

ارزیابی نتایج آزمایش پیش بینی لرزه ای تونل (TSP) بر اساس شواهد زمین شناسی و تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه EPB Hard Rock

وحید جودکی*^۱، عبدالله سهرابی بیدار^۲، رسول اجل لوثیان^۳، نوید امینی^۴، توماس دیکمن^۵

دریافت مقاله: ۹۷/۰۸/۰۹ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۱۳

چکیده

تونل انتقال آب بازی دراز در زون ساختاری زاگرس چین خورده قرار گرفته است. برای حفاری این تونل از یک دستگاه TBM (از نوع EPB Hard Rock) استفاده شده است. محور تونل در یک تاقدیس قرار گرفته است. در این تاقدیس ساختارهای متنوع زمین شناسی از قبیل چین خوردگی، گسل، کارست و... وجود دارد. مطالعات زیرسطحی طرح و اجرای گمانه های اکتشافی در هسته این تاقدیس با محدودیت مواجه بوده است. در این تونل برای پیش بینی شرایط زمین شناسی حین حفاری، مطالعات پیش بینی لرزه ای تونل (TSP) در دو موقعیت کیلومترهای ۳+۲۸۷ و ۵+۵۷۷ اجرا شد. در این روش ژئوفیزیکی از امواج لرزه ای برای تصویرسازی ساختارهای زمین شناسی استفاده می شود. توزیع امواج برشی در مدل سه بعدی تونل، شواهدی از تغییرات لیتولوژیکی (تناوب لایه های مارنی، شیلی و آهکی) و وجود چند زون خرد شده در مسیر حفاری ارائه می کند. تونل بازی دراز اولین پروژه در دنیا است که از روش TSP در مسیر حفاری یک دستگاه حفار از نوع EPB استفاده شده است. در این پژوهش از تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه EPB و نیز کنترل وضعیت سینه کار حفاری، برای ارزیابی میزان درستی نتایج پیش بینی های صورت گرفته توسط روش TSP، استفاده شده است. نوسانات پارامترهای نرخ نفوذ، نیروی تراست و گشتاور در مسیر حفاری، منطبق بر نواحی کم سرعت و سرعت بالا در مدل های سه بعدی امواج برشی است. نتایج کنترل وضعیت سینه کار و مصالح حفاری نیز نشان می دهد که مدل های توزیع امواج برشی، با تغییرات شرایط زمین شناسی در مسیر حفاری، انطباق نسبتاً خوبی دارند.

کلید واژه ها: TSP، امواج برشی، دستگاه EPB، نرخ نفوذ، تراست، گشتاور، زون خرد شده.

۱. کارشناسی ارشد، واحد خدمات مهندسی پروژه بازی دراز، شرکت مهندسی مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران. Joudaki_vahid@yahoo.com

۲. دانشیار، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران، ایران

۳. استاد، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، ایران

۴. استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۵. دکترا، گروه ژئوفیزیک، شرکت امبرگ تکنولوژی، سوییس

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

روش‌های تونل‌سازی سنتی در شرایط مختلف زمین‌شناسی، انعطاف‌پذیر هستند. اما حفاری مکانیزه با TBM به دلیل عدم انعطاف‌پذیری، به شدت به تغییرات شرایط زمین‌شناسی ساختگاه وابسته است. در ایران نیز موارد متعددی از توقفات مکرر و طولانی مدت دستگاه‌های حفار TBM در شرایط نامساعد زمین‌شناسی (زون‌های ریزشی، زون‌های آبدار کارستی و ...) نظیر تونل قمرود (جودکی و اجل‌لوئیان، ۱۳۹۴؛ جودکی و همکاران، ۱۳۹۷)، تونل کوه‌رنگ (Zarei, et al., 2010; Movahednejad, 2008) گزارش شده است. در این تونل‌ها، در صورت پیش‌بینی و شناسایی موقعیت نواحی پرمخاطره، این امکان وجود داشت که قبل از ورود TBM به این مقاطع، راهکارهای اجرایی متناسب با شرایط زمین‌شناسی اتخاذ گردد و تا حد زیادی از توقفات جلوگیری نمود. لذا در روش مکانیزه پیش‌بینی و شناسایی مناطق مخاطره‌آمیز نظیر زون‌های گسلی، حفرات کارستی، تغییرات لیتولوژیکی در مسیر حفاری بسیار مهم است.

اجرای گمانه‌های اکتشافی نیز اگرچه اطلاعات دقیقی از اعماق زمین ارائه می‌کنند اما این اطلاعات نیز تنها مربوط به یک ناحیه کوچک هستند. شرایط توده‌سنگ‌ها به لحاظ خواص لیتولوژیکی و پارامترهای ژئومکانیکی ممکن است به فاصله‌های کوتاه در محدوده چند متر دورتر از یک گمانه، به طور ناگهانی تغییر کند.

در این میان می‌توان با سرعتی بالا و هزینه بسیار کمتر، جهت پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی از روش‌های شناسایی ژئوفیزیکی هم در سطح و هم در زیر زمین (سینه کار حفاری) استفاده کرد. در میان روش‌های ژئوفیزیکی، روش‌های لرزه‌ای به دلیل ارتباط تنگاتنگ انتشار امواج لرزه‌ای با خصوصیات کشسانی سنگ و همچنین بُرد بیشتر امواج لرزه‌ای نسبت به امواج الکترومغناطیسی، بیشترین استفاده را در کاربردهای تونلی دارند (Dickmann, 2008). روش‌های مطالعات ژئوفیزیکی داخل تونل، نسبت به روش‌های سطحی قدرت تفکیکی بالاتری دارند از این رو علی‌رغم مشکلات

اجرایی در محیط تونل، نسبت به روش‌های سطحی برتری دارند.

یکی از روش‌های لرزه‌نگاری توسعه‌یافته ویژه مطالعات داخل تونل، فناوری نوین TSP است که در سال ۱۹۹۲ توسط ساتل (Sattel)، در کشور ژاپن معرفی شد اما روند تجاری‌سازی آن توسط شرکت امبرگ سوییس انجام گرفت و در ادامه توسعه یافت. در این روش از امواج لرزه‌ای به منظور بررسی خصوصیات کشسانی محیط و تصویرسازی ساختارهای زمین‌شناسی استفاده می‌شود. اساس روش پیش‌بینی لرزه‌ای تونل (Tunnel Seismic Prediction) که به اختصار TSP نامیده می‌شود، ایجاد امواج لرزه‌ای حاصل از انفجار مقدار کمی مواد ناریه در جداره تونل (مجاور جبهه‌کار) و دریافت انعکاس امواج لرزه‌ای S و P (ناشی از تغییرات خواص الاستیک توده‌سنگ‌ها) است (Dickmann, 2014).

برای اجرای TSP، نیازی به دسترسی به سینه‌کار حفاری وجود ندارد، لذا این فاکتور یک مزیت مهم (به‌ویژه در تونل‌های مکانیزه) محسوب می‌شود. این روش به‌عنوان یکی از روش‌های ژئوفیزیکی جهت تشخیص موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی مسیر حفاری و به طور معمول برای پیش‌بینی فواصل ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر از سینه‌کار تونل، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجائی که تحلیل‌های زمین‌شناسی در این روش بر اساس سرعت موج لرزه‌ای می‌باشد؛ لذا هرگونه تغییر در سرعت امواج به مثابه یک آنومالی زمین‌شناسی تلقی می‌گردد که کارشناس تحلیل‌گر می‌تواند با مقایسه دقیق‌تر و جزئی‌تر تغییرات سرعت، نوع و کیفیت آنومالی را ارزیابی نماید. در این روش هر چه سنگ سخت‌تر و یکپارچه‌تر باشد فاصله نفوذ امواج لرزه‌ای نسبت به سینه‌کار حفاری بیشتر می‌شود و بر عکس هرچه زمین سست‌تر و دارای شکستگی و درزه باشد، انرژی امواج لرزه‌ای دچار پراکندگی و استهلاک شده و نفوذ امواج کاهش می‌یابد.

پیرامون کاربرد نتایج پیش‌بینی‌های روش TSP در پروژه‌های تونل‌سازی، گزارش‌های متعددی نظیر تونل زاگرس (امینی و همکاران، ۱۳۹۵؛ پروز و همکاران، ۱۳۹۶) و تونل چشمه

جبهه‌کار کاملاً بسته) امکان بازدید سطح توده‌سنگ‌ها تنها در زمان بازگشایی دریچه چمبر وجود دارد. در این تحقیق نیز امکان کنترل مداوم سینه‌کار حفاری (به‌ویژه در تست مرحله دوم در کیلومتر ۵+۵۷۷) وجود نداشته است.

