

بررسی مشخصات فوم و تأثیر آن بر مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای و مخلوط (مطالعه موردی: متروی تبریز)

سه‌نند مقصودی¹، امیرحسین رضایی^{2*}، مسعود حاجی‌علیلوی بناب³

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

² دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

³ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: 1400/4/29، بازنگری: 1400/10/30، پذیرش: 1400/11/16، نشر آنلاین: 1400/11/16

چکیده

اصلاح خاک‌ها شامل تزریق مواد اصلاح‌گر از ماشین حفار بر جبهه کار و خاک‌های حفاری شده با هدف ایجاد مخلوطی با خواص خمیری و قابلیت تراکم‌پذیری بالا، مقاومت برشی پایین و نفوذپذیری مناسب می‌باشد. خواص خاک‌های اصلاح‌شده که دارای تأثیر قابل توجه بر عملکرد ماشین می‌باشد شدیداً به نوع خاک، مقدار و مشخصات مواد اصلاح‌گر بستگی دارد. در تحقیق حاضر مشخصات فنی فوم‌های مختلف مورد استفاده در حفاری متروی تبریز مطالعه و تأثیر پارامترهای مختلف تولید فوم بر مشخصات فنی و همچنین تأثیر کاربرد این فوم‌ها بر مقاومت برشی خاک‌های واقع در مسیر حفاری تونل ارزیابی شده است. بر اساس آزمایشات مشخصه فوم تفاوت عمده این مواد در زمان پایداری آن‌ها بوده و عموماً با افزودن پلیمر به محلول فوم‌ساز افزایش قابل ملاحظه‌ای در زمان پایداری فوم مشاهده شد. از منظر مقاومت برشی، کاربرد تمامی فوم‌ها منجر به کاهش تقریباً یکسان در زاویه اصطکاک داخلی شده و میزان این کاهش تابعی از مشخصات خاک مورد حفاری و نسبت تزریق فوم است. بیشترین کاهش در زاویه اصطکاک داخلی مربوط به نسبت تزریق 60 درصد بوده که میزان این کاهش برای نمونه‌های شن و ماسه سیلت‌دار حدود 20% و برای نمونه‌های سیلنتی حدود 35% بوده است. البته تزریق فوم از یک نسبت به بالاتر، تأثیر زیادی در کاهش بیشتر مقاومت برشی نداشته و نسبت تزریق 20 تا 40 درصد به‌عنوان نسبت مناسب برای پروژه مورد مطالعه در نواحی برداشت نمونه‌ها پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از میزان FIR بالاتر از حد مورد نیاز همگنی مخلوط خاک- فوم را از بین می‌برد.

کلیدواژه‌ها: اصلاح خاک، مشخصات فوم، مقاومت برشی خاک، متروی تبریز، FIR.

1- مقدمه

فوم حفاری و بنتونیت فشار مورد نیاز به جبهه کار اعمال و پایداری جبهه کار تأمین می‌شود. فشار جبهه کار با ایجاد شرایط تعادلی بین حجم مصالح حفاری شده و حجم تخلیه مصالح از درون محفظه دستگاه توسط نقاله ماریچی به دست می‌آید (اسداللهی و مومیوند، 1399).

به‌طور کلی طریقه کار ماشین EPB به این صورت است که فشار درون محفظه را مساوی و یا بزرگتر از مجموع فشارهای خاک و آب زیرزمینی موجود در سطح حفاری نگه می‌دارد (رضایی و شیرزه حق، 1398). در نهایت کنترل فرآیند حفاری و عملکرد ماشین حفار به خصوصیات خاک حفاری شده بستگی دارد.

تونل‌سازی مکانیزه به دلیل مزایای فراوان نسبت به روش‌های حفاری و نگهداری سنتی، به‌عنوان مهم‌ترین روش تونل‌سازی دهه‌های اخیر به‌ویژه در مناطق شهری مطرح شده است. در ماشین‌های حفار مکانیزه برای نگهداری سینه‌کار از مکانیزم‌های مختلفی استفاده می‌شود (Rezaei و همکاران، 2019).

به‌عنوان متداول‌ترین نوع ماشین حفار مکانیزه در زمین‌های نرم، در ماشین‌های سپر تعادلی زمین (Balance Pressure Earth EPB-TBM)، بخشی از مواد حفاری شده، از سینه حفاری به بیرون منتقل نشده و داخل محفظه حفاری تحت فشار نگهداری می‌شود. به‌کمک مواد حاصل از حفاری به‌همراه افزودنی‌هایی مانند



1-1- خصوصیات فوم

فوم در ماشین حفاری از پراکنده شدن هوای فشرده در یک محلول کف‌ساز تولید شده و به‌طور کلی از سه بخش عامل کف‌ساز، آب و هوا تشکیل می‌شود. خواص فوم نقش مهمی را در اصلاح خاک بازی می‌کند، که این خواص عمدتاً به خواص شیمیایی محلول فوم‌ساز، حجم فاز مایع و هوای نسبی و اندازه حباب‌های فوم بستگی دارد (Budach و Thewes، 2010).

پلیمرها مولکول‌های بزرگی هستند که از مولکول‌های تکراری کوچکتر تشکیل شده‌اند و با پیوندهای شیمیایی همانند یک زنجیر بلند به هم متصل شده‌اند. پلیمرها با جذب آب و تغییر ساختار خاک، آن را به یک خمیر پلاستیک تبدیل کرده و همچنین باعث ایجاد لغزندگی و کاهش چسبندگی خاک می‌شوند و عمدتاً به عنوان یک ماده افزودنی به محلول فوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور کلی مواد افزودنی در جبهه کار تونل، محفظه پشت سر مته (چمبر) و نقاله ماریپیچ تزریق می‌گردد. تزریق در جبهه کار و از طریق نازل‌های طراحی شده بر روی سر مته حفار، می‌تواند سبب کاهش اصطکاک بین سر مته و ابزارهای برشی و بدنه سر مته حفار با خاک و جلوگیری و کاهش سایش این قطعات شود. در شکل (1) نمای شماتیکی از مدار تولید و تزریق فوم در ماشین حفار نمایش داده شده است. مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در اصلاح خاک با فوم عبارتند از:

غلظت (C_f): عبارت است از نسبت وزن ماده فوم‌ساز بر واحد وزن محلول فوم که معمولاً بین 0/5 تا 5 درصد است.

$$C_f = \frac{M_{\text{surfactant}}}{M_{\text{foam}}} \times 100 \quad (1)$$

نسبت اتساع یا انبساط فوم (FER): نسبت اتساع مقدار افزایش حجمی است که بر واحد حجم محلول فوم‌ساز اعمال می‌شود. نسبت اتساع فوم معمولاً بین 5 تا 30 درصد می‌باشد.

