



بررسی مشکلات زمین شناسی در زون گسله پورکان-وردیچ و نموه برهم کنش آن با ماشین TBM (مطالعه موردی تونل انتقال آب کرج-تهران)

ممسن غلامی*^۱، ممدرضا جاری^۲، رسول اجل لوئیان^۳

^۱ کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، موسسه حراء gholami.msn@gmail.com

^۲ کارشناس ارشد مدیریت ساخت و اجرا، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، موسسه حراء

^۳ دانشیار زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان

(*عاهده دار مکاتبات)

دریافت: ۹۴/۳/۲۶؛ دریافت اصلاح شده: ۹۴/۶/۱۰؛ پذیرش: ۹۴/۶/۲۹؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۴/۹/۱۵

چکیده

به دلیل اهمیت حفاری تونل در زمین های گسله توسط دستگاه های TBM و وقوع پدیده هایی از قبیل ریزش، فشارندگی و نیز جریان شدید آب به داخل تونل، کنترل حفاری در این مناطق و نیز بررسی ابعاد ناحیه مستعد خطر ضرورت دارد. چنانچه حادثه ای از قبیل گیر کردن دستگاه به هر دلیل باعث توقف در فرایند حفاری تونل گردد، این توقف موجب صرف هزینه های گزاف و نیز از دست دادن زمان برای پروژه خواهد شد. در مسیری از تونل قطعه دوم انتقال آب کرج-تهران، بررسی های میدانی و صحرایی شواهدی را مبنی بر وجود یک گسل رورانده با پهنای خردشدگی زیاد به نام گسل پورکان-وردیچ به ثبت رسانیده است. این گسل از لحاظ پارامترهای ژئومکانیکی و نحوه برهم کنش آن با ماشین سپری TBM فعال در تونل، تردیدهای زیادی از لحاظ وجود خطرات فشارندگی، ریزش و هجوم آب به داخل تونل را ایجاد کرده بود. در این مقاله به وضعیت ساختاری گسل مذکور و محدوده های شکستگی و خردشده در محل تلاقی آن با تونل اشاره شده و در ادامه با بیان برخی از مشکلات تونل سازی در این محدوده، به نحوه عبور از این زون گسله با استناد به پارامترهای حفاری دستگاه TBM از قبیل نیروی پیشران، تعداد دور کاترهد، گشتاور و نرخ نفوذ پرداخته می شود.

واژه های کلیدی: زون شکستگی، زون خرد شده، فشارندگی، تعداد دور کاترهد (RPM)، نیروی پیشران، گشتاور، نرخ نفوذ

۱- مقدمه

مورد نظر طولی در حدود ۱۳/۵ کیلومتر دارد و روش اجرای آن حفاری و سگمنت گذاری کل مسیر با استفاده از یک دستگاه TBM سنگ سخت (Hard Rock TBM) است. با توجه به داده های زمین شناسی، مهم ترین گسل مسیر قطعه دوم تونل انتقال آب کرج-

قطعه دوم تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران، از حوالی روستای کندور در ابتدای جاده چالوس در شمال کرج تا اطراف بند تنظیمی سد کرج واقع در خوزنکلا ادامه دارد. تونل

قبل از گسل پورکان، به دلیل گسل راندگی F4 (شاخه‌ای از گسل پورکان) با شیب کم می‌باشد (تصویر ۱). باید متذکر شد که زون‌های شکستگی (FZ) شدیداً دارای پتانسیل ریزش می‌باشند. اضافه بر اینکه احتمال وقوع ناپایداری‌های ساختاری هم در این زون‌ها وجود دارد. به لحاظ شرایط آب زیرزمینی نیز به دلیل نفوذپذیری بالا چنین زون‌هایی دارای پتانسیل ورود آب به درون تونل می‌باشند. از سوی دیگر، در زون‌های خرد شده (CZ) به علت بهم‌ریختگی ساختاری واحدها، وجود درزه‌های فراوان و غیرسیستماتیک با فاصله‌داری کم و گاهی لایه‌بندی نازک واحدهای سنگی، پتانسیل گسیختگی‌های ساختاری در توده سنگ محتمل نیست و بلوک‌های تشکیل شده بسیار کوچک هستند. ریزش‌های غیرساختاری و فشارندگی و روانه‌های گلی در این بخش‌ها از پتانسیل وقوع بیشتری برخوردار هستند (Wittke et al. 2006 & Kovari 1996).

۲- مشکلات زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه

پیش از این به شرح مشخصات ساختاری زون‌های خرد شده (CZ) و شکستگی (FZ) پرداخته شد. در این بخش از مقاله نیز به برخی از مهمترین مخاطرات زمین‌شناسی در پهنه گسله پورکان-وردیج اشاره می‌شود.

لازم است در اینجا یادآور شد که مخاطرات مورد بررسی قرار گرفته در این مقاله براساس روش حفاری و پوشش نهایی تونل در پروژه تونل انتقال آب کرج-تهران است به طوریکه ماشین حفار از ماشین‌های سپری با سپردوگانه (Double shield TBM) و پوشش نهایی نیز از قطعات پیش ساخته بتنی (Segmental Ring) هستند (Maidl et al. 2008).

به منظور درک بهتر شرایط زمین‌شناسی و نوع مخاطرات پیش رو در قسمت‌های مختلف گسل پورکان و نیز برای تبیین پارامترهای حفاری دستگاه TBM و مقایسه آن با پارامترهای به دست آمده در قبل و بعد از گسل، محدوده مورد مطالعه به ۳ بخش تقسیم شده است:

۲-۱- زون شکستگی قبل از گسل- از متر ۶۱۳۰m تا

۶۴۸۶m

در این ناحیه، توده سنگ عمدتاً خرد شده و در مواردی درزه‌ها و

تهران، گسل پورکان-وردیج با شیب و جهت شیب ۰۵/۶۰ است. این گسل پهنه‌ای بیش از ۲۰ متر و به شدت خرد شده و حاوی برش و گورژ گسله است (مشاور ساحل ۱۳۸۸).

