tuse.shahroodut.ac.ir

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

دوره‌ی ۲- شماره‌ی ۲/زمستان ۱۳۹۲

انتخاب مناسب‌ترین مجموعه‌ی بهسازی خاک در حفاری مکانیزه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران

حسن بخشنده امنیه[۱]؛ محمد صابر زمزم[۲]؛ سید احسان موسوی[۳]؛ صادق طریق ازلی[۴]

۱- دانشیار؛ گروه معدن؛ دانشکده‌ی مهندسی؛ دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی دکترای تخصصی؛ گرایش استخراج؛ دانشکده‌ی مهندسی؛ دانشگاه کاشان

۳- کارشناس فنی تونل خط ۷ متروی تهران، قطعه‌ی شرقی-غربی؛ گروه تخصصی سپاسد

۴- دانشجوی دکترای تخصصی زمین‌شناسی مهندسی؛ دانشکده‌ی علوم؛ دانشگاه فردوسی مشهد

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی

سپر فشار تعادلی زمین

بهسازی خاک

نسبت تزریق فوم

نسبت انبساط فوم

غلظت ماده‌ی کف‌ساز

نسبت تزریق پلیمر

چکیده

امروزه از تونلسازی سپری در مقیاس گسترده برای حفر تونل‌های شهری در خاک‌های نرم و کم‌عمق استفاده می‌شود. تونل‌زنی با *EPB* نیازمند بهسازی خاک است و قابلیت اجرای آن برای خاک‌های فاقد چسبندگی نیز افزایش یافته است. انتخاب مناسب‌ترین مجموعه‌ی بهسازی نیاز به بررسی‌های دقیقی دارد تا بتوان مشخصات خاک بهسازی شده را تعیین و داده‌های قابل اندازه‌گیری را مشخص نمود. انتخاب استراتژی مناسب برای بهسازی خاک در حین حفاری، شناسایی مخاطرات زمین را پر اهمیت جلوه می‌دهد تا با اطمینان بیش‌تر، تصمیمات مورد نیاز برای انتخاب نوع رفتار فیزیکی فوم و دیگر افزودنی‌ها گرفته شود. دراین پژوهش، انتخاب پارامترهای بهسازی با توجه به بررسی‌های تئوری، آزمایشگاهی و میدانی صورت گرفته است. به منظور بهسازی خاک از سه نوع فوم متفاوت (*A*، *B*، *C*) استفاده شده که در آن فوم *B* (برای اهداف معمولی با پایداری متوسط) بیش‌ترین طول مسیر تونل خط ۷ متروی تهران را پوشش داده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد هر واحد خاکی با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، نیاز به افزودنی‌های خاصی دارد و پارامترهای بهسازی برای هریک از آن‌ها متفاوت است. همچنین نتایج حاصل از مطالعات تئوری با نتایج مشاهدات میدانی بسیار به هم نزدیک بوده، ولی با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی متفاوت است. بهسازی مناسب خاک مسیر تونل موجب کاهش گشتاور، سایش، چسبندگی و نفوذپذیری شده و بهبود کنترل خاک را به همراه دارد.

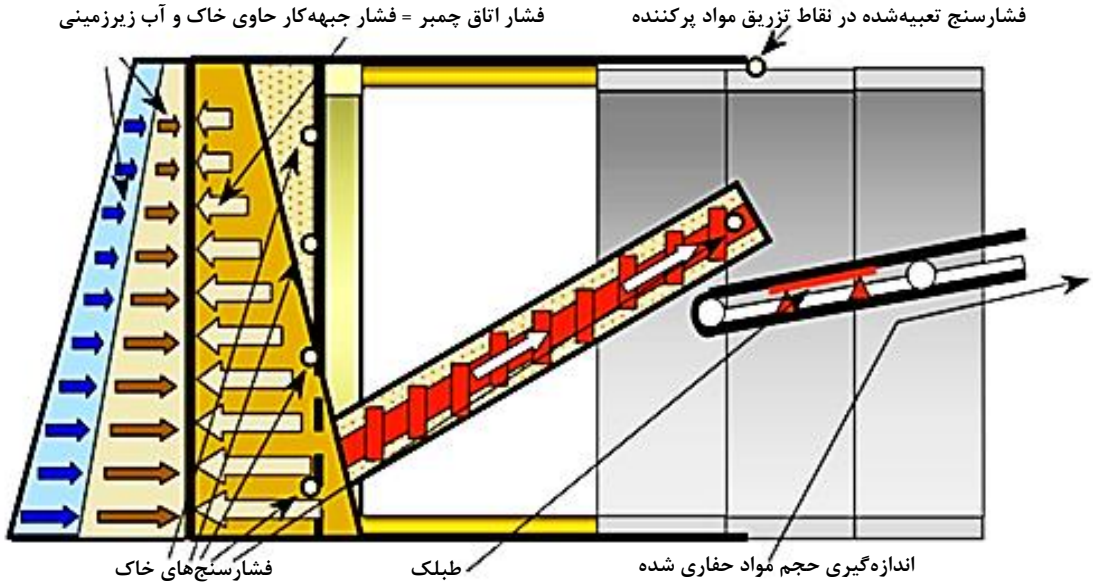
۱- پیشگفتار

در سال‌های اخیر احداث فضاهای زیرزمینی با استفاده از تونلسازی، به طور چشمگیری در نواحی شهری به علت نیاز به احداث زیربناهای حساس و کمبود فضا در سطح افزایش یافته است. امروزه در نقاط پرجمعیت سعی می‌شود هیچ‌گونه همگرایی در محیط اطراف سازه‌ی زیرزمینی به وجود نیاید. یکی از تکنیک‌های مهار همگرایی نامتوازن تونل‌ها و کاهش تغییر شکل‌های غیرمجاز در سطح زمین، بکارگیری تونلسازی سپری است. تونلسازی با سپر *EPB* برای اولین بار در دهه‌ی ۱۹۷۰ در ژاپن بکار برده شد و امروزه در محیط‌های خاکی، به دلیل ایمنی بالا، توانایی پیشگیری از جابجایی و همگرایی زیاد تونل و پیشرفت سریع بخش‌های مکانیکی و الکترونیکی دستگاه، بکارگیری این ماشین‌ها بسیار متداول شده است. در این میان، بهسازی

* اصفهان؛ کاشان؛ کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی؛ دانشگاه کاشان؛ دانشکده‌ی مهندسی؛ گروه معدن؛ کدپستی: ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷؛ شماره‌ی تلفن: ۵۹۱۲۱۳۱-۰۳۶۱؛ داخلی: ۲۱۳۱؛ دورنگار: ۵۵۱۳۱۱۰-۰۳۶۱؛ رایانامه: bakhshandeh@kashanu.ac.ir

خاک یک عامل کلیدی برای حفاری موفقیت‌آمیز تونل در محدوده‌ی وسیعی از شرایط خاک است.

