نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره هفتم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۱ تا ۱۳

بررسی تأثیر برخی از پارمترهای مهم در عمل آوری خاک

سید امین موسوی[1*]، صادق آمون[2]؛ امید روشنی[3]
۱- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان
۲-دانشجوی دکتری، مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۳- کارشناسی ارشد، مکانیک سنگ، دانشگاه تهران

دریافت : ۱۴۰۱/۱۰/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۲

چکیده

ماشین‌های حفاری متعادل کننده‌ی فشار زمین (*EPB*) به‌صورت متداولی برای حفاری تونل‌ها در خاک‌های نرم که محدوده‌ای از خاک‌های درشت‌دانه، شن‌ها تا رس‌های سخت را دربرمی‌گیرند، به کار برده می‌شوند. طراحی این ماشین‌ها به گونه‌ای است که از خاک حفاری شده در داخل اتاقک فشار برای اعمال فشار نگهدارنده به سطح سینه‌کار در طول حفاری استفاده می‌شود. خاک ایده‌آل برای ماشین *EPB* خاکی است که پس از حفاری و ورود به اتاقک فشار، تبدیل به ماده پلاستیک و خمیری با قابلیت اعمال فشار به سینه‌کار باشد. بدیهی است که خاک واقعی در طبیعت به‌ندرت دارای چنین ویژگی‌هایی است. بدین ترتیب تکنولوژی عمل‌آوری خاک از دهه‌ی گذشته برای فائق آمدن بر این مشکلات ظهور کرده است. به فرآیند افزودن فوم و پلیمر به خاک، عملیات به‌عمل‌آوری گفته می‌شود. در تونل‌سازی با ماشین *EPB* رفتار خاک حفاری‌شده از هنگامی‌که در جلوی کاترهد ماشین با فوم مخلوط می‌شود تا زمانی‌که از نقاله مارپیچ خارج می‌شود، بستگی به ویژگی کارپذیری خاک به‌عمل‌آوری شده دارد. عواملی که برروی کارپذیری خاک موثر هستند شامل شاخص استحکام، درصد رطوبت، مقدار ذرات ریزدانه و نسبت تزریق فوم (*FIR*) می‌باشند. هدف اصلی این مقاله بررسی تاثیر پارامترهای فوق به‌صورت آزمایشگاهی بر روی کارپذیری خاک به‌عمل‌آوری شده با فوم است و مقایسه آن با داده‌های واقعی مسیر خط دو قطار شهری تبریز تا بتواند به ارزیابی پارامترهای مکانیکی خاک بپردازد.

واژگان کلیدی **ذرات ریزدانه، عمل‌آوری خاک، اسلامپ، *FIR*، چسبندگی، *EPB*، کارپذیری**

۱- مقدمه

در تکنولوژی‌های نوین حفاری در زمین‌های آبرفتی، معمولاً به فشاری برای نگهداری جبهه کار در پشت آن، برای جلوگیری از ریزش زمین به داخل تونل و کمینه کردن نشست سطح زمین، نیاز می‌باشد. در این میان استفاده از ماشین‌های حفاری متعادل کننده‌ی فشار زمین (*EPB*) نقش حیاتی ایفا می‌کند. مشخصه اصلی ماشین‌های تونل‌زنی *EPB*، دارا بودن اتاقک فشار به منظور مقابله با فشار آب و زمین در جبهه‌کار تونل می‌باشد. در این روش، مواد حفرشده در اتاقک خاصی به نام اتاقک حفاری یا اتاقک فشار که بلافاصله در پشت سر کاترهد قرار دارد، جمع‌آوری و فشرده می‌شوند و تشکیل پوششی را می‌دهند که نگهداری جبهه‌کار را تامین می‌کند؛ ولی نکته‌ی مهم این است که مصالح جمع شده در اتاقک فشار باید دارای خصوصیات ویژه‌ای باشد تا بتوانند الزامات *EPB* را فراهم کنند. به عبارت دیگر خاک جمع شده در اتاقک حفاری باید قابلیت اعمال فشار و همچنین قابلیت انتقالی داشته باشد. لازم به توضیح است که در ادبیات حفاری مکانیزه، به ویژگی‌هایی همچون قابلیت اعمال فشار و انتقال خاک، کارپذیری[1] مصالح می‌گویند. کارپذیری مناسب برای ماشین *EPB* وقتی ایجاد می‌شود که خاک جمع‌شده در اتاقک

[1] Workability

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: **aminmoosavi@vru.ac.ir**

حفاری به یک ماده همگن و پلاستیک تبدیل شود. چنین خاکی هم قابلیت اعمال فشار به سینه‌کار را دارد و هم قابلیت انتقال مصالح از طریق نوار نقاله‌مارپیچ را دارند. بنابراین، کارپذیری شاخصی برای خصوصیت پلاستیکی خاک جمع شده در اتاقک فشار است و معیاری برای کاربری ماشین *EPB* در زمین‌های مختلف می‌باشد **[1-3]**.

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 آیند سع و خطا در بخش‌های اولیه حفاری تونل را کاهش دهد. طبق توصیه‌های مندرج در تحقیقات مختلف**[6-9]**، کارپذیری خاک حفاری شده می‌تواند با آزمایش اسلامپ برآورد گردد.

آزمایش اسلامپ همانند آزمایش اسلامپ برای بتن تازه مطابق استاندارد *ASTM C143* برای تعیین کیفیت یا پلاستیسیته خاک دارای فوم در فشار اتمسفر توسط محققین مختلفی به‌طور گسترده‌ای در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است **[4,6,8,10-14]**. آزمایش اسلامپ این مزیت را دارد که ساده و سریع انجام می‌شود و یک شاخص کلی از رفتار مواد بهسازی شده ارائه می‌کند. *Quebaud(1998)* اسلامپ *12 cm* را برای مخلوط خاک و فوم با مشخصات بهینه برای ایجاد جریان پلاستیک برای ماشین *EPB* پیشنهاد می‌کند، درحالیکه *Jancsecz et al. (1999)* مقدار *20-25 cm*، *Boone at al. (2005)* مقدار *cm* ۱۰-۸ و *Peila et al.(2009)* مقدار *cm* ۲۰-۱۵ را پیشنهاد کرده‌اند **[4,6,10,12]**. مقادیر بهینه گزارش‌شده در تحقیقات گوناگون برای آزمایش اسلامپ به طور مستقیم با محل و شرایط انجام آزمایش‌ها و مشخصات خاک و فوم در ارتباط هستند.

اخیراً اهمیت دیگر پارامترهای تولید فوم و تاثیر آن بر رفتار خاک توسط *Thewes and Budach (2010)* مورد بررسی قرار گرفت **[15]**.