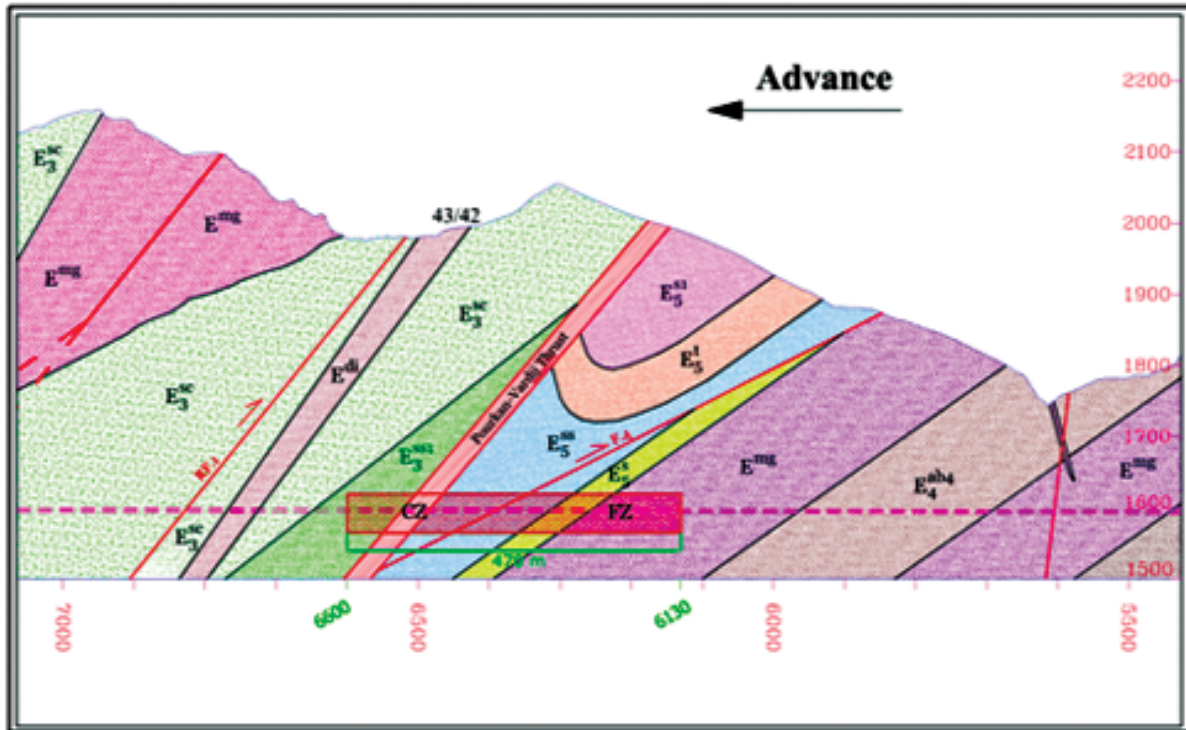
محدوده تعریف شده در این بخش به منظور ارزیابی برهم‌کنش دستگاه TBM و زمین، بازه‌ای برابر با ۴۷۰m خواهد بود. به طور کلی واحدهای رخنمون یافته در این بخش از تونل شامل واحدهای Emg (توده‌های نفوذی مافیک و عمدتاً بازالتی)، ES₅ (کریستال لیتیک توف خاکستری)، ESS₅ (خاکستر توف‌های آهکی خاکستری تیره با بین لایه‌های لیتیک کریستال توف)، ESS₁₃ (توف خاکستری) و ESC₃ (لیتیک کریستال توف خاکستری روشن با بین لایه‌های خاکستر توف) بوده که مربوط به بخش‌های شیل کندوان و شیل آسارا در سازند کرج هستند. تنها نکته حائز اهمیت در مورد این واحدها، تأثیر تکتونیک فشارشی منطقه و خردشدگی و شکستگی‌های وسیع در توده سنگ بوده که در مواردی علی‌رغم مقاومت بالای سنگ بکر، گسلش باعث تغییرات چشمگیر در پارامترهای مهندسی توده سنگ شده است (مشاور ساحل ۱۳۸۸).

زون گسله پورکان-وردیج، زون‌های خرد شده و شکسته شده‌ای را در اطراف خود ایجاد نموده است. محل تقریبی زون‌های شکستگی و زون‌های خرد شده گسلی بر روی مقطع زمین‌شناسی مهندسی به ترتیب با علامت FZ و CZ مشخص گردیده است. تفاوت زون‌های شکستگی با زون‌های خرد شده گسلی در این است که در زون‌های خرد شده به دلیل بهم‌ریختگی شدید لایه‌ها، عمدتاً ناپیوستگی‌ها دارای حالت سیستماتیک نمی‌باشند و در جهات مختلف توده سنگ را متأثر نموده‌اند، در حالی که در زون‌های شکسته شده با وجود فراوانی شکستگی‌ها نسبت به اطراف، این ناپیوستگی‌ها حالت سیستماتیک دارند و می‌توان سیستم‌های مختلف ناپیوستگی را شناسایی نمود. ویژگی‌های این زون‌ها با توجه به توده سنگ در برگیرنده و ناپیوستگی‌های موجود تعیین می‌گردد (Wittke et al. 2006).