استفاده از عوامل بهسازی خاک سبب تغییر مشخصات خاک می‌شود. این تغییرات، خاک را به حالت خمیری تبدیل کرده و از آن برای کنترل فشار و انتقال صحیح آن به اتاقک حفاری (در امتداد نقاله‌ی مارپیچ) استفاده می‌شود **[1]**. همچنین عملیات بهسازی موجب کاهش نفوذپذیری زمین شده و مانع از چسبندگی خاک‌های رسی می‌شود **[2]**. بهسازی خاک با تزریق فوم، پلیمر، آب یا مواد پرکننده (از طریق نازل‌های طراحی شده بر روی کله‌ی حفار) به جلوی سطح جبهه‌کار، اتاقک چمبر، امتداد نوار نقاله‌ی مارپیچ و محفظه‌ی پشت سر کله‌ی حفار صورت می‌گیرد. این امر می‌تواند سبب کاهش اصطکاک بین کله‌ی حفار و ابزارهای برشی و بدنه‌ی کله‌ی حفار با خاک و کاهش سایش این قطعات شود **[3]**. در **شکل ۱** چگونگی کنترل فشار جبهه‌کار *EPB* نشان داده شده است. چسبندگی در خاک‌های ماسه‌دار و شن‌دار به دلیل کافی نبودن مصالح ریزدانه، با عوامل بهسازی خاک تقویت می‌شود. بکارگیری عوامل بهسازی مناسب خاک با فوم و پلیمر، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر بازدهی عملیات حفاری تونل تاثیرگذار است **[4]**.



شکل ۱- مهار فشار جبهه‌کار در حفاری با *EPB* [3]

هنگامی‌که فوم به خاک اضافه می‌شود، حباب‌های هوا، چگالی دوغاب خاکی را کم کرده و اصطکاک بین دانه‌های خاک را کاهش می‌دهند؛ بنابراین فوم باید پیش از متلاشی شدن حباب‌های هوا به خاک جلوی جبهه‌کار اضافه شود. فوم قابلیت تراکم خاک را افزایش می‌دهد. اگر فشار در محفظه‌ی حفاری کاهش یابد، هوای داخل ساختار خاک-فوم منبسط می‌شود و خاک داخل محفظه تغییر شکل خواهد داد **[5]**. پلیمرها نیز در بهسازی خاک، با جذب آب یا خشک نمودن خاک‌های مرطوب و بهبود ساختار خاک برای تغییر خزش خاک (خصوصیات تغییرشکل و روندگی) به کار می‌روند. هدف اصلی استفاده از پلیمرها، مدیریت نگهداری جبهه‌کار و حمل و نقل در خاک‌های سست درشت‌دانه است. همچنین پلیمرها می‌توانند برای کاهش چسبندگی روی تیغه‌های نوار نقاله، در محفظه‌ی حفاری، مورد استفاده قرار گیرند **[4]**.

آگاهی از عوامل مختلف بهسازی و آثار آن بر روی انواع خاک‌ها در تعیین مناسب‌ترین روش بهسازی، بسیار موثر است. از آزمایش مخروط اسلامپ (روانی) برای تعیین موثرترین پارامترهای بهسازی شامل نسبت تزریق فوم (*FIR*)، نسبت انبساط فوم (*FER*) و غلظت ماده‌ی کف‌ساز در محلول فوم (C_f) استفاده می‌شود. اگر این پارامترها به طور صحیح در نظر گرفته نشوند، خاک در محفظه‌ی پشت

کله‌ی حفار کاملاً خشک شده و این مسئله منجر به افزایش گشتاور، دما و کاهش سرعت پیشروی خواهد شد. اگر سیال یا فوم، زیاد از حد اضافه شود، کنترل خاک حفاری سخت و هزینه‌ی حفاری افزایش می‌یابد **[5]**. پارامتر FIR با استفاده از گزاره‌ی (۱) محاسبه می‌شود و بین ۱۰ تا ۸۰ درصد متغیر است. FER مطابق با گزاره‌ی (۲) محاسبه می‌شود. این پارامتر به طور معمول بین ۵ تا ۳۰ درصد متغیر است. همچنین C_f نیز مطابق با گزاره‌ی (۳) محاسبه می‌شود و به طور معمول بین ۰٫۵ تا ۵ درصد تغییر می‌کند.

