

یادداشت فنی: شرایط و مخاطرات ژئوتکنیکی تونل های بلند شهری در تهران، مطالعه موردی تونل متوسلیان

کریم روشن بخت^۱، کیوان آقاییک^{۲*}، طهمز احمد پور^۳

۱- دکتری مهندسی زمین شناسی، سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، تهران، ایران

چکیده

شناسایی های زمین شناسی مهندسی و برآورد پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر تونل اهمیت زیادی در طراحی و اجرای موفق تونل ها دارند. شناسایی دقیق و کامل این پارامترها در محیط های شهری، با توجه به تشدید اثرات آسیب های ناشی از نشست و ریزش تونل ها اهمیت بیشتری پیدا می کند. شناسایی پارامترها و مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل ها در انتخاب نوع دستگاه حفاری نیز دارای اهمیت می باشند. شناسایی این ویژگی ها، یکی از چالش های مهم در تونل سازی است. تونل متوسلیان به طول حدود ۱۰ کیلومتر در ادامه بزرگراه صیاد از شمال میدان سپاه تا بزرگراه آزادگان پیش بینی شده است که با توجه به امتداد شمال- جنوبی، به لحاظ شرایط زمین شناسی طیف متنوعی از واحدهای زمین شناسی را در برمی گیرد. به همین دلیل تخمین و ارزیابی پارامترهای مذکور پیچیده است. در این مطالعه روش برخورد با این پیچیدگی ها جهت رسیدن به ارزیابی قابل اعتماد از شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی تونل متوسلیان با تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی و شناسایی مخاطرات محتمل در مسیر تونل به عنوان یک تجربه مناسب مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس مسیر تونل با توجه به شرایط زمین شناسی به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی تقسیم شده و ضمن معرفی تیپ های مختلف خاک به لحاظ پارامترهای ژئوتکنیکی، با تلفیق نتایج بررسی های صحرایی و آزمایشگاهی، بازه تغییرات پارامترها در هر تیپ خاک مشخص شده و در نهایت مشخصات مصالح هر تیپ جهت انجام تحلیل ها تعیین شده و همچنین مخاطرات محتمل در نواحی مختلف مسیر تونل بررسی و ارائه شده است.

کلمات کلیدی: تونلسازی شهری، ماشین حفری تونل TBM، پارامترهای ژئوتکنیکی، شرایط زمین شناسی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.78925.1109	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.78925.1109	۱۳۹۷/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۴/۱۷	۱۳۹۶/۰۴/۱۷	۱۳۹۶/۰۳/۲۴	۱۳۹۵/۱۲/۱۴
				*نویسنده مسئول:		کیوان آقاییک
				پست الکترونیکی:		kayvan.aghabayk@ut.ac.ir

Technical note: Geotechnical conditions and hazards of urban tunneling in Tehran, Case Study: Motevaselian Tunnel

Karim Rowshanbakht¹, Kayvan aghabayk^{2*}, Tahmaz ahmadpour³

1- PhD of Engineering Geology, TETCO, Tehran, Iran

2- Assistant prof., School of Civil Engineering, University of Tehran, Iran

3- PhD student of Civil Engineering, TETCO, Tehran, Iran

ABSTRACT

Engineering Geology and geotechnical parameters assessment is of the most important issues in successful tunnel design and construction operation. In urban areas, exact and complete reconnaissance of these parameters and site investigations are more critical as a result of the intensified effect of settlement and failure of the tunnels. Geotechnical parameters and hazards in tunnel route also affect the tunnel boring machine (T.B.M) selection and so they are challenging and very important issues. Shahid Motevaselian tunnel with a length of 10 Km. connects Shahid Sayyad Shirazi highway south wards (from north of Sepah Sq.) to Azadegan highway. There is a high geological diversity in geological units as a result of North- south direction of the tunnel and so it is too complicated to assess the parameters. In this study, as a good experience, the method of dealing with the complexities to achieve a reliable assessment of geological and geotechnical conditions is considered and also the possible hazards in different parts of the tunnel is determined. According to the geological and geotechnical situation, tunnel rout is divided to 3 distinct parts (northern part, middle part and southern part) and introducing the different soil types in terms of Geotechnical parameters, range of different parameters in any soil type is determined by combining the results of field and laboratory investigations, and finally, the material properties of each soil type determined as well as possible hazards likely in different parts of the tunnel route.

ARTICLE INFO

Received: 04/03/2017

Revised: 14/06/2017

Accepted: 08/07/2017

Keywords:

Urban Tunneling

Tunnel Boring Machine (TBM)

Geotechnical Parameters geological condition

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.80788.1138

*Corresponding author: Kayvan Aghabayk.