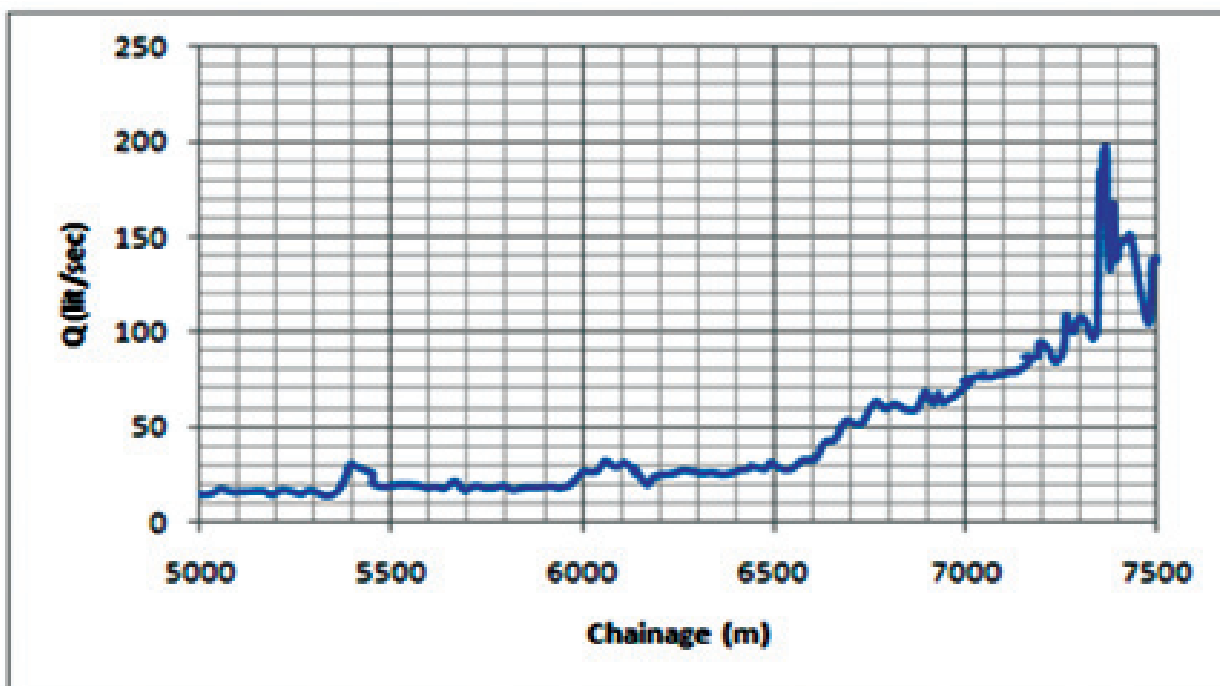
با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و نیز برداشت‌های صحرائی همزمان با حفاری تونل، تا حدودی از شرایط سطحی و عمقی تونل در محل گسل اطلاعات کامل‌تری به دست آمده است. با توجه به برداشت‌های زمین‌شناسی در حین حفاری تونل و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه، از متر ۶۱۳۰+ تا ۶۶۰۰+ را توده سنگی بسیار شکسته شده و خرد شده دربر گرفته است. بزرگتر بودن زون شکستگی در

بعد از آن در این زون اثراتی از حجم بالای آب وجود نداشت. در تصویر ۲ منحنی تجمعی تغییرات آب ورودی به تونل تا بازه‌ای از مسیر تونل آمده است که با توجه به این نمودار روند تقریباً ثابت دبی آب ورودی در زون گسله پورکان (از متر ۶۱۳۰ تا ۶۶۰۰) قابل مشاهده است. مهمترین مسائل قابل بحث در زون شکستگی قبل از گسل، یکی

شکاف‌های فراوان در سینه کار وجود دارد که به واسطه عملکرد گسل F.4 این منطقه از وسعت بیشتری برخوردار است. مصالح حفاری شده در این بازه شامل سنگ‌های مربوط به واحدهای E_5^{mg} ، E_5^{SS} و E_5^{S} هستند که پیش از این بدان اشاره شد (تصویر ۱). با توجه به بازدهی‌های مکرر از کاترهد و مقادیر ثبت شده برای آب خروجی از تونل، تنها تا متر ۶۱۱۰ قبل از زون گسله، سینه کار آبدار و



تصویر ۱- وضعیت زمین شناسی مسیر تونل و موقعیت زون‌های CZ و FZ در محدوده گسل پورکان



تصویر ۲- تغییرات آب ورودی تونل در زون گسله پورکان بر حسب متر حفاری شده (تجمعی، در دهانه تونل)

۲-۱-۱-۲- ترک‌های کششی سگمنت‌ها

یکی از مسائل پیش‌رو در محدوده شکستگی FZ در قبل از گسل اصلی پورکان، حضور ترک‌هایی بر روی قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) نصب شده در این زون و جابجایی‌های احتمالی توده سنگ دیواره تونل بوده است. با نزدیک شدن به محدوده گسل پورکان بر میزان به هم ریختگی توده سنگ افزوده شده و شرایط برای وقوع پدیده فشارندگی توده سنگ افزایش می‌یابد. در تصویر ۴ بخشی از سقف تونل در این زون همراه با ترک‌های ایجاد شده در سگمنت‌ها را می‌توان مشاهده نمود. از آنجا که ترک‌های مذکور از نوع ترک‌های کششی هستند، لذا نیروی خمشی، عامل اصلی پدیدآورنده این ترک‌ها هستند. خمش وارده بر سگمنت‌ها در ابتدا باعث ایجاد رینگ تخم‌مرغی شکل شده و در صورت القای بارهای مضاعف بر این رینگ ترک‌های کششی ایجاد می‌شوند. شاید مهمترین دلایل تخم‌مرغی شدن رینگ‌ها را بتوان به نحوه نصب سگمنت، بار زمین و نیز بارهای حاصل از وزن سیستم یک‌آپ ارتباط داد که برای هر یک از این موارد نیاز به بررسی دقیق عوامل تأثیرگذار و آگاهی از میزان پرشدگی پشت سگمنت است (Wittke et al. 2006). تصویر ۵ به طور شماتیک تخم‌مرغی شدن رینگ و بخش‌های مستعد ترک‌های کششی را نشان می‌دهد. در این مقطع از تونل می‌توان به پتانسیل بالای توده سنگ دیواره تونل برای جابجایی‌های آبی اشاره کرد که وجود خش‌های لغزش موجود بر روی دیواره تونل در این مناطق به این امر قوت می‌بخشد. تصویر ۶ نمایی از توده سنگ سینه کار تونل را به همراه اثرات لغزش نشان می‌دهد.



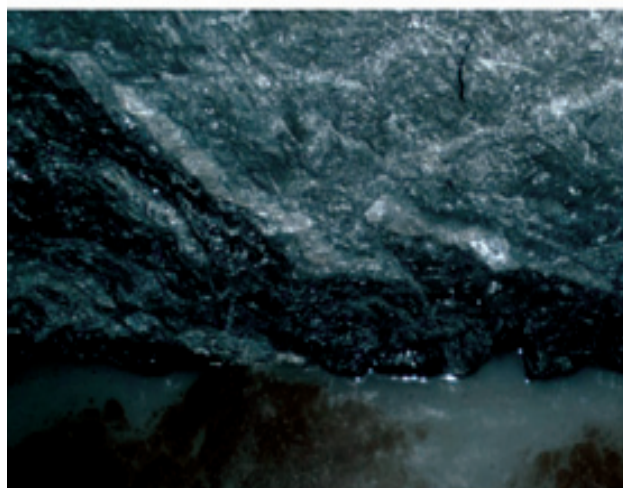
تصویر ۴- ترک‌های ایجاد شده در سگمنت‌های سقف تونل