یکی از مهمترین سناریوهای خطر برای تونل‌زنی با ماشین‌آلات تعادلی فشارزمین (*EPB*) در خاک‌های خاک رسی، مسدود کردن حفره‌های کله حفار و در بدترین حالت گرفتگی دستگاه است. استفاده از عوامل بهسازی خاک، بخصوص فوم‌ها و پلیمرهای پراکنده، منجر به کاهش چسبندگی و کلاگینگ شده و باعث بهبود شرایط ماشین‌آلات تعادلی فشارزمین در فرآیند حفاری می شود. روش‌های اندازه‌گیری برای چسبندگی و پتانسیل گرفتگی (کلاگینگ) خاک اغلب بر اساس رویکردهای توصیفی و تجربه‌ی مربوط به یک مشکل خاص می‌باشد **[9]**. برای یک عملیات حفاری بوسیله‌ی *EPB*، خاک‌های رسی ممکن است بسته به استحکام و انعطاف‌پذیری آن‌ها، پتانسیل گرفتگی از صفر تا ۱۰۰ داشته باشند. استحکام خاک در این زمینه اغلب با کمک شاخص استحکام توصیف می‌شود **[1]**.

$$I_c = \frac{W_l - W}{W_l - W_p} \quad (1)$$

که در آن w درصد رطوبت طبیعی خاک، W_l حد روانی و W_p حد خمیری می‌باشد. همواره بیشترین پتانسیل گرفتگی برای خاک‌های رسی با شاخص استحکام (I_p) بین ۰,۷۵ و ۱,۲۵ و شاخص خمیری (I_p) بالای ۳۰ درصد پیشنهاد شده است.

چسبندگی بین خاک و فولاد به عنوان عامل اصلی مشکل گرفتگی(کلاگینگ) در تونل‌زنی در نظر گرفته می‌شود و به‌طور کلی به عوامل بسیاری از جمله جهت بارگذاری، ویژگی‌های تغییر شکل خاک، خواص سطح فولاد و همچنین خصوصیات شیمیایی خاک رس بستگی دارد **[9]**.

۲- معرفی پروژه

پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر و دارای ۲۰ ایستگاه زیرزمینی می‌باشد که از منطقه قراملک در غرب تبریز شروع شده و بعد از گذشتن از خیابان‌های قره‌آغاج، جمهوری، میدان دانشسرا، خیابان عباسی به منطقه باغمیشه می‌رسد. در ادامه به سمت شرق امتداد یافته و در محدوده نمایشگاه بین‌المللی تبریز خاتمه می‌یابد. مسیر خط دو قطار شهری تبریز از شفت غربی (منطقه قراملک) تا ایستگاه *S16* بوسیله *EPB* حفاری شده و مابقی مسیر به روش *NATM* حفاری خواهد شد. در این مقاله به بررسی مسیر از ایستگاه *S2* تا *S3* پرداخته شده است. در شکل ۱ نمایی کلی از مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز را نشان می‌دهد.

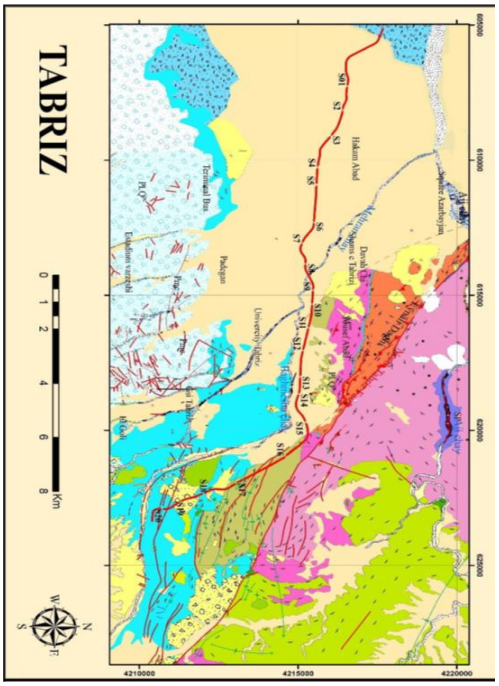
مطابق شکل ۲ و ۳ بخش‌های مختلف سیستم تزریق فوم دستگاه *TBM* خط ۲ قطار شهری تبریز شامل یک تانک ذخیره تنسیو اکتیو یک مسیر واحد پمپاژ تنسیو اکتیو، یک تولیدکننده فوم، خطوط تزریق به کاترهد از طریق روتاری سیل، خط تزریق به چمبر، خط تزریق به اسکرو، پمپ فوم و تانک آن که در گانتری ۱ قرار دارند.

۳- مکانیزم عملکرد فوم

فوم یا کف در حفاری با ماشین آلات تعادلی فشارزمین به منظور تسهیل در امر حفاری، کم کردن اصطکاک ما بین صفحه حفار و خاک زمین در حال حفاری و در نتیجه کاهش سایش ابزار برشی، تقلیل در نفوذ پذیر خاک حفاری شده و ... استفاده می شود .بطور کلی مواد افزودنی در جبهه کار تونل، محفظه پشت کاترهد یا چمبر و نوارنقاله مارپیچ) استفاده می‌شود **[4]**. همچنین عملیات بهسازی موجب کاهش نفوذپذیری زمین شده و مانع از چسبندگی خاک‌های رسی می‌شود **[5]**.

بطور کلی کارهای آزمایشگاهی کمی بر روی به‌عمل‌آوری خاک با فوم انجام شده است و طراحی بهسازی مشخصات خاک اغلب بر اساس یک فرآیند سعی و خطا در بخش‌های اولیه حفاری تونل و مستقیما در کارگاه انجام می‌گیرد. با این حال در سال‌های اخیر یکسری کارهای آزمایشگاهی انجام شده است که می‌تواند انجام فر

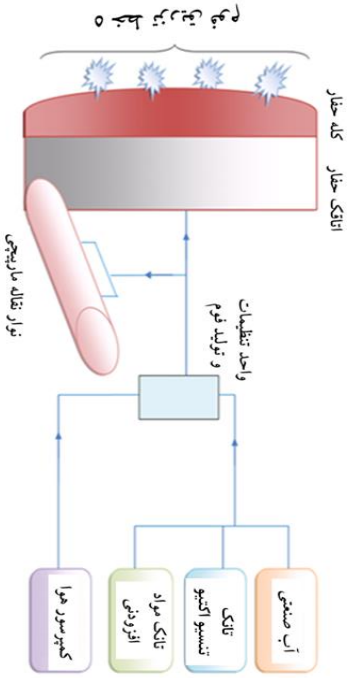
مارپیچ تزریق می‌گردد. تزریق در جبهه کار از طریق نازل‌های طراحی شده برروی کاترهد، می‌تواند سبب کاهش اصطکاک بین کاترهد، ابزار های برشی و بدنه کاترهد با خاک و نیز سبب جلوگیری یا کاهش سایش این قطعات شود .همچنین تزریق مواد در محفظه پشت سرکاترهد می‌تواند سبب کاهش اصطکاک و سایش در بین خاک و قطعات محفظه پشت سر کاترهد گردد.فوم به عنوان موثرترین و پرکاربردترین مواد در عملیات بهسازی خاک جبهه کار در حفاری مکانیزه است .فوم مورد استفاده در دستگاه حفار *EPB* متشکل از ترکیب دو ماده خاص بنام تنسیو اکتیو و پلیمر با آب و هوا می‌باشد **[2]**.