$$FER = \frac{V_{\text{foam}}}{V_{\text{liquid}}} \times 100 \quad (2)$$

در شکل (2) فوم‌های با مقادیر مختلف FER برای نشان دادن تأثیر این پارامتر بر مشخصات ظاهری فوم تولید شده ارائه شده است. نسبت تزریق فوم (FIR): نسبت تزریق فوم عبارت است از نسبت حجم فوم تزریق شده به حجم خاک. نسبت تزریق فوم معمولاً بین 10 تا 80 درصد می‌باشد.

$$FIR = \frac{V_{\text{foam}}}{V_{\text{soil}}} \times 100 \quad (3)$$

زمان پایداری ($T_{50\%}$): اندازه زمانی است که 50 درصد وزنی محلول به‌کار رفته در تولید فوم دوباره به محلول اولیه تبدیل شود. ساختار فوم به‌علت این که لایه نازک محیطی فاقد هرگونه پایداری

برای انجام حفاری با کیفیت مناسب مصالح حفاری شده داخل چمبر باید به یک ماده همگن، پلاستیک و خمیری تبدیل شود که برای رسیدن به این خصوصیات از اصلاح‌گرها یا عوامل مناسب‌ساز خاک (SCA) استفاده می‌شود. به این امر اصطلاحاً اصلاح خاک گفته می‌شود که هدف آن ایجاد خاکی با خواص خمیری و قابلیت تراکم‌پذیری بالا، زوایه اصطلاک داخلی و مقاومت برشی پایین و نفوذپذیری مناسب برای جایی که آب زیرزمینی وجود دارد می‌باشد. این خصوصیات کارایی مناسبی برای خاک حفاری شده ایجاد کرده و اجازه می‌دهد تا فشار اعمالی توسط جک‌ها به‌طور یکنواختی به جبهه کار تونل وارد شده و قابلیت کنترل ورود خاک حفاری شده درون محفظه ماشین و انتقال مصالح از طریق نوار نقاله ماریپیچ افزایش یابد. به‌علاوه، اصلاح خاک موجب کاهش نفوذپذیری زمین و کنترل بهتر آب‌های زیرزمینی شده و مانع از چسبندگی خاک‌های رسی و انسداد محفظه ماشین می‌شود (Peila و همکاران، 2007).

همچنین اصلاح مؤثر خاک در فرآیند حفاری می‌تواند باعث کاهش در میزان زوایه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی (Hajjaliloue و همکاران، 2014)، سایش و استهلاک در سر مته حفار و ابزارآلات آن و نقاله حلزونی، گشتاور و فشار مورد نیاز برای ماشین، دوره‌های توقف ماشین برای انجام تعمیرات و کاهش حرکت‌های زمین و تأثیرات آن روی سازه‌های اطراف در کنار بهبود سرعت پیشروی حفاری تونل شود (حسن‌پور و همکاران، 1395؛ بخشنده و همکاران، 1392؛ Plötze و همکاران، 2013).

با این وجود مصالح تحت حفاری به‌ندرت دارای این خواص ایده‌آل می‌باشند. این امر به‌ویژه در خاک‌های فاقد ریزدانه دارای اهمیت بیشتر می‌باشد زیرا کاهش ذرات ریزدانه به‌طور کلی سبب کاهش کارپذیری، افزایش اصطکاک و نفوذپذیری می‌شود (Ball و همکاران، 2009). در ماسه‌های درشت‌دانه و شن‌ها خاک به‌آسانی به‌شکل خمیر پلاستیک در نمی‌آید و کنترل جریان خاک و آب توسط ماشین مخصوصاً با فشار آب زیرزمینی بالایی که دارند مشکل می‌شود. بدون به‌کار بردن SCA، استفاده از ماشین‌های EPB به خاک‌های ریزدانه محدود خواهد شد (Maidl و همکاران، 2012). مواد اصلاح‌گر مورد استفاده در اصلاح خاک‌ها شامل آب، فوم‌ها، پلیمرها، واگراکننده‌ها و گل بنتونیت می‌باشد. هرکدام از این مواد اصلاح‌گر از خواص متفاوتی برخوردار هستند و اثرات متفاوتی را در خاک‌های مختلف می‌گذارند و می‌تواند به‌صورت جداگانه و یا ترکیبی از هم مورد استفاده قرار بگیرند. فوم‌ها و پلیمرها از جمله متداول‌ترین مواد اصلاح‌گر می‌باشند که در ادامه به بیان مشخصات آن‌ها پرداخته شده است.

گیرد. به‌طور کلی این امر اغلب بر مبنای تجربیات کارکنان تونل استوار بوده و یا بر اساس سعی و خطا در بخش‌های اولیه تونل تعیین می‌گردد. در سال‌های اخیر به‌منظور کاهش آزمون و خطا آزمون‌های آزمایشگاهی از قبیل آزمایش‌های اختلاط، نفوذ مخروط، نفوذپذیری، تراکم‌پذیری، برش و مخروط اسلامپ هستند (پورمند و همکاران، 1395). اخیراً آزمون‌های بزرگ مقیاس با استفاده از سیستم نقلیه ماریچج آزمایشگاهی نیز پیشنهاد شده است (Viani و همکاران، 2008).

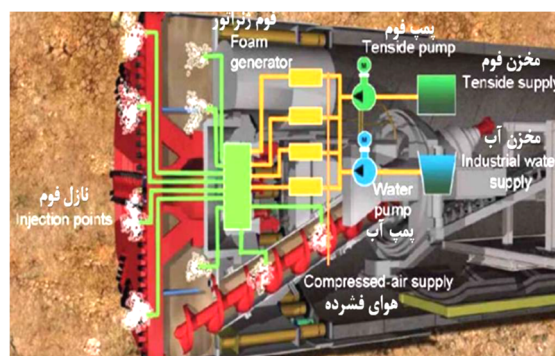
در مطالعه حاضر به‌عنوان یک مطالعه موردی به بررسی تأثیر فوم‌های مورد مصرف در حفاری تونل‌های خط 2 متروی تبریز پرداخته شده است. برای این منظور تأثیر مشخصات مختلف فوم از جمله CF ، FER و FIR و زمان پایداری بر عملکرد فوم و پلیمرهای مصرفی در پروژه مورد مطالعه قرار گرفته و همچنین با انجام آزمایشات برش نحوه تأثیر مشخصات فوم بر مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای و مخلوط بررسی شده است.