برخورد به لایه‌های سنگی حاوی گاز متان و دیگری ایجاد ترک‌هایی بر روی سگمنت‌های نصب شده در تونل بوده که در ادامه به شرح دلایل ایجاد این پدیده‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱-۲- گاز متان

خطر اصلی ناشی از حضور گاز در سنگ‌های تشکیل‌دهنده سازند کرج، خطر وجود گاز متان موجود در سازند شمشک و یا سازندهای نزدیک به آن و در مواردی حضور برخی آثار گیاهی می‌باشد. در طی مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته در محدوده تونل، اثراتی از حضور سازند شمشک و یا معادل آن که حاوی مواد آلی باشند مشاهده نشده است ولی احتمال به تله افتادن مقادیر اندک گاز در برخی از سازندها با نفوذپذیری اندک مانند واحدهایی از جنس توف خاکستری و حتی لایه‌های شیلی وجود دارد که این واحدها به صورت سدی در برابر گازهای مهاجر از دیگر سازندها عمل کرده و موجب شوند که خود این واحدها یا واحدهای زیرین آنها حاوی کمی گاز باشند (مشاور ساحل ۱۳۸۸).

در مترژ ۶۳۷۰+ تا ۶۴۳۵+ و به طول ۶۵ متر، مقادیری از گاز متان با LEL% (Lower Explosion Limit) متغیر توسط سنسورهای تعبیه شده در دستگاه ثبت شده‌اند. نفوذپذیری بالای توده سنگ در این منطقه برای انتقال هرگونه سیال یا گاز محبوس در لایه‌های نفوذناپذیر، یک عامل بسیار تأثیرگذار در آزاد شدن گاز متان در فضاهای زیرزمینی بوده که این امر در محدوده مذکور کاملاً صدق می‌کند. در تصویر ۳ نمایی از سینه کار و مواد آلی موجود در آب نشتی توده سنگ را می‌توان مشاهده کرد.



تصویر ۳- مواد آلی موجود در آب نشتی از توده سنگ

در مسیر تونل قطعه دوم برای آن ثبت شده است.

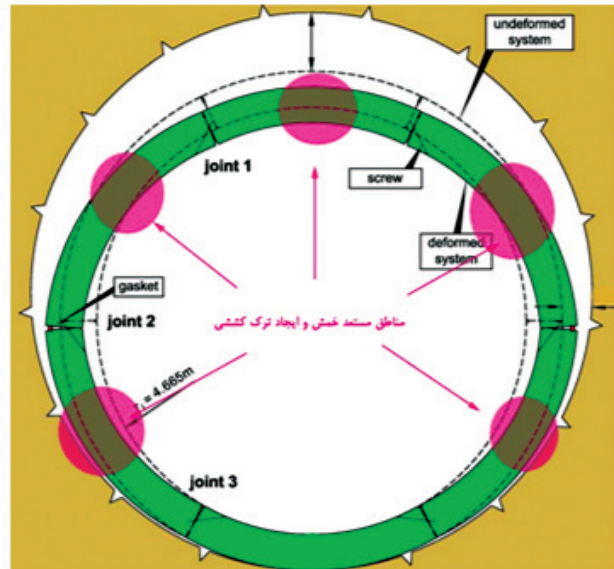
از مهمترین مشکلات موجود در این منطقه باید به جابجایی های دیواره تونل (احتمالاً در اثر فشارندگی زمین) و نیز تجمع مصالح در اطراف سپر (Shield) و ورود حجم بالایی از این مصالح به داخل سپر اشاره کرد.

۲-۱-۲- جابجایی دیواره تونل (در اثر فشارندگی)

پدیده فشارندگی (Squeezing) به صورت همگرایی بزرگ وابسته به زمان در طی حفاری تونل خود را نشان می دهد. فشارندگی هنگامی اتفاق می افتد که با ترکیب ویژه ای از تنش های القایی و خواص مصالح، به زون اطراف تونل فشاری بیش از مقاومت برشی زمین وارد شود. این تغییر شکل ها ممکن است در طی حفاری تونل و یا در طی دوره زمانی طولانی ادامه یابد. بزرگی همگرایی تونل، نرخ جابجایی و وسعت زون تسلیم به شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی، وضعیت تنش های برجای سنگ، جریان آب های زیرزمینی، فشار آب منفذی و همچنین خواص توده سنگ بستگی دارد (Toan 2006). در صورتی که شرایط بارگذاری برای شروع فشارندگی فراهم باشد این پدیده بیشتر در سنگ های گنایس، میکاشیست، کالکوشیست (به طور ایده آل زون های تکتونیکی، تماسی و گسل ها)، رس سنگ ها، شیل های رسی، رس های ماری و حتی در برخی از توف ها اتفاق می افتد (Kovari et al. 1996).

طبق تعاریف ارائه شده برای پدیده فشارندگی در تونل، محدوده ای به ضخامت ۳۸ متر و در متراژ ۶۴۸۶+ تا ۶۵۲۴+ در محل گسل پورکان دارای پتانسیل فشارندگی بوده است. در این متراژ مهمترین دلیل قانع کننده برای اثبات فشارندگی زمین، گیر نمودن مقطعی دستگاه در زمان هایی از حفاری تونل و اعمال نیروهای پیشروی کاذب جهت حفاری بوده است. لازم به ذکر است که در این محدوده تمام شرایط زمین شناسی برای ایجاد پدیده فشارندگی از قبیل خردشدگی شدید توده سنگ و جهت گیری درزه ها به موازات جهت پیشروی دستگاه (طبق نظر Qiu-Ming et al. 2005) و از همه مهمتر قرارگیری در یک زون گسله وجود داشته است.

با بررسی مستقیم سینه کار مشخص شد که در زمان توقف ۲ ساعته ای بعد از تعویض شیفت ۳ با شیفت ۱، جابجایی زمین در دیواره های تونل رخ داده است. این پدیده در قسمت سقف با جدا شدن ورقه ای



تصویر ۵- محدوده های مستعد ایجاد ترک کششی در یک رینگ تخم مرغی



تصویر ۶- اثر خطوط لغزش در توده سنگ سینه کار و دیواره تونل

با توجه به شواهدی که در بالا بدان اشاره شد، دلیل ایجاد ترک های موجود در سگمنت ها را تنها باید در عوامل زمین شناسی جستجو کرد که مشهودترین آن جابجایی های آبی بلوک های سنگی بزرگ در سقف تونل تشخیص داده می شود.