$$FIR = 100 \times \frac{V_{foam}}{V_{soil}} \quad (۱)$$

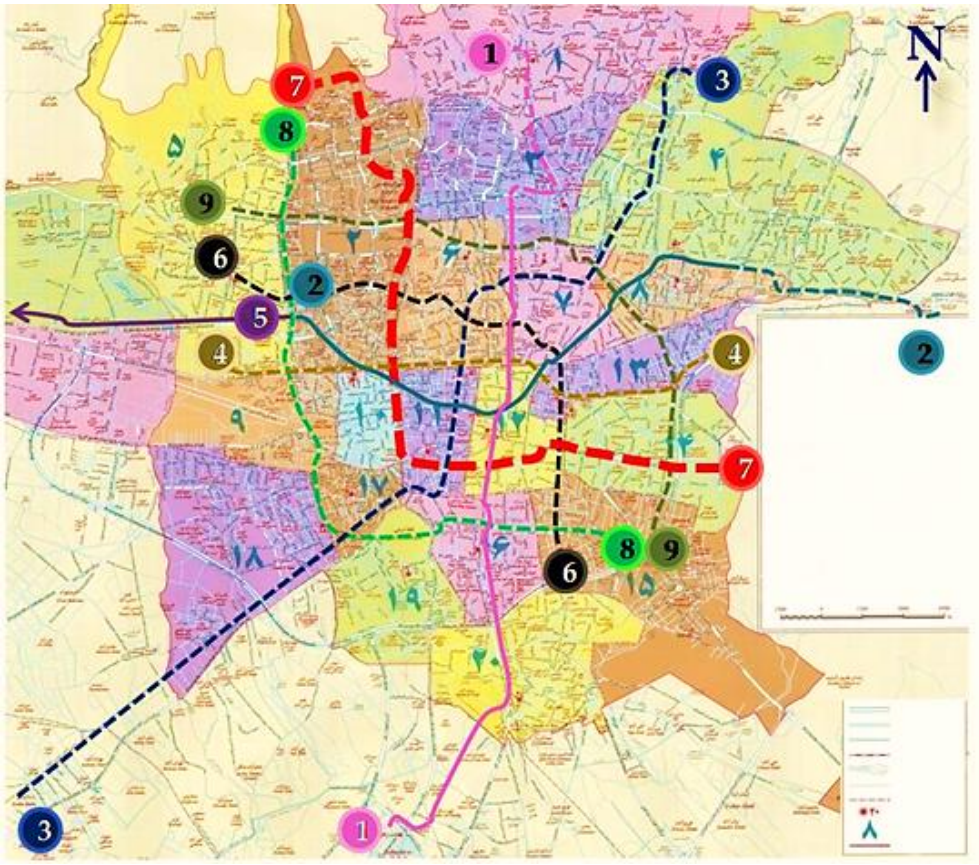
$$FER = \frac{V_{foam}}{V_{foam\ solution}} \quad (۲)$$

$$C_f = 100 \times \frac{m_{surfactant}}{m_{foam\ solution}} \quad (۳)$$

در این پژوهش، مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی در حفاری تونل‌های شهری با دستگاه EPB با مطالعه موردی قطعه‌ی شرقی- غربی تونل خط ۷ متروی تهران شناسایی و با توجه به بررسی‌های صورت گفته (تئوری، آزمایشگاهی و میدانی) روش مناسب بهسازی خاک و پارامترهای بهینه‌ی آن ارائه شده است.

۲- ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۷

خط ۷ متروی تهران از شهرک امیرالمومنین واقع در منطقه‌ی جنوب شرقی تهران در امتداد شرقی- غربی شروع و پس از عبور از تقاطع بزرگراه محلاتی- خیابان ۱۷ شهریور و میدان محمدیه، در تقاطع بزرگراه نواب- پل قزوین تغییر جهت داده و در امتداد جنوبی- شمالی (در راستای بزرگراه نواب صفوی) مسیر آن ادامه می‌یابد و ضمن گذر از کنار تونل توحید، برج میلاد و میدان صنعت، در منطقه‌ی سعادت‌آباد (میدان بوستان) در شمال غرب تهران به پایان می‌رسد (**شکل ۲**)، **[5]**.



شکل ۲- مسیر عبور خط ۷ مترو بر روی نقشه‌ی تهران [5]

مطالعات ژئوتکنیکی مسیر خط ۷ متروی تهران، در سه مرحله‌ی مفهومی، مقدماتی و تکمیلی انجام شده است. کاوش‌ها و برداشت‌های صحرایی بر پایه‌ی دستورالعمل‌ها و مشخصات فنی با حفاری ۲۹ حلقه، گمانه‌ی ماشینی و ۱۱ حلقه، چاه دستی در نقاط مناسب در طول مسیر طرح در مرحله‌ی مقدماتی انجام گرفته است **[5]**. لایه‌های خاکی در برگیرنده‌ی مسیر تونل به ۶ واحد زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده است (**جدول ۱**)، [۶].

جدول ۱- مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در لایه‌های خاکی در برگیرنده‌ی تونل [۶]

واحدهای زمین شناسی مهندسی	*ET-1*	*ET-2*	*ET-3*	*ET-4*	*ET-5*	*ET-6*
توصیف خاک	گراول ماسه‌ای و ماسه‌ی گراولی	خاک درشت‌دانه از جنس ماسه‌ی گراولی به همراه سیلت و رس	ماسه‌ی رسی به همراه گراول	خاک درشت‌دانه از جنس ماسه‌ی رسی به همراه گراول	سیلت رسی و رس سیلتی به همراه اندکی ماسه	سیلت ماسه‌ای
درصد عبوری از الک ۲۰۰ (سیلت و رس)	۳-۱۲	۱۲-۳۰	۳۰-۶۰	۲۲-۳۴	بیش‌تر از ۶۰	بیش‌تر از ۶۰
نوع خاک (*USCS*)	*GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP*	*SC, SC-SM & GC*	*SC, SM & CL*	*SC & SM*	*CL, ML & CL-ML*	*ML*

واحد *ET-6* عمدتاً از سیلت ماسه‌ای تشکیل شده است و از لحاظ دانه‌بندی به واحدهای *ET-5* و *ET-3* شبیه است، ولی با توجه به ضعیف بودن پارامترهای مکانیکی به عنوان یک واحد جداگانه معرفی شده است. به طور کلی این واحد در مسیر پروژه گسترش کمی داشته و تنها در کیلومتراژ ۱۰۰+۷ و ۶۰۰+۷ در محدوده‌ی بالای سقف تونل وجود دارد [۶].