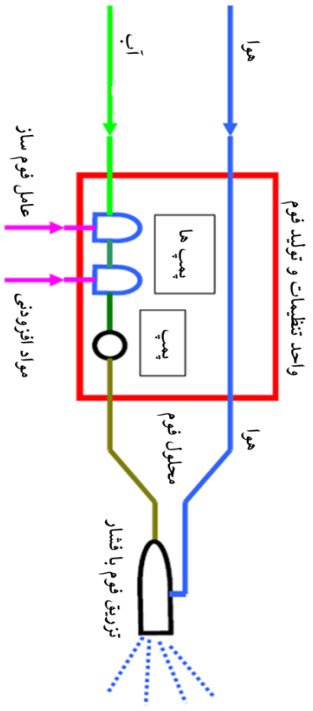
شکل ۱: نمایی کلی از مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز.

$$FOAM = Water + (Tensio\ active + polymer) + Air \quad (۲)$$

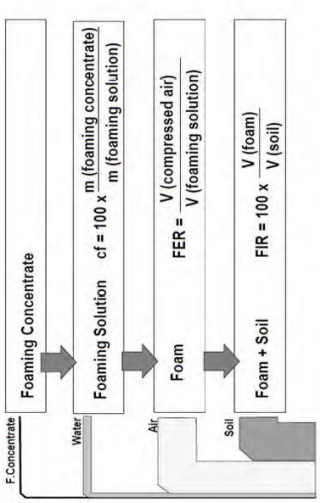
این ترکیبات به عنوان ترکیبات اصلی در مراحل ساخت و تزریق فوم در جبهه کار به شمار می رود .فاکتورهای اساسی که ویژگی های کنترلی و پایداری فوم را توصیف می کند در شکل ۴ نمایش داده شده است، که در آن $M_{surfactant}$ وزن ماده کف‌ساز در محلول (Kg)، $M_{Foam\ solution}$ وزن محلول(Kg)، V_{Foam} حجم فوم(لیتر)، $V_{Foam\ soluton}$ حجم محلول فوم(لیتر) و V_{Soil} حجم برجای خاک است.



شکل ۲: مراحل تشکیل و موقعیت نقاط تزریق فوم در دستگاه *TBM*.



شکل ۳: نمایی شماتیک از سیستم تزریق فوم.



شکل ۴: پارامترهای کلیدی فوم مورد استفاده در تونل.

از جمله تاثیرات تزریق فوم به سینه کار حفاری و ترکیب فوم با مصالح جبهه کار می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ایجاد فضایی همگن و یکدست و نفوذ ناپذیر در مقابل آب جبهه کار
- پایدار سازی جبهه کار در مقابل ریزش در زمین های سست ، ناپایدار و سنگ های شدیدا درزه دار
- کاهش مقاومت گشتاور کاترهد
- کاهش سایش و اصطکاک ابزار های برشی
- کم کردن نیروی تراست و افزایش راندمان حفاری
- کم کردن مقاومت انتقال و آسان شدن حمل و جابجایی مصالح حفاری
- ایجاد مواد الاستیک در جبهه کار و کمک به حفظ فشار *EPB* در حفاری در زمین‌های ریزشی
- کاهش نیروی اصطکاکی اطراف سپر ناشی از حجم روباره و کاهش نیروی پیشروی

۴- ارزیابی پتانسیل گرفتگی (کلاگینگ) مسیر خط دو قطار شهری و نمونه‌های خاکی مورد آزمایش

به طور کلی، خاک مسیر خط دو قطار شهری تبریز براساس مشاهدات حین حفاری و نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی ، از لایه‌های آبرفتی و لایه‌های سنگی ضعیف تشکیل شده است. لایه‌های آبرفتی شامل دو بخش آبرفت درشت‌دانه و آبرفت ریزدانه می‌باشند. لایه‌های شبه‌سنگی عمدتاً در بخش شرقی مسیر شناسایی شده است که با حرکت به سمت غرب به ضخامت رسوبات ریز دانه اضافه شده است به طوری که لایه های زیر سطحی عمدتا از تناوبی از رسوبات آبرفتی ریزدانه و درشت دانه تشکیل شده است. بطور کلی براساس حفاری های انجام شده، طور مسیر از شفت غربی تا ایستگاه *S16* که در حدود ۱۸ کیلومتر می‌باشد به ۵ ناحیه کلی به شرح زیر تقسیم بندی شده است:

- ناحیه ۱: از ابتدای مسیر تا کیلومتر ۲+۵۰۰
- ناحیه ۲: از کیلومتر ۲+۵۰۰ تا کیلومتر ۶+۰۰۰
- ناحیه ۳: از کیلومتر ۶+۰۰۰ تا کیلومتر ۱۱+۳۰۰
- ناحیه ۴: از کیلومتر ۱۱+۳۰۰ تا کیلومتر ۱۵+۸۰۰
- ناحیه ۵: از کیلومتر ۱۵+۸۰۰ تا کیلومتر ۱۸+۶۰۰

قسمتی از مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است در ناحیه ۱ و ۲ واقع شده است. در این ناحیه در غرب شهر تبریز تا عمق بررسی شده (حدود ۳۰ متر) عمدتاً رسوبات آبرفتی ریزدانه رسی و سیلتی دیده می‌شود. در میان این لایه‌های آبرفتی ریزدانه، میان لایه‌هایی از رسوبات ماسه‌ای هم وجود دارد، ولی مسیر تونل عمدتاً از درون رسوبات آبرفتی ریزدانه عبور می‌کند.

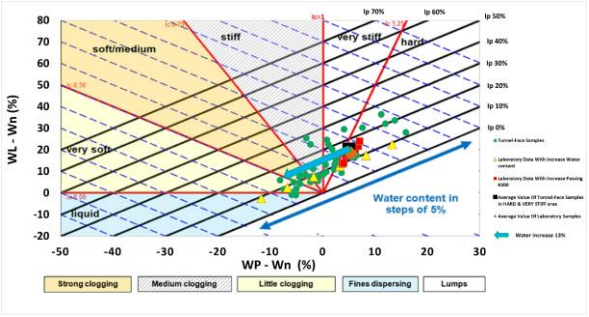
وجود رس و خاک های ریز دانه دارای خاصیت چسبندگی در سینه کار تونل، می‌تواند حین حفاری مشکلاتی چون چسبندگی کانی های رسی به قسمت های مختلف کاترهد و انسداد و گل گرفتگی کله و یا اسکرو ماشین حفاری و در نهایت صرف زمان و نیر وی انسانی زیاد برای عمل تمیز کاری و زدودن گل گرفتگی و آزاد نمودن تیغه های متوقف شده را ایجاد نماید .در چنین شرایطی ناگریز نرخ پیشروی حفاری تونل کاهش می‌یابد.