۲-۲- زون فرد شده CZ در محل گسل - از متراژ ۶۴۸۶م تا ۶۵۲۴م

با عبور از زون شکستگی FZ و گسل F.4، وارد منطقه ای از زون گسله پورکان-وردیج شده که در آن پرشدگی درزه ها با کلسیت، پتانسیل بالای توده سنگ برای تورق و خردشدگی در سینه کار مشخص شده است. این زون خرد شده یا CZ محدوده ای را شامل می گردد که محل گسل پورکان-وردیج بوده و پهنایی برابر با ۳۸ متر

۴- مقایسه پارامترهای حفاری ماشین TBM در زون گسله پورکان

در مناطق گسله بسته به نوع پدیده زمین‌شناسی پیش رو باید در اعمال پارامترهای حفاری دقت کرد به عنوان مثال در شرایط زمین‌های ریزشی که امکان گیر افتادن کاترهد وجود دارد، تعداد دور کاترهد (RPM) و نیروی پیشران یا تراست (Thrust Force) تأثیر بسزایی بر گسترش ناحیه ریزشی خواهد داشت. برای درک بهتری از نحوه برهم‌کنش ماشین و زمین در زون‌های گسله، استفاده از نمودارهای ثبت شده برای پارامترهای ماشین و مقایسه آنها با همدیگر مفید خواهد بود (JSCE 2007). لذا در این قسمت با کمک نمودارهای مربوطه و تحلیل آنها سعی شده است تا علاوه بر نحوه حفاری در زمان عبور از گسل، به تغییرات ایجاد شده در پارامترهای ماشین TBM نیز پرداخته شود.

با استناد به یافته‌های زمین‌شناسی و داده‌های ثبت شده از سینه کار و دیواره‌های تونل همراه با نحوه عکس‌العمل ماشین TBM در زون گسله پورکان-وردیج، بایستی علاوه بر بلوکی شدن توده سنگ در سینه کار، پدیده مهم یعنی فشارندگی و جابجایی زمین را همراه با گیر کردن سپر، پدیده اصلی پیش رو در این زون گسله دانست و پارامترهای حفاری طبق آن اعمال شده باشد. بدین ترتیب با توجه به ماهیت پدیده مذکور و مشخصات هر بخش از منطقه مورد مطالعه، اقدامات صورت گرفته متناسب با هر پدیده در ادامه شرح داده می‌شود.

۴-۱- کنترل اضافه حفاری در اطراف سپر

لزوم استفاده از دیسک کاترهایی با تیغه‌های نو و کمتر خورده شده در ایجاد اضافه حفاری بیشتر و کاهش خطر گیر کردن سپر ماشین نقش بسزایی دارد که این موضوع با اندازه‌گیری روزانه میزان خوردگی تیغه‌های مربوط به دیسک کاتره‌های محیطی یا گیج (Gauge) (Cutterdisc) در زون گسله برای کنترل اضافه حفاری امری ضروریست.

۴-۲- سرعت پیشروی ماشین متناسب با مقاطع مختلف زون گسله

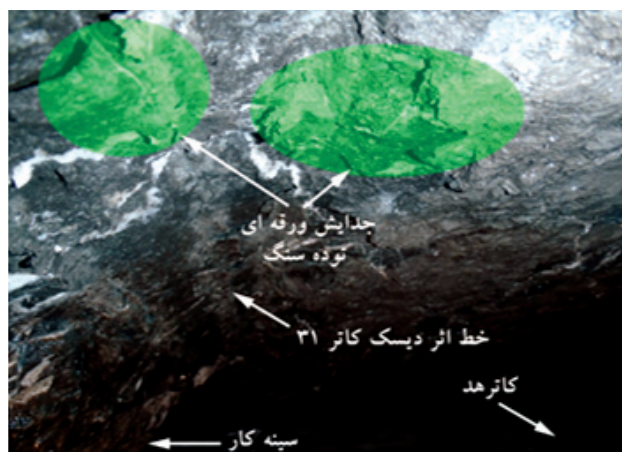
نرخ نفوذ (Penetration Rate) به ثبت رسیده برای مترآزهای مختلف مسیر تونل در زون گسله پورکان مؤید تغییر سرعت پیشروی

سنگ از دیواره و آزاد شدن تدریجی تنش‌ها به وضوح دیده شده و حتی در پاره‌ای اوقات صدای مهیب ناشی از شکست سنگ و آزاد شدن تنش نیز به وضوح قابل شنیدن بوده است. برای تشخیص راحت‌تر این پدیده، قبل از عقب کشیدن کله حفار (کاترهد) اقدام به چرخش آن کرده تا مقایسه بین قسمت برش خورده جدیدتر (توسط دیسک ۳۱) و بخش حفاری شده قدیمی‌تر به خوبی امکان پذیر باشد. تصویر ۷ بخشی از سقف تونل در جلوی کاترهد را نمایش می‌دهد که این پدیده به راحتی قابل مشاهده بود.

در اینجا باید متذکر شد نیروهای حاصل از فشارندگی در این بازه تنها بلافاصله بعد از باربرداری رخ داده و نرخ جابجایی آن در زمان کوتاهی به حداقل مقدار خود رسیده و لذا با توجه به نصب سگمنت‌هایی با مقاومت بالا هیچگونه خطری این محدوده را دستخوش شکستگی یا ترک قرار نداده است.

۲-۳- زون شکستگی FZ بعد از گسل - (از متر ۶۵۲۴m به بعد)

با عبور از محدوده خرد شده گسل پورکان، به تدریج شرایط حفاری به حالت طبیعی برگشته و اثرات گسل تنها به صورت وجود قطعات درشت در میان مصالح حاصل از حفاری و نیز درز و شکافهایی تا حدود ۸۰ متر بعد از گسل خود را نشان داده است. ادامه حفاری تونل نیز در واحد $ESS1_3$ یا لایه‌های توف خاکستری تیره انجام گرفته به گونه‌ای که برخلاف محدوده خرد شده گسل، امکان برداشت نمونه دستی میسر شده است. موقعیت این زون در تصویرهای قبلی ارائه شده است. به دلیل گذر از محل گسل و تغییر روند حفاری به حالت عادی، پدیده خاصی برای این محدوده قابل ذکر نیست.