2- مطالعه موردی

1-2- معرفی پروژه

شهر تبریز یکی از شهرهای بزرگ و پر جمعیت ایران در شمال غرب این کشور می‌باشد. پروژه خط 2 قطار شهری تبریز به‌طول تقریبی 22/4 کیلومتر از غرب تبریز شروع شده و در محدوده نمایشگاه بین‌المللی تبریز در شرق خاتمه می‌یابد (Mostafaei و همکاران، 2019). طول مسیر پروژه به‌صورت مکانیزه توسط دو ماشین حفار سپری مکانیزه با سیستم فشار تعادلی زمین حفاری خواهد شد. به‌طور کلی، از لحاظ ژئوتکنیکی، لایه‌های زیرسطحی مسیر پروژه در بخش عمده‌های آن عمدتاً تناوبی از خاک‌های رسی-سیلتی و ماسه‌ای می‌باشند که در مجموع به دو گروه رسوبات درشت دانه (ماسه‌ای) و ریزدانه قابل تقسیم هستند. لایه‌های ماسه‌ای عمدتاً با طبقه‌بندی SM و لایه‌های ریزدانه با طبقه‌بندی CL و ML شناسایی شده‌اند (Katebi و همکاران، 2015). برای تهیه خاک مورد نیاز از ایستگاه‌های در حال ساخت 1، 2 و 3 در بخش غربی و ایستگاه 16 در بخش شرقی مسیر نمونه‌گیری انجام گردید. از هر ایستگاه، چهار نمونه از نقاط مختلف و در تراز تونل برداشت گردید. مسیر پروژه خط 2 به‌همراه موقعیت ایستگاه‌های مذکور در شکل (3) نمایش داده شده است. نمونه‌های بخش غربی مسیر با طبقه‌بندی SM و GM و دارای قطر متوسط $D_{50}=1\sim 3\text{mm}$ بوده نمونه‌های اخذ شده از ایستگاه 16 با طبقه‌بندی ML و SM و به‌طور کلی ریزدانه‌تر از خاک بخش غربی مسیر بوده ($D_{50}\approx 0.2\text{mm}$) و دارای متوسط دامنه خمیری 9 می‌باشند. منحنی دانه‌بندی نمونه‌های مربوط به ایستگاه 1 و ایستگاه 16 به‌عنوان نمونه در شکل (3) ارائه شده است.

می‌باشد، ناپایدار خواهد بود. پایداری فوم به ضخامت لایه آن و روند به‌هم آمیختن مایع و هوا بستگی دارد.



شکل 1- نمایی شماتیک از مدار تولید و تزریق فوم در ماشین حفار EPB (طریق ازلی و همکاران، 1393)



شکل 2- مشخصات ظاهری فوم‌های تولید شده با مقادیر مختلف FER (Yang و Zhou، 2020)

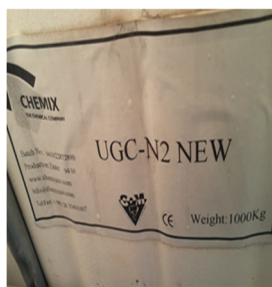
هنگامی که فوم به خاک اضافه می‌شود، حباب‌های هوا، چگالی دوغاب خاکی را کم کرده و اصطکاک بین دانه‌های خاک را کاهش می‌دهند؛ بنابراین فوم باید زودتر از زمان از بین رفتن حباب‌های هوا به‌خاک جلوی جبهه کار اضافه شود. اگر این پارامترها به‌طور صحیح در نظر گرفته نشوند، خاک موجود در محفظه ماشین حفار کاملاً خشک شده و این مسئله منجر به افزایش آبی فشار گشتاور، دما و کاهش سرعت پیشروی خواهد شد. در صورت اضافه شدن بیش از حد سیال یا فوم نیز خاک در محفظه‌های حفاری در مخلوط آب و کف غوطه ور شده و انجام عملیات تخلیه را با وجود پلاستیسیته بالا، بسیار مشکل خواهد کرد (Jancsez و همکاران، 1999).

خواص خاک‌های اصلاح شده شدیداً به نوع خاک و نوع و مقدار، مشخصات و ترکیب مواد اصلاح‌گر بستگی دارد که دارای تأثیر قابل توجهی روی عملکرد ماشین حفاری می‌باشد. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای دخیل در این امر و همچنین تنوع مختلف اصلاح‌گرها اصلاح خاک می‌بایست با مطالعه و شناخت کافی انجام

استفاده از بنتونیت به همراه فوم یا انجام حفاری با افزایش غلظت فوم توصیه می‌شود. برای تهیه نمونه ظرف میکسر را با 1500 گرم از خاک مورد آزمایش در حالت خشک پر کرده و سپس آب را به تناسب رطوبت مورد نظر (اشباع؛ رطوبت 10 درصد) به نمونه اضافه کرده و پس از اختلاط کامل، فوم با میزان FER مورد نظر به آن افزوده شده و عمل اختلاط در میکسر با دور آهسته انجام می‌شود. بر اساس حجم خاک مورد نیاز برای انجام هر آزمایش، با اختلاط در حدود دو دقیقه مخلوط یکنواختی از خاک فوم‌دار حاصل می‌شود. نمونه‌ها بلافاصله بعد از تولید فوم آماده شده و آزمایشات مورد نظر انجام می‌شدند تا زمان بین تولید نمونه و مرحله آزمایش در حداقل ممکن نگه‌داشته شود.

جدول 1- مشخصات فنی فوم‌های مورد استفاده

پلیمر	KF168B	KF159A	UGC-N2	مشخصات دمایی 20 درجه
زرد روشن	بی‌رنگ	زرد	زرد کم رنگ	رنگ
1300	1035	1400	1035	چگالی kg/m ³
250	100	250 ± 5	100	ویسکوزیته m.pa.s
7	-7/5	± 0/5	-7/5	PH
	6/5	7/5	6/5	
کاملاً	کاملاً	کاملاً	کاملاً	قابلیت حل در آب
محلول	محلول	محلول	محلول	



(الف)

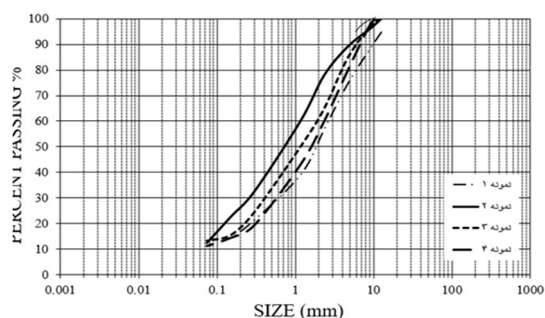


(ب)

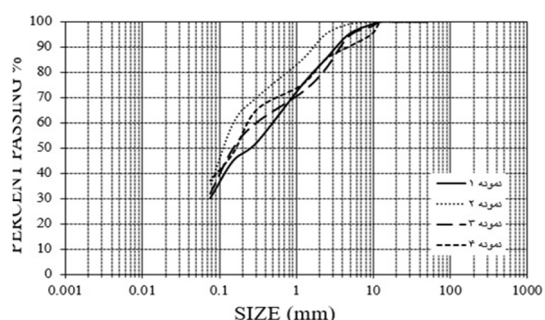
شکل 3- الف) فوم مصرفی KF168B و UGC-N2، ب) میکسر مورد استفاده و شمای کلی دستگاه فوم‌ساز



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 3- الف) مسیر خط 2 متروی تبریز و ایستگاه‌های برداشت خاک، ب) ایستگاه 1، ج) ایستگاه 16، نمودارهای دانه‌بندی نمونه‌های برداشت شده

2-2- مواد فوم‌ساز

در این تحقیق، از سه نوع ماده فوم‌ساز شامل فوم‌های تولید داخل سری KF از نوع کمیل (KF159A - KF168B) و چمیکس (UGC-N2) به همراه یک نوع پلیمر (RHEOSOIL211) برای انجام آزمایشات روی فوم استفاده شده است که این فوم‌ها در پروژه خط 2 متروی تبریز در حال مصرف بود. مشخصات فنی فوم‌های مورد مطالعه در جدول (1) ارائه شده و نمونه ظرف فوم‌های UGC-N2 و KF168B در شکل (4) نمایش داده شده است.