۲. زمین‌شناسی منطقه

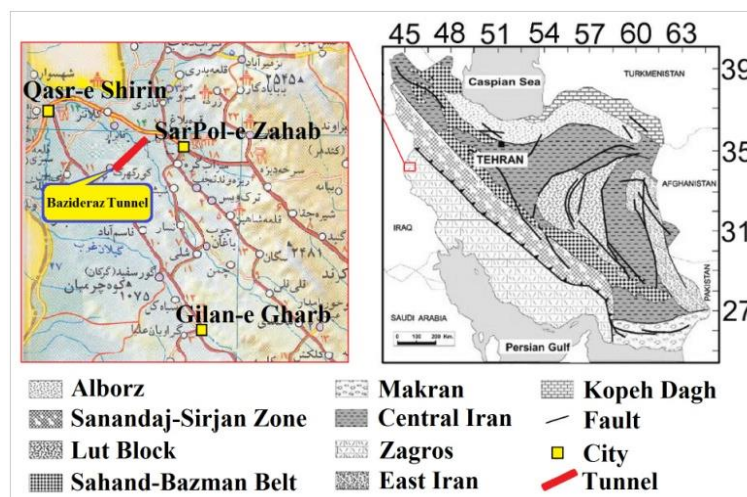
ساختمان مورد مطالعه بر اساس تقسیم‌بندی کلی زمین‌شناسی ایران (آقائاتی، ۱۳۸۳) و با توجه به شکل ۱، در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. حضور چند گسل در محدوده مورد نظر و تکتونیزه شدن توده‌سنگ‌ها در این منطقه باعث ایجاد بخش‌های خرد شده‌ای در مسیر تونل شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، در مجموع توده‌سنگ‌های رخنمون‌یافته در مسیر تونل انتقال آب بازی‌دراز به هفت گونه زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده است. مبنای تفکیک گونه‌های مذکور بیشتر خصوصیات مهندسی توده‌سنگ‌ها به‌ویژه مقاومت و استحکام ظاهری و وضعیت عمومی ناپیوستگی‌های موجود در آنها بوده است (SCE, 2015). در شکل ۲، گونه‌های زمین‌شناسی مهندسی و حدود تقریبی آنها در مسیر تونل نشان داده شده است.

محدوده مربوط به این تحقیق مربوط به سه گونه زمین‌شناسی در سازندهای گورپی، پابده و تله‌زنگ است. این تشکیلات دارای پارامترهای مهندسی متفاوت و شامل شیل، مارن آهکی، مارن، شیل آهکی و آهک هستند (جدول ۱).

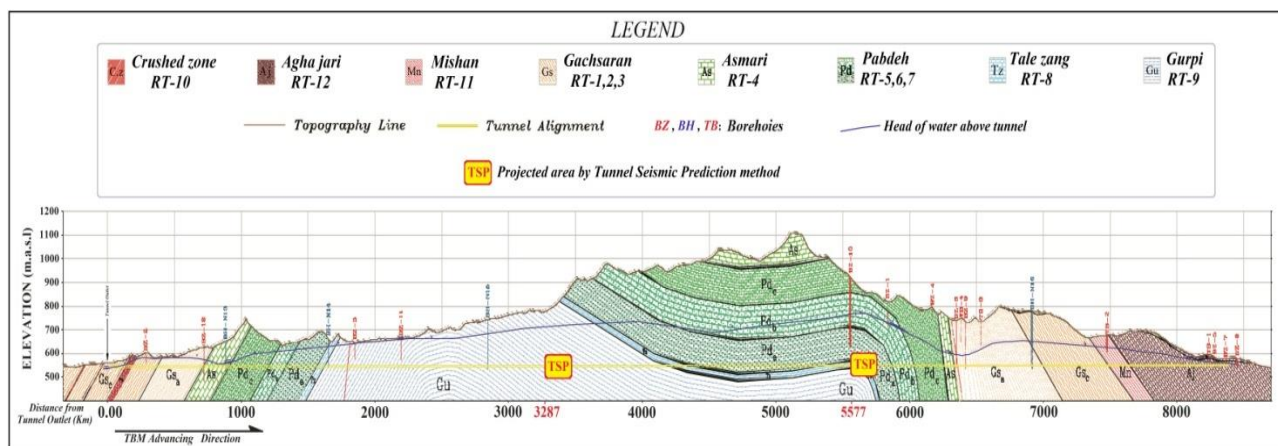
روزیه سمنان (صادق اسلام و همکاران، ۱۳۹۳؛ Etemadi et al., 2008) در ایران، تونل Qiyueshan در چین (Li et al., 2014; Lin and Li, 2010)، تونل Hsuehshan در تایوان (Chang and YU., 2005; Tsai et al., 2005)، تونل Koralm در اتریش (Dickmann, 2008)، تونل Vereina Rail در سوئیس (Dickmann and Sander, 1996; Geotech Co., 2004)، تونل Chavimochic در پرو (Hecht-Méndez and Dickmann, 2016) ارائه شده است که همه این مطالعات مؤید کارایی این روش در پیش‌بینی ساختارهای مختلف زمین‌شناسی بوده‌اند.

هدف این پژوهش برآورد میزان صحت پیش‌بینی‌های روش TSP در تونل انتقال آب بازی‌دراز در غرب ایران است. در این پژوهش برای مقایسه نتایج مدل‌های سه بُعدی سرعت توزیع امواج برشی با واقعیت زمین‌شناسی، از تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه TBM و نیز کنترل سینه‌کار حفاری بهره گرفته شده است. برای حفاری این تونل از یک دستگاه TBM از نوع EPB Hard Rock ساخت شرکت Lovat کانادا استفاده شده است. با توجه به احتمال وجود خطا در ثبت پارامترهای عملیاتی توسط اپراتور دستگاه، در این پژوهش جهت تحلیل شرایط حفاری از اطلاعات ذخیره شده در سیستم ثبت داده‌های دستگاه (Data logger system) استفاده شده است.

پیش از ورود به بحث ذکر این نکته لازم است که در ماشین‌های حفار معمولی (غیر EPB) امکان بازدید سطح توده‌سنگ‌ها در موقعیت دیواره‌ها و سینه‌کار در همه زمان‌ها وجود دارد. اما در ماشین‌های حفار EPB (به دلیل حفاری در



شکل ۱. موقعیت زمین شناسی (برگرفته از Stocklin, 1977) و جغرافیایی تونل بازی دراز.



شکل ۲. مقطع زمین شناسی مهندسی تونل (SCE, 2015) و موقعیت نواحی پیش بینی شده توسط مطالعات TSP.

جدول ۱. تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگها (SCE, 2015) در مسیر مطالعات TSP.

Geological Types	Formation	Lithology	UCS (MPa)		RQD (%)		RMR	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
RT-9	Gurpi	Limy Shale, Limy Marl, Marl, Shale	7	25	80	95	39	52
RT-7	Pabdeh	Shaly Limestone	25	35	70	75	38	51
RT-8	Tale zang	Limestone	65	75	55	60	46	64

با یک ملات خاص به سنگ چسبانده می شود. امواج لرزه ای ایجاد شده توسط انفجارها پس از بازتاب از ساختارهای زمین شناسی روبروی جبهه کار، توسط این گیرنده ها ثبت می گردند. با استفاده از نرم افزار تخصصی ارائه شده توسط شرکت امبرگ داده های ثبت شده پردازش می شوند. در این روش اولین چال چشمه در یک سمت تونل در نزدیک ترین قسمت به جبهه کار حفر می شود. ۲۳ چال دیگر نیز با فواصل

