی در منطقه ضروری است تا به بررسی شواهد مرتبط با گسترش کارست در منطقه پرداخت. بر پایه نتایج به دست

آمده طی چند مرحله پیمایش صحرایی در ساختگاه طرح، انواع سیماهای کارستی دیده شده در آهکهای منطقه به شرح زیر هستند:

Rain pit .1−₩

این اشکال در سطح بیشتر آهکهای منطقه دیده می شوند؛ ولی گسترش و پراکندگی زیادی ندارند و به سوی ارتفاعات بالاتر (آهکهای تودهای) بر تراکم آنها افزوده می شود (شکل ۳- الف).

Solution Pan .▼ –♥

این اشکال در منطقه چندان عمومیت ندارند و بهصورت معدود در ارتفاعات بالا و روی آهکهای تودهای دیده می شوند که در سطوح صاف قرار گرفتهاند (شکل ۳-الف). سر سر

Rillen Karren **.♥ −♥**

این اشکال در سطح بیشتر آهکهای منطقه دیده می شوند؛ ولی گسترش آنها چندان زیاد نیست. با پیشروی به بالای کوه (آهکهای تودهای) باز شدگی درزه ها و سطوح لایه بندی در اثر عمل انحلال بیشتر شده و بر تراکم این شکل ها افزوده می شود، ولی در کل ژرفای این آثار کم است، پیشرفت چندانی ندارند و تراکم آنها نیز چندان زیاد نیست (شکل ۳– ب).

Pit and tunnel karren .Ŷ −♥

در مسیر تونل تقریباً تنها نقطهای که در آن آثار Pit and tunnel karren به فراوانی دیده میشود، محلی در یال خاوری کوه چالهنده و باختر رودخانه دربند (در راستای محور تونل محدوده کیلومتراژ ۱۵۰۰) است (شکل ۴).

آهکهای این ناحیه تا حدودی دولومیتی شدند و حالت شیستوزیته ضعیفی از خود نشان می دهند و در عین حال ناز کلایه نیز هستند. به نظر می رسد که همین ضعفهای ساختاری سبب ایجاد این نوع از مورفولوژی کارستی در این آهکها شده است؛ چرا که هر چند به دلیل ناز کلایه بودن آب نمی تواند به صورت متمر کز کانالیزه شود و قدرت خود را در یک نقطه متمر کز کند؛ ولی وجود خطواره های بسیار (شکل ۴- پ)، سبب ضعیف شدن بافت سنگ شده و آن را در برابر انحلال نامقاوم ساخته است. این اشکال نیز در منطقه بسیار سطحی هستند و ژرفای چندانی ندارند؛ به طوری که بیشتر آنها دارای ژرفای بیشینه ۵/۰ تا ۱ متر هستند. این آثار اگر چه شاهدی بر شدت عمل بیشتر کارستی شدن هستند؛ ولی به دلیل کم ژرفا بودن تنها برای سطح صدق می کنند و نمی توانند دلیلی بر کارستی شدن شدن شدید تر در زیر سطح نیز باشند.

۳- ۵. غارها

در منطقه تعداد ۷ غار دیده شد که ۲ غار از این غارها در مجاورت یکدیگر در دامنه جنوبی کوه سرسیل یعنی کوههای مشرف به روستای گندمینه و ۵ غار دیگر در دامنه خاوری کوه چالهنده و باختر رودخانه دربند (در راستای محور تونل محدوده کیلومتراژ ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰، همان ناحیهای که Pit and tunnel karrenها دیده می شوند) قرار گرفتهاند.

غارهای دامنه جنوبی کوه سرسیل دهانهای به نسبت بزرگ دارند؛ ولی ژرفای آنها چندان زیاد نیست و در حد چند متر است. در بازدید از این غارها و بررسیهای انجام گرفنه، دیده شد که این غارها بیشتر غارهای ساختاری هستند و در اثر ریزش قطعات سنگ حاصل از فعالیتهای ساختاری ایجاد شدهاند؛ در این میان، عمل انحلال توسط آب تنها وسیلهای برای سست کردن اتصال قطعات سنگ و کمک به ریزش آنها بوده و نقش مستقیم در تشکیل غارها نداشته است. در واقع مورفولوژی این غارها هیچ گونه همانندی به غارهای انحلالی ندارد (شکل ۵- الف).

از ۵ غاری که در دامنه خاوری کوه چالهنده دیده میشوند، غاری که در ارتفاع پایین تر قرار دارد، دارای شرایط غارهای کوه سرسیل است و هیچ همانندی به غارهای انحلالی ندارد و ریزش قطعات سنگ از دریچه غار در سراشیبی تند کوه، کاملاً مشهود است. ولی در ۴ غار دیگر که در ارتفاعی بالاتر قرار گرفته اند، شواهد انحلال بیشتر به چشم میخورد. این غارها در راستای لایه بندی و به موازات آن شکل گرفته اند. در این غارها نیز عمل انحلال در راستای لایه بندی و در سطح میان صفحات

عاويد

وحيد جودكي و همكاران

لایهبندی و همچنین سطوح درزهها سبب شده که بلوکهای آهکی در جای خود سست شوند، ریزش کنند و غارها شکل بگیرند (شکل ۵–ب). بنابراین با وجود دیده شدن این غارها باز هم نمی توان گفت که سازندهای آهکی منطقه سامانه کارستی گسترش یافتهای دارند.