Email address: kayvan.aghabayk@ut.ac.ir

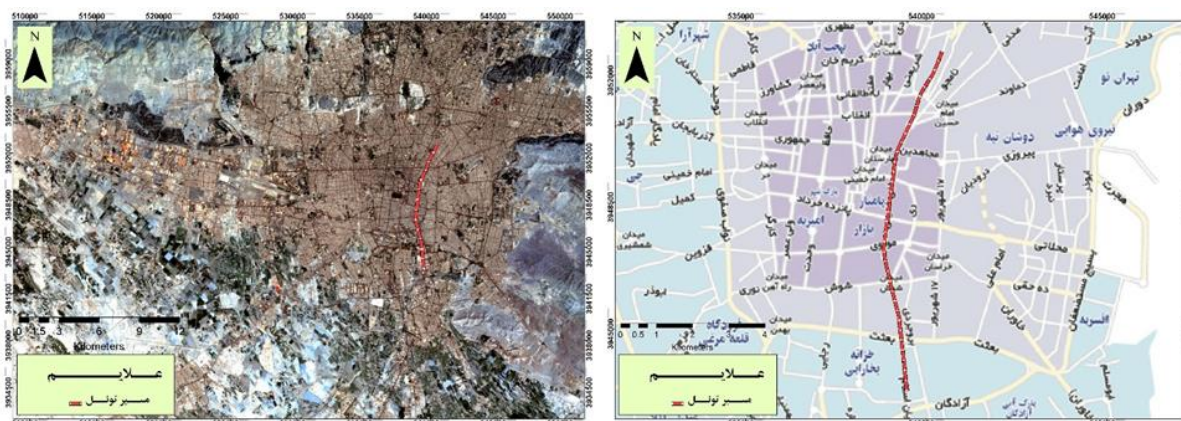
۱- مقدمه

تراکم ترافیک، کمبود فضا و عوامل زیست محیطی موجب ایجاد تقاضا برای استفاده بیشتر از فضاهای زیرزمینی در مناطق شهری است [۱]. با توجه به نیاز به گسترش شبکه‌های مترو و راه‌های ارتباطی، استفاده از روشهای مکانیزه تونلسازی در نواحی شهری اجتناب ناپذیر است و استفاده از روشهای مکانیزه حفاری تونل مستلزم انتخاب ماشین مناسب با در نظر گرفتن شرایط پروژه است [۲ و ۳]. شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی شده در امتداد مسیر تونل برای انتخاب دستگاه اهمیت حیاتی دارند. که اهمیت آن به وضوح در توصیه‌های سازمان‌های بزرگ تخصصی مانند BTS 2005، DAUB 2000 و AFTES 2000 [۴ و ۵] مشاهده می‌شود. برای انتخاب ماشین مناسب باید توانایی‌های ماشین‌های حفاری در زمینهای نرم، دامنه کاربرد و محدودیت‌های خاص هر یک با توجه به شرایط زمین مسیر تونل را در نظر گرفت [۶]. به طور کلی، خواص زمین نرم پیچیده‌تر از سنگ سخت است. در تونل‌های بلند و تونل‌هایی که در مسیرهای با تنوع زیاد شرایط زمین‌شناسی حفر می‌شود، شرایط خاک یکسان نیست. ماشین انتخاب شده باید بر اساس شرایط زمین‌شناسی غالب پروژه طراحی شود ولی در عین حال بایستی توانایی حفاری در شرایط دشوار زمین‌شناسی را نیز داشته باشد [۶]. طراحی‌های ژئوتکنیکی همواره با عدم قطعیت‌هایی روبرو است که این عدم قطعیت‌ها می‌توانند به عدم اطمینان پارامتر و عدم اطمینان مدل طبقه‌بندی شوند. در صورت استفاده از روش طراحی بیان شده در یک کد طراحی، چالش واقعی برای مهندسان ژئوتکنیک چگونگی تعیین مقادیر طراحی برای پارامترهای خاک است. در آنالیزهای ژئوتکنیکی، به دست آوردن داده‌ها از منابع مختلف یک روش معمول برای مهندسان است. علیرغم روش‌هایی که برای ترکیب اطلاعات ارائه شده ولیکن اغلب، ترکیب اطلاعات بر اساس قضاوت مهندسی و تجربه صورت می‌گیرد [۷]. این ابهام بطور خاص در پروژه‌های خطی که طول زیادی داشته و پارامترها تغییرات شدیدتری دارند، جدی بوده و نیاز به تصمیم‌گیری اساسی است. در این خصوص بررسی تجارب مطالعات صورت گرفته و روش برخورد جهت شناسایی و دسته‌بندی مصالح بسیار ارزشمند است. لذا بررسی‌های صورت گرفته به منظور شناسایی ژئوتکنیکی در مسیر تونل متوسلیان در قالب این تحقیق ارائه شده است.

در تونل متوسلیان نظر به طول زیاد پروژه و تنوع زیادی که در مصالح آبرفتی مسیر تونل وجود دارد، سعی شده است ضمن بررسی کلیه مشخصات مهندسی خاک‌های مسیر، دسته‌بندی مناسبی برای خاک‌ها بر اساس مشخصات ژئوتکنیکی آنها با توجه به تجارب و قضاوت مهندسی صورت گیرد. علاوه بر مشخصات مصالح، ریسک‌های ژئوتکنیکی محتمل برای حفاری با TBM در طول مسیر شناسایی و معرفی شده است.