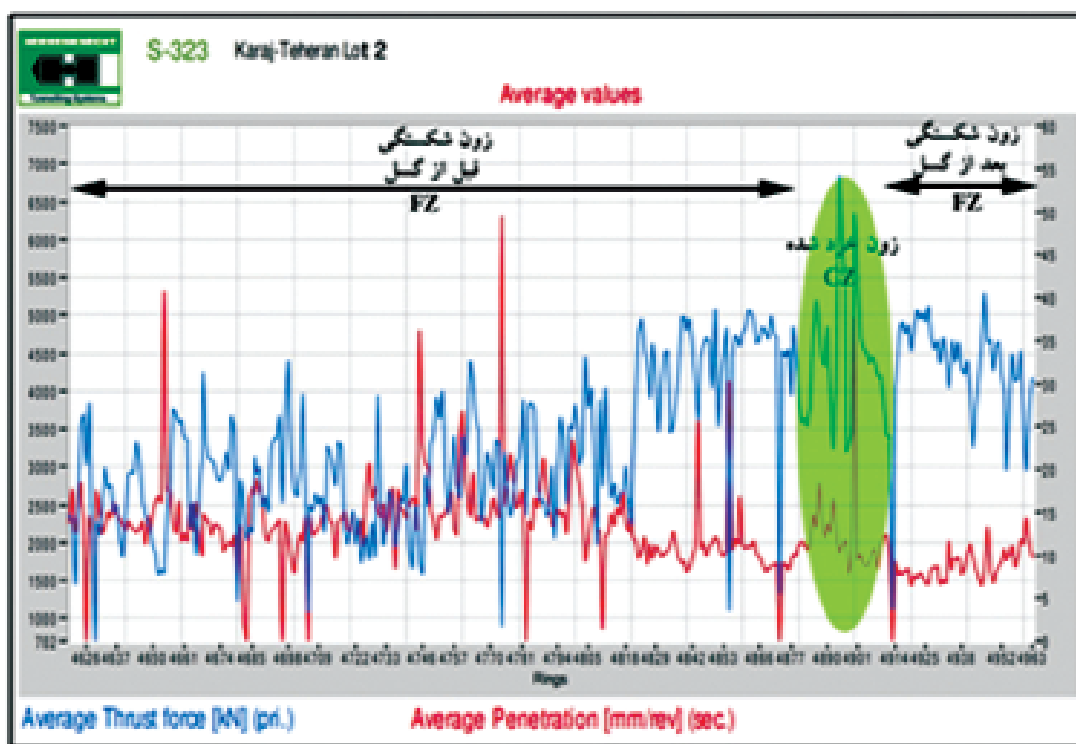
تصویر ۷- سقف تونل در جلوی کاترهد و در محل گسل پورکان

جهت پیشروی نیاز بوده و لذا این نیرو در محل گسل مقادیر متوسطی بین ۳۰۰۰-۶۵۰۰ kN را داشته و حتی در حالت حفاری تک سپره این نیرو به ۸۵۰۰ kN نیز رسیده است. با مقایسه زمان حفاری هر کورس در مترهای مختلف از پهنه مورد مطالعه، می توان به نتایج قابل قبولی رسید که شرح آن در جدول ۱ آمده است.

۱۴-۳- انباشتگی مصالح در اطراف سپر ماشین

تصویر ۹ نمونه ای از نمودارهای مربوط به تغییرات نیروی تراست را در متر ۶۵۱۹ متری تونل نمایش می دهد. چنانکه در این شکل نیز مشاهده می شود، نیروی تراست در دو حالت حفاری تک سپره

ماشین مطابق با شرایط زمین شناسی پیش رو بوده است. به گونه ای که در تصویر ۸ مشاهده می شود، قبل از زون خرد شده CZ، نیروی پیشران در بازه ۲۰۰۰-۵۰۰۰ kN نوسان داشته و با نرخ نفوذ تقریباً بالا و بین ۱۰-۲۰ mm/rev همراه بوده است. تغییرات شدید نیروی پیشران به دلیل زون شکستگی FZ و ناپایداری بلوک های سنگی در سینه کار تشخیص داده می شود که نیازمند اعمال نیروی پایین و کنترل ورود مصالح به داخل کاترهد و بر روی نوار نقاله خواهد بود تا از اعمال گشتاور (Torque) بالا و آسیب به نوار نقاله جلوگیری شود. با نزدیک شدن به زون خرد شده CZ و وجود مکانیسم فشارشی در آن و نیز پایداری توده سنگ در سینه کار تونل، نیروی پیشران بیشتری



تصویر ۸- تغییرات میانگین نیروی پیشران و نرخ نفوذ در پهنه گسله پورکان-وردیج

جدول ۱- بازه های زمانی هر کورس حفاری در زون گسله پورکان-وردیج

توضیحات	زمان میانگین حفاری یک کورس (min)		متر از (m)
	حالت سپر دوگانه	حالت سپر تکی	
در توده سنگ بلوکه و خرد شده و با نرخ نفوذ بالا، برای کنترل موقعیت ماشین و جلوگیری از سرعت پیشروی بیش از حد مجاز (کمتر از ۱۰۰ mm/min)، حفاری با حالت سپر تکی صورت گرفته است.	۱۰-۲۰ min	۵-۲۰ min	۶۱۳۰-۶۴۸۶
زمانهای بیشتر به دلیل گیر بودن سپر ماشین است. برای جلوگیری از ورود مصالح به داخل سپر ماشین و نیز کنترل چرخش سپر و نیز برای ممانعت از گیر کردن سپر تلسکوپی، حفاری با سپر تکی انجام گرفته است.	۱۰-۲۵ min	۱۵-۴۰ min	۶۴۸۶-۶۵۲۴
با عبور از منطقه خرد شده و روند عادی حفاری، برای پیشروی سریع تر، حالت سپر دوگانه ارجحیت دارد.	۱۵-۲۰ min	-	۶۵۲۴-۶۶۰۰

فضاهای باز سپر تلسکوپی به داخل ماشین می‌شود. از طرفی، ورود این مصالح به داخل سپر ماشین و تجمع آنها در بخش‌های مختلف ماشین، علاوه بر بالا بردن امکان آسیب‌دیدگی قطعات دستگاه، توقف طولانی مدت حفاری جهت تمیزکاری را در پی داشته و این خود احتمال گیرکردن ماشین در اثر آزاد شدن تنش‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. انباشتگی مصالح در روی سپر به حدی زیاد بوده که با عبور سپر انتهایی ماشین از آخرین رینگ سگمندی نصب شده، این مصالح از روی سپر و سقف تونل بر روی سگمنت‌ها انتقال یافته و جایگزین محل تزریق پی‌گراول در فضای خالی اطراف رینگ شده‌اند. این انباشتگی مصالح را می‌توان به وضوح در تصویر ۱۰ مشاهده کرد.