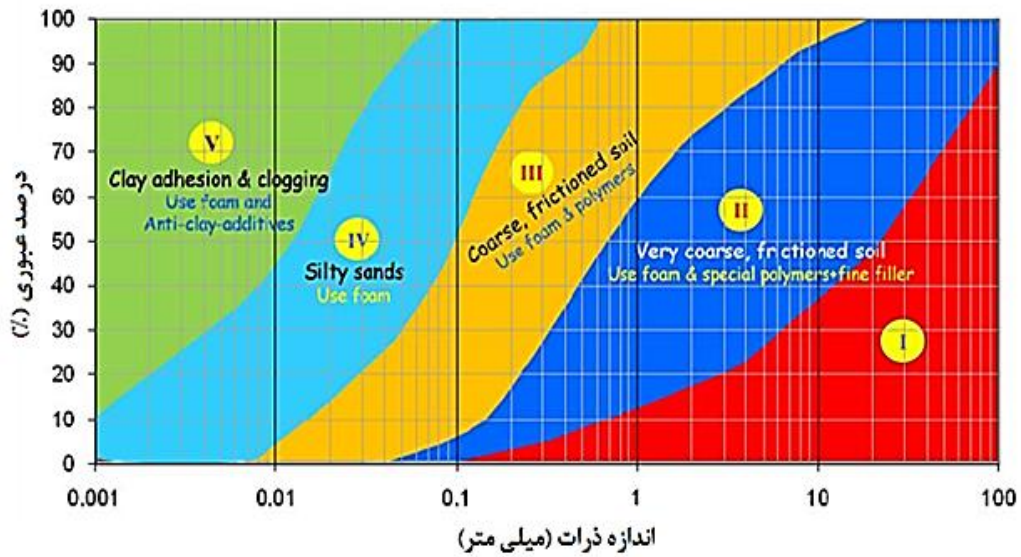
۳- کاربری ماشین EPB و نوع مواد افزودنی بر اساس منحنی‌های دانه‌بندی

از مهم‌ترین مخاطرات محتمل زمین‌شناسی که بر روی بهسازی شرایط خاک موثرند را می‌توان به فقدان ریزدانه‌ی خاک، خطر کلاگینگ یا انسداد ماشین، نفوذپذیری زیاد خاک، وجود آبرفت درشت‌دانه و خورندگی خاک تقسیم نمود.

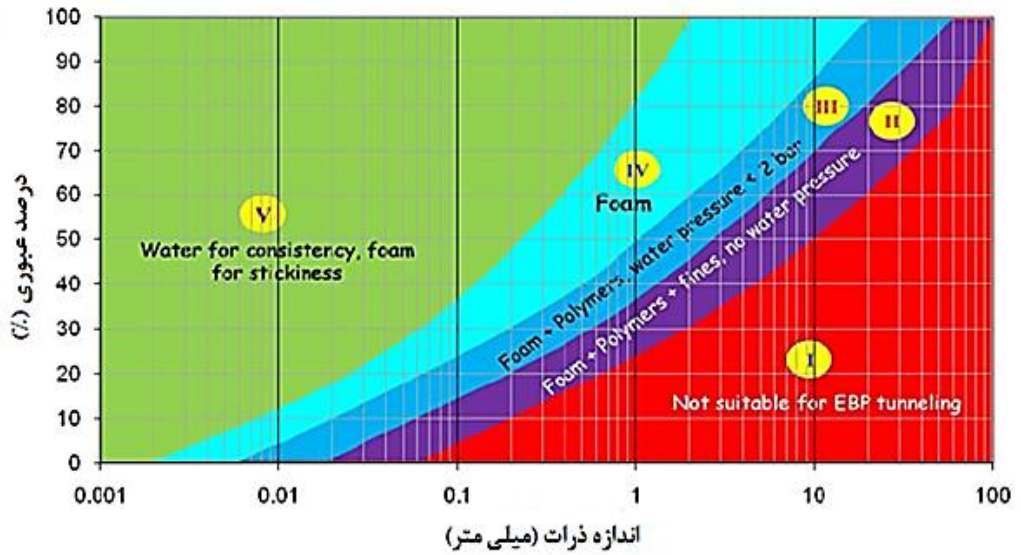
یکی از مهم‌ترین اصول بهسازی شرایط خاک، انتخاب نوع مواد افزودنی و به دست آوردن اطلاعات کافی از رفتار حفرپذیری خاک در مواجهه با ماشین است **[8]**. رفتار خاک را می‌توان با بررسی توزیع دانه‌بندی لایه‌های مختلف شناسایی نمود. در این زمینه چندین معیار توسط محققین و همچنین استانداردهای مختلف ارائه شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مایدل (*Maidl*) ۱۹۹۶، جانسس (*Jancsec*) ۱۹۹۹، افنارک (*Efnarc*) ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵، توس (*Thewes*) ۲۰۰۷ و لانگ‌ماک ۲۰۰۸ اشاره نمود.

از میان این موارد، معیار مایدل از جمله اولین معیارهایی است که در آن بهسازی متناسب با رفتار حفرپذیری خاک پیشنهاد شده است **[4]**. علاوه بر این معیار، از سال ۲۰۰۰ تا به امروز تحقیقات متعددی بر روی فوم‌ها و پلیمرها برای گسترش تونلسازی با *EPB* انجام شده است و آخرین معیارهای موجود در این زمینه، توس و لانگ‌ماک، به ترتیب در **شکل ۳** و **شکل ۴** نشان داده شده است **[9]** و **[10]**.

در این تحقیق، برای تعیین عوامل بهسازی مناسب، منحنی‌های دانه‌بندی واحدهای خاکی در برگیرنده‌ی مسیر تونل در **جدول ۱** با معیارهای دانه‌بندی توس و لانگ‌ماک مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در **جدول ۲** آورده شده است.



شکل ۳- توزیع دانه‌بندی کاربری ماشین *EPB* و پیشنهاد انواع بهسازی شرایط خاک بر اساس معیار لانگ‌ماک ۲۰۰۸ [9]



شکل ۴- توزیع دانه‌بندی کاربری ماشین *EPB* و پیشنهاد انواع بهسازی خاک بر اساس معیار توس ۲۰۰۷ [10]

۴- برآورد پارامترهای بهسازی

در این پژوهش برای برآورد پارامترهای بهسازی از سه روش جدول‌های استاندارد، مطالعات آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی استفاده و نتایج حاصل با هم مقایسه شده است.