۲- مشخصات طرح

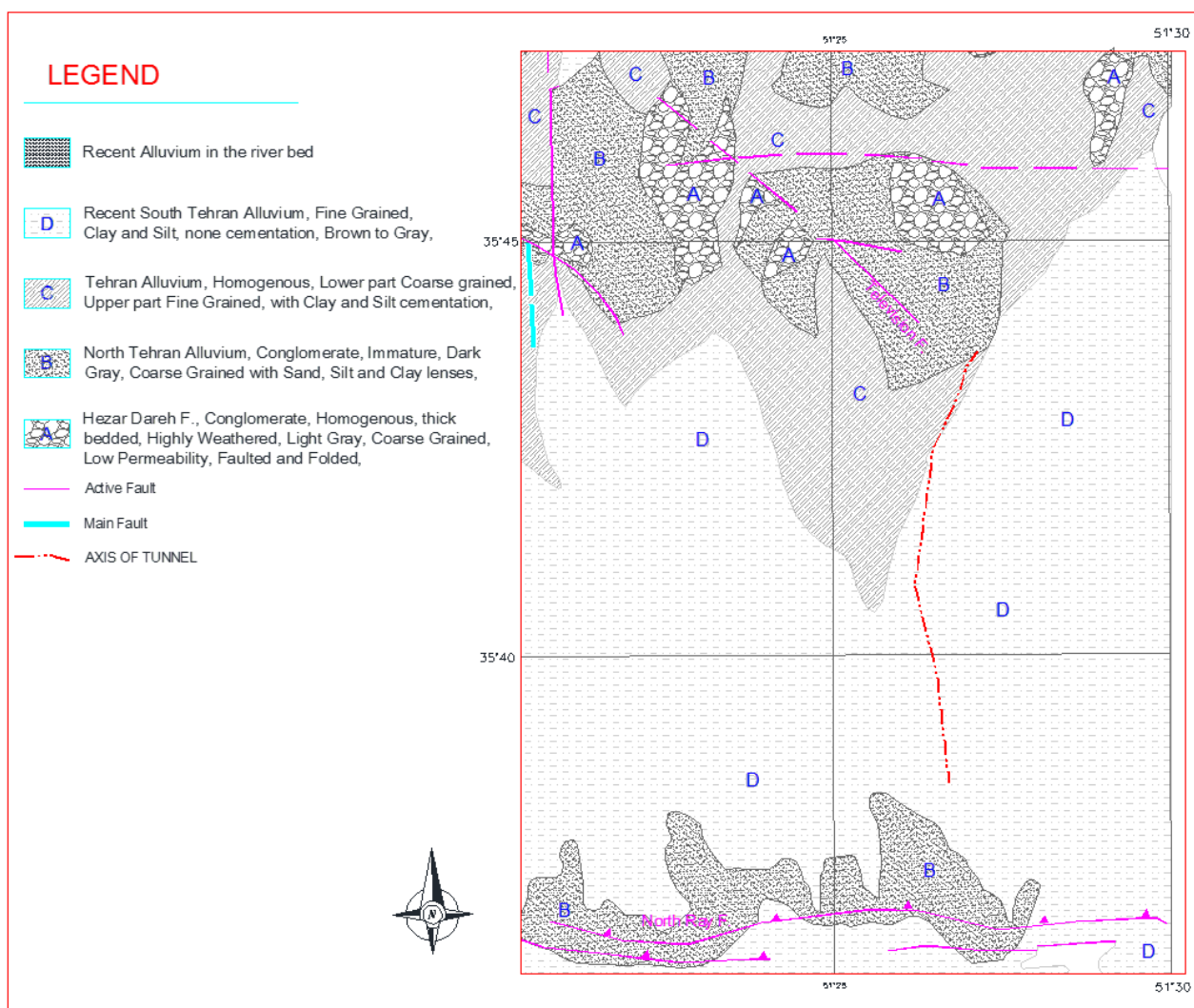
با توجه به اهمیت و نقش ترافیکی بزرگراه شهید صیاد شیرازی که ارتباط‌دهنده مناطق مسکونی شمال شرق تهران با مرکز شهر بوده و در میدان سپاه خاتمه می‌یابد، توسعه و ادامه آن به سمت جنوب به منظور افزایش دسترسی‌ها و بهبود شاخص‌های ترافیکی در این محدوده ضروری است. به این منظور تونل متوسلیان در ادامه بزرگراه صیاد شیرازی به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر از شمال میدان سپاه تا بزرگراه آزادگان پیش‌بینی شده است (شکل ۱). این تونل، یک تونل دوطبقه با دو خط عبور در هر طبقه (قطر حفاری ۱۳/۰۴ و قطر داخلی ۱۱/۶۴ متر) است که در عمق حداکثر ۴۰ متری و با کمک TBM حفاری خواهد گردید.



شکل ۱: موقعیت تونل متوسلیان (الف) در شهر تهران و (ب) روی نقشه خیابانهای محدوده.

پروژه در محدوده شهر تهران و روی نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم بنا شده است. این آبرفت‌ها توسط سیلاب‌هایی که در اواخر دوران سوم و همزمان با برپایی ارتفاعات البرز از آنها سرچشمه گرفته‌اند، در نواحی دامنه‌ای و پست برجای گذاشته شده است. بر اساس طبقه‌بندی ریبن (۱۹۵۵) رسوبات آبرفتی تهران از قدیم به جدید به چهار دسته A، B، C و D رده‌بندی شده‌اند. مطابق نقشه زمین شناسی محدوده، مسیر تونل در محدوده سازندهای C و D آبرفت تهران واقع شده است به نحوی که بخش شمالی آن در محدوده گسترش آبرفت C و بیشتر طول مسیر در بخش جنوبی، در محدوده آبرفت سازند D قرار گرفته است. سازند C شامل آبرفت‌های جوان مخروط افکنه‌ای است که از دامنه جنوبی کوه البرز به سمت جنوب ادامه داشته، بخشی از دشت را در بر گرفته و بخش گسترده‌ای از شهر تهران بر روی آن بنا گردیده است. این سازند بطور کلی از نهشته‌های سیلابی و رودخانه‌ای جور نشده تشکیل می‌گردد. سازند C در نزدیکی کوهپایه‌ها شکل مخروط افکنه واضحی داشته و به سمت جنوب تبدیل به لایه‌های سیلتی کم‌شیب می‌شود. از دیدگاه مقاومت مکانیکی، این سازند عموماً دارای مقاومت نسبی بالا بوده و پتانسیل ذخیره آب را دارد.

آبرفت‌های سازند D متشکل از جوانترین نهشته‌های رودخانه‌ای و یا سیلابی بوده و در بستر رودخانه‌ها، مسیل‌ها و یا پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌های جوان بر جای گذاشته شده است. دشت جنوب تهران عمدتاً از این رسوبات پوشیده شده است. در جنوب تهران، این سازند از رسوبات ریزدانه سیلتی - رسی تشکیل شده است. مقاومت مکانیکی واحدهای این سازند بسیار متغیر است.



شکل ۲: نقشه زمین شناسی محدوده تونل.

۳- شناسایی ژئوتکنیکی مسیر تونل

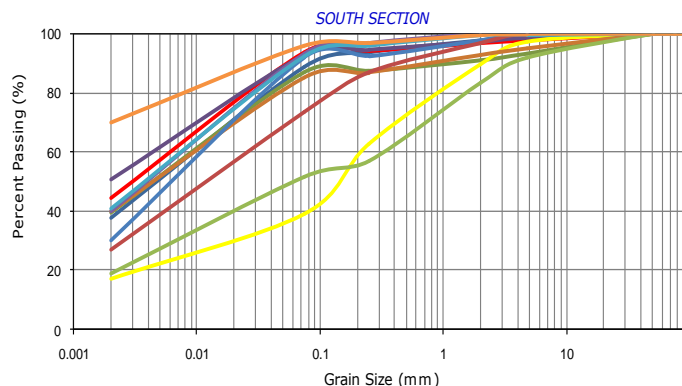
به منظور شناسایی ژئوتکنیکی مسیر، ۱۴ گمانه شناسایی به عمق‌های ۵۰ تا ۵۵ متر و ۱۴ چاهک شناسایی به عمق‌های ۳۵ تا ۶۰ متر حفر شده و آزمایشات صحرائی شامل پرسیومتری (PMT)، نفوذ استاندارد (SPT)، نفوذپذیری لوفران، دانسیته در محل و اندازه‌گیری سرعت موج برشی صورت گرفته و ضمن اندازه‌گیری سطح آب، نمونه برداری جهت آزمایشات آزمایشگاهی نیز صورت گرفته است. روی نمونه‌های اخذ شده، آزمایشات آزمایشگاهی (دانه بندی، برش مستقیم، سه محوری، تک محوری، تحکیم و نفوذپذیری) انجام شده است.