به‌طور کلی تمامی فوم‌های مورد مطالعه ویژه حفاری در زمین‌های سست تولید شده و مطابق مشخصات ارائه شده از طرف تولید کننده برای انواع خاک‌های مختلف قابل کاربرد هستند. برای حفاری در خاک‌های شنی درشت‌دانه که فاقد ریزدانه می‌باشند،

متفاوت و انواع مواد فوم ساز، برخواص فوم بررسی شود (EFNARC، 2005). در مطالعه حاضر اثر تغییرات غلظت ماده فوم ساز (غلظت - های 1%، 2/5% و 4%) و دبی هوا (300 و 400 لیتر بر ساعت) بر مدت زمان پایداری و نسبت اتساع فوم های مختلف بررسی شده است. انتخاب مقادیر بر اساس میزان رایج مصرفی در پروژه مورد مطالعه و بر اساس داده های ثبت شده عملیات حفاری انجام گرفته است. برای هر یک از شرایط غلظت و دبی هوا سه بار آزمایش تعیین نسبت اتساع فوم و مدت زمان پایداری فوم تکرار شده و میانگین نتایج حاصله به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است. در مجموع 108 آزمایش بر روی سه نوع فوم مصرفی انجام گرفته و پس از رسیدن به شرایط استاندارد تولید 12 آزمایش هم بر روی پلیمر انجام شده است. نتایج آزمایشات به تفکیک نوع ماده فوم ساز در جدول (2) ارائه شده است.

در این تحقیق از دستگاه فوم ساز آزمایشگاهی دانشگاه تبریز برای تولید فوم استفاده شده است. طرح دستگاه شبیه به دستگاه تولید فوم در ماشین حفاری EPB می باشد ولی اندازه آن در مقیاس آزمایشگاهی برای تولید حجم کمتری از فوم در آزمایشگاه طراحی شده است. شکل (4) بخش های مختلف دستگاه فوم ساز را نشان می دهد. برای اختلاط خاک و فوم از یک میکسر 5 لیتری استفاده شده که در سه سرعت مختلف قابل کارکرد است (شکل (4)).

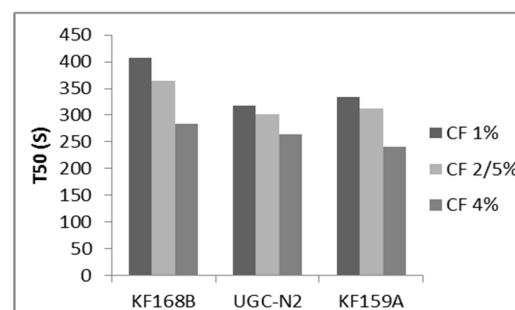
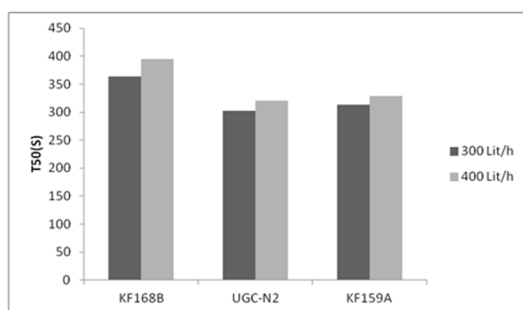
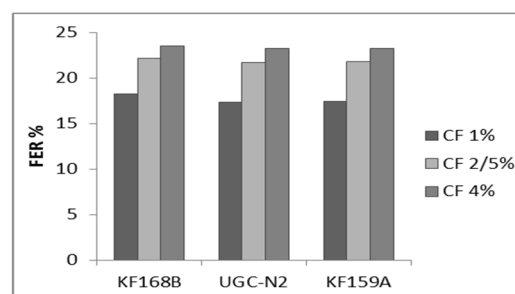
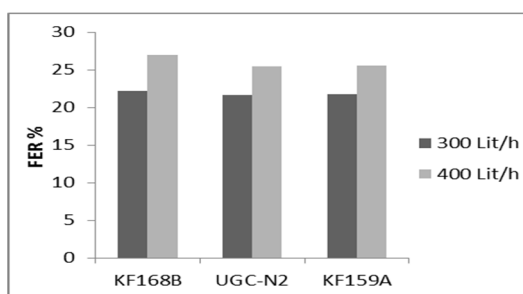
3- نتایج

3-1- نتایج آزمایشات مشخصات فوم

آزمایشات مشخصه فوم به منظور اندازه گیری خواص فوم تولید شده از محلول های مختلف فوم انجام می شود تا اثرات شرایط تولید

جدول 2- نتایج آزمایشات مشخصات فوم

C_r (%)	دبی هوا (L/h)	KF168B		UGC-N2		KF159A		KF159A همراه با پلیمر	
		FER (%)	T50 (sec)	FER (%)	T50 (sec)	FER (%)	T50 (sec)	FER (%)	T50 (sec)
1	300	18/25	408	17/33	317	17/46	334	---	---
	400	23/14	433	22/59	340	22/73	381	---	---
2.5	300	22/19	364	21/68	302	21/76	313	16/45	408
	400	26/98	395	25/42	320	25/54	329	23/18	427
4	300	23/52	284	23/21	264	23/26	251	---	---
	400	30/12	360	29/21	276	29/39	286	---	---



غلظت 2/5%

دبی هوای تولیدی 300 لیتر بر ساعت

شکل 4- اثر غلظت ماده فوم ساز و دبی هوا بر FER و زمان پایداری فوم برای سه نوع فوم مورد مطالعه

در سایر غلظت ها، می‌توان بیان کرد که فوم KF168B در مورد تأثیر غلظت بر زمان پایداری کارایی بهتری نسبت به فوم‌های دیگر از خود نشان داده است.

بر اساس نتایج شکل (5) و جدول (2)، زمان پایداری فوم تولید شده در یک میزان غلظت ثابت با مقدار دبی هوای وارده، رابطه مستقیم داشته است. با افزایش میزان دبی تولیدی زمان پایداری فوم به نسبت قابل توجهی افزایش می‌یابد. از آنجا که پایداری فوم پارامتر بسیار تأثیرگذاری در عملیات حفاری با ماشین EPB می‌باشد، افزایش دبی هوای تولیدی می‌تواند به‌عنوان یکی از ساده‌ترین و مؤثرترین راه‌ها برای افزایش پایداری فوم مورد توجه قرار گیرد.