۴-۱- جدول‌های استاندارد

برای تونلسازی در زمین‌های نرم، یکی از معتبرترین جدول‌های راهنما مربوط به پیشنهادهای ارائه شده توسط انجمن *EFNARC* است. این انجمن در سال ۲۰۰۵ جدیدترین راهنمای ویژه‌ی بکارگیری محصولات تخصصی برای تونلسازی در زمین نرم را ارائه داده است. در **جدول ۳** جمع‌بندی پیشنهاد انجمن *EFNARC* در مورد نوع و مقدار فوم مورد نیاز در انواع خاک‌ها آورده شده است. در این جدول، فوم‌ها به سه گروه کلی فوم نوع *A* (قابلیت بالا در شکستن پیوندهای بین مولکولی و کاهش اثر تورم)، فوم نوع

B (برای اهداف معمولی با پایداری متوسط) و فوم نوع C (قابل اجرا در خاک‌های چسبنده و نفوذناپذیر با پایداری بالا) تقسیم‌بندی شده است **[11]**. با توجه به **جدول ۳**، نوع فوم، پلیمر و FIR برای خاک‌های با ویژگی‌های مختلف، متفاوت است. این پارامترها به صورت توصیفی بوده و تمام انواع خاک‌ها را شامل نمی‌شود. نتایج مطابقت واحدهای خاکی تشکیل‌دهنده‌ی مسیر تونل (**جدول ۱**) با پیشنهاد بکارگیری عوامل بهسازی (**جدول ۳**) در **جدول ۴** بیان شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از همپوشانی منحنی‌های دانه‌بندی بر روی معیارهای بهسازی خاک [9] و [10]

واحد خاک	پیشنهاد بهسازی خاک بر اساس معیار لانگ‌ماک ۲۰۰۸	پیشنهاد بهسازی خاک بر اساس معیار توس ۲۰۰۷
ET-1	فوم + پلیمرهای ویژه + مصالح پرکننده‌ی ریز در مورد مصالح بسیار ریز و خاک اصطکاکی (II)	فوم + پلیمر + پرکننده، بدون فشار آب (II)
ET-2	فوم + پلیمرهای ویژه + مصالح پرکننده‌ی ریز در مورد مصالح بسیار ریز و خاک اصطکاکی (II) فوم + پلیمر در مورد مصالح ریز و خاک اصطکاکی (III)	فوم + پلیمر، فشار آب کمتر از ۲ بار (III)
ET-3	فوم + پلیمر در مورد مصالح ریزدانه و خاک اصطکاکی (III) فوم در مورد ماسه سیلتی (IV)	فوم (IV) و آب برای پایداری، فوم برای چسبندگی (V)
ET-4	فوم + پلیمرها در مورد مصالح ریزدانه و خاک اصطکاکی (III)	فوم (IV)
ET-5	فوم در مورد ماسه‌ی سیلتی (IV) فوم + مصالح پرکننده در مورد کلاگینگ و رس چسبنده (V)	آب برای پایداری و فوم برای چسبندگی (V)
ET-6	فوم در مورد ماسه‌ی سیلتی (IV)	فوم (IV)

جدول ۳- راهنمای بکارگیری عوامل بهسازی خاک انجمن *EFNARC* [11]

واحد خاک	نوع فوم			*FIR (%)*	پلیمر مصرفی
	A	***B***	***C***		
رس	■			۳۰-۸۰	پلیمر آنتی‌کلاگینگ
ماسه‌ی رسی- سیلت	■	■		۴۰-۶۰	پلیمر آنتی‌کلاگینگ
ماسه- سیلت رسی		■		۲۰-۴۰	پلیمر برای کنترل پایداری
ماسه		■	■	۳۰-۴۰	پلیمر برای ایجاد چسبندگی و کنترل پایداری
گراول رسی			■	۲۵-۵۰	پلیمر برای ایجاد چسبندگی و کنترل پایداری
گراول ماسه‌ای			■	۳۰-۶۰	پلیمر برای ایجاد چسبندگی و کنترل پایداری

جدول ۴- نتایج مطابقت واحدهای خاکی تشکیل‌دهنده‌ی مسیر تونل خط ۷ با پیشنهاد بکارگیری عوامل بهسازی

واحد خاک	مطابقت با جدول	پیشنهاد عامل بهسازی	*FIR (%)*	توضیحات
ET-1	گراول‌های ماسه‌ای	C	۳۰-۶۰	استفاده از پلیمر برای ایجاد قوام و چسبندگی
ET-2	گراول‌های رسی	C	۲۵-۵۰	استفاده از پلیمر برای ایجاد قوام و چسبندگی
ET-3	رس ماسه‌ای- گراول‌های سیلتی رسی	B	۲۰-۴۰	استفاده از پلیمر برای ایجاد قوام و همچنین در مواقعی که مقدار ریزدانه زیاد است برای کاهش چسبندگی
ET-4	ماسه	B و C	۳۰-۴۰	استفاده از پلیمر برای ایجاد قوام و چسبندگی
ET-5	رس	A	۴۰-۶۰	استفاده از پلیمر برای کاهش خطر کلاگینگ
ET-6	ماسه-سیلت رسی	B	۲۰-۴۰	استفاده از پلیمر برای ایجاد قوام و چسبندگی

۴-۲- مطالعات آزمایشگاهی

یکی از روش‌های تعیین نوع ماده‌ی افزودنی و پارامترهای بهسازی، انجام مطالعات آزمایشگاهی است. در مطالعات آزمایشگاهی عملکرد و رفتار خاک بهسازی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در اغلب مواقع، انتخاب عوامل بهسازی و کنترل آن‌ها، در حین حفاری و بر اساس آزمون‌های سعی و خطا انجام می‌شود. این آزمون‌ها باید بتوانند امکان مقایسه‌ای آسان بین افزودنی‌های در دسترس، تعیین مقدار صحیح عوامل بهسازی و کنترل آسان کیفیت بهسازی در حین حفاری را فراهم نمایند **[12]**.

آزمون‌های متداول در بهسازی شرایط خاک شامل آزمایش‌های اختلاط، نفوذ مخروط، نفوذپذیری، تراکم‌پذیری، برش و مخروط اسلامپ هستند. اخیراً آزمون‌های بزرگ‌مقیاس با استفاده از سیستم نقاله‌ی مارپیچ آزمایشگاهی نیز پیشنهاد و امکان‌پذیری آن ثابت شده است؛ زیرا در این آزمون، پارامترهای دارای ارتباط مستقیم با حفاری ماشین *EPB* قابل اندازه‌گیری است **[13]** و **[14]**. در ظاهر این آزمایش، بهترین ابزار برای طراحی بهسازی یا اصلاح مشخصات خاک است؛ اما برای شروع آزمایش به حجم بزرگی از خاک نیاز است. بنابراین برای انجام یک مقایسه‌ی سیستماتیک بین عوامل مختلف بهسازی مناسب به نظر نمی‌رسد. از سویی دیگر این آزمایش بسیار گران بوده و هنوز به طور کامل توسعه پیدا نکرده است.