۳-۱- توصیف لایه های خاک در مسیر تونل متوسلیان

بر اساس نتایج بررسی‌های ژئوتکنیکی، بطور کلی واحدهای خاکی در برگیرنده مسیر تونل از لحاظ جنس مصالح تغییرات بسیاری داشته و از لحاظ زمین‌شناسی مهندسی، مسیر تونل به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی قابل تقسیم است که در ادامه ویژگی‌های آنها بطور خلاصه توضیح داده می‌شود.

۳-۱-۱- بخش جنوبی (حد فاصل بزرگراه آزادگان تا میدان شوش)

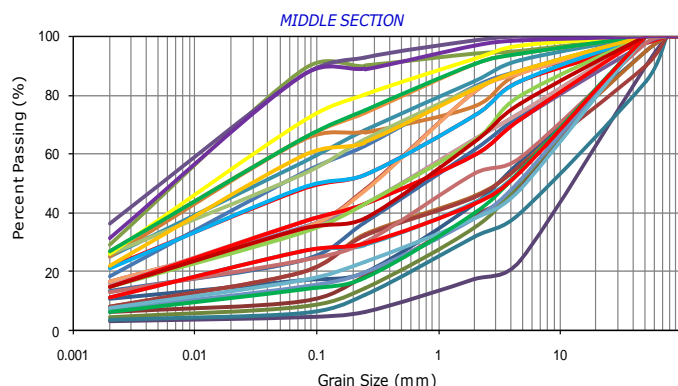
بخش جنوبی مسیر از شمال بزرگراه آزادگان تا میدان شوش ادامه دارد. این بخش اساساً از مصالح ریزدانه تشکیل شده که جنس آنها غالباً رس (CL) بوده و در آن لندهایی ماسه‌ای و سیلتی (SC و ML) دیده می‌شود البته در نواحی شمالی تر در اعماق بیشتر مصالح شنی (GC) نیز مشاهده شده است. منحنی دانه بندی مصالح این بخش در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: منحنی دانه بندی مصالح تشکیل دهنده جبهه کار تونل تونل در بخش جنوبی

۳-۱-۲- بخش میانی (حدفاصل میدان شوش تا چهارراه سرچشمه)

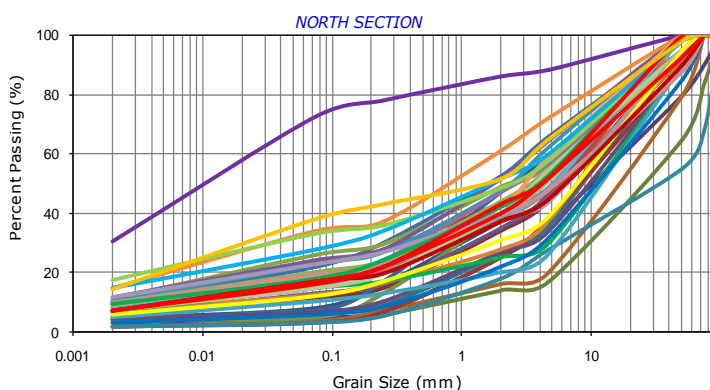
بخش میانی که از قسمت‌های جنوبی میدان شوش شروع و تا چهار راه سرچشمه ادامه دارد. این بخش در واقع ناحیه انتقال از مصالح ریزدانه جنوب به مصالح درشت‌دانه در شمال مسیر است و مجموعه‌ای از لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه در آن مشاهده گردیده است. بطور کلی در این بخش از مسیر تونل، رسوبات ماسه‌ای و سیلتی (SM و SC) در مقایسه با دیگر واحدهای خاکی گسترش بیشتری دارند. در قسمت جنوبی این بخش، ضخامت قابل توجهی از مصالح ریزدانه با جنس رس (CL) بر روی مصالح درشت‌دانه (پائین تر از عمق ۲۰ متر) قرار دارند. به سمت شمال این بخش، بر میزان مصالح ماسه‌ای افزوده شده و از میزان حضور لایه‌های رسی کمتر می‌گردد و همچنین لایه‌های شنی با ضخامت ۳ تا ۵ متر نیز در پروفیل ظاهر می‌شوند. به سمت چهار راه سرچشمه بر ضخامت لایه‌های شنی افزوده شده و مصالح شنی جنس غالب مصالح را تشکیل می‌دهند. به هر حال در این بخش از مسیر تونل، رسوبات ماسه‌ریسی و ماسه سیلتی (SC و SM) در مقایسه با واحدهای خاکی دیگر گسترش بیشتری دارند. منحنی دانه بندی مصالح این بخش در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: منحنی دانه بندی مصالح تشکیل دهنده جبهه کار تونل تونل در بخش میانی

۳-۱-۳- بخش شمالی (حداصل چهار راه سرچشمه تا جنوب پل شیخ صفی)