۳. برداشت داده های TSP در تونل بازی دراز

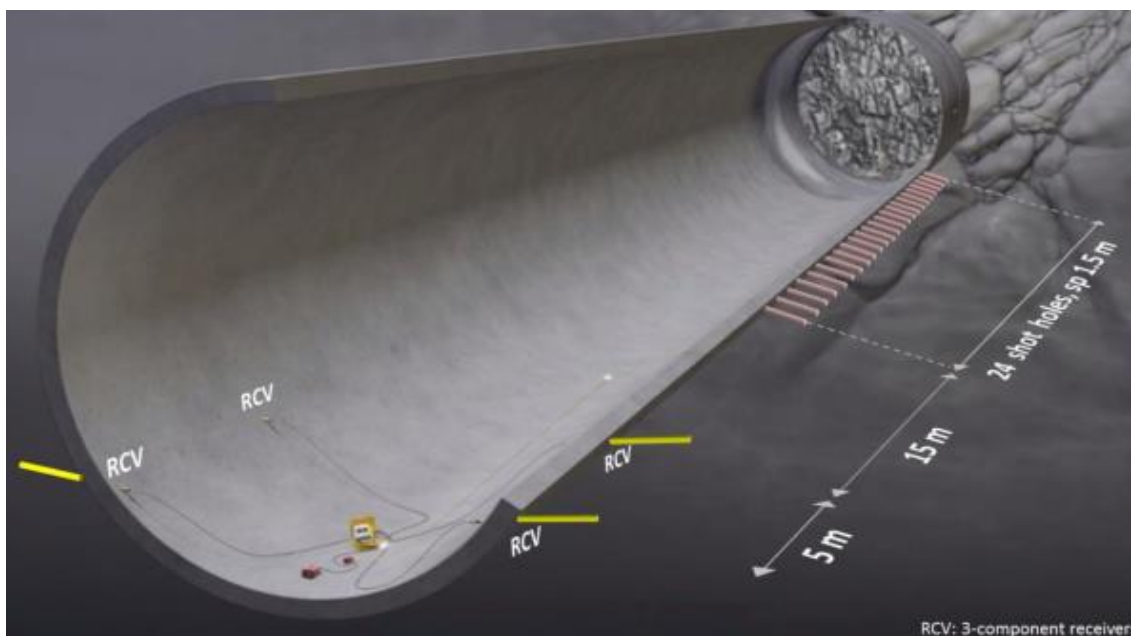
در این روش امواج لرزه ای با استفاده از انفجار مواد منفجره (به طور معمول ۵۰ الی ۵۰۰ گرم ماده منفجره) در ۲۴ چال حفر شده در دیواره تونل ایجاد می شود. برای ثبت امواج لرزه ای از چهار گیرنده حساس سه مؤلفه ای استفاده می شود. این گیرنده ها درون چال های حفاری شده در دو طرف دیوارهای تونل قرار می گیرند و انتهای گیرنده ها درون چال ها

افزایش خواهد داد، اما می‌تواند در افزایش دقت نتایج حاصل، اثر گذار باشد.

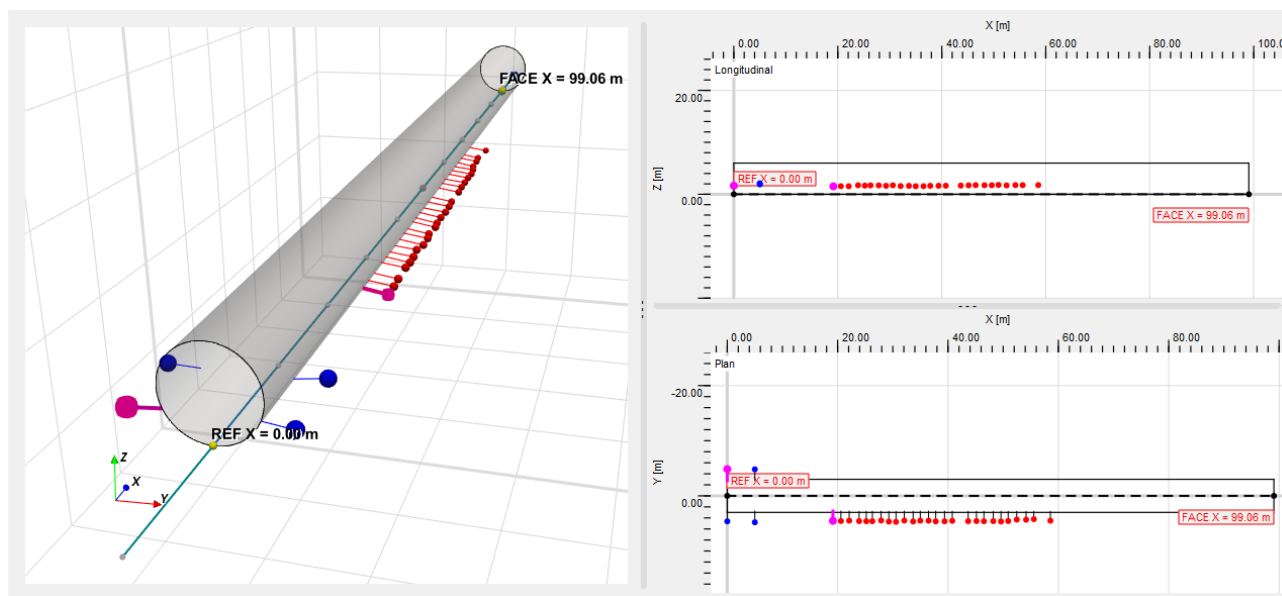
از آنجا که در این روش می‌توان امواج تراکمی و برشی را مورد مطالعه قرار داد، این روش قابلیت محاسبه خصوصیات مکانیکی مانند نسبت پواسان و یا مدول یانگ و بالک سنگ‌ها را نیز دارا است. در خروجی حاصل از پردازش‌های نرم‌افزار، اطلاعات ارزشمندی نظیر توزیع سرعت انتشار امواج تراکمی و برشی، نقشه ضرایب بازتاب و مرز صفحات زمین‌شناسی که از محور تونل عبور می‌نماید در قالب مدل‌های دو و سه‌بعدی قابل ارائه است که کمک زیادی به تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی می‌نماید. سیستم TSP 303 PLUS آخرین نسخه ارائه شده این روش توسط شرکت امبرگ می‌باشد.

۱/۵ متری از هم در همان سمت حفر می‌گردند. عمق مناسب جهت چال‌های چشمه ۱/۵ متر است. به این ترتیب چشمه‌ها گستره‌ای در حدود ۳۴/۵ متر را پوشش می‌دهند. پس از حفر آخرین چال چشمه، با یک فاصله ۱۵ متری، تعداد ۲ چال گیرنده در طرفین تونل به عمق حدود ۲ متر حفر می‌گردند. با فاصله ۵ متری نسبت به چال اول گیرنده، ۲ چال گیرنده دیگر نیز در طرفین قرار خواهند گرفت (مجموعاً ۴ چال گیرنده). بدین ترتیب فاصله اولین چشمه تا آخرین گیرنده حدود ۵۴/۵ متر خواهد بود (شکل ۳ و ۴).

لازم به توضیح است در مقاطعی از مسیر اجرای تونل‌ها که ساختارهای زمین‌شناسی شرایط پیچیده‌ای دارند، می‌توان چال‌های چشمه را در دو سمت تونل حفر نمود. این آرایش اگرچه زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش و برداشت داده‌ها را



شکل ۳. طرحی شماتیک از موقعیت چال‌های انفجاری و چال‌های گیرنده در روش TSP.



شکل ۴. نحوه چیدمان چشمه‌ها (نقاط قرمز) و گیرنده‌ها (نقاط آبی) در عملیات TSP تونل بازی دراز، کیلومتر ۳+۲۸۷.

خروج است. این گاز در محدوده lel ۲۴ قابیل اشتعال دارد. در این وضعیت انجام انفجارات در چال‌های TSP می‌توانست مخاطراتی (تخریب پوشش بتنی تونل در محل چال‌ها و آسیب‌های احتمالی به تجهیزات دستگاه حفار) را به دنبال داشته باشد. با توجه به وضعیت چین‌خورده لایه‌ها در این مقطع تونل (که در مرکز تاق‌دیس بازی دراز قرار دارد) این احتمال وجود داشت که گاز متان در یک تله زمین‌شناسی در نزدیکی جداره تونل به دام افتاده باشد و انجام تست مشکلاتی ایجاد کند. لذا با توجه به ملاحظات ایمنی، اجرای تست TSP متغی و موکول به عبور از نواحی گازدار شد.

۵. تحلیل نتایج TSP در موقعیت کیلومتر ۳+۲۸۷

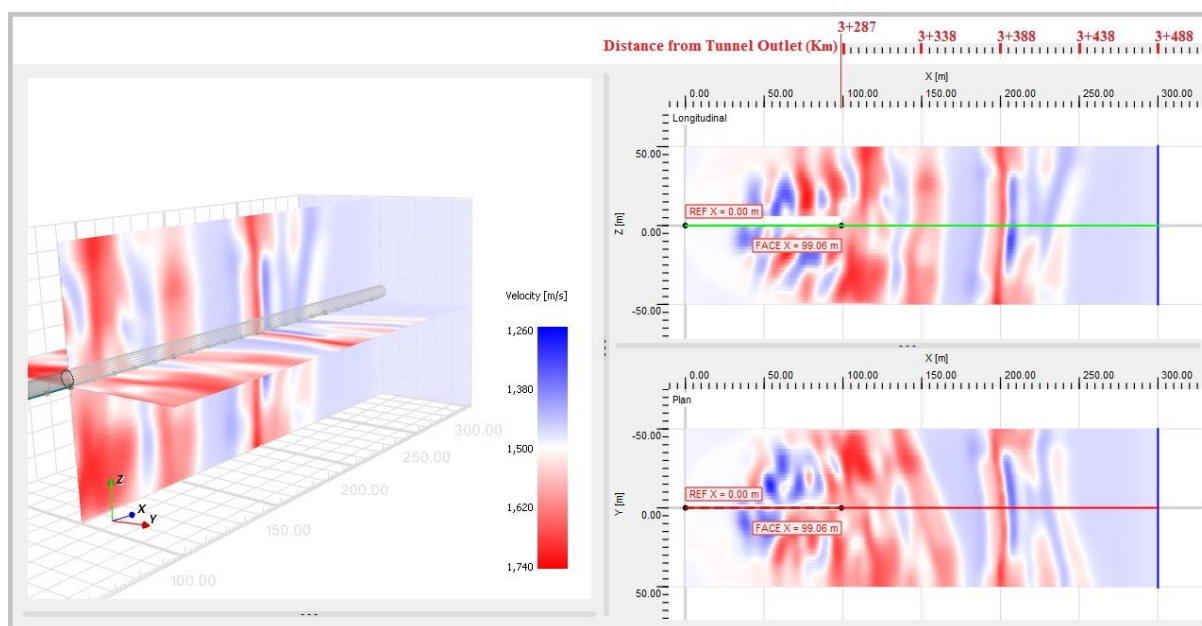
مهم‌ترین خروجی تحلیل داده‌های آزمایش TSP، مدل‌هایی است که در آن نحوه توزیع سه بُعدی سرعت امواج تراکمی و برشی ارائه می‌گردد. این خروجی‌ها امکان شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و مخاطرات احتمالی را فراهم می‌سازد. در این پژوهش تحلیل‌ها بر اساس نتایج مدل توزیع سرعت امواج برشی صورت گرفته است (شکل ۵).