به‌عنوان نمونه با توجه به نتایج حاصل در غلظت 2/5% فوم‌های مختلف برای دبی هوای 400 لیتر در ساعت، زمان پایداری فوم‌های KF168B، KF159A، UGC-N2 به ترتیب 8%، 6% و 5% بیشتر از مقادیر زمان پایداری در دبی هوای 300 لیتر در ساعت شده است. برای غلظت 4% این مقدار افزایش در زمان پایداری فوم‌ها به ترتیب 21%، 13% و 8% بوده است.

براساس آزمایشات انجام گرفته می‌توان به این جمع‌بندی رسید که برای یک محلول موجود، خواص فوم می‌تواند با تنظیم غلظت و پارامترهای دستگاه تولید کننده فوم متغیر باشد و در نتیجه مشخصات فوم تزریق شده به خاک می‌تواند با استفاده از متغیرهای بالا تغییر کند تا این که در طول حفاری در مواجهه با انواع خاک‌ها شرایط تولید فوم را برای بهترین عملکرد دستگاه حفاری به بهترین نحوه مدیریت کرد.

3-1-3- تأثیر پلیمر

با توجه به کاربرد پلیمر همراه با ماده اصلاح‌گر KF159A در پروژه، تأثیر افزودن پلیمر بر مشخصات فوم خاص بررسی گردید. بر اساس نتایج جدول (2) استفاده از پلیمر به‌همراه KF159A برای تولید فوم در شرایط آزمایشات نشان می‌دهد که افزودن پلیمر باعث افزایش قابل ملاحظه زمان پایداری فوم می‌شود. صرف‌نظر از دبی هوا، با افزودن 1% پلیمر به ماده اصلاح‌گر میزان زمان پایداری در حدود 22% افزایش یافته است. دلیل این امر افزایش نیروی کشش سطحی در اثر اضافه شدن پلیمر می‌باشد که باعث می‌شود مدت زمان پایداری فوم زیادتر شود. بنابراین استفاده از پلیمرها در عملیاتی که فوم تولید شده به زمان پایداری بالایی نیاز داشته باشد، می‌تواند مفید باشد. البته لازم به‌ذکر است افزودن پلیمر منجر به کاهش قابل توجه در میزان FER شده است که این امر نیازمند توجه در فعالیت‌های اجرایی می‌باشد.

3-1-1- تأثیر غلظت فوم و دبی هوا بر نسبت اتساع فوم

در شکل (5) تأثیر غلظت ماده فوم‌ساز و همچنین دبی هوا (Q_a) بر میزان FER به‌عنوان نمونه برای برخی مقادیر نشان داده شده است. بر اساس نتایج این شکل و جدول (2) ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان غلظت ماده فوم‌ساز از 1 به 4 درصد در یک دبی هوای ثابت عدد FER در حدود 5 تا 8 درصد افزایش می‌یابد که این افزایش بسته به نوع ماده فوم ساز متفاوت می‌باشد. به نظر می‌رسد که در نتیجه افزایش غلظت محلول فوم‌ساز کشش سطحی محلول کاهش یافته و در نتیجه انرژی لازم برای تولید فوم کاهش پیدا کرده و این امر منجر به افزایش قطر حباب‌های تولیدی فوم و کاهش مقدار فوم در حجم ثابت شده است که در نهایت باعث افزایش مقدار FER می‌شود. ملاحظه می‌شود میزان نسبت اتساع فوم در KF168B بیشتر از دو نوع دیگر بوده و در UGC-N2 کمترین مقدار حاصل شده است. می‌توان گفت فوم KF168B در مورد تأثیر غلظت بر نسبت اتساع فوم نسبت به فوم‌های دیگر عملکرد بهتری دارد.

در اثر افزایش دبی هوا از 300 به 400 لیتر بر ساعت در یک میزان ثابت غلظت، افزایش 18 تا 30 درصدی در نسبت اتساع فوم دیده می‌شود. کمترین درصد تفاوت نیز مربوط به غلظت 2/5% می‌باشد. میزان افزایش در مقدار FER در اثر افزایش دبی هوا در مقایسه با میزان افزایش آن، در اثر افزایش غلظت محلول فوم‌ساز کمی بیشتر می‌باشد. علت افزایش میزان FER در دبی‌های هوای بالاتر افزایش درصد حجم هوای وارد شده به فوم می‌باشد. با توجه به شکل (5) در غلظت 2/5% میزان ضریب اتساع در فوم‌های KF168B، KF159A، UGC-N2 در حالت دبی 400 لیتر در ساعت به ترتیب 21%، 18% و 18% بیشتر از مقادیر در دبی هوا 300 لیتر در ساعت می‌باشد. بر این اساس تأثیر دبی هوا بر اتساع فوم در KF168B نسبت به فوم‌های دیگر بیشتر است.

3-1-2- تأثیر غلظت فوم و دبی هوا بر زمان پایداری فوم

نتایج آزمایشات فوم نشان‌دهنده یک رابطه معکوس مابین زمان پایداری فوم و میزان غلظت محلول فوم‌ساز می‌باشد به طوری که با افزایش غلظت محلول فوم‌ساز زمان پایداری فوم کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش غلظت محلول فوم از کشش سطحی محلول کاسته و این امر منجر به ناپایداری حباب‌های فوم می‌گردد و فوم سریع‌تر از بین می‌رود. همان‌طور که در شکل (5) مشاهده می‌شود در غلظت 2/5% در دبی 400 لیتر بر ساعت میزان زمان پایداری فوم در KF168B 20% بیشتر از UGC-N2 و 16% بیشتر از KF159A به‌دست آمده است. همچنین در دبی 300 لیتر بر ساعت 17% زمان پایداری KF168B بیشتر از UGC-N2 و 14% بیشتر از KF159A می‌باشد. با توجه به روند مشابه

3-2- نتایج آزمایشات برش مستقیم

مقاومت برشی به‌عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی و پایه‌ای در خاک‌های فوم‌دار از اهمیت زیادی در حفاری‌های مکانیزه برخوردار است. چرا که کاهش در مقاومت برشی خاک حفاری شده منجر به کاهش در گشتاور لازم برای دوران سرمنته ماشین حفاری خواهد شد. در مطالعه حاضر به‌منظور ارزیابی مقاومت برشی خاک‌های فوم‌دار از آزمایش برش مستقیم براساس استاندارد ASTM D 3080 استفاده شده است. با توجه به ارتفاع حدود 9/5 متری محفظه ماشین حفار پروژه مورد مطالعه و وزن مخصوص خاک مخلوط با فوم، برای انجام آزمایش سه تراز تنش مختلف 25، 50 و 100 کیلوپاسکال در نظر گرفته شده‌اند. در آزمایشات انجام گرفته از سرعت 0/24 میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. لازم به‌ذکر است در آزمایشات انجام شده زاویه اصطکاک داخلی معادل 10% کرنش کل یا 6 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تعداد 48 آزمایش برش مستقیم برای هر ایستگاه انجام شده است که در هر ایستگاه 36 عدد از آن‌ها (12 آزمایش با سه تراز تنش متفاوت)

مربوط به خاک‌های فوم دار و 12 عدد خاک بدون فوم می‌باشد. برای تعیین درصد تزریق بهینه در عملیات حفاری پروژه مورد مطالعه، مقدار غلظت فوم برابر 2/5 درصد و میزان FER در حوالی 15 درصد ثابت نگه داشته شده و اثر تغییرات FIR بر مقاومت برشی مخلوط خاک و فوم بررسی شده است. بر اساس مقادیر متداول پروژه، میزان FIR برابر 20، 40 و 60 درصد در نظر گرفته شده است. همچنین دو حالت اشباع و رطوبت 10 درصد (رطوبت در محل نمونه‌ها) برای خاک اولیه قبل از اضافه کردن فوم مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج آزمایشات مربوطه در جدول (3) ارائه شده است. شایان‌ذکر است برای نمونه‌های در حالت اشباع از اثر چسبندگی صرف‌نظر شده است.