خطر انسداد و گل گرفتگی با افزایش شاخص پلاستیکی افزایش می‌یابد، خاکهایی که دارای شاخص پلاستیکی کوچکتر هستند نیاز به شرایط مرزی بسیار خاص دارند تا چسبناک شوند، زیرا سازگاری پلاستیکی تنها در محدوده‌ی کمی از درصد رطوبت خاک بدست می آید و با افزایش میزان آب، زودتر به ناحیه مایع خواهد رسید. اقدامات برای کاهش گل گرفتگی اغلب مربوط به افزایش مصنوعی میزان آب به منظور تجزیه بخش هایی از مواد چسبنده در داخل آب و یا حداقل اضافه کردن آب برای کاهش استحکام رس می‌باشد.و هرچقدر شاخص پلاستیکی بیشتر باشد بایستی مقدار آب بیشتری برای کاهش استحکام رس مصرف شود **[16]**.

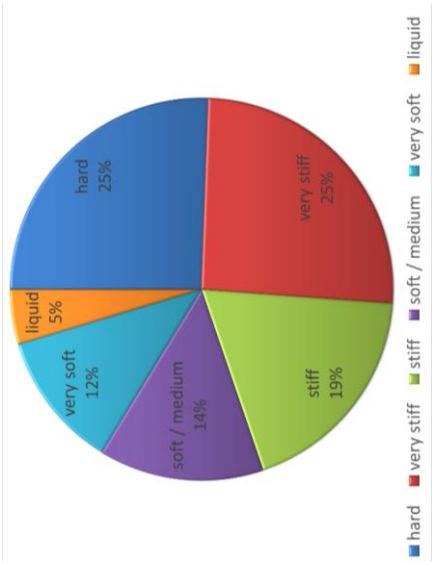
خاک‌های ریزدانه نرم که شاخص استحکام آنها مابین ۰,۴ الی ۰,۷۵ می‌باشد بطور مستقیم می‌تواند به عنوان محیط نگهدارنده استفاده شود **[17]**. خاک‌هایی که دارای شاخص استحکام کمتر از ۰,۴ را دارا می باشند نمی توانند به طور معمول به عنوان محیط نگهدارنده استفاده شوند، زیر ممکن است نتواند فشار لازم برای نگهداری جبهه را داشته باشد **[15]**. همچنین خاک‌هایی که دارای شاخص استحکام بیشتر از ۰,۷۵ هستند بیش از حد سفت بوده و بایستی بهسازی بر روی آنها صورت گیرد تا بتوان از آنها به عنوان محیط نگهدارنده استفاده کرد. یکی از را های معقول برای بهسازی این نوع خاک‌ها

اضافه کردن آب می‌باشد. بنابراین برای اینکه خاک به حالت سازگاری تبدیل شوند ممکن است در حالت اشباع قرار گیرد **[16]**.

در شکل ۵ نمودار خطر انسداد ماشین حفاری در مسیر خط دو قطار شهری تبریز شامل ناحیه ۱ و ۲ و نمونه های خاکی مورد آزمایش را نشان می‌دهد. اساس این نمودار برپایه بهسازی خاک بوسیله میزان آب مصرفی برای ماشین های *EPB* می‌باشد **[16]**. شکل ۶ درصد پراکندگی نمونه های مربوط به مقطع تونل که در ناحیه ۱ و ۲ خط ۲ قطار شهری تبریز واقع شده اند را با توجه به شکل ۵ نشان می‌دهد. در حدود ۵۰ درصد نمونه‌ها در ناحیه *hard* و *very stiff* واقع شده‌اند که اگر میانگینی از این نمونه ها گرفته شود مشخص می‌شود که میزان آب لازم برای رسیدن به شرایط مناسب نگهداری جبهه کار و اتاقک فشار ۱۳ درصد می‌باشد. برای نمونه های خاکی که از مقطع تونل تهیه شده است نیز این بررسی صورت گرفت. در این حالت مقدار ریز دانه خاک تا ۸۰ درصد با خاکی که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است، افزایش یافت و مشخص گردید که میزان آب لازم برای رسیدن به شرایط مناسب نگهداری جبهه کار و اتاقک فشار ۱۳ درصد می‌باشد.



شکل ۵: نمودار خطر انسداد ماشین حفاری در مسیر خط دو قطار شهر تبریز مابین ایستگاه S2 و S3 و نمونه‌های خاکی مورد آزمایش [۱۶].



شکل ۶: درصد پراکندگی نمونه های مربوط به مقطع تونل.

۵- آزمون‌های آزمایشگاهی

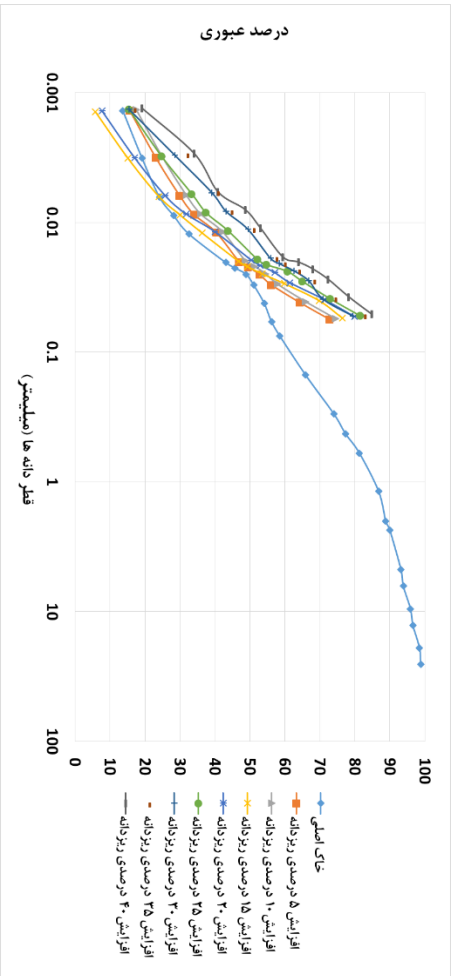
در این بخش از مطالعه به بررسی نتایج حاصل از آزمایشات و تحلیل و مقایسه آنها پرداخته شده است و شامل دو بخش می‌باشد، بخش اول شامل بررسی آزمایشات شناسایی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و بخش دوم شامل بررسی نتایج آزمایشات به‌عمل‌آوری خاک می‌باشد. برای انجام این آزمایشات از یک خاک مرجع که از ایستگاه ۳ خط دو قطاری شهری تبریز و از مقطع تونل تهیه شده بود استفاده گردیده است. با استفاده از این آزمایشات به بررسی تاثیر فوم بر روی خاک به‌عمل‌آوری شده در نسبت انبساط‌های مختلف، درصد رطوبت های مختلف و درصد ریزدانه مختلف پرداخته شده است.