3-6 فروچاله

تنها فروچاله موجود در آهکهای منطقه در انتهای باختری کوه ویلوو در مجاورت کوه کمرسته در ارتفاعات کوه سرسیل دیده شد که فروچالهای به قطر تقریبی ۲۵۰ متر است (شکل ۶). این فروچاله در محل تقاطع دو گسل ایجاد شده است و حوضه آبریز به نسبت کوچکی دارد که منحصر به سطح خود فروچاله و بخش کمی از سنگهای مجاور در بخش جنوب باختری است. با توجه به این نکته و همچنین جنس سنگهایی که این فروچاله در آنها تشکیل شده است -که از آهکهای مارنی هستند- و از سوی دیگر نبود چشمههای بزرگ و پر آب در پیرامون آن، می توان نتیجه گرفت که گسترش یافتگی کارست چندان شدید نیست و با توجه به دلایل بالا و وجود دو گسل در امتداد آن و شکستگیهای زیاد و قطعات و بلوکهای سنگی فاوان در محل فروچاله، می توان فروچاله موجود را از نوع Subsidence doline م سبب سست شدن اتصالات میان بلوکهای سنگی شده است و با یوجه به دلایل بالا سبب سست شدن اتصالات میان بلوکهای سنگی شده است و با یوبه به دلایل بالا مواوان در محل فروچاله، می توان فروچاله موجود را از نوع Subsidence doline استگی دانست که به دلیل وجود درز و شکافهای فراوان در آن، عمل انحلال توسط آب سبب سست شدن اتصالات میان بلوکهای سنگی شده است و این بلوکها در جای

3- 7. چشمەھا

در بررسیهای صحرایی، چشمههای کارستی بزرگی از دید آبدهی در منطقه دیده نشد. مظهر چشمههای منطقه در فصل مشترک سنگیآهک در رسوبات شیلی و ماسهسنگی ژوراسیک و یا در محل تقاطع گسلها جای گرفته است. بنابراین نقش گسلهای منطقه در هدایت جریان آب زیرزمینی و نقش فصل مشترک رسوبات شیلی و ماسهسنگی (به عنوان سد زیر زمینی: Barrier) با سنگآهک به عنوان محل خروج آب زیرزمینی قابل توجه است. شکل ۷، نمای یکی از چشمههای عمده در مسیر تونل را نشان می دهد.

۴- شواهد نبود جریان شدید آب زیرزمینی در تشکیلات آهکی

به دلیل انجام نشدن مطالعات ژئوفیزیکی و نیز حفاری نشدن گمانههای اکتشافی با تعداد و ژرفای کافی در آهکههای منطقه، اطلاعات کافی از وضعیت گسترش سامانههای کارستی در ژرفا در دست نبوده است. این در حالی است که Mikulec and Trumic (1976) بر این باورند که در بررسیهای کارستی حتی اگر مطالعات اکتشافی فراوان با بودجه کافی و فرصت لازم انجام شود، باز هم احتمال بروز مخاطرات وجود دارد.

در تشکیلات آهکی تنها دو گمانه (TGH-23 و BHB در شکل ۲) حفر شده است. که تنها در گمانه 23-TGH، ۱۱ آزمون لوژن انجام شده است. همان گونه که در اطلاعات جدول شماره ۱ دیده می شود، تودهسنگها نفوذپذیری کمی داشتهاند و در ۷۵ متر بالایی گمانه، میزان لوژن کمتر از ۱ بوده است. تنها در یک مقطع و در ژرفای ۹۰ تا ۵۹ میزان لوژن بیشتر از ۱۰۰ به دست آمده است. مقدار شاخص کیفی سنگ (RQD)، در بیشتر طول گمانه بیش از ۷۰ درصد بوده است. اما در این مقطع از گمانه (ژرفای ۹۰ تا ۵۵) نیز با وجود رقم بالای لوژن، شاخص کیفی سنگ، حدود ۹۰ درصد بوده است. بنابراین شواهد نشان می دهد که آبگذری زیاد گمانه، ناشی از خردشدگی تودهسنگ نیست و می توان آن را با وجود یک مجرای کارستی مرتبط دانست.

البته به دلیل نبود راه دسترسی و توپو گرافی منطقه، این گمانه در محور تونل حفاری نشده و حدود ۹۰۰ متر دورتر از محور تونل، در نزدیکی یکی از چشمههای منطقه و به ژرفای تنها ۱۰۰ متر حفر شده است. اگر چه اطلاعات حاصل از این گمانه می توانست تا حدی راهنمای شرایط عمومی تودهسنگها در منطقه باشد، اما با توجه به فاصله زیاد آن نسبت به محور تونل، به نظر می رسد تعمیم اطلاعات این گمانه به محور تونل، برای پیش بینی مخاطرات آب زیرزمینی در مسیر حفاری، کار دشواری است.

از این رو، با وجود محدودیت مطالعات اکتشافی، بر پایه نتایج این پژوهش با توجه به مشاهدات صحرایی و بررسی سیماهای کارستی منطقه، دلایل اصلی نبود سامانههای کارستی گسترشیافته در مسیر حفاری TBM را می توان مورد بحث قرار داد:

در منطقه ساخت تونل عوارض شاخص مانند فروچالههای بزرگ، غارهای انحلالی طویل، چشمههای بزرگ با دبی بالا، رودخانههای ناپدید شونده و ... دیده نمیشوند که بتوانند دلیلی قطعی بر گسترش سامانههای کارستی در ژرفای زمین و خطر هجوم شدید آب زیرزمینی در مسیر حفاری دستگاه TBM باشند.

Rain pit; Solution Pan;) عوارض کارستی سطحی دیده شده در منطقه (;Rain pit; Solution Pan;) تواکم و پراکندگی زیادی ندارند؛ به همین دلیل نمی توانند شواهدی قطعی برای گسترش کارست در ژرفا و در تراز حفاری تونل باشند.

سازوکار تشکیل فروچاله و غارهای دیده شده در منطقه، تنها بر اثر عمل انحلال نیست و در حقیقت به دلیل ریزش قطعات سنگ حاصل از فعالیتهای ساختاری ایجاد شدهاند و در این میان، عمل انحلال توسط آب تنها وسیلهای برای سست کردن اتصال قطعات سنگ و کمک به ریزش آنها بوده و نقش مستقیم در تشکیل این عوارض نداشته است. از سوی دیگر، این احتمال وجود دارد که با توجه به شرایط فعال زمینساختی منطقه، نیروهای لرزهای نیز میتوانستهاند با عمل دینامیکی خود سبب تشدید ناپایداری و فروریختگیها در چنین عوارضی شوند (جودکی، ۱۳۹۱). عمل نیروهای لرزهای بیشتر متمرکز در فراخ کردن فروریختگیها بهصورت درونریزی سقف غارها یا قطع و انسداد مجاری کارست است. برای نمونه (I962) Janjic اظهار داشته است که طی زمینلرزه ژانویه سال ۱۹۶۲ در ناحیه ساحلی نزدیک Makarka (دهکده Kozica) یوگسلاوی، سقف برخی غارها فروکش کرده و کف بسیاری از حفرههای فروکش باز شده است (آغاسی و افراسیابیان، ۱۳۷۸). همچنین مطالعات بسیار دیگری نیز در نقاط مختلف دنیا از جمله شمال خاور تهران (Khorsandi and Miyata, 2007)، جنوب باختر تركيه (Celik and Onsal, 1999)، شمال خاور عربستان (Edgell, 1993)، جاوه مركزي اندونزي (Kusumayudha et al., 2000)، جاوه مركزي اندونزي (و ... به تأثير زمينساخت بر گسترش فروچالهها و غارها پرداختهاند.