لازم به‌ذکر است با توجه به تعداد زیاد آزمایشات، نتایج و نمودارهای مربوطه و تنوع فوم‌های مورد مطالعه و در نظر گرفتن حجم مقاله حاضر، به ارائه نتایج مربوط به بخشی از آزمایشات بسنده شده است. با توجه به مشابهت نمونه‌های ایستگاه های 1، 2، 3 در ادامه صرفاً به نتایج مربوط به ایستگاه 3 در کنار خاک ایستگاه 16 پرداخته می‌شود.

جدول 3- نتایج آزمایشات برش مستقیم

نوع فوم	FIR	FER	ایستگاه 1		ایستگاه 2		ایستگاه 3		ایستگاه 16	
			چسبندگی (Kg/cm ²)	∅ (درجه)	چسبندگی (Kg/cm ²)	∅ (درجه)	چسبندگی (Kg/cm ²)	∅ (درجه)	چسبندگی (Kg/cm ²)	∅ (درجه)
			رطوبت 10 درصد		رطوبت 10 درصد		رطوبت 10 درصد		رطوبت 10 درصد	
---	---	---	0/064	35/3	34/3	0/066	35/03	35/5	---	---
UGC-N2	20	15	0/034	29/3	27/2	0/047	32/6	30/3	---	---
UGC-N2	40	15	0/022	27/2	25/2	0/035	30/6	27/3	---	---
UGC-N2	60	15	0/019	26/8	24/4	0/031	28/6	26/06	---	---
---	---	15	0/068	35/03	34/5	0/068	36/6	36/3	---	---
Kf168B	20	15	0/031	28/2	26/8	0/039	31/2	28/2	---	---
Kf168B	40	15	0/023	27/4	24/5	0/035	28/9	27/03	---	---
Kf168B	60	15	0/018	25/3	23/6	0/027	28/3	25/06	---	---
---	---	---	0/056	33/5	33/4	0/14	26/01	25/3	---	---
UGC-N2	20	15	0/035	29/6	28/1	0/089	22/6	20/6	---	---
UGC-N2	40	15	0/025	27/8	26/6	0/068	19/4	17/9	---	---
UGC-N2	60	15	0/019	27	25/3	0/053	16/7	15/4	---	---
---	---	15	0/054	30/7	31/5	0/13	26/5	24/9	---	---
Kf168B	20	15	0/032	29/7	27/8	0/068	21/1	19/5	---	---
Kf168B	40	15	0/026	28/4	25/8	0/046	18/2	16/2	---	---
Kf168B	60	15	0/016	26/4	24	0/04	16/4	14/6	---	---

در نمونه های ایستگاه 3، بیشترین کاهش در زاویه اصطکاک داخلی مربوط به نسبت تزریق 60 درصد بوده که میزان این کاهش برای فوم KF168B در حالت رطوبت اشباع و 10% به ترتیب حدود 20% و 23% حاصل شده است. برای نمونه های حاوی فوم UGC-N2 این مقادیر به ترتیب 24% و 23% می باشد. تأثیر فومها در خاک ایستگاه 16 اندکی بیشتر بوده و در نسبت تزریق 60 درصد برای نمونه های حاوی فوم KF168B و UGC-N2 زاویه اصطکاک داخلی در شرایط رطوبت اشباع به ترتیب به میزان 41% و 39% و در رطوبت 10% به میزان 38% و 35% نسبت به خاک بدون فوم کاهش یافته است.

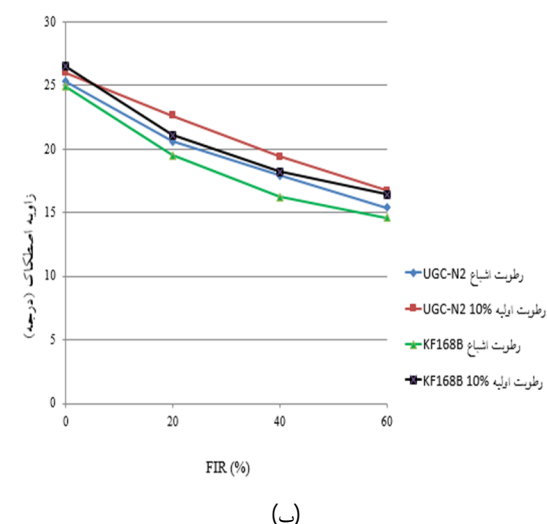
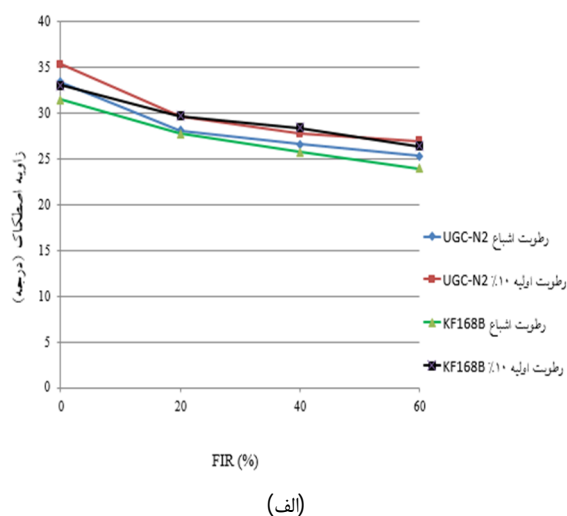
با توجه به شکل (6-الف) در FIR برابر با 20 درصد یک کاهش قابل توجه در زاویه اصطکاک داخلی نسبت به خاک اصلاح نشده مشاهده می شود و با زیادتر شدن FIR، از شیب کاهش در زاویه اصطکاک داخلی با افزایش FIR کاسته می شود. بر همین اساس و با توجه به نرخ کاهش زاویه اصطکاک داخلی در FIRهای مختلف، در ایستگاه های 1، 2، و 3 نسبت تزریق 20 تا 40 درصد و در ایستگاه 16 نسبت تزریق 40% به عنوان درصد بهینه پیشنهاد می گردد. علاوه بر کاهش مقدار زاویه اصطکاک داخلی، برای نمونه های حاوی فوم KF168B در اثر تزریق فوم رفتار اتساعی نمونه های خاک به کلی از بین رفته و رفتار انقباضی در کل نمونه مشاهده شده است.