این بخش از نزدیکی چهار راه سرچشمه شروع شده و تا ابتدای مسیر (بالاتر از میدان سپاه و جنوب پل شیخ صفی) ادامه می‌یابد. جنس غالب مصالح در این بازه خاکهای درشت‌دانه (شنی و ماسه ای) است که نوع خاک درشت‌دانه آن نیز از ابتدای مسیر تا چهار راه سرچشمه تغییر می‌کند. در ابتدای مسیر مصالح درشت‌دانه بوده و از لایه‌های ضخیم شن رسی (GC) و شن سیلتی (GM) تشکیل شده است که با حرکت به سمت جنوب لایه‌هایی از جنس SC با ضخامت دیده شده است. منحنی دانه‌بندی مصالح این بخش در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی مصالح تشکیل دهنده جبهه کار تونل تونل در بخش جنوبی

۴- ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی

۴-۱- شناسایی تیپ‌های مختلف خاک به لحاظ پارامترهای ژئوتکنیکی در مسیر تونل

با توجه به اینکه بررسی اطلاعات گمانه‌ها حاکی از وجود تیپ‌های مختلفی از خاک در مسیر تونل می‌باشد، به منظور امکان بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی واحدهای مختلف محدوده مورد مطالعه، خاکها به تیپ‌های مختلفی تقسیم‌بندی شده‌اند. هر تیپ خاک شامل واحدهایی از خاک است که مشخصات فیزیکی و مکانیکی (پارامترهای تغییر شکلی و مقاومتی) مشابهی دارند. بر این اساس در وهله اول با مینا قراردادن دانه‌بندی و عدد نفوذ استاندارد (SPT) بدست آمده برای لایه‌های مختلف خاک، ۱۱ تیپ مختلف از خاک تعریف شده که در جدول (۱) دیده می‌شود. این ۱۱ تیپ عبارتند از: چهار تیپ خاک برای رس (از سست تا مقاوم)، سه تیپ برای ماسه (از سست تا مقاوم)، سه تیپ برای شن (از سست تا مقاوم) و یک تیپ برای لای.

جدول ۱: تیپ بندی خاکهای مختلف در مسیر تونل بر مبنای بررسی لاگ‌های گمانه‌ها و چاهک‌ها

No.	Description	N _{spt}
1	Clay Type 1(Hard)	>40
2	Clay Type 2 (Very Stiff)	>20
3	Clay Type 3 (Stiff)	>10
4	Clay Type 4 (Firm)	>5
5	Sand Type 1 (Very Dense)	>42
6	Sand Type 2 (Dense)	>25
7	Sand Type 3 (Medium)	>8
8	Gravel Type 1 (Very Dense)	>42
9	Gravel Type 2 (Dense)	>25
10	Gravel Type 3 (Medium Dense)	>8
11	Silt (Medium Dense)	

در گام بعد سعی شده تا وضعیت سایر پارامترهای ژئوتکنیکی و تغییرات آنها در این تیپ‌های معرفی شده، مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور وضعیت پارامترهای ژئوتکنیکی مشتمل بر پارامترهای صحرایی و آزمونهای آزمایشگاهی در تیپ‌های مختلف بررسی و محدوده پارامترهای منتسب به این تیپ‌ها تدقیق شده و اصلاحات احتمالی در تیپ‌بندی صورت گرفته است.

انتخاب متغیرهای ژئوتکنیکی مربوط به هر کدام از تیپ‌های خاک با استفاده از نتایج آزمایشات صحرایی (PMT، SPT، لفران) و آزمایشات آزمایشگاهی (دانه بندی، برش مستقیم، سه محوری، تک محوری، تحکیم و نفوذپذیری) به صورت جداگانه صورت گرفته است که خروجی این قسمت در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به توضیح است که از نتایج آزمایشات آزمایشگاهی به طور مستقیم می‌توان متغیرهای ژئوتکنیکی مربوط به هر تیپ را مشخص کرد. تعیین متغیرهای ژئوتکنیکی با استفاده از خروجی آزمایشات صحرایی نیاز به استفاده از روابط همبستگی دارد. در این خصوص از آیین‌نامه‌ها و کدهای معتبر مربوط به هر آزمایش که در ذیل جدول مورد اشاره قرار گرفته و در لیست مراجع آمده است، استفاده شده است.

جدول ۲: تیپ تیپ بندی اولیه انواع خاک ها براساس نتایج آزمایشگاهی و صحرایی

تیپ خاک	N _{sp} ^(۱)	توصیف خاک ^(۲)	PI ^(۱)	دانسیتته ^(۳)		پارامترهای مقاومتی از برش مستقیم و سه محوری ^(۱)		پارامترهای مقاومتی و تغییر شکلی از آزمایش SPT		
				خشک	اشباع	C'	Φ°	Φ°	E _s ^(۵)	C _u ^(۲)
				(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kPa)	(Deg.)	(Deg.)	(MPa)	(kPa)
Clay Type 1 (C1)	>40	HARD	13	19	20	-	-	-	60	200
Clay Type 2 (C2)	>20	Very Stiff	15	17	19	-	-	-	38	160
Clay Type 3 (C3)	>10	Stiff	14	16	18	-	-	-	23	120
Clay Type 4 (C4)	>5	Firm	14	14	16	-	-	-	12	50
Sand Type 1 (S1)	>42	Very Dense	-	21	22	12	35	41	147	-
Sand Type 2 (S2)	>25	Dense	-	19	21	4	36	38	122	-
Sand Type 3 (S3)	>8	Medium	-	17	20	12	34	33	77	-
Gravel Type1 (G1)	>42	Very Dense	-	21	22	13	35-42	>43	200	-
Gravel Type 2 (G2)	>25	Dense	-	19	21	0	35-40	39	126	-
Gravel Type 3 (G3)	>8	Medium Dense	-	17	20	-	-	34	90	-
Silt (M)	>8	Medium Dense	8	17	20	-	-	24	20	-