و ... به نایر رمین سخت بر تسترس فروچه ده او عارف پر داختهاید. نوع سنگ آهک در گسترش کارست اهمیت زیادی دارد و باید دانست که سنگ مورد نظر از جنس Pure Calctie یا Dolomite و High-Mg Calcite است. میزان درصد کلسیم و منیزیم در دو سنگ دولومیت و آهک متفاوت و میزان اشباع آب از این دو کانی تقریباً یکسان است (حدود ۵۰۰ میلی گرم در لیتر)؛ ولی زمان انحلال و به اشباع رسیدن یا به عبارتی سرعت انحلال و اشباع شدن آنها متفاوت است. پژوهش های آزمایشگاهی نشان داده است که سرعت انحلال در کانی های کربنات کلسیم و منیزیم به صورت زیر است:

Aragonite> Low-Mg Calctie> Calctie> Dolomite با توجه به مطالب گفته شده و این نکته که بخشی از آهک های منطقه ساخت تونل دولومیتی هستند، گسترش نیافتن کارست در این آهک ها تا حدودی از این دیدگاه قابل انتظار است.

کارست گسترش یافته بیشتر در سنگ آهکهای تودهای تشکیل می شوند که ستبرای زیادی دارند (Maurice et al., 2010). در منطقه مورد مطالعه از آنجا که آهکهای ستبرلایه و تودهای در بالاترین بخش ستون چینه شناسی قرار دارند؛ انتظار می رود که گسترش کارست در ارتفاعات بالا، بیشتر باشد. همچنین وجود لایه های نازک سبب پخش شدن آب در مسیرهای گوناگون می شود و از کانالیزه شدن آب جلوگیری می کند و بنابراین گسترش کارست کمتر خواهد شد؛ که این شرایط در تراز حفاری تونل (لایه های پایینی ستون چینه شناسی که دارای لایه بندی مناسب هستند) وجود دارد. از سوی دیگر معمولاً هر چه لایه های آهکی نازکتر باشند، مقدار ناخالصی آنها افزایش و در نتیجه گسترش کارست کاهش می بابد.

وجود کانی های رسی سبب محدود شدن گسترش کارست می شود. تجربه نشان داده است که با وجود ۲۰ تا ۳۰ درصد رس در سنگ آهک، کارست گسترش پیدا

بررسی اشکال انحلالی سطحی و میزان توسعه آب زیرزمینی در ساختگاه قطعه ۴ تونل قمرود

نمی کند. برای نمونه به تازگی تجربه حفاری مکانیزه و عبور از سازندهای مختلف در تونل انتقال آب بازی دراز(جنوب باختری استان کرمانشاه) نشان می دهد که سازندهای پابده و گورپی با وجود ۵۰ تا ۶۰ درصد آهک، کارست گسترش یافتهای ندارد. رس به این علت گسترش کارست را مختل می کند که پس از کمی انحلال آهکها، رسها باقی می مانند. در این شرایط رس با پر کردن شکافها و درزهها (و نیز به دلیل نفوذیذیری کمی که دارد) مجاری حرکت آب را مسدود می کند.

در پیمایش های سطحی صورت گرفته در منطقه ساخت تونل، این پدیده در محل چشمه کمربسته دیده می شود؛ به گونهای که در محل گسل موجود (سطح گسل) افقی از مارن دیده می شود که در واقع ناشی از انحلال آهک های مارنی در پهنه های خرد شده است که آهک آن حل شده ولی مارن برجای مانده است. شکل ۸ نمایی از آهکهای رانده شده روی شیل و ماسه سنگ ژوراسیک و مقطع زمین شناسی نمادین این چشمه را نشان می دهد.

در این پژوهش برای افزایش دامنه مطالعات، دو نمونه آهک (یک نمونه مربوط به تراز حفاری تونل و دیگری از رخنمونهای سطحی) برای تهیه مقطع نازک سنگ انتخاب شد که بررسی میکروسکوپی بافت و کانیشناسی در این مقاطع، وجود ناخالصی رسی در این آهکها و محدودیت انحلال در تشکیلات کرتاسه را تأیید میکند (شکلهای ۹–الف و ب).

در شکل ۹- الف، ساختار یک استیلولیت در بافت سنگ آهکی دیده می شود که منشأ ایجاد آن نیروهای زمین ساختی در منطقه است. همان گونه که در تصویر میکروسکوپی دیده می شود، فضای خالی در درزه استیلولیتی توسط رس ها پر شده است که این عامل، پتانسیل استیلولیت در افزایش نفوذپذیری (به عنوان رابط فضاهای خالی سنگ) را خنئی می کند. افزون بر این، بررسی میکروسکوپی نمونه ها، نشان دهنده عملکرد پدیده دگر گونی و تبلور دوباره کانی کلسیت است. در دگر گونی، نوعی جهت یابی انتخابی در کانی ها (شکل ۹- الف) و در نتیجه سطوح ضعف در سنگ ایجاد می شود. اما در برابر آن، تبلور دوباره (شکل ۹- ب) سبب افزایش مقاومت سنگ می شود. از این رو با توجه به محدودیت گسترش جریان آب زیرزمینی (وجود ناخالصی رسی) و استحکام توده سنگ های آهکی، حفاری مکانیزه در تشکیلات سازند کر تاسه چندان دشوار نبوده است (شکل ۹- پ).

۵- پیمایش سطحی و بررسی ژئومورفولوژی در تشکیلات غیر آهکی ژوراسیک

در تشکیلات ناتراوا نیز با بررسی ژئومورفولوژی منطقه، امکان دستیابی به اطلاعاتی از شرایط هیدرولوژیکی در ژرفا وجود دارد. از این رو بررسی عوارض سطحی زمین در تشکیلات غیر آهکی نیز میتواند نقش مهمی در مطالعات هیدروژئولوژیکی طرحهای سدسازی و تونلسازی داشته باشد.