۴. محدودیت‌های اجرایی و زمین‌شناسی جهت انجام

تست TSP در تونل بازی دراز

برای انجام انفجارات و ثبت داده‌های TSP، به‌طور متوسط در یک شیفت کاری (۶ الی ۸ ساعت) عملیات حفاری مکانیزه متوقف می‌گردد و تردد داخل تونل نیز باید به طور کامل قطع گردد، زیرا هر نوع حرکت ماشین‌آلات موجب تولید امواج مزاحم (NOISE) و خطا در ثبت داده‌ها می‌شود.

اما چالش خاص در تونل بازی دراز مربوط به ویژگی‌های سازندهای زمین‌شناسی این تونل به لحاظ وجود گازهای هیدروکربونی در مسیر حفاری است. به نحوی که پس از انجام یک مرحله تست TSP در کیلومتر ۳+۲۸۷، در مرحله دوم در کیلومتر ۴+۵۶۳ نیز چال‌های TSP حفاری و پرسنل فنی آماده انفجار مواد ناریه بودند. اما با انتشار گازهای سمی و قابل اشتعال از محل چال‌های حفاری شده (سولفید هیدروژن، دی‌اکسید کربن، متان و ...)، جهت ملاحظات ایمنی عملیات گاز سنجی صورت گرفت. نتایج نشان می‌داد از مجرای تعدادی از چال‌ها، گاز متان در محدوده خطر و به میزان بیش از lel ۵۰ (Lower Explosive Limit) در حال



شکل ۵. مدل سه بُعدی توزیع سرعت انتشار امواج برشی در تست کیلومتر ۳+۲۸۷.

در شرایط معمولی حفاری (در نبود شرایطی نظیر لهیدگی، هجوم آب، کلاکینگ و...) در توده‌سنگ‌های ضعیف؛ پارامتر نرخ نفوذ با افزایش، تراست با کاهش و گشتاور با افزایش همراه خواهد بود. در توده‌سنگ‌های مقاوم نیز وضعیت این پارامترها، روندی معکوس دارد.

تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار حاکی از آن است که در مترهای ۳۲۸۸ الی ۳۳۷۱، مابین نحوه توزیع سرعت امواج برشی با تغییرات پارامترهای دستگاه، سازگاری مشخصی دیده نمی‌شود (شکل ۶). بازدید سینه‌کار و کنترل مصالح حفاری نشان می‌دهد توده‌سنگ‌ها در این ناحیه، از متر ۳۲۸۸ الی ۳۳۲۰؛ شامل تناوب شیل‌های آهکی با مارن آهکی و از متر ۳۳۲۰ الی ۳۳۷۱؛ شامل مارن آهکی و مارن با میان‌لایه‌های شیل آهکی بوده است.

اما در ادامه مسیر حفاری، روند تغییرات پارامترهای عملیاتی تا حد زیادی منطبق بر نحوه توزیع سرعت امواج برشی است و می‌توان گفت که نتایج TSP با تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها سازگاری نسبی دارد. به‌طور مثال در شکل ۶، افزایش نرخ نفوذ دستگاه حفار در مترهای ۳۳۷۲ الی ۳۳۸۴ (با مقدار بیشینه ۳۷ میلی‌متر بر دور در متر ۳۳۷۹) منطبق بر ناحیه کم سرعت در مدل موج برشی (با سرعت

طبق نتایج حاصل از برداشت داده‌های TSP، گستره تغییرات سرعت انتشار امواج برشی در محل اندازه‌گیری از حدود ۱۲۶۰ تا ۱۷۴۰ متر بر ثانیه متغیر است که با مقادیر تجربی سرعت انتشار امواج برشی (Bourbie et al., 1987)، در تشکیلات سازند گورپی (مارن، مارن آهکی و شیل آهکی) مطابقت دارد. همانگونه که در شکل ۵، دیده می‌شود در این آزمایش مقادیر سرعت موج برشی تا فاصله ۲۰۰ متری نسبت به سینه‌کار پیش‌بینی شده است.

نواحی با سرعت پایین انتشار نشان‌دهنده وجود توده‌سنگ‌هایی با پارامترهای ژئومکانیکی ضعیف و نواحی با سرعت انتشار بالا نیز نشان‌دهنده وجود توده‌سنگ‌هایی با پارامترهای ژئومکانیکی بالاتر می‌باشد.

در این میان نوسانات پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار نیز وابسته به مقاومت توده‌سنگ (UCS)، شاخص کیفی (RQD) و سایر خصوصیات مهندسی سنگ‌های مسیر است. از این‌رو بررسی وضعیت پارامترهای نرخ نفوذ (Penetration rate)، تراست (Thrust) و گشتاور (Torque) در دستگاه حفار و مقایسه روند تغییرات آنها با نتایج آزمایش TSP، می‌تواند معیاری برای سنجش میزان اعتبار نتایج پیش‌بینی شده توسط این روش باشد.

خواص کانی‌شناسی و افزایش درصد رس توده‌سنگ‌ها نیز از عوامل تاثیر گذار بر خزش توده‌سنگ‌ها بوده است. تراوش آب در درز و شکاف‌های توده‌سنگ، سبب شسته شدن و از میان رفتن میان‌لایه‌های نامقاوم شده است و با کاهش مقاومت چسبندگی، شرایط خزش توده‌های سنگی را فراهم ساخته است. در این ناحیه توده‌سنگ از پارامترهای ژئومکانیکی پایینی برخوردار بوده است و کاهش نرخ نفوذ به دلیل خزش توده‌سنگ‌ها و درگیری سپر دستگاه با زمین بوده است. از این‌رو علی‌رغم کاهش نرخ نفوذ در این نواحی، می‌توان تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه را با نحوه توزیع سرعت امواج برشی (ناحیه کم سرعت در این مقطع: حدود ۱۳۸۰ متر بر ثانیه) منطبق دانست.

در ۵۰ متر انتهایی مسیر حفاری (مترهای ۳۴۳۸ الی ۳۴۸۸) نوسانات نرخ نفوذ در فواصل کوتاهی افزایش ناگهانی (با مقادیر بیشینه ۲۳ الی ۲۷ میلی‌متر بر دور) و مجدداً کاهش ناگهانی (با مقادیر کمینه ۱۳ الی ۱۵ میلی‌متر بر دور) نشان می‌دهد (شکل ۶). علت افزایش و کاهش متوالی نرخ نفوذ در این فواصل کوتاه، متأثر از پراکندگی درزه‌ها و نیز تناوب لایه‌های ضعیف مارنی با لایه‌های مقاوم شیل آهکی (که در روند حفاری مشاهده شد) است. اگر چه در ۵۰ متر انتهایی در مدل توزیع امواج برشی شواهدی مختص لایه‌های مقاوم شیل آهکی (با سرعت انتشار بالا) دیده نمی‌شود اما دلیل این مسئله را می‌توان به کاهش قدرت تفکیک نتایج TSP با افزایش فاصله نسبت داد.