۵-۱ آزمایشات شناسایی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک

در این مطالعه تاثیر فوم بر عملکرد مواد ریز دانه مورد بررسی قرار گرفته است، بدین منظور تعیین نوع دانه‌بندی خاک‌های بکار رفته و تعیین حدود اتربرگ آنها حائز اهمیت می‌باشد. در این بخش نتایج حاصل از آزمایشات دانه‌بندی با الک و هیدرومتری و همچنین نتایج حدود اتربرگ آورده شده است. برای انجام دانه‌بندی برای خاک اصلی از دانه‌بندی با الک استفاده گردید و با توجه به بررسی تاثیر فوم بر خواص خاک‌های ریزدانه از نوعی خاک که مشخصات آن در

جدول ۱ آورده شده است برای افزایش ریز دانه‌ی خاک مورد نظر استفاده شد. بدین صورت که به خاک اصلی به نسبت های ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ و ۳۰ و ۳۵ و ۴۰ درصد خاک مورد نظر اضافه گردید و آزمایشات مربوطه صورت پذیرفت. که دانه‌بندی این مخلوط ها با توجه به ریزدانه بودن با روش هیدرومتری انجام گرفت که نتیجه‌ی آن بصورت شکل ۷ می‌باشد. از خصوصیات مواد ریزدانه که می‌تواند در نتایج آزمایشات تاثیرگذار باشد حدود اتربرگ خاک مورد آزمایش می‌باشد. در جدول ۱ نتایج آزماش‌های حد روانی و حد خمیری نمونه خاک‌های مورد آزمایش ارائه شده است. با توجه به **جدول ۱** با افزایش درصد ریزدانه، حد روانی و حد خمیری خاک اصلی مورد آزمایش افزایش می‌یابد.

در رابطه ۱، پارامترهای W_l و W_p جزء خصوصیات ذاتی یک خاک محسوب میگردند و تغییر پذیر نمی باشند ولی محتوای رطوبت یک خاک می‌تواند به راحتی تغییر نماید که این تغییر تاثیر مستقیم بر روی قوام و استحکام خاک خواهد داشت. شرایط خاک بر اساس شاخص‌های مختلف استحکام مطابق جدول ۲ قابل رده‌بندی می‌باشد. از آنجایی‌که آزمون‌های آزمایشگاهی با محتوای رطوبت ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ و ۳۰ درصد انجام شده لذا می توان برای هرکدام از حالت ها شاخص استحکام را بدست آورد تا مشخص شود استحکام خاک در چه طبقه‌بندی ای براساس جدول ۲ خواهد داشت.



شکل ۷: نمودار دانه‌بندی خاک اصلی مورد آزمایش و خاک‌های با درصد ریزدانه (عبوری از الک شماره ۲۰۰) مختلف.

توصیف شرایط استحکام هریک از حالت‌های خاک‌های استفاده شده در آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده

می‌شود شاخص استحکام اکثر خاک‌های مورد آزمایش در دامنه‌ی بزرگتر از ۱,۲۵ قرار گرفته و طبق جدول ۲ در رده‌ی خاک‌های سخت طبقه‌بندی می‌شوند.

جدول ۱ حد روانی و حد خمیری نمونه خاک‌های مورد آزمایش.

نوع خاک	درصد رطوبت حد روانی	درصد رطوبت حد خمیری
خاک تهیه شده از مقطع تونل	*27.5*	***18.28***
خاک اضافه شده	*60*	***23.69***
مخلوط خاک با افزایش ۵ درصد ریزدانه	*28.4*	***18.78***
مخلوط خاک با افزایش ۱۰درصد ریزدانه	*28.9*	***19.01***
مخلوط خاک با افزایش ۱۵ درصد ریزدانه	*32.3*	***19.47***
مخلوط خاک با افزایش ۲۰ درصد ریزدانه	*33*	***20.03***
مخلوط خاک با افزایش ۲۵ درصد ریزدانه	*33.5*	***20.77***
مخلوط خاک با افزایش ۳۰ درصد ریزدانه	*35.1*	***21.21***
مخلوط خاک با افزایش ۳۵ درصد ریزدانه	*36.7*	***21.81***
مخلوط خاک با افزایش ۴۰ درصد ریزدانه	*39*	***22.05***

جدول ۲ طبقه‌بندی شرایط خاک براساس تغییرات شاخص استحکام(Ic).

شاخص استحکام(*Ic*)	توصیف شرایط استحکام خاک
سخت	*>1.25*
خیلی سفت	*1 - 1.25*
سفت	*.75 - 1*
نرم	*.5 - 0.75*
خیلی نرم	*0 - 0.5*
روان	*<0*

جدول ۲: توصیف شرایط استحکام خاک‌های مورد آزمایش.