در مطالعه موردی حاضر با توجه به شرایط سنگ شناسی در سازند ژوراسیک، جریانهای گسترش یافته آب زیرزمینی در این تشکیلات پیش بینی نمی شد. با این حال تشکیلات ژوراسیک در مسیر شکستگیها و سطوح برشی، امکان هدایت آب زیرزمینی را به داخل تونل در حال ساخت فراهم می کرد.

بررسی عوارض سطحی و ژئومورفولوژی منطقه در تشکیلات غیر آهکی این تونل، نیز می توانسته در مواردی برای شناخت شرایط آب زیرزمینی در تراز حفاری تونل مفید باشد. برای نمونه اگر در پیمایش سطحی در راستای محور تونل، شواهدی از گسل خوردگی دیده شود، بسته به شرایط آبهای سطحی و حوضه آبریز در محدوده گسل، احتمال نفوذ آب در مسیر شکستگیها به اعماق در محدوده حفاری تونل وجود دارد.

برای نمونه شرایط هیدرولوژیکی در هنگام حفاری در متراژ ۵۲۶۰ با برخورد TBM به یک پهنه گسلی بهصورت جریان آب بروز کرده است. با پیمایش سطحی در راستای محور تونل و بررسی ژئومورفولوژی دیده شد که در این موقعیت (متراژ ۵۲۶۰)، درهای شکل گرفته است که با توجه به وجود چندین شاهد سطحی میتوان به وجود پهنه گسلی در آن پی برد (شکل ۱۰- الف). لایههای

ماسهسنگی، اسلیتی و شیستی در محل این دره رخنمون دارند که با تر کیب سنگی دیده شده درون تونل انطباق دارد. وجود آثار لغزش در برخی رخنمون های سطحی و تفاوت رنگ مصالح در امتداد خط اثر گسل و آبدار بودن دره از جمله مهم ترین این شواهد است. از سوی دیگر به نظر میرسد وجود یک چشمه آب جاری که در دره (شکل ۱۰–ب) دیده می شود، منشأ آب جریان یافته در محدوده حفاری متراژ به تراز حفاری تونل انتقال یافته باشد.

در متراژ ۵۲۶۰ با خزش تودهسنگها، سپر TBM در اثر پدیده لهیدگی توسط دیوارههای تونل دربر گرفته شد و نیز با ریزش تودهسنگها روی کلهحفار TBM عملیات حفاری متوقف شد که عملیات آزادسازی دستگاه و شروع دوباره عملیات حفاری، بازه زمانی طولانیمدتِ ۳۱ روزه داشت.

حضور آب در این متراژ از تونل و در دیگر پهنههای گسلی در مسیر سازند ژوراسیک (بهصورت قطرهای تا جریانی)، با دگرسانی تودهسنگها و کاهش مقاومت مادهسنگ و مواد پرکننده درزهها، نقش مهمی در رخداد ریزشها و ناپایداری دیوارهها در محدوده عملیات حفاری TBM داشته است. نفوذ آب در متراژ ۵۲۶۰ بیشتر به وجود گسل و ساختار خرد شده سنگها و همچنین ترکیبسنگی ماسهسنگی تودهسنگ در برگیرنده، بر میگردد.

۶- پیشبینی مخاطرات آب زیرزمینی و مقایسه با شرایط رخ داده

سطح آب زیرزمینی در ساختگاه طرح، در محدوده ۲۵۰ متر (در تشکیلات ژوراسیک) تا ۳۰۰ متر (در تشکیلات کرتاسه) بالاتر از تراز حفاری تونل قرار داشته است. از این رو یکی از نگرانی های اصلی پیش از اجرای این بخش از تونل، احتمال هجوم آب زیرزمینی به تونل و ایجاد خطرات جانی، مالی و نیز اختلال در عملیات حفاری بود. به این منظور در این بخش تلاش شده است که با استفاده از معادلات تحلیلی، مقدار آب ورودی به تونل بر آورد شود و سپس با اطلاعات اندازه گیری شده آب ورودی به تونل و شرایط ژئومور فولوژی منطقه مقایسه شوند.

6 - ۱ - ۲ آورد آب ورودی به تونل با استفاده از معادلات تحلیلی

روش های تحلیلی با تکیه بر معادلات حاکم بر جریان آب به سوی تونل ها با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند نفوذپذیری تودهسنگ، ارتفاع سطح ایستایی، شعاع تونل و به برآورد میزان نفوذ آب به تونل ها می پردازند (جدول ۲).

در این معادلات₄ H ، فاصله مرکز تونل تا سطح ایستابی (متر)؛ Z، ستبرای روباره (متر)؛ r، شعاع تونل (متر)؛ K، ضریب نفوذپذیری معادل محیط سنگ در امتداد جریان نشت (متر بر ثانیه) و _LQ، میزان نفوذ آب(متر مکعب بر ثانیه) در واحد طول تونل است.

در روشهای تحلیلی با در نظر گرفتن متغیرهایی همچون نفوذپذیری متوسط تودهسنگ، ارتفاع سطح ایستابی و شعاع تونل، میزان نفوذ آب به تونل برآورد میشود. به کارگیری معادلات ارائه شده، نیازمند در نظر گرفتن شرایط و فرضیات زیر است:

۱) جریان بهصورت دوبعدی در نظر گرفته شده و مقطع تونل بهصورت دایرهای است.

۲) محیط نشت ایزوتروپ و هموژن است.

۳) مقطع تونل زیر سطح ایستابی (در ناحیه اشباع) قرار گرفته است.