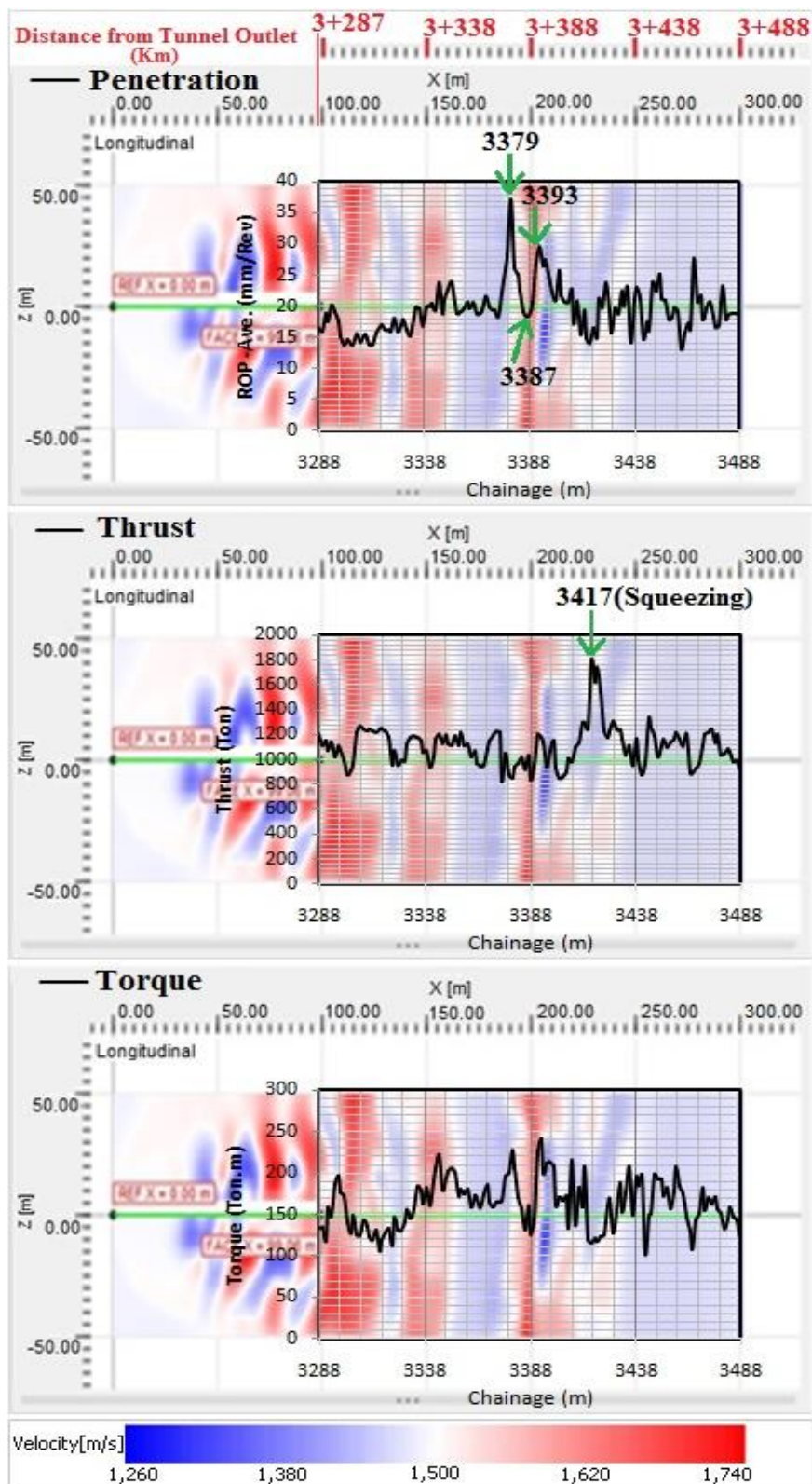
لازم به ذکر است که در محدوده مورد مطالعه، اگرچه تونل در زیر سطح ایستایی آب زیرزمینی قرار گرفته است اما ناخالصی توده‌سنگ‌ها (مارنی و شیلی بودن سنگ‌های آهکی) موجب شده که جریان‌های آب زیرزمینی توسعه پیدا نکند و در مسیر حفاری از حالت مرطوب و قطره‌ای تا حداکثر حدود ۱ لیتر بر ثانیه تجاوز نکند.

حدود ۱۳۸۰ متر بر ثانیه) است. طبق مشاهدات زمین‌شناسی وضعیت سینه‌کار در این ناحیه یک توده‌سنگ درزه‌دار شامل مارن آهکی و مارن با یک میان‌لایه شیل آهکی بوده است (شکل ۷).

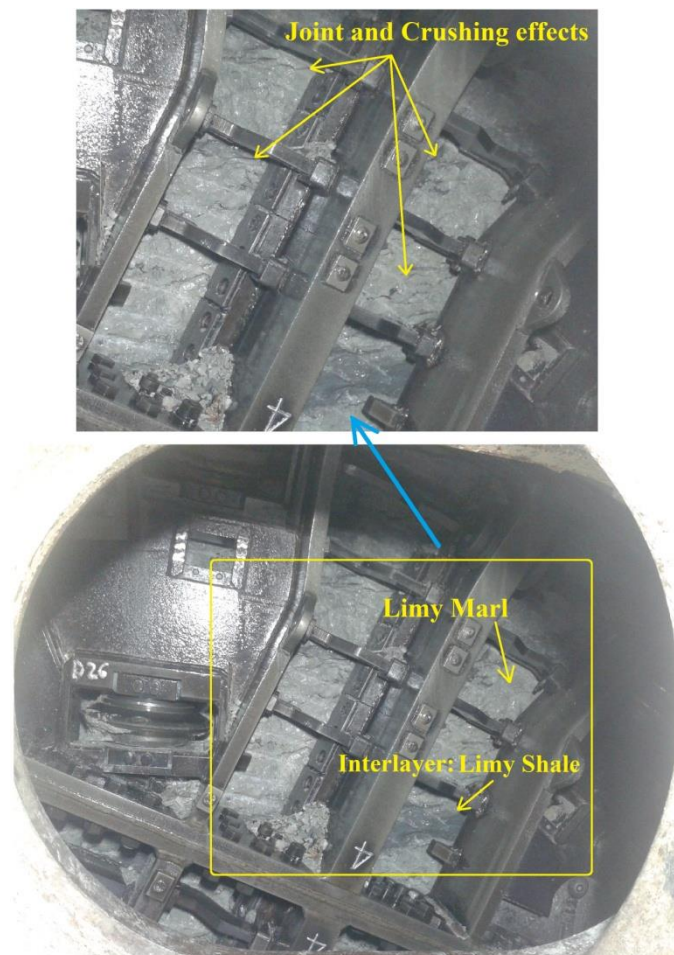
پس از عبور از لایه‌های مارنی، دستگاه با چند لایه نسبتاً ضخیم شیل آهکی در مترهای ۳۳۸۵ الی ۳۳۸۹ برخورد کرد (با نرخ نفوذ کمینه ۱۸ میلی‌متر بر دور در مترهای ۳۳۸۷) که منطبق بر ناحیه سرعت بالای امواج برشی (با سرعت ۱۷۴۰ متر بر ثانیه) است. در این محدوده فراوانی درزه‌ها کاهش یافته است و معدود درزه‌های موجود با فاصله بیش از ۶۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داشتند. توده‌سنگ به لحاظ شاخص کیفی سنگ (RQD) در محدوده ۸۰ الی ۸۵ قرار داشت (شکل ۸).

بلافاصله پس از عبور از لایه‌های شیل آهکی و با ورود به یک ناحیه مارنی و مارن آهکی در مترهای ۳۳۹۰ الی ۳۴۰۲ نرخ نفوذ دستگاه با یک افزایش چشمگیر (با مقدار بیشینه ۳۰ میلی‌متر بر دور در مترهای ۳۳۹۳) مواجه شد که منطبق بر ناحیه سرعت پایین امواج برشی (با سرعت ۱۲۶۰ متر بر ثانیه) است (شکل ۶).

در ادامه حفاری علی‌رغم حفاری در توده‌سنگ‌های ضعیف (مارن آهکی با میان‌لایه‌های شیلی)، پارامترهای نرخ نفوذ و گشتاور (به ترتیب به میزان ۱۴ میلی‌متر بر دور و ۱۱۵ تن‌متر) کاهش نشان می‌دهد. در این نواحی افزایش نیروی تراست (با مقدار بیشینه ۱۸۰۰ تن در مترهای ۳۴۱۷) نشان می‌دهد که افزایش روباره تونل در این مقطع (۲۹۵ متر) موجب خزش توده‌سنگ‌ها در امتداد سطح ناپیوستگی‌ها و درگیری سپر دستگاه با زمین شده است (شکل ۶). با ایجاد اصطکاک بین سپر و زمین به دلیل پدیده لهیدگی (Squeezing)، در مترهای ۳۴۱۷ میزان نرخ نفوذ کاهش می‌یابد، لذا اپراتور TBM برای عبور دستگاه از این ناحیه به ناچار نیروی تراست دستگاه را افزایش داده است و برای روانکاری و کاهش اصطکاک، اقدام به تزریق بتونیت در پشت سپر دستگاه کرده است. البته در این میان برخی عوامل دیگر نظیر درزه‌داری سنگ، وجود آب در این ناحیه (به حالت قطره‌ای تا کمتر از ۰/۵ لیتر ثانیه)،



شکل ۶. مقایسه روند پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار با توزیع سرعت انتشار امواج برشی.