در عین حال و علی‌رغم کاهش سرعت تونل‌زنی، برای جلوگیری از ورود مصالح به داخل و نیز جلوگیری از تغییر شکل سپر تلسکوپی (عدم توقف تمامی بخش‌های ماشین) حفاری با حالت تک‌سپره بهترین گزینه است.

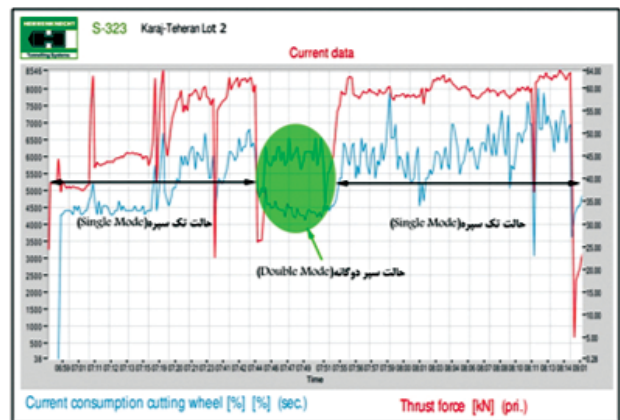
۴-۴- کنترل گشتاور کاترهد

در زمین‌هایی مشابه پهنه گسله پورکان که تنش‌های دیواره تونل بر ماشین تأثیرگذار بوده و در پاره‌ای باعث وقوع فشارندگی می‌گردد، گشتاور کاترهد تحت تأثیر این پدیده نخواهد بود. دلیل این امر ثبات در سینه کار تونل و عدم وقوع ریزش‌های ساختاری شدید است. لازم به ذکر است، در زمین‌های شدیداً فشارنده که باعث ناپایداری سینه کار نیز می‌گردد، این موضوع صدق نمی‌کند (Toan 2006). تصویر ۱۱ تغییرات گشتاور کاترهد را در کنار نیروی پیشران در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، گشتاور حاصل از حفاری ماشین روند منطقی با تغییرات نیروی پیشران نداشته و با مقادیری بین $200-800 \text{ kN.m}$ حاکی از شرایط عادی حفاری و عدم گیر بودن کاترهد در سینه کار می‌باشد و حتی در زون خردشده CZ این مقدار پایین بوده و به کمتر از 700 kN.m نیز رسیده است. مناطقی با گشتاور بیشتر مربوط به زمانی است که ریزش بلوک‌های سنگی و شکسته شده از سینه کار در زون‌های FZ قبل و بعد از گسل باعث ایجاد شوک ناگهانی به کاترهد می‌شود که در این شرایط با کنترل تعداد دور کاترهد (RPM) می‌توان از بالا رفتن گشتاور جلوگیری نمود.

یکی از نمونه‌های عملی برای کنترل گشتاور کاترهد (Cutterhead

(Single Shield) و سپر دوگانه (Double Shield) دارای اختلافی در حدود 400 kN بوده که همان نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک زمین در حالت تک‌سپره را نشان می‌دهد. در حالت معمول و در زمان حفاری با سپر دوگانه میزان نیروی پیشران جهت غلبه بر اصطکاک زمین کمتر از 150 kN و برای تک‌سپره به دلیل سطح تماس بیشتر، این نیرو در حدود 250 kN به ثبت رسیده است. لذا نیروهای تراستی که بیش از این مقادیر متعارف باشند حاکی از گیر بودن سپر خواهد بود. از سوی دیگر در تصویر مذکور، نمودار تغییرات جریان مصرفی الکتروموتورهای کاترهد نیز آمده است. همانگونه که دیده می‌شود به دلیل گیر بودن سپر ماشین، نیروی پیشران در حالت تک‌سپره تا 850 kN افزایش یافته و در عین حال جریان مصرفی توسط الکتروموتورهای کاترهد در حد نرمال خود بوده‌اند و لذا نمی‌توان برخلاف برخی از قسمت‌های واقع در زون FZ (که ریزش بلوک‌های سنگ باعث ایجاد شوک و افزایش جریان و گشتاور می‌شود)، ریزش و گیر بودن کاترهد را در این بخش از زون CZ تأیید کرد.

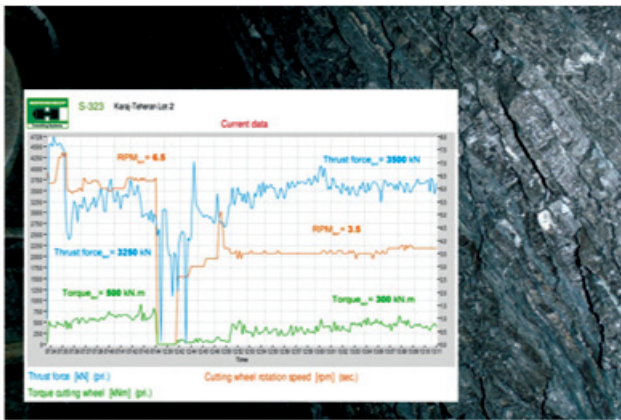
تجمع مصالح در اطراف سپر به نوبه خود باعث هجوم مصالح از



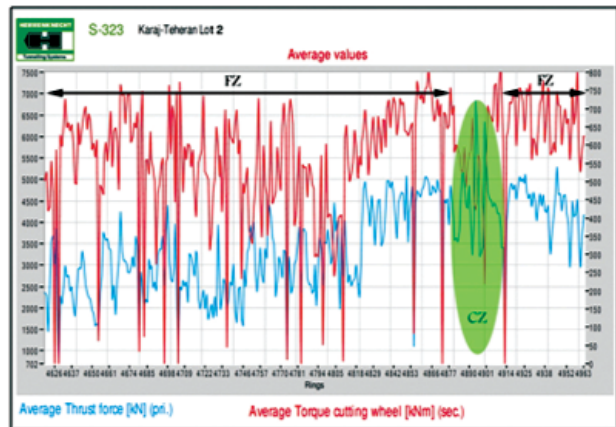
تصویر ۹- میزان تغییرات نیروی تراست و جریان الکتروموتورهای کاترهد در متر از ۶۵۱۹ متر