(2003) El Tani با بررسی هر کدام از روابط یاد شده در جدول ۲ و نتایج حاصل از آنها و مقایسه با میزان واقعی نفوذ آب به تونل، میزان دقت این روابط را با توجه به ژرفای ساختگاه تونل، ارزیابی کرده است. بر پایه این پژوهش، برای تونل هایی که نسبت r/h (نسبت شعاع تونل به ژرفای قرار گیری تونل زیر سطح ایستایی) کمتر از ۲۰/۴ باشد، همه معادلات جدول ۲ با دقت بالایی مقدار آب ورودی به تونل را به دست خواهند آورد. بنابراین، با توجه به این مسئله در این مقاله با استفاده از معادله (2003) El Tani در عدود ۵۶ لیتر آب ورودی به تونل بر آورد شد که بر این اساس، به صورت تجمعی در حدود ۵۶ لیتر بر ثانیه، آب وارد تونل میشود. وحيد جودكي و همكاران

Jeojege C

۶- ۲. مشاهدات و اندازه گیریهای آب ورودی به تونل

در زمان پیشروی TBM در تشکیلات آهکی کرتاسه، میزان جریان آب از حدود ۳۰ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه متغیر بوده است. البته در برخی مقاطع نیز هجوم آب به میزان ۶۰ تا ۸۰ لیتر بر ثانیه نیز رسیده است. شواهد و نتایج بررسی های صحرایی در این پژوهش نشان از آن دارد که افزایش میزان آب در این مقاطع ناشی از مجاری کارستی گسترش یافته تر (نسبت به دیگر مقاطع تونل) نبوده؛ بلکه بیشتر متأثر از شرایط فصلی در مقطع زمانی عملیات حفاری بوده است. بارندگی های شدید و ذوب شدن برف ارتفاعات و نفوذ آب حاصل در سنگهای سطحی، میتوانسته عامل اصلی افزایش دبی آب ورودی تا ۸۰ لیتر بر ثانیه بوده باشد. بررسی شرایط آب ورودی به تونل، پس از پایان حفاری تشکیلات آهکی و ورود تی بی م به تشکیلات سازند غیر آهکی ژوراسیک، این نکته را تأیید می کند.

بعد از پایان حفاری تشکیلات آهکی در نیمه نخست سال ۱۳۸۳، TBM در حال پیشروی در تشکیلات غیر آهکی ژوراسیک بوده است. با این حال جریان آب ورودی به تونل در بخش آهکی همچنان ادامه داشته است. بررسی اندازه گیریهای دبی آب ورودی نشان میدهد که میزان دبی در فصل بدون بارش و در فصل بارندگی با یکدیگر اختلاف دارند. بهطوری که بلافاصله پس از بارندگیهای شدید روزهای ۲۲ و ۲۳ اسفندماه ۱۳۸۳، میزان دبی آب ورودی در تاریخ ۲۴ اسفندماه به میزان ۸۰ لیتر بر ثانیه افزایش می یابد (شکل ۱۱).

مقایسه نتایج حاصل از برآورد نشت توسط معادلات تحلیلی و مقادیر واقعی اندازه گیری شده، نشاندهنده دقت قابل قبول محاسبات است. اگر چه در تشکیلات آهکی نفوذ آب از مسیر مجاری کارستی در تراز حفاری تونل صورت گرفته است؛ اما با توجه به حجم به نسبت کم آب، میتوان گفت این مجاری از گسترش یافتگی برخوردار نبودهاند که البته شرایط مورفولوژی منطقه و پراکندگی اشکال انحلالی سطحی نیز این مسئله را تأیید میکند که آهکهای منطقه قابلیت گسترش آب زیرزمینی را ندارند. در حقیقت عامل اصلی ایجاد مجاری کارستی در تراز تونل، بازشدگی درز و شکافهای تودهسنگها در نواحی خرد شده بوده است. نفوذ آب (به ویژه ناشی از بارشهای شدید) به ژرفا و خاصیت انحلالی آن، موجب فراختر شدن شکافها شده و امکان هدایت آب به محدوده عمیات حفاری تا میزان بیشینه ۸۰ لیتر بر ثانیه را فراهم کرده است.

البته با توجه استحکام ژئومکانیکی آهکهای کرتاسه (نسبت به تشکیلات ضعیف و متورق سازند ژوراسیک) و نیز میزان قطر مقطع حفاری (۴/۵ متر)، جریان آب به مقدار ۸۰ لیتر بر ثانیه در چنین تونلی نمی توانسته است سبب مشکلات و مخاطرات مهمی شود. از این رو عملیات حفاری در تودهسنگهای آهکی سازند کرتاسه روند پیشروی مناسبی داشته است.

اما در تشکیلات غیر آهکی سازند ژوراسیک، عملیات حفاری به دلیل ریزش تودهسنگها در پهنههای گسلی روی کله حفار TBM، بارها متوقف شده است. در چنین شرایطی تخلیه مصالح، بهسازی زمین و آزادسازی دستگاه TBM، عملیات بسیار خطرناک، زمانبر و پرهزینهای بوده است که تنها توسط کارگران باتجربه و ماهر و بهصورت دستی صورت میگرفت. در این تشکیلات از جمله عوامل تشدیدکننده پدیده ریزش، وجود آبهای زیرزمینی در میان درزه و شکافهای نواحی خرد شده بود. بررسیها در تشکیلات سازند ژوراسیک نشان داد که

وضعیت آب زیرزمینی در مسیر حفاری از مرطوب تا قطرهای و نیز جریانی متغیر بوده است. در مقطع زمین شناسی مهندسی تونل (شکل ۲) محدودههای جریان آب و توقفهای TBM در سازند ژوراسیک مشخص شده است. حضور آب بیشتر به دلیل وجود گسل و ساختار خرد شده سنگنها بوده است که البته در برخی مقاطع وجود ترکیبسنگی ماسه سنگی عاملی مؤثر در گسترش جریان آب در این تشکیلات بوده است. اگر چه آب ورودی به محدوده حفاری در پهنههای گسلی (کمتر از ۲ تا ۶ لیتر بر ثانیه)، حجم قابل ملاحظهای نداشته است تا ز گمانه زهکشی یا تزریق استفاده شود؟ ولی در افزایش شدت ریزش توده سنگها روی کله حفار و توقف TBM نقش مؤثری داشته است. در چنین شرایطی جریان آب زیرزمینی همچنین می تواند منطق ریزشی را افزایش دهد. هر چند وجود پهنههای گسلی و خرد شده در مسیر مناطق ریزشی را افزایش دهد. هر چند وجود پهنههای گسلی و خرد شده در مسیر تونل، مخاطره اصلی و از دلایل اصلی توقفات دستگاه حفار بوده است؟ اما می توان حضور آب زیرزمینی را نیز به عنوان یکی از مخاطرات زمین شناسی در تشکیلات