شکل ۷. دید از دریچه عینکی چمبر- متراژ ۳۳۷۹، نمایی از شرایط لیتولوژیکی و پایین بودن پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ مارن آهکی (افزایش نرخ نفوذ تا ۳۷ میلی متر بر دور، کاهش تراست نیز تا میزان ۸۳۰ تن، افزایش نیروی گشتاور تا میزان ۲۳۰ تن متر).



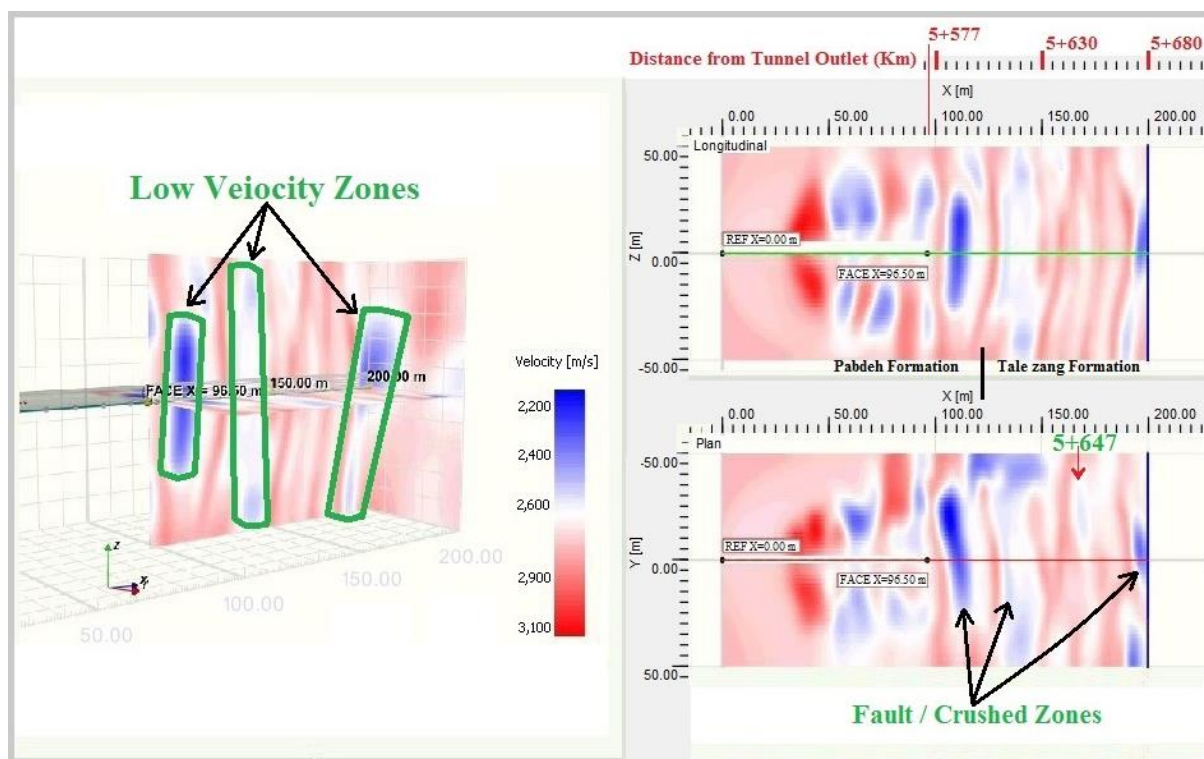
شکل ۸. دید از دریچه عینکی چمبر- متراژ ۳۳۸۷، نمایی از استحکام و بالا بودن پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ شیل آهکی (کاهش نرخ نفوذ تا ۱۸ میلی متر بر دور، افزایش تراست نیز تا میزان ۱۰۳۵ تن، کاهش نیروی گشتاور تا میزان ۱۳۰ تن متر).

عملیات حفاری با اولین ناحیه خردشده و هجوم آب (به همراه انتشار گازهای سمی) مواجه شد که منطبق بر موقعیت اولین زون کم سرعت (با سرعت ۲۲۰۰ متر بر ثانیه) در نتایج مدل سه بُعدی توزیع موج برشی است. در این ناحیه وجود قطعات بلوکی بزرگ و خردشده در مصالح حفاری نشانگر وضعیت درزه‌داری شدید توده‌سنگ است.

بررسی شرایط زمین‌شناسی حین حفاری نشان می‌داد که در ناحیه پیش‌بینی شده توسط آزمایش TSP (از متر ۵۵۷۷ الی ۵۶۸۰)، توده‌سنگ‌ها تقریباً در کل مسیر، دارای جریان‌های آب زیرزمینی هستند. در این ناحیه جریان آب در سینه‌کار از حداقل ۱۰ الی حداکثر ۱۰۰ لیتر بر ثانیه ثبت گردیده است. که البته نواحی خرد شده بحرانی در مسیر حفاری (با حداکثر دبی هجوم آب) تقریباً منطبق بر موقعیت زون‌های کم سرعت در مدل سه بُعدی موج برشی (با سرعت‌های ۲۲۰۰ الی ۲۴۰۰ متر بر ثانیه) است (شکل ۹).

۶. تحلیل نتایج TSP در موقعیت کیلومتر ۵+۵۵۷

این آزمایش در محدوده دو سازند پابده و تله‌زنگ انجام شده است. تشکیلات سازند پابده در این ناحیه آهک شیلی است و لیتولوژی سازند تله‌زنگ نیز شامل توده‌سنگ آهکی است. همانگونه که در شکل ۹ دیده می‌شود سرعت انتشار موج برشی در چند زون به شدت کاهش یافته است و از ۳۱۰۰ به ۲۲۰۰ متر بر ثانیه رسیده است. بررسی شرایط زمین‌شناسی حین حفاری نشان داد که نواحی سرعت پایین موج برشی، به‌طور تقریبی منطبق بر موقعیت زون‌های گسلی و توده‌سنگ‌های خرد شده در مسیر حفاری است. شرایط حین حفاری حاکی از آن بود که با توجه به ترکیب سنگ‌شناسی تشکیلات (به لحاظ ناخالصی کم و پتانسیل بالا برای ذخیره آب)، درز و شکاف‌های سنگ‌ها موجب توسعه جریان‌های آب زیرزمینی نیز شده است. پس از انجام آزمایش TSP، با آغاز پشروی دستگاه حفاری در فاصله‌ای کمتر از ۱۰ متر،



شکل ۹. مدل توزیع سه بُعدی سرعت انتشار امواج برشی در تست کیلومتر ۵+۵۷۷.

تراست با افزایش (به ترتیب مقادیر ۱۶۵۰، ۱۳۵۰، ۱۶۵۰ و ۱۴۰۰ تن) همراه بوده است.