ادامه جدول ۲: تیپ تیپ بندی اولیه انواع خاک ها براساس نتایج آزمایشگاهی و صحرایی

تیپ خاک	پارامترهای آزمایش پرسیمتری ^(۴)		پارامترهای تحکیم				ضریب نفوذ پذیری			ضریب رانش حالت سکون	
	Φ'	E _s	از تحکیم ^(۱)		از روابط تجربی ^(۶)		لفران ^(۱)	از آزمایشگاه ^(۱)	روابط تجربی ^(۷)		پواسون
	(Deg.)	(Mpa)	C _c	C _s	C _c	C _s	K (m/sec)			(۸)ν	K _v ^(۹)
Clay Type 1 (C1)	-	43	-	-	0.18	0.018	7×10 ⁻⁸	8×10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ to 5×10 ⁻⁸		
Clay Type 2 (C2)	-	43	0.2	0.04	0.2	0.02	2×10 ⁻⁷	4.7×10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ to 5×10 ⁻⁸	.37	0.6
Clay Type 3 (C3)	-	30	-	-	0.2	0.02	-	-	10 ⁻⁵ to 5×10 ⁻⁸		
Clay Type 4 (C4)	-	12	-	-	0.2	0.02	-	-	10 ⁻⁵ to 5×10 ⁻⁸		
Sand Type 1 (S1)	>40	213	-	-	-	-	1×10 ⁻⁶	2×10 ⁻²	5×10 ⁻⁴ to 10 ⁻⁶		.49
Sand Type 2 (S2)	40	102	-	-	-	-	7×10 ⁻⁶	2.6×10 ⁻³	5×10 ⁻⁴ to 10 ⁻⁶		.56
Sand Type 3 (S3)	38	40	-	-	-	-	5×10 ⁻⁷	-	5×10 ⁻⁴ to 10 ⁻⁶	.33	.38
Gravel Type1 (G1)	>40	387	-	-	-	-	3×10 ⁻⁶	8.3×10 ⁻²	10 ⁻³ to 5×10 ⁻⁴		.44
Gravel Type 2 (G2)	>40	230	-	-	-	-	4×10 ⁻⁶	-	10 ⁻³ to 5×10 ⁻⁴		.44
Gravel Type 3 (G3)	-	-	-	-	-	-	1×10 ⁻⁴	-	10 ⁻³ to 5×10 ⁻⁴		.44
Silt (M)	-	89	-	-	-	-	6×10 ⁻⁸	-	10 ⁻⁵ to 5×10 ⁻⁸	.35	0.6

(۱) گزارش نهایی عملیات ژئوتکنیک مهندسی مشاور ساحل، (شهریور ۸۹)، [۸].

(2) Look, 2007, [۹]. (Table 5.3, 5.4, and 5.5, p.p: 54-55),

(3) Look, 2007, [۹]. (Table 7.3, p.p: 78)

(۴) سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. دفتر امور فنی و تدوین معیارها، (۱۳۸۰)، " دستورالعمل آزمایشهای پرسیمتری "، [۱۰]. (صفحه ۳۵ تا ۳۸)

(5) Look, 2007, [۹]. (Table 11.15, p.p: 131)

(6) Bowels, J.E., 1996, [۱۱]. pp: 88-89

- (7) Cashman, P.M. and Preene, M., 2003, [۱۲]. John Wiley & Sons Publication, Hoboken, New Jersey
 (8) Look, 2007, [۹]. (Table 11.17, p.p: 132)
 (9) Look, 2007, [۹]. (Table 19.3, p.p: 243),

۲-۴- پیشنهاد متغیرهای ژئوتکنیکی برای تیپ‌های خاک و ارائه پروفیل طراحی

متغیرهای ژئوتکنیکی نهایی برای هر تیپ خاک با استفاده از میانگین‌گیری وزنی بین متغیرهای ژئوتکنیکی حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی و آزمایشات صحرایی، تحلیل آنها و قضاوت مهندسی بر اساس اعتبار نتایج آزمایشات، مقایسه با تجربیات قبلی و نحوه تاثیر بر تحلیل‌ها، بدست آمده و پارامترهای مورد نظر براساس مدل رفتاری موهر کلمب انتخاب شده و در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تونل تهیه و در شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۳: تیپ تیپ‌بندی اولیه انواع خاک‌ها براساس نتایج آزمایشگاهی و صحرایی

No	Description	N _{spt}	γ_d	γ_{sat}	C'	Φ'	C _u	E	C _c	C _s	k (m/sec)	v	K _o
			(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kPa)	(Deg.)	(kPa)	(MPa)					
1	Clay Type 1(Hard)	>40	19	20	-	-	200	50					
2	Clay Type 2 (Very Stiff)	>20	17	19	-	-	160	40					
3	Clay Type 3 (Stiff)	>10	16	18	-	-	120	24	0.2	.02	10 ⁻⁷	.37	0.6
4	Clay Type 4(Firm)	>5	14	16	-	-	50	12					
5	Sand Type 1(Very Dense)	>42	21	22	4	38	-	150	-	-			.49
6	Sand Type 2(Dense)	>25	19	21	4	36	-	100	-	-	2×10 ⁻⁵		
7	Sand Type 3(Medium)	>8	17	20	4	32	-	70	-	-			.56
8	Gravel Type 1 (Very Dense)	>42	21	22	6	40	--	200	-	-		.33	.38
9	Gravel Type 2(Dense)	>25	19	21	6	38	-	120	-	-	2×10 ⁻⁴		
10	Gravel Type 3(Medium Dense)	>8	17	20	6	34	-	90	-	-			.44
11	Silt (Medium Dense)	>8	17	20	4	24	-	20	-	-	10 ⁻⁷	.35	0.6

۴-۳- وضعیت آب زیرزمینی

نتایج حاصل از برداشت سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده طی مطالعات ژئوتکنیک، حاکی از کاهش عمق سطح آب زیرزمینی در طول مسیر از شمال به جنوب است. در قسمت‌های شمالی مسیر با عمق حفاری ۵۰ متر، سطح آب زیر زمینی دیده نشده است. به سمت جنوب مسیر عمق سطح آب به تدریج کم شده و به ۹ متر می‌رسد. سطح آب زیرزمینی در پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تونل نمایش داده شده است.