۷- نتیجهگیری

بررسی ژئومورفولوژی و سیماهای کارستی در این پژوهش، با توجه به ناکافی بودن تعداد و ژرفای گمانهها (به ویژه در تشکیلات آهکی)، اطلاعات مفیدی را در راستای برآورد میزان گسترش یافتگی جریانهای آب زیرزمینی در مسیر حفاری تونل ارائه مي كند. بر پايه اطلاعات حاصل از مطالعات صحرايي در منطقه، سازندهاي مسير تونل پتانسیل بالایی برای گسترش آب زیرزمینی نداشتهاند. همچین با استفاده از معادلات تحلیلی نیز مقدار آب ورودی به این تونل در حدود ۵۶ لیتر بر ثانیه بر آورد می شود که این نتایج با پدیدههای موفولوژی منطقه و شرایط پیش آمده هنگام حفاری (جریان ۳۰ تا ۸۰ لیتر بر ثانیه در تشکیلات آهکی) تطابق نسبی قابل قبولی دارد. در عملیات حفاری، استحکام ژئومکانیکی آهکهای کرتاسه موجب شد تا جریان آب بر روند پیشروی TBM تأثیر گذار نباشد. اما در تشکیلات متورق و ضعیف ژوراسیک با وجود حجم پایین آب ورودی (کمتر از ۱ تا ۶ لیتر بر ثانیه)، شرایط به گونه دیگری بوده است. در تشکیلات غیر آهکی ژوراسیک در برخی مناطق از پهنههای گسلی، حضور آب زیرزمینی بهصورت جریانی بود و این مسئله سبب تشدید پدیده ریزش در تونل و گیر کردن دستگاه TBM میشد. نتایج حاصل از این پژوهش، نشانگر اهمیت بررسی عوارض سطحی زمین در مرحله مطالعات هیدروژئولوژیکی طرحهای تونلسازی است، چرا که شرایط تودهسنگها و آب زیرزمینی در اعماق زمین را نمی توان تنها با تکیه بر روش های ژئوفیزیکی، اطلاعات حاصل از گمانهها و ردهبندیهای مکانیک سنگ پیش بینی کرد.

سپاسگزاری

در پایان نگارنده اول لازم میداند از همیاری و حمایت استاد بزرگوار جناب آقای مهندس شمسی و همکاران محترم خود در گروه سازههای زیرزمینی شرکت مهندسین مشاور ساحل سپاسگزاری کند. همچنین از محبتهای دوستان عزیز آقایان مهندس آسترکی، ظریفی و جلالی به دلیل مشارکت ایشان در بازدیدهای صحرایی برای گردآوری اطلاعات و تهیه تصاویر سپاسگزاری می شود.



شكل ۱- موقعيت زمين شناسي (برگرفته از مراجع Hezarkhani, 2006; Stocklin, 1977) و جغرافيايي قطعه ۴ تونل قمرود.



شکل ۲- مقطع زمین شناسی مهندسی مربوط به شش کیلومتر ابتدایی در قطعه ۴ تونل قمرود (SCE, 2005).

شکل ۳– الف) نمایی از آثار Rain pit و Solution pan در منطقه؛ ب) نمایی از آثار Rillen karren در منطقه.

<u>Utojęsk</u>

وحید جودکی و همکاران

ک عرویدن



شکل ۴- الف و ب) نمایی از آثار Pit and tunnel karren در منطقه؛ پ) خطوارهها و ضعفهای ساختاری در آهکهای دولومیتی و آثار Pit and tunnel karren.



شکل ۵- الف) نمایی از غارهای دامنه جنوبی کوه سرسیل؛ ب) نمایی از غارهای دامنه خاوری کوه چالهنده.



شکل ۶- نمایی از موقعیت فروچاله در ارتفاعات کوه سرسیل مشرف به روستای گندمینه.

بررسی اشکال انحلالی سطحی و میز ان توسعه آب زیرزمینی در ساختگاه قطعه ۴ تونل قمرود





شکل ۷- نمایی از چشمه سراب هنده.



شکل ۸- الف) آهکهای رانده شده روی شیل و ماسهسنگ ژوراسیک در محل چشمه کمربسته؛ ب) مقطع زمین شناسی نمادین چشمه.

```
Archive of SID
```

وحید جودکی و همکاران



شکل ۹-الف) مقطع میکروسکوپی یک نمونه آهک از رخنمونهای سطحی کیلومتراژ ۲۴۰۰ تونل؛ ب) مقطع میکروسکوپی یک نمونه آهک از تراز حفاری کیلومتراژ ۱۶۵۰ تونل؛ پ) نمایی از وضعیت ژئومکانیکی و استحکام تودهسنگ آهکی در سینه کار تونل. خط اثر سایش ابزارهای برشی دستگاه حفار را میتوان بر سطح سنگ دید.



شکل ۱۰-الف) نمایی از دره گسلی؛ ب) نمایی از چشمه آب در دره.

<u>الماروم</u>

. بررسی اشکال انحلالی سطحی و میزان توسعه آب زیرزمینی در ساختگاه قطعه ۴ تونل قمرود



شکل ۱۱- تغییرات میزان دبی آب ورودی به بخش آهکی تونل در فصول مختلف.

ojook (

جدول ۱- نتایج آزمایشات لوژن در تشکیلات آهکی کرتاسه (SCE, 2005).

		ژرفا (متر)		گمانه
زرقای آب (متر)	لوزن	انتها	ابتدا	
۲/۵	1>	۲۵	۲.	
۴/۵	1>	۵۰	40	
۴/۵	1>	۶.	۵۵	
۴/۵	1 >	۶۵	۶.	
۴/۵	1>	٧٠	90	TGH-23
۱/۵	1>	٧۵	٧٠	
۴/۵	1>	٨٠	٧۵	
۲/۵	۲/۱۲	٨۵	٨٠	
۲/A	1>	٩.	٨۵	
۲/A	1 <	٩۵	٩.	
۲/۶	٣/٧۵	1	٩۵	



وحید جودکی و همکاران

جدول ۲- معادلات تحلیلی حاکم بر جریان آب ورودی به تونل.