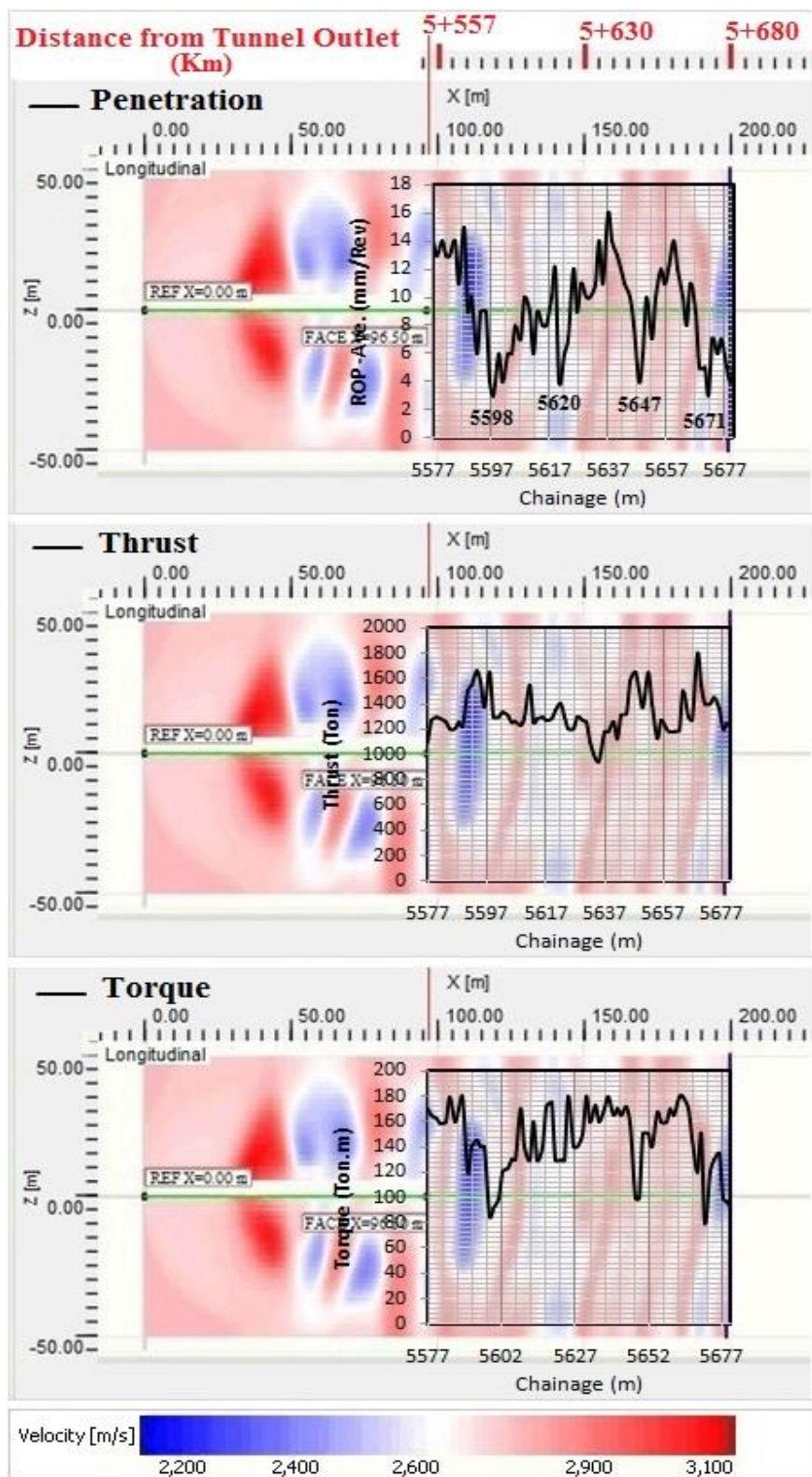
در این مناطق ناپایداری بلوک‌های سنگی و هجوم آب از میان سطوح ناپیوستگی درزه‌ها، موجب پُر شدن ناگهانی محفظه چمبر و در نتیجه تأثیر بر روند پیشروی دستگاه می‌شد. از طرفی به دلیل هجوم آب، در حین تخلیه چمبر حجم زیادی از آب و مصالح سنگی حفاری از روی نوار نقاله ریزش می‌نمود (شکل ۱۱ و ۱۲). لذا در این شرایط حفاری به حالت EPB (اعمال فشار EPB در محفظه چمبر) و کاهش نرخ نفوذ در زون‌های خردشده آبدار، اجتناب ناپذیر بوده است.

نکته قابل ذکر در حین حفاری، وضعیت خردشده توده سنگ در محدوده متر ۵۶۴۵ الی ۵۶۵۰ است که این ناحیه در مدل توزیع موج برشی (شکل ۹)، سرعتی در حدود ۲۶۰۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد لذا برخلاف سایر زون‌های خردشده در مدل موج برشی به وضوح قابل مشاهده نیست که این امر به دلیل عرض کم ناحیه کم سرعت و نیز به دلیل کاهش قدرت تفکیک روش TSP با افزایش فاصله می‌باشد. وضعیت خردشدگی توده سنگ در این مقطع به نحوی بوده است که در متر ۵۶۴۷ با هجوم آب، نرخ نفوذ تا میزان ۴ میلی متر بر دور، کاهش یافته است (شکل ۱۰).

تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار (شکل ۱۰)، حاکی از آن است که مابین مدل توزیع سرعت امواج برشی با تغییرات پارامترهای دستگاه، سازگاری نسبی دیده می‌شود.

در شرایط معمول در سنگ‌های خردشده، نرخ نفوذ دستگاه افزایش می‌باید. اما در این مقطع نرخ نفوذ روند معکوس و نزولی دارد. در این زون‌های خردشده آبدار، محفظه چمبر به سرعت از قطعات بلوکی سنگی بزرگ و حجم زیادی از آب انباشته می‌شد، لذا اپراتورهای دستگاه ناگزیر بودند که نرخ نفوذ را به نحوی کنترل نمایند که روند تخلیه (آب و مصالح سنگی درون محفظه چمبر)، مشکلات کمتری برای عملیات اجرایی ایجاد نماید. در این میان، بسته شدن دریچه چمبر و حفاری به حالت EPB (اعمال فشار EPB در محفظه چمبر)، موجب می‌شد نیروی تراست دستگاه نیز افزایش پیدا کند. عامل دوم در افزایش نیروی تراست این است که حرکت توده سنگ‌های خردشده و اصطکاک آنها با سپر دستگاه، نیز در افزایش نیروی تراست اثر گذار بوده است.

همانگونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود در زون‌های کم سرعت مدل موج برشی (منطبق بر زون‌های گسلی خردشده) مقادیر نرخ نفوذ کاهش می‌باید. در متر ۵۵۹۸، ۵۶۲۰، ۵۶۴۷ و ۵۶۷۱ با هجوم آب و ریزش بلوک‌های سنگی به داخل محفظه چمبر، نرخ نفوذ به کمترین حد (به ترتیب مقادیر ۳، ۴، ۴ و ۳ میلی متر بر دور) رسیده است و نیروی



شکل ۱۰. مقایسه روند پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار با توزیع سرعت انتشار امواج برشی.



شکل ۱۱. A- دید از دریچه چمبر: متراژ ۵۶۲۰، نمایی از هجوم شدید آب از درز و شکاف توده سنگ آهکی تله زنگ و پُر شدن محفظه چمبر از آب و مصالح سنگی. B- نصب پمپ آبکش و هدایت جریان آب در شیب مثبت تونل.



شکل ۱۲. A- ریزش مصالح سنگی حفاری به همراه جریان شدید آب از روی نوار نقاله. B- تمیزکاری و جمع‌آوری مصالح سنگی ریخته شده از روی نوار نقاله.

جهت گاز سنجی (جدول ۲) و بازدید دیسک‌های برشی گشوده می‌شد. با این حال علی‌رغم این محدودیت‌ها، با کنترل مصالح حفاری بر روی نوار نقاله، شرایط زمین‌شناسی (به‌ویژه تغییرات لیتولوژیکی) کنترل می‌گردید. به‌طور مثال یکی از نشانه‌های درزه‌دار بودن توده سنگ آهکی، مشاهده رگه‌های ضخیم کانی‌های ثانویه کلسیت در مصالح حفاری است که در حقیقت این کانی‌ها بعد از ایجاد شکستگی‌ها در فضاهای خالی درزه‌ها تبلور مجدد یافته‌اند. همچنین حین کنترل مصالح حفاری، مشاهده مواد آلی نفتی در بافت سنگ‌های آهکی، نشانه‌ای از وجود گاز متان در سینه‌کار

با پیشروی دستگاه، هجوم آب و انتشار گازهای سمی (با شدت بیشتر در زون‌های خردشده) شرایطی را ایجاد نمود که در این محدوده، بر خلاف شرایط تست قبلی (در موقعیت کیلومتر ۲۸۷+۳)، بازدید سینه‌کار به سهولت میسر نبوده است.

در بخش‌های زیادی از مسیر حفاری به دلیل لزوم حفاری به حالت EPB (به دلیل افزایش آب، گاز سمی سولفید هیدروژن، گاز انفجاری متان و غیره)، دریچه چمبر مسدود بوده است. لذا امکان بازدید سینه‌کار (جهت کنترل تغییرات لیتولوژیکی) تنها در مترازهایی مقدور بود که دریچه چمبر

آشکار گردید (شکل ۱۳). که البته به دلیل نزدیکی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها (تشکیلات آهکی در هر دو سازند)، مرز تغییر سازند در مدل‌های توزیع امواج لرزه‌ای، قابل تفکیک نیست.

حفاری بود. اما در مهم‌ترین یافته‌ها حین حفاری متر از ۵۶۰۰، با نمونه‌گیری از مصالح حفاری و مشاهده ریزدانه‌های سبز رنگ در بافت نمونه‌های آهکی (آهک گلاکونیت‌دار: شاخص سازند تله زنگ) عبور از مرز سازند پابده به سازند تله زنگ

جدول ۲. مقادیر گازهای انفجاری و سمی در محفظه چمبر، طی مسافت متر از ۵۵۷۷ الی ۵۶۸۰.

CO (PPM)		H2S (PPM)		CH4 (LEL)	
Min	Max	Min	Max	Min	Max
12	222	10	150	52	100



شکل ۱۳. وضعیت توده‌سنگ‌های آهکی (مصالح حفاری) در مرز سازندهای پابده و تله‌زنگ.