۵- مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل متوسلیان

مخاطرات ژئوتکنیکی موجود در مسیر تونل متوسلیان، شامل تراوش آب به درون تونل، ناپایداری جبهه کار در حین حفاری، ماسه سست اشباع شده، خاکهای متورم شونده، جمع شدگی جدار تونل، جبهه کار مختلط، روانگرایی، وجود تخته سنگ یا بولدر و وجود فروچاله‌ها است. وجود یا عدم وجود هر یک از این مخاطرات در طول مسیر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در نقشه برش ژئوتکنیکی مسیر تونل با هاشور در طول مسیر نمایش داده شده است (شکل ۶).

با توجه به اینکه مسیر تونل از لحاظ زمین‌شناسی به سه بخش شمالی، بخش میانی و بخش جنوبی تقسیم شده است، بررسی مخاطرات نیز در این سه بخش ارائه می‌گردد که در ادامه هر یک از آنها بطور خلاصه توضیح داده شده است.

۱-۲-۵- مخاطرات ژئوتکنیکی بخش جنوبی (حد فاصل بزرگراه آزادگان تا میدان شوش)

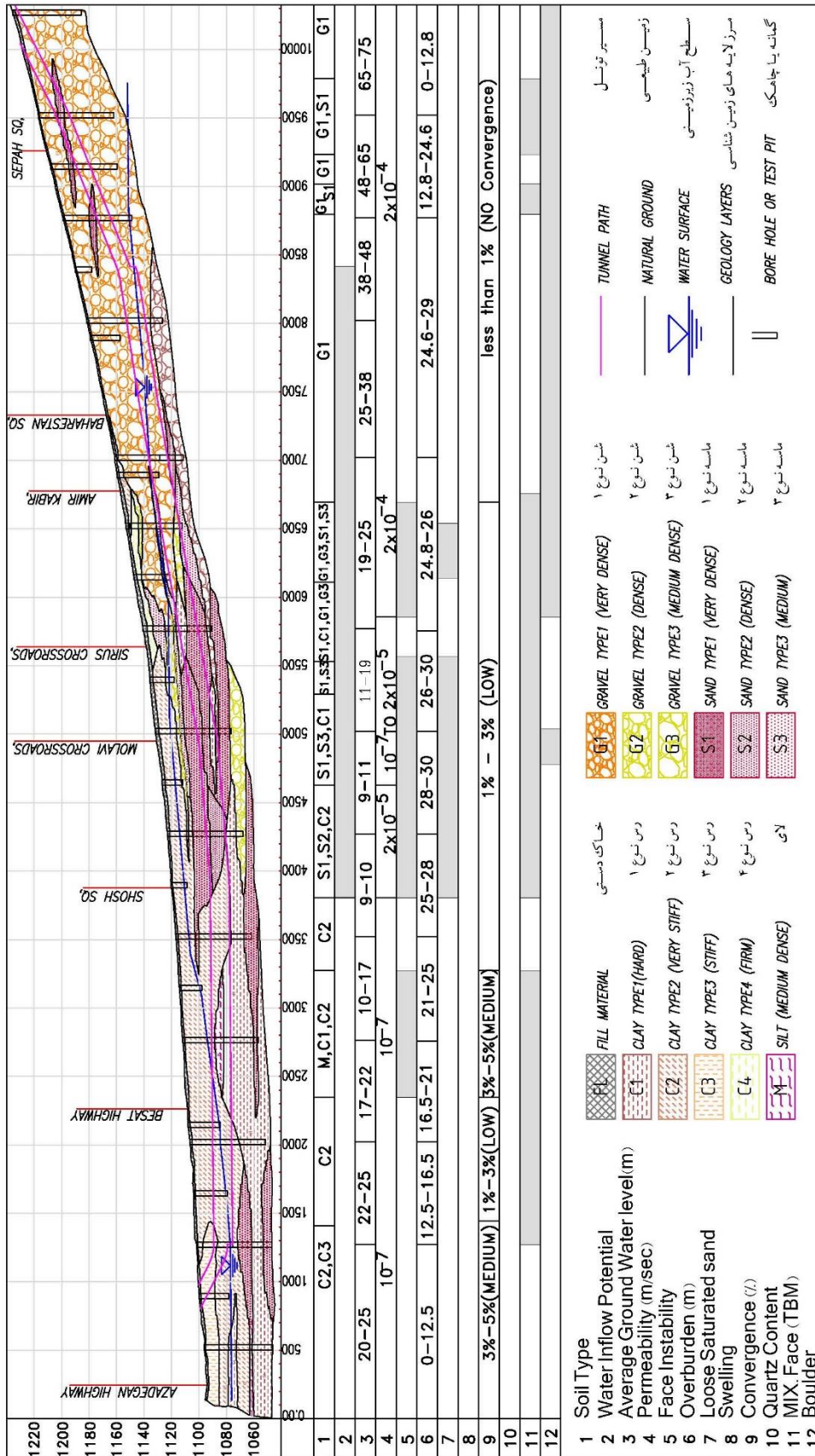
مخاطرات ژئوتکنیکی در این بخش شامل موارد ذیل می‌باشد:

- ناپایداری جبهه کار (Face Instability)
 - جمع شدگی جدار تونل (Convergence)
 - جبهه کار مختلط (Mixed face)
 - خطر وجود فروچاله
- در نواحی شمالی این بخش
در تمام این بخش با پتانسیل متوسط
در بسیاری از طول مسیر این بخش
در این بخش تعداد کمی کانال زیر سطحی و قنات وجود دارد بافت خاک هم ریزدانه است و سطح آب نیز در حدود ۲۰ متری است. لذا این بخش دارای خطر متوسط ایجاد فروچاله است.