توضيحات	رابطه	Rrferences
این معادله دارای سه پیشفرض اساسی و اولیه زیر است؛ جریان شعاعی، نبود تغییرات قابل توجه لایهبندی و اعمال نفوذپذیری معادل محیط	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2z}{r})} \tag{1}$	Goodman et al. (1965)
این پژوهشگران با جایگزینی _۳ H به جای z در رابطه ۱، آن را تصحیح کردند.	$Q = \frac{2\pi KH_0}{\ln(\frac{2H_0}{r})} $ (Y	Freeze & Cherry (1979)
ضریب کاهش هیوور (مقدار یک هشتم) و تغییراتی در مخرج به منظور تصحیح رابطه ۲ اعمال شده است.	$Q_L = \frac{2\pi KH_0}{\ln(\frac{2z}{r})} \times \frac{1}{8} $ (*	Heuer (1995)
ترکیبی از رابطه ۳ و ۱ به منظور کاهش خطا در مورد تونلهای ژرف و کمژرفا بر پایه مشاهدات میدانی تدوین شده است.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2h}{r} - 1)} $ (*	Raymer (2003)
در این رابطه روش (Goodman et al. (1965) با اعمال دقیق تر شرایط واقعی تصحیح شده است.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{h}{r} + \sqrt{(\frac{h}{r})^2 - 1)}} $ (\diamond	Lei (1999)
El Tani (2003) با بررسی میزان دقت معادلات یاد شده، رابطه ۶ را به عنوان یک رابطه بهینه معرفی کرده است.	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\ln \lambda} \& \lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1} (\%)$	El Tani (2003)

کتابنگاری

- آغاسی، ع. و افراسیابیان، ا.، ۱۳۷۸- هیدروژئولوژی کارست، ترجمه کتابKarst Hydrogeology نوشته Milanovic, P. T., 1981، انتشارات طرح تنظیم استانداردهای مهندسی آب کشور، چاپ اول، ۳۹۶ ص.
 - آفانباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ اول، ۵۸۶ ص.
- جودکی، و. و اجل لوئیان، ر.، ۱۳۹۲- تأثیر پایاننامه های دانشجویی در جهت رشد صنعت تونل سازی (مطالعه موردی تونل بلند قمرود)، فصلنامه علمی ترویجی صنعت و دانشگاه، سال ششم، شماره ۱۹ و ۲۰، صص. ۵۹ تا ۸۰
- جودکی، و. و اجللوئیان، ر.، ۱۳۹۴- نقش شرایط زمینشناسی و سنگشناسی سازندها در رخداد مخاطرات حفاری (مطالعه موردی تونل قمرود)، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، سال بیست و پنجم، شماره ۹۷، صص. ۱۵۱ تا ۱۶۲.
- جودکی، و.، ۱۳۹۱- بازنگری ژئوتکنیکی قطعه ۳ و ۴ مسیر تونل انتقال آب قمرود، پایاننامه کارشناسی ارشد گرایش زمینشناسی مهندسی، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان.
- جودکی، و.، اجل لوئیان، ر. و ملارضایی، ف.، ۱۳۹۰- لزوم مقاومسازی محتاطانه و محافظه کارانه پوشش داخلی تونل قمرود به عنوان حیاتی ترین شریان انتقال آب در کشور، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی عمران: مقاومسازی و حفظ بناهای ماندگار، اراک.
- حسنپور، ج. و ارومیهای، ع.، ۱۳۸۵- ارزیابی اعتبار روش های مختلف تخمین جریان آب ورودی به تونل های سنگی (مطالعه موردی تونل قمرود)، هفتمین کنفرانس ملی تونل ایران، دانشگاه صنعتی شریف، صص. ۵۷۴ تا ۵۸۱.
- عالیانوری، ع.، ۱۳۸۴- تخمین میزان نفوذ آب به تونل های سنگی با نگرشی خاص به تونل انتقال آب قمرود، پایاننامه کارشناسی ارشد گرایش مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن-متالوژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- عالیانوری،ع.، کتیبه، ه.، شریفزاده، م. و فرهادیان، ه.، ۱۳۸۸- محاسبه جریان ناگهانی و اولیه آب به درون تونل های سنگی مطالعه موردی تونل انتقال آب قمرود، هشتمین کنفرانس ملی تونل ایران، دانشگاه تریبت مدرس، صص. ۱۹۶ تا ۲۰۴.
- کتیبه، ه. و عالیانوری، ع.، ۱۳۸۵- تخمین جریان نشت آب زیرزمینی به تونل انتقال آب قمرود توسط نرمافزار TunSeep، هفتمین کنفرانس ملی تونل ایران، دانشگاه صنعتی شریف، صص. ۳۷۱ تا ۳۷۹.
- مهری، ح.، ۱۳۸۳- ارزیابی آبهای هجومی به داخل عملیات معدنی تونل انتقال آب قمرود و ارائه مدل زهکشی آن، پایاننامه کارشناسی ارشد گرایش مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.



References

Aalianvari, A., Katibeh, H. and Sharifzadeh, M., 2012- Application of fuzzy Delphi AHP method for the estimation and classification of Ghomrud tunnel from groundwater flow hazard, Arabian Journal of Geosciences, Volume 5, Issue 2, pp. 275-284.

Alavi, N. M., 1994-Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran : New data and interpretation. Tectonophysics, Vol. 229 (3): 211-238.

Barton, N., 2000- TBM Tunnelling in jointed and faulted rock, Balkema, the Netherlands, pp. 3–104, 147–149.

- Celik, M. and Onsal, N., 1999- Grounwater Circulation In the allochthonous Limestone Unite Between Lake Gridev and Kaxanplnarl Spring, Antallya, South¬western Turkey, Springer Hydrogeology journal. V.7. n.5. p. 483-489.
- Cooper, A. H., Farrant, A. R. and Price, S. J., 2011- The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain, Geomorphology, Vol. 134 (1–2): 118–131.

Cvijić, J., 1893- Das Karstphänomen. Geographische Abhandlungen herausgegeben von A. Penck 5, 218–329.

- De Waele, J., Plan, L. and Audra, P., 2009- Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction, Geomorphology, Volume 106 (1-2), Pages 1–8.
- Edgell, H., 1993- Karst and Water Resources in the Hyper arid Area of Northeastern Saudi Arabia, International Symposium on Water Resources in Karsts with Special Emphasis on Arid and Semi Arid zone. Iran. p. 320.

El Tani, M., 2003- Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunn Undergr Space Technol 18:49-55.