تقریباً تمام تحقیقات اخیر نشان می‌دهد آزمایش مخروط اسلامپ شاخصی مناسب برای ارزیابی کارکرد عملی خاک بهسازی شده، است **[12]**. این آزمایش روی واحدهای خاکی مسیر تونل خط ۷ در آزمایشگاه *BASF* در کشور سوییس به صورت سیستماتیک، با مقدار متنوعی از فوم و با درصد رطوبت طبیعی انجام شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های اسلامپ و پیشنهادهای آن در **جدول ۵** آورده شده است.

جدول ۵- نتایج حاصل از آزمون‌های اسلامپ در آزمایشگاه *BASF* [۶] و [9]

واحد خاک	پیشنهاد *FIR(%)*	مقدار مصرف در حالت برجا (Lit/m^3)
ET-1	۶۰-۷۰	۱٫۵-۱٫۸
ET-2	۲۰	۰٫۶
ET-3	۲۰-۳۰	۰٫۶-۰٫۸
ET-4	-	-
ET-5	۷۰-۸۰	۱٫۸-۲
ET-6	۲۰-۳۰	۰٫۶-۰٫۸

۴-۳- مشاهدات میدانی

پروژه‌های اخیر تونلسازی در سنگاپور نشان داده است، در جایی که افزودنی‌های بهسازی ممکن است برای کنترل فشار خاک یا سهولت حفاری چندان مهم نباشد، استفاده از فوم مزایای بیشتری را برای حفاظت در مقابل سایش کله‌ی حفار، آب‌بندی‌ها و یاتاقان‌های *TBM* فراهم می‌آورد **[15]**. این موضوع در حفاری‌های طولانی با *TBM* بسیار مهم است.

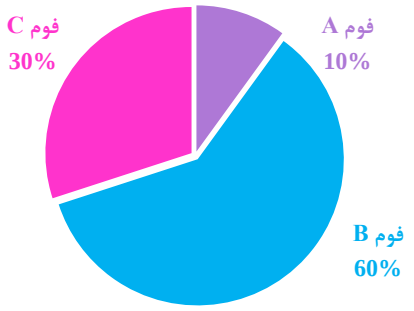
در **جدول ۶**، مبنای استفاده از عوامل فوم‌سازی که ظرفیت‌های انبساط بالایی داشته و همچنین آثار روان‌سازی خوبی دارند، بیان شده است **[15]**. طبقه‌بندی خاک‌های *I* تا *IV* و مطابقت آن با شرایط زمین‌شناسی مهندسی خط ۷ متروی تهران با توجه به **شکل ۳** و **شکل ۴** صورت گرفته و نتایج آن در **جدول ۲** بیان شده است.

جدول ۶- موثرترین روش بهسازی خاک در زمین‌های نوع *I* تا نوع *IV* [15]

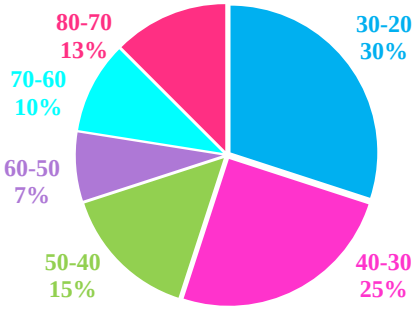
نوع / پارامتر	رطوبت (٪)	C_f (٪)	*FIR*	*FER*	*PIR*
I	۲-۳	۵	۴۰-۶۰	۲۰	-
II	۳-۵	۲	۲۰-۳۰	۶-۸	۲-۵
III	-	-	-	-	۱۰
Iv	۳	-	۵-۱۰	-	-

در **شکل ۵**، درصد فوم مصرفی در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان

دریافت که ۶۰ درصد از خاک طول مسیر پروژه با فوم نوع B (برای اهداف معمولی با پایداری متوسط) بهسازی شده است. در **شکل ۶** نیز، دامنه‌ی تغییرات FIR در طول مسیر پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران به درصد بیان شده است. در **جدول ۷**، مشاهدات میدانی پارامترهای بهسازی و اصلاح شرایط خاک در مسیر تونل خط ۷ متروی تهران به تفکیک زمین‌شناسی مهندسی ارائه شده است.



شکل ۵- درصد فوم مصرفی (*A*، *B*، *C*) در مسیر پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران



شکل ۶- دامنه‌ی تغییرات پارامتر *FIR* در مسیر پروژه تونل خط ۷ متروی تهران

جدول ۷- نتایج حاصل از مشاهدات میدانی پارامترهای بهسازی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

واحد خاک	عامل بهسازی	*FIR (%)*
ET-1	فوم B و C	۴۰-۶۰
ET-2	فوم B و C	۳۰-۶۰
ET-3	فوم B	۲۵-۴۰
ET-4	فوم B	۳۰-۴۰
ET-5	فوم A، B و C	۴۰-۶۰

با توجه به **جدول ۶** می‌توان اشاره نمود که حجم آب تزریق شده به صورت درصدی از حجم محفظه‌ی پشت کله‌ی حفار (با فرض پر بودن محفظه) اندازه‌گیری می‌شود. به خصوص در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران، موارد زیر مشاهده شده است:

- در خاک نوع *I*، استفاده از فوم پایدار با نسبت‌های تزریقی ۴۰ تا ۶۰ درصد حجم، در کاهش گشتاور و افزایش نرخ نفوذ بسیار موثر است.
- خاک نوع *II* با درصد رس بالا، تحت شرایطی بسیار سفت می‌شود. در این حالت، اضافه نمودن فوم به عنوان یک عامل بهساز منفرد چندان موثر نخواهد بود. در این پروژه مقادیر زیادی مایع فوم در هنگام باز شدن دریچه‌ی نقاله‌ی مارپیچ بر روی نوار نقاله مشاهده شده است. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که فوم‌ها سبب روانی دوغاب خاک می‌شوند؛ اما این مقدار برای خرد کردن رس در محفظه‌ی پشت کله‌ی حفار چندان موثر نیست. خاک رس سفت در تکه‌های بزرگ از نقاله‌ی مارپیچ خارج شده و نرخ نفوذ کله‌ی حفار به سرعت کاهش و تولید گرما در خاک حفاری شده افزایش می‌یابد.
- از آنجایی که اضافه نمودن فوم به همراه پلیمر در مقایسه با اضافه نمودن پلیمر به تنهایی، حفاری را در خاک‌های رسی نرم بهبود می‌دهد؛ بنابراین در مسیر خط ۷ متروی تهران از پلیمرهای مایع، ضد سایشی و آنتی‌کلاگینگ استفاده شده است.
- در خاک نوع *III*، استفاده از پلیمرهای با درصد رطوبت بالا نشان دهنده‌ی کنترل بهتر جابجایی خاک و نشست سطح زمین است.
- در خاک نوع *IV* (رس بسیار نرم، چسبنده و مچاله شونده)، اضافه نمودن آب به محفظه‌ی پشت کله‌ی حفار به عنوان یک عامل بهسازی خاک کافی است. مقادیر کم فوم تزریق شده در جلوی کله‌ی حفار برای تمیز کردن و روان‌سازی ابزارهای برشی و جلوگیری از انسداد تزریق است.

۵- نتیجه‌گیری

تونل‌زنی با ماشین *EPB* نیازمند فرآیند بهسازی خاک است تا از این راه کنترل درستی بر عملیات حفاری به خصوص در

محیط‌های خاکی بدون چسبندگی وجود داشته باشد. این فرآیند می‌تواند از طریق تزریق فوم، پلیمر، آب یا مواد پرکننده به جلوی سطح جبهه‌کار و اتاقک چمبر یا در امتداد نوار نقاله‌ی مارپیچ صورت گیرد. از آنجایی که آگاهی از عوامل مختلف بهسازی و آثار آن‌ها روی انواع خاک‌ها در تعیین مناسب‌ترین نوع فوم برای استفاده بسیار موثر است؛ لازم است که در تونلسازی با دستگاه *EPB*، استراتژی بهسازی خاک در مرحله‌ی طراحی ارائه شود. با بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق برای پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران نتایج زیر به دست آمده است:

- با توجه به مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر قطعه‌ی شرقی- غربی تونل خط ۷ متروی تهران، لایه‌های خاکی در برگیرنده‌ی مسیر تونل به شش واحد زمین‌شناسی مهندسی *ET-1* تا *ET-6* تفکیک شده است. در این مطالعه مشخص شد هر واحد خاکی با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، نیاز به افزودنی‌های خاص دارد و پارامترهای بهسازی برای هریک از آن‌ها متفاوت است.
- مقدار بهینه‌ی عوامل بهسازی و نوع ماده‌ی افزودنی در مسیر تونل با توجه به گسترش و حضور واحدهای مختلف خاکی در جبهه‌کار تونل و همچنین در نظر گرفتن مخاطرات زمین‌شناسی نیازمند بهسازی در سه مرحله‌ی جداگانه (بر اساس جدول‌های استاندارد، مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات میدانی) است. بررسی‌ها نشان می‌دهند نتایج حاصل از روش‌های تئوری (جدول‌های استاندارد) با نتایج حاصل از مشاهدات میدانی بسیار به هم نزدیک بوده، ولی با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی متفاوت است.
- از آنجایی که بهسازی خاک در بخش تئوری و آزمایشگاهی با کاربرد کارگاهی آن نتایج مختلفی را ارائه داده است، بنابراین باید تمام نتایج تئوری و آزمایشگاهی به وسیله‌ی ارزیابی‌های کارگاهی تکمیل شوند. چنین ارزیابی‌هایی باید پس از شروع عملیات حفاری تونل انجام شوند؛ به طوری که اپراتور با اندرکنش ماشین- خاک آشنا بوده و دیگر اجزای *EPB* از نظر کارکرد، مناسب تشخیص داده شده باشند. بنابراین ارزیابی‌های کارگاهی باید حین عبور *EPB* از یک نوع خاک به خاکی دیگر انجام شود.
- با توجه به وجود سه نوع متفاوت فوم (*A*، *B*، *C*) در پروژه، فوم *B* برای ۶۰ درصد از طول مسیر و فوم *C* برای ۳۰ درصد از طول مسیر و فوم *A* برای ۱۰ درصد از طول مسیر پروژه استفاده شده است.
- دامنه‌ی تغییرات پارامتر *FIR* در پروژه با توجه به سه نوع بررسی (تئوری، آزمایشگاهی و میدانی) بین ۲۰ تا ۸۰ درصد است که بیش‌ترین مقدار مصرف در بازه‌ی ۲۰ تا ۴۰ درصد است. همچنین *FER*=۴-۷ و در تمامی آنالیزها C_f = ٪۲ در نظر گرفته شده است.

۶- سپاسگزاری

از گروه تخصصی سپاسد و موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل به سبب همکاری در مراحل پژوهش و در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
FIR	%	نسبت تزریق فوم	FER	-	نسبت انبساط فوم
$m_{foam\ solution}$	kg	وزن محلول فوم	PIR	%	نسبت تزریق پلیمر
V_{foam}	lit	حجم فوم	V_{soil}	m^3	حجم برجای خاک
$V_{foam\ solution}$	lit	حجم محلول فوم	$m_{surfactant}$	kg	وزن کف‌ساز در محلول فوم
C_f	%	غلظت ماده‌ی کف‌ساز در محلول فوم			

۸- منبع‌ها

[1] Quebaud, S., Sibai, M., & Henry, J. P. (1998). Use of Chemical Foam for Improvements in Drilling by Earth

Pressure Balanced Shields in Granular Soils. *Tunnelling Underground Space Technology*, *13*(2), 173-180. http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00045-5.