از طرفی با مقایسه نمودار نمونه های حاوی فوم در دو حالت رطوبت اولیه اشباع و 10% نتیجه گرفته می شود که مقدار کاهش در زاویه اصطکاک داخلی در حالت اشباع بیشتر از حالت رطوبت اولیه 10% است. عملکرد دو فوم مورد مقایسه تقریباً به یکدیگر نزدیک بوده و به طور کلی فوم تولید داخل KF168B نسبت به فوم UGC-N2 در نمونه های تمامی ایستگاهها اندکی بیشتر زاویه اصطکاک داخلی نمونه ها را کاهش داده است.

3-2-2-2- نمودارهای نسبت تنش برشی به تنش قائم در برابر جابه جایی افقی

الف) نتایج نمونه های برداشت شده از ایستگاه S03 به منظور ارزیابی دقیق تر تأثیر فوم بر رفتار برشی مخلوط خاک و فوم، در شکل (7) و به عنوان نمونه، نمودارهای مربوط به نسبت تنش برشی به تنش قائم در برابر جابه جایی افقی برای خاک ایستگاه 3 همراه با فوم UGC-N2 در تراز تنش 100 کیلوپاسکال و فوم KF168B در تراز تنش 50 کیلوپاسکال برای حالت های رطوبت اشباع و 10% و FIRهای ارائه شده است.

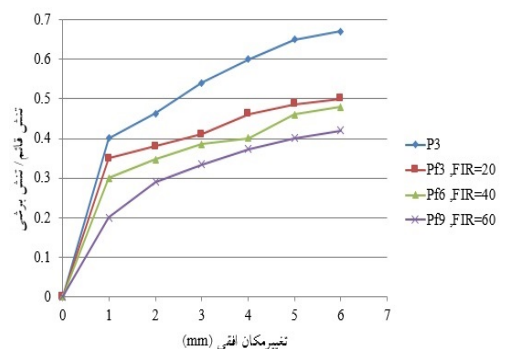
بر اساس نتایج، به عنوان یک الگوی کلی میزان نسبت تنش برشی به تنش قائم خاک، با افزایش مقدار نسبت تزریق فوم کاهش پیدا کرده است. برای فوم KF168B در حالت اشباع با افزودن فوم



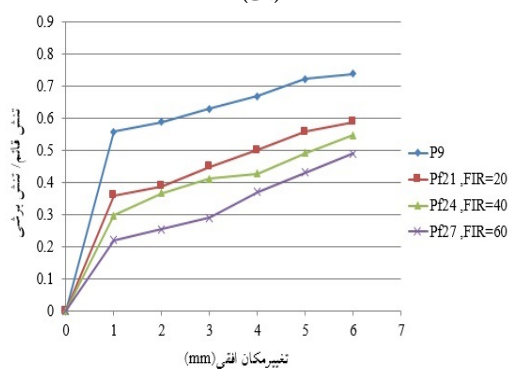
شکل 5- نمودار اثر FIR بر مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک: الف) ایستگاه 3؛ ب) ایستگاه 16

3-2-3- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در مقابل FIR

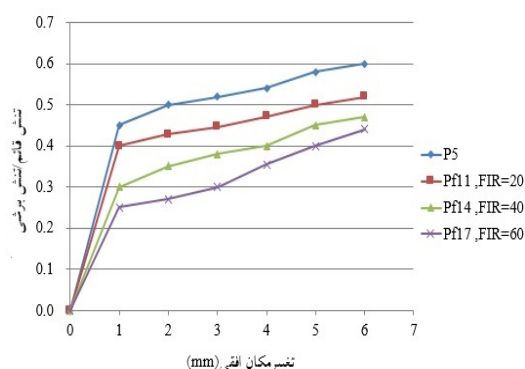
به منظور ارزیابی تأثیر فوم و همچنین تأثیر شرایط رطوبت و نسبت تزریق فوم بر زاویه اصطکاک داخلی مخلوط خاک و فوم، در شکل (6) و به عنوان نمونه نمودارهای زاویه اصطکاک داخلی در برابر نسبت تزریق فوم FIR نمونه های خاک ایستگاه 3 و 16 برای دو نوع فوم KF168B و UGC-N2 و همچنین در دو حالت که خاک قبل از افزودن فوم دارای حالت اشباع و رطوبت 10 درصد بوده، ارائه شده است. بر اساس نتایج، به عنوان یک الگوی کلی با افزایش میزان FIR میزان زاویه اصطکاک داخلی نیز کاهش می یابد. زمانی که نسبت تزریق فوم به خاک افزایش می یابد یعنی درصد بیشتری فوم به خاک مورد نظر وارد می شود در این حالت دانه های خاک از هم فاصله گرفته و راحت تر بین هم حرکت می کنند که در نهایت زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می یابد.



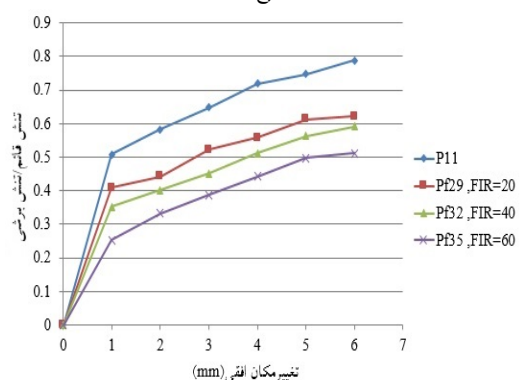
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 6- نمودار نسبت تنش برشی بر تنش قائم - جابه جایی افقی برای خاک ایستگاه 3: الف) تراز تنش 100 کیلوپاسکال - فوم UGC-N2؛ اشباع، ب) رطوبت اولیه 10 درصد، ج) تراز تنش 50 کیلوپاسکال - فوم KF168B؛ اشباع، د) رطوبت اولیه 10

درصد

با نسبت تزریق 20%، نسبت تنش برشی به تنش قائم نسبت به خاک بدون فوم در تراز تنش‌های 25، 50 و 100 کیلوپاسکال به ترتیب 14%، 19% و 25% کاهش یافته است. با افزایش نسبت تزریق فوم به 60%، مقادیر متناظر کاهش به 20%، 29% و 37% افزایش یافته است. روند مشابه در حالت رطوبت 10% نیز مشاهده می‌شود.

برای فوم UGC-N2 در حالت اشباع با افزودن فوم با نسبت تزریق 20%، نسبت تنش برشی به تنش قائم نسبت به خاک بدون فوم در تراز تنش‌های 25، 50 و 100 کیلوپاسکال به ترتیب 4%، 13% و 24% کاهش یافته است. با افزایش نسبت تزریق فوم به 60%، مقادیر متناظر کاهش به 16%، 27% و 38% افزایش یافته است. روند مشابه در حالت رطوبت 10% نیز مشاهده شده است. شایان ذکر است که میزان این نسبت در حالت اشباع، کمتر از حالت رطوبت اولیه 10% می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل، فوم KF168B تأثیر اندک بهتری نسبت به فوم UGC-N2 داشته است. همچنین نسبت تزریق 20 درصد به عنوان درصد بهینه در خاک ایستگاه 3 پیشنهاد می‌شود.