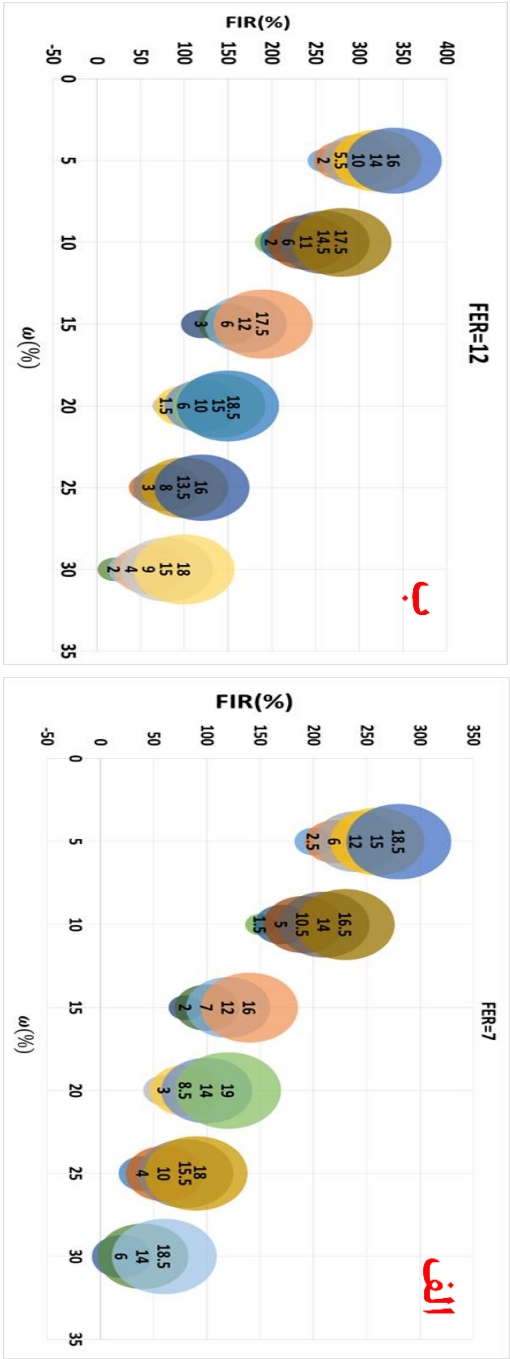
نوع خاک	درصد رطوبت خاک	درصد رطوبت حد روانی	درصد رطوبت حد خمیری	شاخص استحکام	توصیف شاخص استحکام
نمونه های خاکی گمانه ها	20.5	42.7	16.3	1.36	سخت
نمونه های خاکی گمانه ها	25.3	35.1	9.1	1.08	خیلی سفت
نمونه های خاکی گمانه ها	24.2	31.6	11.8	0.63	نرم
نمونه های خاکی گمانه ها	26.1	34.4	11.6	0.72	نرم
نمونه های خاکی گمانه ها	22.6	31.2	13	0.66	نرم
نمونه های خاکی گمانه ها	24.4	47	21.5	1.05	خیلی سفت
نمونه های خاکی گمانه ها	27	52.4	28.5	0.89	سفت
نمونه های خاکی گمانه ها	20.6	33.7	12.5	1.05	خیلی سفت
نمونه های خاکی گمانه ها	20.8	26.5	6.6	0.86	سفت
نمونه های خاکی گمانه ها	17.1	26.5	5.8	1.62	سخت
نمونه های خاکی گمانه ها	25.7	50.3	23.8	1.03	خیلی سفت
نمونه های خاکی گمانه ها	24.1	24.5	6.1	0.07	خیلی نرم
نمونه های خاکی گمانه ها	17.5	30.8	11	1.21	خیلی سفت
نمونه های خاکی گمانه ها	21.7	23.4	9.1	0.19	خیلی نرم
نمونه های خاکی گمانه ها	23.6	29.5	14	0.42	خیلی نرم
نمونه های خاکی گمانه ها	20.9	31.8	8.7	1.25	خیلی سفت
خاک تهیه شده از مقطع تونل	5	27.5	18.28	2.44	سخت
خاک تهیه شده از مقطع تونل	10	27.5	18.28	1.89	سخت
خاک تهیه شده از مقطع تونل	15	27.5	18.28	1.35	سخت
خاک تهیه شده از مقطع تونل	20	27.5	18.28	0.81	سفت
خاک تهیه شده از مقطع تونل	25	27.5	18.28	0.27	خیلی نرم
خاک تهیه شده از مقطع تونل	30	27.5	18.28	-0.27	روان
مخلوط خاک با افزایش ۵ درصد ریزدانه	15	28.4	18.78	1.39	سخت
مخلوط خاک با افزایش ۱۰درصد ریزدانه	15	28.9	19.01	1.40	سخت
مخلوط خاک با افزایش ۱۵ درصد ریزدانه	15	32.3	19.47	1.34	سخت
مخلوط خاک با افزایش ۲۰ درصد ریزدانه	15	33	20.03	1.38	سخت
مخلوط خاک با افزایش ۲۵ درصد ریزدانه	15	33.5	20.77	1.45	سخت
مخلوط خاک با افزایش ۳۰ درصد ریزدانه	15	35.1	21.21	1.44	سخت
مخلوط خاک با افزایش ۳۵ درصد ریزدانه	15	36.7	21.81	1.45	سخت
مخلوط خاک با افزایش ۴۰ درصد ریزدانه	15	39	22.05	1.41	سخت

۵-۲ نتایج آزمایشات به‌عمل‌آوری خاک

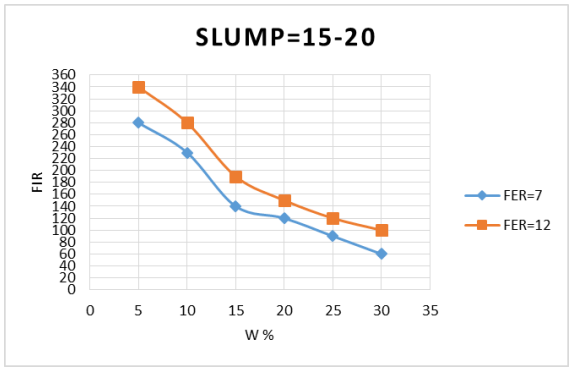
در این بخش به بررسی تاثیر پارامتر های مختلف بر روی خصوصیات خاک به‌عمل‌آوری شده پرداخته شده است. با انجام آزمایش اسلامپ می توان به بررسی خاصیت خمیری خاک اصلاح شده پرداخت. برای انجام این آزمایش ابتدا خاک اصلی با دو مقدار *FER* ۷ و ۱۲ با درصد های رطوبت مختلف که از رطوبت ۵ درصد شروع و با افزایش ۵ درصدی رطوبت نسبت به حالت قبل تا رطوبت ۳۰ درصد ادامه پیدا کرد. در مرحله‌ی بعدی درصد ریزدانه خاک تهیه شده از ایستگاه سوم قطار شهری تبریز بوسیله خاک با حدود اتربرگ مشخص (**جدول ۱**) با درصد افزایش ۵ درصد نسبت به حالت قبل و تا ۴۰ درصد افزایش یافته و برای هر مرحله افزایش درصد ریز دانه خاک، آزمایش اسلامپ با درصد رطوبت ۱۵ برای همه‌ی حالات انجام گرفت.

برای بررسی تاثیردرصد رطوبت بر روی اسلامپ، از درصد های رطوبت ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ و ۳۰ استفاده شد. آزمایش اسلامپ برای هریک از درصدهای رطوبت درنظر گرفته شده برای خاک با دو *FER=7* و *FER=12* انجام شده و تزریق فوم به خاک تا رسیدن به اسلامپ بهینه‌ی ۱۵ الی ۲۰ سانتی متر انجام شد که نتایج بصورت شکل ۸ و ۹ ارائه گردیده است. همانطوریکه که در شکل مشاهده می شود، با افزایش درصد رطوبت خاک مقدار تزریق فوم برای رسیدن به اسلامپ بهینه کاهش یافته است. به عنوان مثال و با توجه به **جدول** برای *FER=7* در رطوبت ۱۰ درصد خاک با مقدار *FIR=230* منجر به اسلامپ بهینه شده است، درحالی که در رطوبت ۳۰ درصد خاک مقدار *FIR* برای رسیدن به اسلامپ بهینه مقدار ۶۰ را داشته است.

با توجه به نمودار شکل ۵ مشخص می‌شود که هر چه درصد رطوبت یک نوع خاک افزایش یابد شرایط مناسب تری از نظر استحکام خاک داشته و محیط حفاری از نظر نگهداری جبهه کار در شرایط بهینه تری قرار خواهد گرفت. این شرایط بهینه از نتایج بدست آمده از آزمایشات نیز قابل مشاهده است (اشکال ۸ و ۹)، که با افزایش درصد رطوبت خاک، خاک حالت پلاستیک به خود گرفته و شرایط مناسبی را از نظر نگهداری جبهه کار حفاری به خود خواهد گرفت و مصرف فوم برای بهسازی خاک و رسیدن به کارپذیری بالا و مناسب کاهش خواهد یافت.