[2] Peila, D., Oggeri, C., Vinai, R. (2007). Screw Conveyor Device for Laboratory Tests on Conditioned Soil for EPB Tunneling Operations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *133*(12), 1622-1625. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1622).

[3] Herrenknecht, M., & Rehm, U. (2002). Newest Development in Mechanized Tunnelling. *Journées d'études Internationales* (pp.201–206). Toulouse: AFTES.

[4] Maidl, B., Herrenknecht, M., & Anheuser, L. (1996). *Mechanized Shield Tunnelling* (pp. 345-360). Wiley. ISBN: 9783433012925.

[5] Jancsecz, S., Krause, R., & Langmaack, L. (1999). Advantage of Soil Conditioning in Shield Tunnelling-Experiences of LRTS Izmir. In T. Alten (Ed.), *Challenges for the 21st Century: Proceedings of the World Tunnel Congress '99*. Rotterdam: A. A. Balkema. http://www.langmaacks.eu/assets/oslo_mbt-version.pdf.

[۶] گروه تخصصی سپاسد. (۱۳۸۷). *مطالعات پایه‌ی تونل (فاز پیشرفته): روش اجرا، انتخاب دستگاه و مشخصات فنی دستگاه TBM خط ۷ متروی تهران.*

[۷] مهندسین مشاور ساحل. (۱۳۸۷). *گزارش زمین‌شناسی مهندسی بخش شرقی- غربی تونل خط ۷ مترو تهران.*

[8] Boone, S. J., Artigiani, E., Shirlaw, J. N., Ginanneschi, R., Leinala, T., & Kochmanova, N. (2005). Use of Ground Conditioning Agents for Earth Pressure Balance Machine Tunnelling. *Journées techniques* (pp. 313-320). Chambéry: AFTES. http://structurae.net/refs/items/index.cfm?id=r0057158.

[9] Langmaack, L. (2002). Soil Conditioning for TBM: Chances & limits. *Journées d'études Internationales* Toulouse: AFTES. http://www.langmaacks.eu/assets/aftes-paper.pdf.

[10] Thewes, M. (2007). TBM Tunneling Challenges- Redefining The State of The Art. *Underground Space: The 4th Dimension of Metropolises: Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress*. London: Taylor & Francis. ISBN: 9780415408073. http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2007/wtc2007/mc-3.pdf.

[11] EFNARC. (2005). Specification and Guidelines for The Use of Specialist Products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock. http://www.efnarc.org/pdf/TBMGuidelinesApril05.pdf.

[12] Pelia, D., Oggeri, C., & Bori, L. (2009). Using The Slump Test to Assess The Behavior of Conditioned Soil for EPB Tunneling. *Environmental & Engineering Geoscience* *15*(3). 167-174. http://dx.doi.org/10.2113/gseegeosci.15.3.167.

[13] Vinai, R., Peila, D., Oggeri, C., & Pelizza, S. (2007). Laboratory Test for EPB Tunnelling Soil Conditioning. *Underground Space: The 4th Dimension of Metropolises: Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress* (pp. 273–278). London: Taylor & Francis. ISBN: 9780415408073. http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2007/Pdf/CH-045.pdf.

[14] Vinai, R., Oggeri, C., & Peila, D. (2008). Soil Conditioning of Sand for EPB Applications: A Laboratory Research. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *23*(3), 308-317. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.010.

[15] Zhao, J., Gong, Q. M., & Eisensten, Z. (2007). Tunnelling through a Frequently Changing and Mixed Ground: A Case History in Singapore. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *22*(4), 388-400. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.10.002.

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
tuse.shahroodut.ac.ir
Volume 2-Issue 2\Winter 2014

Selection of the Most Appropriate Soil Conditioning Set in Mechanized Boring of Tehran Subway Line 7 Tunnel

H. Bakhshandeh Amnieh[1]; M. S. Zamzam[2]; S. E. Moosavi[3]; S. Tarigh Azali[4]
1- Associate Professor; Department of Mining Engineering; Faculty of Engineering; University of Kashan
2- Ph.D. Candidate in Mining Engineering; Faculty of Engineering; University of Kashan
3- Technical Expert of Tehran Subway Line 7 Tunnel, East-West Section; Sepasad Group
4- Ph.D. Candidate in Engineering Geology; Faculty of Sciences; Ferdowsi University of Mashhad

Received: 16 Jan 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Earth Pressure Balance (EPB) shield
Soil conditioning
Foam Injection Ratio (FIR)
Foam Expansion Ratio (FER)
Foaming agent concentration (C_f)
Polymer Injection Ratio (PIR)

Extended Abstract

In recent years, tunneling with the Earth Pressure Balance (EPB) shield has been used in urban areas in different soils types. The most common technology in the mechanized tunneling is using the EPB machine. Soil conditioning operation can be carried out through the screw conveyor. Knowing different soil conditioning agents and their affects in different soils types is quite important in selection of the most appropriate foam-polymer to be used.

Introduction

Selection of the most appropriate soil conditioning set needs different precise studies so that the properties of the conditioned soil can be determined and the measurable data can be specified. Selection an appropriate strategy (for soil conditioning during boring) highlights the importance of the ground risks involved so that conclusive decisions can be made regarding the type of the physical behavior of the foam and other additives.

Methodology and Approaches

The soil layers in this project have been divided into 6 units (ET-1 to ET-6). In this study, it has been revealed that every unit needs specific additives depending on its geological and geotechnical specifications, and also, the soil conditioning parameters for every unit would be different. The optimum amounts of conditioning agents and types of additives to be used in the tunnel route (considering the geological risks that need conditioning, and the presence and expansion of different soil units) have been studied in 3 separate stages based on the guiding tables, standards, and laboratory and field tests.

Results and Conclusions

The materials, used for soil conditioning, have been made of 3 different foam types A, B and C in which foam types A & B are used for ordinary soils with medium stability and foam type C is used for adhesion and impermeable soils with high stability. These foam types have been used for soil conditioning in the tunnel route. The Foam Injection Ratio (FIR) change amplitude in the project has been estimated to be 20% to 80%; maximum consumption of the foams has been in the interval of 20% to 40% of the tunnel route, and Foam Expansion Ratio (FER) has been equal to 4 to 7.