تصویر ۱۰- تجمع مصالح بر روی آخرین سگمنت نصب شده در سقف

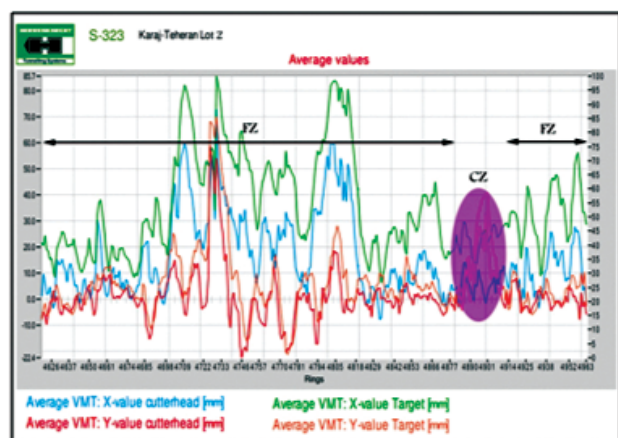


تصویر ۱۰- توده سنگ نازک لایه و سست سینه کار در متر ۶۳۶۵ و پارامترهای ثبت شده برای آن



تصویر ۱۱- تغییرات متوسط گشتاور و نیروی پیشران در زون گسله پورکان-

وردیج



تصویر ۱۳- موقعیت ماشین TBM در زون گسله پورکان-وردیج

(Torque) در زمین های سست، حفاری در متر ۶۳۶۵ متر از مسیر تونل است. توده سنگ در این ناحیه به صورت لایه بندی نازک و با درزه داری و به هم ریختگی شدید بوده و جهت گیری مناسب از لحاظ نرخ نفوذ بالا را برای حفاری توسط ماشین TBM داشته است. تصویر ۱۲ نمودار مربوط به سه پارامتر نیروی پیشران، گشتاور و RPM را با مقادیر متوسط آنها، در کنار توده سنگ نازک لایه سینه کار به تصویر کشیده است. با رسیدن ماشین به این متر ۶۳۶۵ و پیشروی ماشین، به دلیل پایین بودن نیروی پیشران لازم جهت حفاری، به تدریج بر گشتاور ایجاد شده در کاترهد افزوده شده و این روند صعودی تا 900 kN.m نیز ادامه دارد. برای جلوگیری از افزایش بیشتر گشتاور، بعد از توقف در انتهای کورس (یک گام حفاری) و شروع کورس بعدی، تعداد چرخش کاترهد از $RPM=6/5$ به حدود $RPM=3/5$ کاهش یافته و نیروی پیشران نیز با تغییر کم به حدود 3500 kN رسیده است. این تغییر پارامترها از یک سو باعث افت گشتاور تا حدود متوسطی برابر 300 kN.m شده و از سوی دیگر سرعت پیشروی را نیز تا حدودی کاهش داده است که با توجه به کاهش دور کاترهد امری قابل پیش بینی است.

۴-۵- کنترل انحراف ماشین

یکی دیگر از اثرات حفاری ماشین در پهنه گسله مورد مطالعه، انحراف مسیر پیشروی ماشین و تغییر مختصات آن بر اساس مسیر پیش فرض اولیه بوده است. به طور کلی برای حفاری در زمین های سست و ریزشی و به عبارتی زمین هایی که عامل زمین نقش تعیین کننده بیشتری در روند حفاری دارد، کنترل موقعیت ماشین دشوارتر و با

۴-۶- نتیجه گیری

کنترل رفتار ماشین TBM در زمین های مستعد وقوع خطر، از اولویت های تونل زنی به روش مکانیزه است. با توجه به مشخصات زون گسله پورکان-وردیج و نیز برهم کنش ماشین TBM با این زون

می‌توان به یافته‌هایی جهت بکارگیری در پروژه‌های مشابه دست یافت که در متن بدان اشاره گردید. با توجه به طراحی ماشین‌های سپر دوگانه به منظور مواجهه با شرایط دشوار زمین‌شناسی و افزایش سرعت پیشروی در حفاری تونل، بایستی در مناطق پرخطر برحسب شرایط موجود از این قابلیت استفاده کرد. لذا حفاری با سپر تکی برای کنترل مصالح در اطراف سپر ماشین و نیز کنترل انحراف ماشین در برخی قسمت‌های زون گسله مذکور بدین لحاظ بوده است. از سوی دیگر اعمال پارامترهای حفاری دستگاه باید بر اساس قابلیت‌های ماشین و نیز نحوه عکس‌العمل زمین در قبال این پارامترها تنظیم گردد. بنابراین با اطلاع قبلی از نوع مخاطرات زمین‌شناسی و انجام مطالعات تکمیلی در حین عملیات تونل‌زنی می‌توان شرایط را برای مهار و یا کنترل خطر آماده و در کمترین زمان اقدام مناسب و بهینه را اجرایی کرد. در انتها باید به این مهم اشاره کرد که تجزیه و تحلیل پارامترهای ماشین‌های حفاری TBM و کنترل روند حفاری نیازمند بکارگیری تجربه و تخصص یک مهندس زمین‌شناس و ژئوتکنیک می‌باشد.

مراجع

مؤسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۸. گزارش زمین‌شناسی مسیر تونل قطعه دوم انتقال آب کرج-تهران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰. ۱۰۴ ص.

JSCE., 2007. Standard Specifications for Tunneling - 2006:Shield Tunnels. *Japan Society of Civil Engineers*, 271 pp.

Kovari, K., Staus, J., 1996. Basic consideration on Tunneling in Squeezing ground. *Journal of Rock mechanics and Rock Engineering* 29(4), p 203-210.

Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M., 2008. Hard Rock Tunnel Boring Machines. *Ernst & Sohn, Berlin*, 343 pp.

Qiu-Ming, G., Zhao, J., Yu-Yong Jiao, Y., 2005. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20, p 183-191.

Toan, N. D., 2006. TBM and Lining - Essential Interfaces. Master thesis in Tunneling and Tunnel Boring Machines, Politecnico di Torino, Italy, 174 pp.

Wittke, W., Druffel, R., Erichsen, C., Gattermann, J., Kiehl, J., Schmitt, D., Tegelkamp, M., Wittke, M., Wittke-Gattermann, P., Wittke-Schmitt, B., 2006. Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling. *WBI GmbH, Aachen*, 563 pp.