شکل ۸: نمودار حبابی برای بررسی رابطه‌ی بین تغییرات درصد رطوبت خاک (محور افقی)، مقدار FIR (محور قائم) و میزان افت اسلامپ (اندازه حباب‌ها) برای الف) FER=7 ب) FER=12.

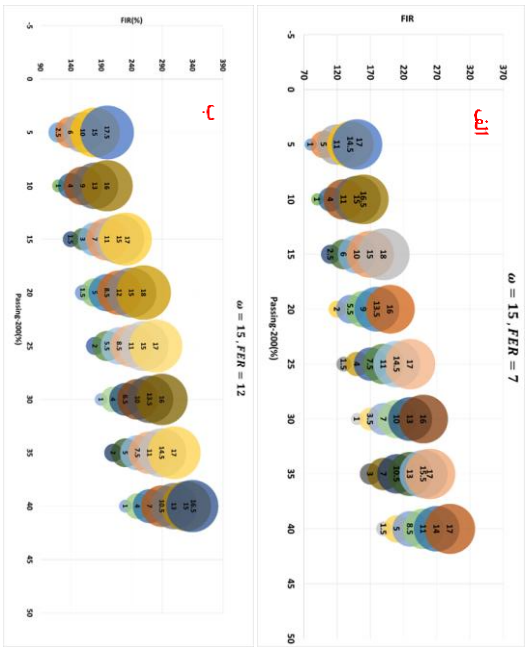


شکل ۹: تاثیر درصد رطوبت بر روی افت اسلامپ در FERهای مختلف.

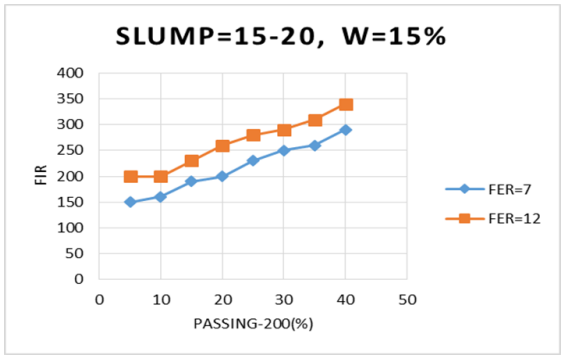
جدول ۴: نتایج حاصل از بررسی درصد رطوبت خاک بر روی افت اسلامپ در FERهای مختلف.

اسلامپ بهینه	*FER*	*FIR*	*w %*
15-20	*7*	*280*	*5*
15-20	*7*	*230*	*10*
15-20	*7*	*140*	*15*
15-20	*7*	*120*	*20*
15-20	*7*	*90*	*25*
15-20	*7*	*60*	*30*
15-20	*12*	*340*	*5*
15-20	*12*	*280*	*10*
15-20	*12*	*190*	*15*
15-20	*12*	*150*	*20*
15-20	*12*	*120*	*25*
15-20	*12*	*100*	*30*

برای افزایش مواد ریزدانه خاک تهیه شده از ایستگاه سوم قطار شهری تبریز از خاکی که منحنی دانه‌بندی و حدود اتربرگ آن در شکل ۷ و جدول ۱ آورده شده است، استفاده گردید. افزایش ریز دانه خاک اصلی بدین صورت انجام گرفت که درصدی از خاک که برای افزایش ریزدانه نیاز است از الک ۲۰۰ رد شده و به خاک اصلی اضافه شده و آزمایش انجام گردید. آزمایش اسلامپ برای بررسی تاثیر افزایش مواد ریز دانه بر روی افت اسلامپ با دو *FER* مختلف صورت پذیرفت که نتایج آزمایش قالب اشکال ۱۰ و ۱۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱۰: نمودار حبابی برای بررسی رابطه‌ی بین تغییرات درصد ریزدانه خاک(عبوری از الک ۲۰۰) (محور افقی)، مقدار FIR (محور قائم) و میزان افت اسلامپ (اندازه حباب‌ها) برای رطوبت ۱۵ درصد خاک و الف) FER=7 و ب) FER=12.



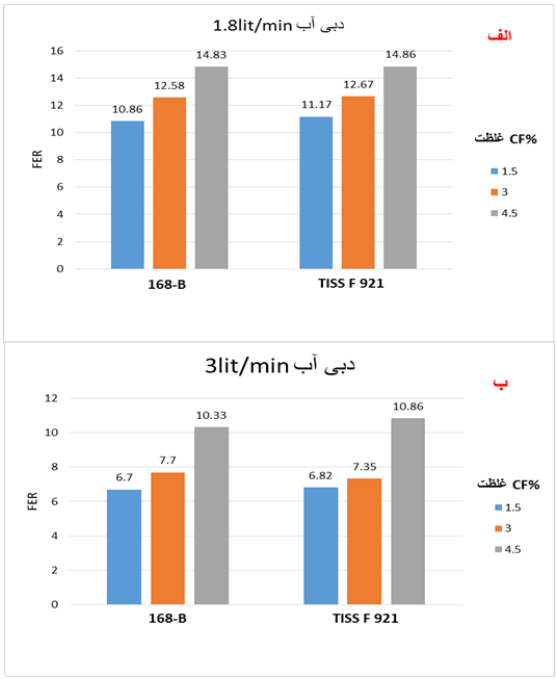
شکل ۱۱: تاثیر افزایش درصد مواد ریزدانه(عبوری از الک ۲۰۰) خاک بر روی افت اسلامپ در FERهای مختلف با ۱۵ درصد رطوبت.

با توجه به اشکال ۱۰ و ۱۱ نسبت تزریق فوم برای رسیدن به کارپذیری بالا و اسلامپ بهینه با افزایش درصد ریزدانه خاک افزایش می‌یابد. و رسیدن به اسلامپ بهینه مستلزم تزریق فوم زیادی می‌باشد. اما با توجه به اینکه از دو نوع *FER* استفاده شده است و مشاهده می‌شود که در *FER=7* مقدار تزریق فوم نسبت به *FER=12* کاهش پیدا کرده است. بنابراین با افزایش درصد ریزدانه خاک اگرچه میزان تزریق فوم به خاک افزایش می‌یابد اما می توان با انتخاب *FER* مناسب این مقدار تزریق فوم را کاهش داد. مقدار *FER* مورد استفاده شده در تولید فوم می‌تواند نقش مهمی در رسیدن به کارپذیری بالا با مقدار تزریق پایین ایفا کند.