۲-۲-۵- مخاطرات ژئوتکنیکی بخش میانی (حد فاصل میدان شوش تا چهارراه سرچشمه)

مخاطرات ژئوتکنیکی در این بخش شامل موارد ذیل می‌باشد:

- تراوش آب به تونل (Water Flow Potential)
 - ناپایداری جبهه کار (Face Instability)
 - ماسه سست اشباع (Loose Saturated Sand)
 - جمع شدگی جدار تونل (Convergence)
 - جبهه کار مختلط (Mixed face)
 - خطر وجود تخته سنگ (Boulder)
 - خطر وجود فروچاله
- در تمام طول مسیر این بخش
در تمام طول مسیر این بخش
در تمام طول مسیر این بخش
در تمام طول مسیر این بخش با پتانسیل کم
در تمام طول مسیر این بخش
در قسمتی از طول مسیر در این بخش
در این بخش بیشترین تعداد کانال زیر سطحی و قنات (سه رشته قنات و چهار رشته کانال) وجود دارد. همچنین سطح آب زیر زمینی تقریباً بالاست و بافت این بخش هم حاوی خاک ریزدانه می‌باشد. لذا این بخش دارای بیشترین خطرات ایجاد فروچاله است.



شکل ۶: پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تونل

۳-۲-۵- مخاطرات ژئوتکنیکی بخش شمالی (حداصل چهار راه سرچشمه تا جنوب پل شیخ صفی)

مخاطرات ژئوتکنیکی در این بخش شامل موارد ذیل می باشد:

- تراوش آب به تونل (Water Flow Potential)
 - ناپایداری جبهه کار (Face Instability)
 - ماسه سست اشباع (Loose Saturated Sand)
 - جمع شدگی جدار تونل (Convergence)
 - جبهه کار مختلط (Mixed face)
 - خطر وجود تخته سنگ (Boulder)
 - خطر وجود فروچاله
- در تمام طول مسیر این بخش
در نواحی جنوبی این بخش
در نواحی جنوبی این بخش
در نواحی جنوبی این بخش با پتانسیل کم
در نواحی جنوبی این بخش
در تمام طول مسیر در این بخش
در این بخش شش رشته قنات و دو رشته کانال وجود دارد.
ولی بدلیل آنکه خاک این منطقه اغلب درشتدانه و سطح
آب زیر زمینی هم پایین است، این بخش دارای خطر کم
ایجاد فروچاله می باشد.

۶- نتیجه گیری

بر اساس شناسایی‌های ژئوتکنیکی که شامل حفر ۱۴ گمانه، ۱۴ چاهک و آزمونهای صحرایی و آزمایشگاهی مربوطه می‌باشد، لایه‌بندی زمین توصیف شده و با توجه به آن، خاک‌های مسیر به ۱۱ تیپ کلی تقسیم گردید. سپس پارامترهای فیزیکی و مقاومتی هر تیپ خاک، به تفکیک بر مبنای نتایج آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی تعیین شده و پارامترهای منتسب به هر تیپ خاک مورد قضاوت مهندسی قرار گرفته و پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تهیه شده است. بر این اساس بخش جنوبی مسیر از شمال بزرگراه آزادگان تا میدان شوش عمدتاً از مصالح ریزدانه تشکیل شده است. بخش میانی که از قسمت‌های جنوبی میدان شوش شروع و تا چهار راه سرچشمه ادامه دارد، ناحیه انتقال از مصالح ریزدانه جنوب به مصالح درشت دانه در شمال مسیر بوده و رسوبات ماسه‌ای و سیلتی غالب است. در بخش‌های شمالی مسیر عمدتاً خاک‌های درشت‌دانه شنی و ماسه‌ای وجود دارند. در نهایت جهت تکمیل اطلاعات مورد نیاز جهت انتخاب TBM، مخاطرات محتمل در مسیر تونل شناسایی شده و موقعیت آنها در پروفیل ژئوتکنیکی مسیر ارائه شده است. مشاهده می‌شود در بخش‌های جنوبی بیشترین مخاطرات مربوط به پتانسیل جمع شدگی جدار تونل است. احتمال تراوش آب بداخل تونل، وجود ماسه‌های سست و اشباع و ناپایداری سینه کار در بخش میانی غالب بوده و احتمال برخورد با بولدر در بخش‌های شمالی مسیر وجود دارد.

سپاسگزاری

از سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران در کسوت کارفرمای طرح و شرکت مهندسی مشاور هندسه پارس بعنوان مشاور طرح که اطلاعات لازم برای این تحقیق را فراهم نمودند صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

- [1] Anagnostou, G. and Rizos, D. (2009). Geotechnical and contractual aspects of urban tunneling with closed shields. In: *ITA-AITES World Tunnel Congress: Safe Tunelling for the City and Environment*. City: Budapest, Hungary.
- [2] Jerome B. O'Carroll, (2005). *A Guide to Planning, Constructing, and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling*. Parsons Brinckerhoff Inc, 146 pages .

- [3] BTS, British Tunnelling Society in association with the Institution of Civil Engineers. (2005). *Closed-Face Tunnelling Machines and Ground Stability: A guideline for best practice*. Thomas Telford Ltd, London, 77 Pages.
- [4] DAUB, ÖGG & FGU (2000). *Recommendations for Design and Operation of Shield Machines*. Tunnel, 6/00, 54-76.
- [5] AFTES, French National Tunnelling Association, (2005). *Choosing mechanized tunnelling techniques*. Paris.
- [6] Zhang, J., Boothroyd, p., Calvello, M., Eddleston, M., Canavate, A., Iason, P., Luo, Z., Najjar, S., Rodriguez, A., Straub, D., Uzielli, M. and Wang, Y. (2016). Bayesian Method: A Natural Tool for Processing Geotechnical Information. TC304 Working Group on "Discussion of statistical/reliability methods for Eurocodes".
- [7] Sahel Consulting Engineers. (2010). *Final Report*, Engineering services for 1st phase of geotechnical studies of Sayyad Shirazi tunnel. Tehran.
- [8] G. Look, B. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, Taylor & Franklin Publication, the Netherland.
- [9] Management and Planning Organization. (2000). *Guidelines for pressuremeter tests (in geotechnical studies)*. Technical Office, First Edition, Tehran.
- [10] Cashman, P.M. and Preene, M., (2003). *Groundwater Lowering in Construction*, John Wiley & Sons Publication, Hoboken, New Jersey.
- [11] Bowels, J.E., (1996). *Foundation Analysis and design*, 5th edition, McGraw-Hill Publication.