زمین‌شناسی در پروژه‌های دیگر (که از دستگاه متفاوت استفاده کرده‌اند) نیست.

۷. نتیجه‌گیری

نتایج TSP در قالب مدل‌های سه بُعدی توزیع امواج برشی، حاکی از تغییرات لیتولوژیکی (تناوب لایه‌های مارنی، شیلی و آهکی) و وجود چند زون خردشده است که کنترل شرایط زمین‌شناسی در حین حفاری، صحت این پیش‌بینی را تایید می‌نماید. مقایسه نتایج TSP با روند تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه نشان می‌دهد که مدل سه بُعدی توزیع امواج برشی نسبت به واقعیت زمین‌شناسی، تا حدودی از یک مطابقت نسبی در بسیاری از مترها برخوردار است. نواحی کم سرعت و سرعت بالای مدل‌های سه بُعدی امواج برشی، نسبتاً منطبق بر نوسانات نرخ نفوذ دستگاه در مسیر حفاری بوده است. تغییرات نرخ نفوذ و دیگر پارامترهای عملیاتی دستگاه به دلیل تغییرات لیتولوژیکی تشکیلات مارنی و شیلی

در پایان پیرامون تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه، این مطلب را می‌بایست شرح داد که در پروژه بازی‌دراز به لحاظ نوع طراحی دستگاه EPB، نرخ نفوذ از ترکیب گشتاور و تراست بالا حاصل می‌شود. لذا حفاری همواره تحت تراست بالا انجام می‌گیرد. به‌طور مثال در محدوده مربوط به این تحقیق (تشکیلات مارنی، شیلی و آهکی) نیز حفاری با تراستی اغلب حدود ۱۱۰۰ الی ۱۳۰۰ تن (به‌جز موقعیت لهیدگی) صورت گرفته است. در صورتی که اگر برای این تشکیلات از یک دستگاه حفار از نوع معمولی (غیر EPB) استفاده می‌شد؛ تراست لازم برای پیشروی به‌طور معمول از حدود ۵۰۰ الی ۶۰۰ تن تجاوز نمی‌کرد.

تونل بازی‌دراز اولین و تنهاترین پروژه در دنیا (تا زمان ارائه این پژوهش) است که از روش TSP در مسیر حفاری یک دستگاه حفار از نوع EPB استفاده شده است. لذا باید تأکید نمود که پارامترهای عملیاتی در این پروژه، تابع خصوصیات دستگاه مذکور است و قابل تعمیم برای شرایط مشابه

هرچه بیشتر پیش‌بینی نماید. در این صورت می‌توان ضمن کنترل وضعیت، برای تغییرات ناگهانی و مخاطره‌آمیز شرایط توده‌سنگ‌ها (ناشی از عدم تطابق پیش‌بینی‌های قبل از اجرا با واقعیت زمین‌شناسی حین اجرا)، تمهیدات لازم را چاره‌اندیشی کرد و برای عبور TBM از شرایط نامساعد زمین‌شناسی (زون‌های گسلی، هجوم آب و...)، مناسب‌ترین راهکارها را اتخاذ نمود.

تشکر و قدردانی

در پایان مؤلف اول بر خود لازم می‌داند که از پرسنل محترم شرکت زمین سنجش رایان (نماینده‌ی شرکت امبرگ در ایران) و نیز از همگی همکاران صنعتی خود در تیم حفاری و خدمات مهندسی پروژه بازی‌دراز قدردانی نماید.

در سازند گورپی (متناسب با تغییرات سرعت موج برشی: ۱۲۶۰ الی ۱۷۴۰ متر بر ثانیه در نتایج آزمایش مرحله اول TSP) و نیز متأثر از تغییرات شدید پارامترهای ژئومکانیکی تشکیلات آهکی سازندهای پابده و تله‌زنگ در اثر برخورد با زون‌های خردشده (متناسب با تغییرات سرعت موج برشی: ۲۲۰۰ الی ۳۱۰۰ متر بر ثانیه در نتایج آزمایش مرحله دوم TSP) بوده است. اگر چه با استفاده از این روش تنها محدوده‌های کوچکی از مسیر حفاری پیش‌بینی شده است. اما در چنین پروژه‌هایی می‌توان با انجام دوره‌ای و متوالی روش TSP (در نواحی محتمل و مخاطره‌آمیز) پیش از وقوع مخاطرات زمین‌شناسی، اطلاعات مفیدی جهت کنترل روند حفاری و اندیشیدن تمهیدات لازم به دست آورد. اعضا تیم فنی حفاری می‌توانند با تلفیق نتایج TSP با دیگر روش‌ها (حفر گمانه پیشاهنگ، کنترل روند تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار، بازدید سینه‌کار و...)، شرایط توده‌سنگ‌هایی که به زودی حفاری خواهد شد را با دقت

منابع

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ اول، ۵۸۶ صفحه.
- امینی، ن.، دیکمن، ت.، پروز، ر. و عبدالرزاق‌نژاد، ع.، ۱۳۹۵. پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی در حفاری تونل بلند زاگرس با استفاده از فن‌آوری TSP، چهارمین همایش و نمایشگاه سد و تونل ایران، تهران.
- امینی، ن.، دیکمن، ت.، پروز، ر. و عبدالرزاق‌نژاد، ع.، ۱۳۹۵. پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی سنگ در تونل بلند زاگرس با استفاده از روش TSP، ششمین کنفرانس ملی مکانیک سنگ ایران، تهران.
- پروز، ر.، نادعلی‌زاده، م. و سالاری، ا.، ۱۳۹۶. کاهش ریسک حفاری تونل انتقال آب طویل زاگرس با استفاده از روش TSP، سومین کنفرانس منطقه‌ای و دوازدهمین کنفرانس تونل ایران (تونلسازی و تغییر اقلیم)، تهران.
- 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، صفحات ۱۶۲-۱۵۱.
- جودکی، و. و اجل‌لوئیان، ر. و یزدخواستی، ن.، ۱۳۹۷. مقایسه نتایج برگردان دوبعدی داده‌های مقاومت‌سنجی با شرایط زمین‌شناسی در مسیر حفاری قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود، مجله علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد یازدهم، شماره ۱، صفحات ۶۴-۴۹.
- صادق اسلام، گ.، میکائیل، ر.، شفیعی‌حق‌شناس، س. و علیمرادی، ا.، ۱۳۹۳. پیش‌بینی نواحی مخاطره‌انگیز زمین‌شناسی در تونل‌زنی با استفاده از روش TSP و خوشه‌بندی فازی، پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، تهران.
- Alimoradi, A., Moradzadeh, A., Naderi, R., Zad Salehi, M. and Etemadi, A., 2008. Prediction of geological hazardous zones in front of a tunnel face using TSP-203 and artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 (6), 711-717.
- Bourbie, T., Coussy, O. and Zinszner, B., 1987. *Acoustics of Porous Media*, Translated from the French by Nissim MARSHALL, Gulf Publishing Company. Book Division, Houston, London, Pp.329.

- Chang, P.S. and YU., C.W., 2005. Reliability of geological exploration methods during construction of the Hsuehshan tunnel, World LongTunnels. pp 129-138.
- Dickmann, T., and Sander B.K., 1996. Drivage concurrent Tunnel Seismic Prediction (TSP), Felsbau. 14, 6: 406-411.
- Dickmann, T., 2008. Theoretical and Applied Case Studies of Seismic Imaging in Tunneling, Geomechanics and Tunneling, 5: 436-441.
- Dickmann, T., 2014. The Role of Tunnel Seismic prediction in a Tunnelling projects: best practises. Proceedings of the Fifth Indian Rock Conference, Delhi, India.
- Geotech Co., 2004. TSP 203: Case Histories, Amberg Co., Switzerland, p. 26.
- Hecht-Méndez, J. and Dickmann, T., 2016. 3D-TSP – Advanced geological prediction during tunneling projects in the Andes, xv colombian geotechnical congress & II international specialized conference of soft rocks. cartagena on october 5th -7th 2016.
- Li, S., Li, S., Zhang, Q., Xue, Y., Liu, B., Su, M., Wang, Z. and Wang, S., 2010. Predicting geological hazards during tunnel construction. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2 (3): 232–242.
- Lin, C.J. and Li, S.C., 2014. Tunnel Seismic Prediction (TSP) and its Application in Tunnel Engineering", Applied Mechanics and Materials, Vols. 501-504, pp. 1779-1782.
- 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.
- SCE (Sahel Consultant Engineers), 2015. Geological and Engineering Geological Review of Bazideraz Water Conveyance Tunnel.
- 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.
- Tsai, D.T., Hwang, F.L., Shih, H.M., Kao, S.C., Tseng, J.S. and Shi. L.P., 2005. Application of tunnel Seismic Prediction for the Hsuehshan tunnel, World LongTunnels. pp 171-176.
- 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.