جدول ۵: نتایج حاصل از بررسی افزایش درصد مواد ریزدانه(عبوری از الک ۲۰۰) خاک بر روی افت اسلامپ در FERهای مختلف با ۱۵ درصد رطوبت.

w(%)	*Passing-200(%)*	*FIR*	*FER*	اسلامپ بهینه(*cm*)
15	*5*	*150*	*7*	***15-20***
15	*10*	*160*	*7*	***15-20***
15	*15*	*190*	*7*	***15-20***
15	*20*	*200*	*7*	***15-20***
15	*25*	*230*	*7*	***15-20***
15	*30*	*250*	*7*	***15-20***
15	*35*	*260*	*7*	***15-20***
15	*40*	*290*	*7*	***15-20***
15	*5*	*200*	*12*	***15-20***
15	*10*	*200*	*12*	***15-20***
15	*15*	*230*	*12*	***15-20***
15	*20*	*260*	*12*	***15-20***
15	*25*	*280*	*12*	***15-20***
15	*30*	*290*	*12*	***15-20***
15	*35*	*310*	*12*	***15-20***
15	*40*	*340*	*12*	***15-20***

با توجه به نمودار شکل ۵ و اینکه افزایش درصد رطوبت خاک می‌تواند در بهسازی خاک نقش مهمی داشته باشد، در بهسازی خاک به کمک فوم استفاده از نسبت انبساط پایین می‌تواند در بهبود شرایط محیط نقش مهمی داشته باشد. در شکل ۱۲ که نتایج آزمایشات بر روی دو نوع *168-B* و *TISS F 921* برای بدست آوردن *FER* مناسب انجام شده است مشخص می‌شود که میزان نسبت انبساط فوم در دبی ثابت با کاهش غلظت ماده فوم ساز کاهش می‌یابد، ولی میزان کاهش در مقدار نسبت انبساط فوم در اثر افزایش دبی آب استفاده شده در مقایسه با کاهش آن در اثر کاهش غلظت ماده فوم ساز در محلول بسیار قابل توجه می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که درصورت استفاده از فوم برای بهسازی خاک و با توجه به نمودار شکل ۵ مبنی بر افزایش درصد رطوبت خاک برای رسید به کارپذیری بالا، می توان در تولید فوم از دبی آب بالاتری استفاده کرد که به نسبت انبساط پایین‌تری دست یافت و با نسبت تزریق فوم کمتری به کارپذیری بالا رسید و شرایط را برای نگهداری جبهه کار بهبود بخشید.



شکل ۱۲: تاثیر غلظت ماده فوم ساز بر میزان FER، الف) دبی آب lit/min ۱،۸ ب) دبی آب lit/min ۳.

۶- نتیجه‌گیری

تونل‌زنی با ماشین *EPB* نیازمند فرآیند بهسازی خاک است تا از این راه کنترل درستی بر عملیات حفاری بخصوص در محیط های خاکی و شرایطی بدون چسبندگی 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 بهساز برای استفاده بسیار موثر است؛ لازم است که در تونلسازی با دستگاه *EPB*، استراتژی بهسازی خاک در مرحله‌ی طراحی ارائه شود. با بررسی های صورت گرفته در این تحقیق برای پروژه‌ی خط ۲ قطار شهری تبریز نتایج زیر به دست آمده است:

- یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر روی میزان افت اسلامپ، نسبت انبساط فوم(*FER*) می‌باشد. با توجه به ریز دانه بودن خاک مورد آزمایش، هر چقدر *FER* فوم استفاده شده در آزمایش مقدار کمتری داشته باشد خاک زودتر به قابلیت کارپذیری بالا خواهد رسید.
- نتایج آزمایشات اسلامپ نشان می‌دهد که مقدار تزریق فوم (*FIR*) رابطه‌ی عکس با مقدار رطوبت خاک دارد و با بالا رفتن درصد رطوبت خاک، درصد *FIR* تزریقی به خاک کاهش پیدا خواهد کرد.
- با افزایش درصد رطوبت خاک، شاخص استحکام (*Ic*) کاهش می‌یابد و با کاهش *Ic* مقدار *FIR* تزریق شده به خاک برای رسیدن به کارپذیری بالا کاهش خواهد یافت.
- با افزایش درصد ریزدانه خاک(عبوری از الک شماره ۲۰۰)، شاخص استحکام افزایش پیدا می کند و این افزایش در مقدار مصرف فوم تاثیر گذاشته و باعث بالا رفتن مقدار *FIR* برای رسیدن به کارپذیری مناسب می شود.
- میزان نسبت انبساط فوم در دبی ثابت با کاهش غلظت ماده فوم ساز کاهش می‌یابد. میزان کاهش در مقدار نسبت انبساط فوم در اثر افزایش دبی آب استفاده شده در مقایسه با کاهش آن در اثر کاهش غلظت ماده فوم ساز در محلول بسیار قابل توجه می‌باشد.

۷- منبع‌ها

[1] Azali, S.T., et al., *Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line 7, Tehran Metro, Iran.* Engineering Geology, 2013. **166**: p. 170-185.

[2] Tarigh Azali, S. and H. Moammeri. *EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan Metro Line 1*. in *ITA-AITES world tunnel congress (WTC), Bangkok, Thailand*. 2012.

[3] Thewes, M., C. Budach, and M. Galli, *Laboratory tests with various conditioned soils for tunnelling with earth pressure balance shield machines.* Tunnel International Journal For Subsurface Use, 2010(6): p. 21.

[4] Quebaud, S., M. Sibai, and J.-P. Henry, *Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils.* Tunnelling and underground space technology, 1998. **13**(2): p. 173-180.

[5] Peila, D., C. Oggeri, and R. Vinai, *Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007. **133**(12): p. 1622-1625.

[6] Peila, D., C. Oggeri, and L. Borio, *Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling.* Environmental & Engineering Geoscience, 2009. **15**(3): p. 167-174.

[7] Peila, D., A. Picchio, and A. Chieregato, *Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process.* Tunnelling and Underground Space Technology, 2013. **35**: p. 55-66.

[8] Vinai, R., C. Oggeri, and D. Peila, *Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research.* Tunnelling and underground space technology, 2008. **23**(3): p. 308-317.

[9] Zumsteg, R. and A. Puzrin, *Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes.* Tunnelling and Underground Space Technology, 2012. **31**: p. 86-96.

[10] Boone, S., et al. *Use of ground conditioning agents for Earth Pressure Balance machine tunnelling*. in *Congres international de Chambéry–Octobre*. 2005.
[11] EFNARC, A., *Specifications and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock*. 2005.
[12] Jancsecz, S., R. Krause, and L. Langmaack, *Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: experiences of LRTS Izmir.* Challenges for the 21st Century, Alten et al (eds), 1999: p. 865-875.
[13] Langmaack, L., *Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling.* Proceedings of North American tunneling, 2000: p. 525-542.
[14] Peila, D., *Soil conditioning for EPB shield tunnelling.* KSCE Journal of Civil Engineering, 2014. **18**(3): p. 831-836.
[15] Thewes, M. and C. Budach, *Soil conditioning with foam during EPB tunnelling/. Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden.* Geomechanics and Tunnelling, 2010. **3**(3): p. 256-267.
[16] Hollmann, F. and M. Thewes, *Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling.* Tunnelling and Underground Space Technology, 2013. **37**: p. 96-106.
[17] Maidl, B., et al., *Mechanised shield tunnelling*. 2013: John Wiley & Sons.