Ford, D. C. and Williams, P. W., 2007- Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, United Kingdom. 562 pp. Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979- Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, TIC: 217571.

Goodman, R., Moye D, Schalkwyk, A. and Javendel. I., 1965- Groundwater inflow during tunnel driving. Eng Geol 1:150–162.

- Heuer, R. E., 1995- Estimating rock-tunnel water inflow. Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, June, pp 18-21.
- Hezarkhani, A., 2006- Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu–Mo deposit, Iran: evidence from fluid inclusions. Journal of Asian Earth Sciences, 28 (4), 409-422.
- Janjic, M., 1962- Prilog poznavanju podzemnih fenomena u karstu (Contribution to knowledge of underground phenomena in karst). Vesnik Geozavoda Beograd Yugoslavia.
- Katibeh, H. and Aalianvari, A., 2009- Development of a New Method for Tunnel Site Rating from Groundwater Hazard Point of View, Journal of Applied Sciences, Vol 9 pp. 1496-1502.
- Khorsandi, A. and Miyata, T., 2007-Fault determination due to sinkhole array on Lar valley, northeast of tehran (Iran), ACTA CARSOLOGICA Journal, Volume 36, Issus 2, pp.,203-208.
- Kusumayudha, B., Ten, M., Notosiswoyo, S. and Sayoga, R., 2000- Fractal Analysis of River, Cave Systems, and Topography of the Gunungsewu Karsts Area, Cen¬tral Java, Indonesian, Springer Hydrogeology journal. v.8. n.3, p. 271-278.
- Lei, S., 1999- An analytical solution for steady flow into a tunnel. Ground Water 37:23–26.
- Maurice, L., Atkinson, T. C., Williams, A. T., Barker, J. A. and Farrant, A. R., 2010- Catchment scale tracer testing from karstic features in a porous limestone, Journal of Hydrology, Vol. 389 (1-2): 31-41.
- Mikulec, S. and Trumic, A., 1976- Engineering works in karst regions of Yugoslavia. Proceeding book Karst Hydrology and Water Resources, W.R.P., Colorado, USA.
- Movahednejad, A. E., 2008- Deep tunnelling in fault zone case study in Kuhrang 3 water conveyance tunnel, World Tunnel Congress, Underground Facilities for Better Environment and Safety, India.
- Raymer, J. H., 2003- Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: estimating the high-end of the permeability distribution. RETC, pp 201–217.
- SCE (Sahel Consultant Engineers), 2005- Engineering report: Engineering Geological Review and Summary Report on Adverse Geology Situations in Tunnel Driven Path, (Parts III and IV of Ghomroud Water Conveyance Tunnel), SHL 2019 UNGR MTUN RM RP 003 DO.
- Sharifzadeh, M. and Hemmati Shaabani, A., 2006- TBM tunneling in adverse rock mass with emphasis on TBM jamming accident in Ghomroud water transfer tunnel, Van Cotthem, Charlier, Thimus and Tshibangu (eds), May 9-12, Liege, Belgium, pp. 643-647.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran : a review. American Association Petroleum Geologists, Bulletin., Vol. 52 (7), 1229 1258.
- Stocklin, J., 1977- Structural correlation of the Alpine range between Iran central Asia. Memoire Hors-Serve No.8 dela Societe Geologique de France, 8: 333-353.
- Tseng, D., Tsai, B. and Chang, L., 2001- A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingression in Taiwan, International Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 16, 175-183.
- Veni, G., 1999- A Geomorphological Strategy for Conducting Environmental Impact Assessments in Karst Areas, Geomorphology, Vol. 31 (1): 151-180.
- Wenner, D. and Wannenmacher, H., 2009- Alborz service tunnel in Iran: TBM tunneling in difficult ground conditions and its solution, proceeding of 8th Iranian Tunneling Conference, pp. 342-353.
- White, W. B., 1988- Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains, Oxford University Press, New York. 464 pp.
- Zarei, H. R., Uromiyehi A. and Sharifzadeh, M., 2010- Identifying geological hazards related to tunneling in carbonate karstic rock- Zagros, Iran, Arabian Journal of Geosciences, In press, Online available:Pp.1-8, DOI 10.1007/s12517-010-0218-y.

Study of the surface dissolution forms and development of groundwater in the part 4 of Ghomroud tunnel site

V. Joudaki^{1*}, F. Koohiyan-Afzal², A. Aalianvari³, R. Ajalloeian⁴ and A. Sohrabi-Bidar⁵

¹M.Sc., Department of Underground Structures, Sahel Omid Iranian Consultant Engineers Co., Tehran, Iran

²Ph.D., Water Research Institute, Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Mining engineering, Kashan University, Kashan, Iran

⁴Professor, Department of Engineering Geology, Isfahan University, Isfahan, Iran

⁵Assistant Professor, Department of Engineering Geology, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 2015 May 04 Accepted: 2016 July 03

Abstract

Part 4 of Ghomroud tunnel is located in the Sanandaj-Sirjan geological zone. In this area, due to the existence of numerous faults, crushed zones and significant development of major and minor catchments, the tunnel has been encountered with the risk of groundwater influx. On the other hand, due to some limitations such as thick(up to 600 meters in some localities)overburden over the tunnel and the lack of exploratory drilling down to the tunnel level, it has been difficult to forecast and estimate the groundwater flow in the tunnel route. Due to the existence of numerous faults in part 4 of the Ghomroud tunnel ,encountering of the drilling machine (Double Shield TBM) with high-pressure water could cause influx of large amounts of water into the tunnel and collapse of rock masses in the crushed zones. It hence could cause deviation of the machine and drilling stop. In this article, the lack of data from boreholes led us to try investigating the development of groundwater flow in the tunnel based on geomorphological evidence. Analytical modeling and geomorphological field survey in the area show a relative consistency between geomorphology and volume of water flowing in the tunnel excavation. Therefore, according to measurements conducted on the water entering the tunnel, about 80 liters per second of water flowed into the tunnel, which is in agreement with geomorphological studies. Results show that the study of morphology and surface features could provide useful information in order to identify more precisely the hydrogeologic conditions of the area.

Keywords: Ghomroud Tunnel, TBM, Geomorphology, Groundwater flow, Analytical modeling. For Persian Version see pages 29 to 40 *Corresponding author: V. Joudaki; E-mail: Joudaki_vahid@yahoo.com



Jojock