ب) نتایج نمونه‌های برداشت شده از ایستگاه S16

در این بخش به عنوان نمونه نمودارهای مربوط به نسبت تنش برشی به تنش قائم - جابه‌جایی افقی در تراز تنش 50 کیلوپاسکال در حالت‌های اشباع و رطوبت اولیه 10% در درصد تزریق‌های 20 تا 60 درصد دو نمونه فوم (KF168B و UGC-N2) در ایستگاه 16 مطابق شکل (8) ارائه شده است. در حالت رطوبت اشباع با فوم UGC-N2 در نمونه حاوی فوم نسبت تنش برشی به تنش قائم در تغییرمکان 6 میلی‌متر در تراز تنش 25 کیلوپاسکال با نسبت تزریق‌های 20 و 60 درصد به ترتیب 10% و 30% نسبت به خاک بدون فوم کاهش یافته است. این مقادیر در نسبت تنش 50 کیلوپاسکال به ترتیب به 23% و 46% و در تراز تنش 100 کیلوپاسکال به ترتیب به 29% و 50% رسیده است. با افزایش تراز تنش میزان کاهش در مقاومت برشی، افزایش یافته است. در رطوبت 10%، با افزایش نسبت تزریق فوم از صفر به 20 و 60 درصد، مقدار نسبت تنش برشی به تنش قائم در تراز تنش 50 کیلوپاسکال به ترتیب 20% و 45% نسبت به خاک بدون فوم کاهش یافته است.

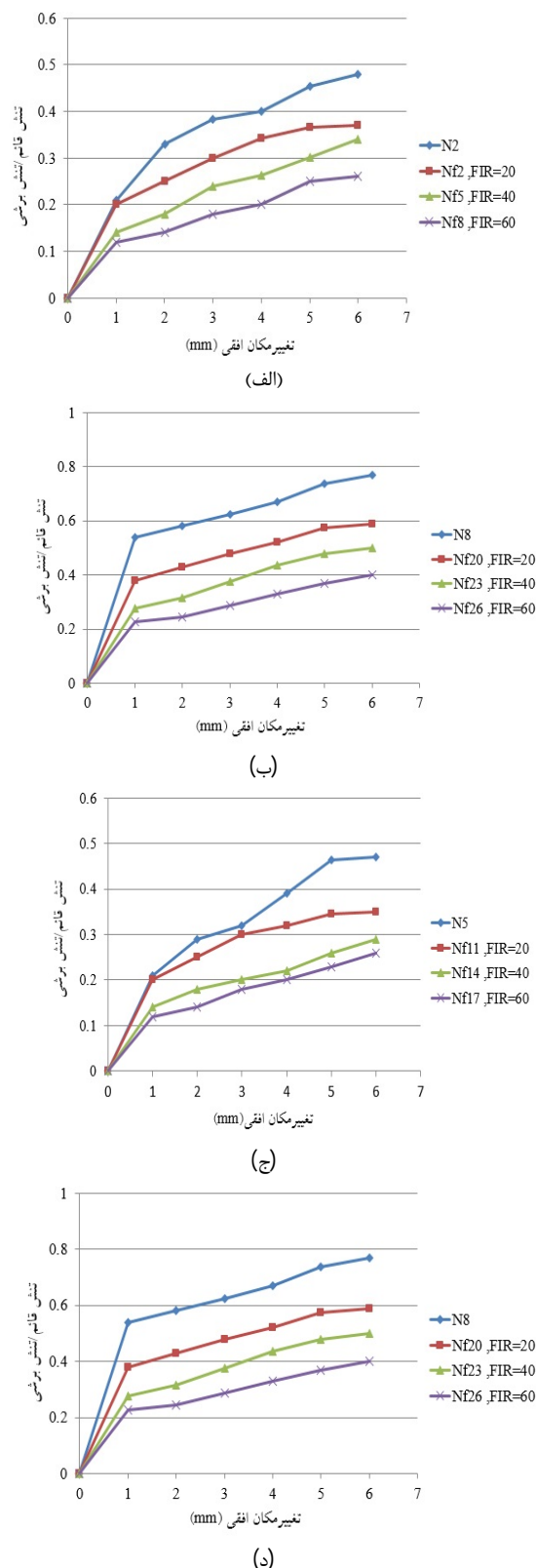
مطابق شکل (8) در رطوبت اشباع و با فوم KF168B، در تراز تنش‌های 25، 50 و 100 کیلوپاسکال، افزایش نسبت تزریق از صفر به 20 درصد به ترتیب موجب کاهش نسبت تنش برشی به تنش قائم به میزان 12%، 26% و 34% شده است. با افزایش نسبت تزریق به 60 درصد نرخ کاهش مقاومت برشی نسبت به حالت بدون فوم به ترتیب 37%، 45% و 50% می‌باشند. در رطوبت 10% با نسبت تزریق 20 و 60 درصد در تراز تنش 50 کیلوپاسکال کاهش این نسبت به ترتیب برابر 24% و 44% می‌باشد. در این حالت نیز با افزایش تراز تنش میزان کاهش در مقاومت برشی، افزایش یافته است.

با عنایت به نتایج به دست آمده در ایستگاه 16 نتیجه گرفته می‌شود که تأثیر فوم KF168B کمی بیشتر از فوم UGC-N2 بوده است. مقدار بهینه نسبت تزریق برای هر دو فوم بین 20 الی 40 درصد پیشنهاد می‌شود. همچنین با توجه به این که خاک ایستگاه 16 دارای سیلت با خمیری پایین می‌باشد تأثیر فوم در نمونه‌های برداشته شده از این ایستگاه در مقایسه با نمونه‌های بخش غربی مسیر، نسبتاً بیشتر است.

ج) مقایسه بین فوم KF168B و UGC-N2 در نمونه خاک‌های مربوطه برای چهار ایستگاه

برای انجام یک بررسی جامع، مقایسه عملکرد فوم KF168B و فوم UGC-N2 در نمونه خاک‌های مربوطه به چهار ایستگاه مذکور در شکل (9) انجام گرفته است. نمودارها برای حالت رطوبت اشباع و تراز تنش 100 کیلوپاسکال که نزدیک به شرایط موجود در داخل محفظه ماشین حفار می‌باشد ارائه شده است.

با توجه به مقدار مناسب نسبت تزریق در بخش‌های قبل، نسبت تزریق فوم 40 درصد مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل ملاحظه می‌گردد که در هر چهار ایستگاه مذکور، تقریباً تأثیر فوم KF168B کمی بیشتر از فوم UGC-N2 بوده است. همچنین تأثیر هر دو فوم در ایستگاه 16 به مراتب بیشتر از خاک سه ایستگاه دیگر می‌باشد. به نظر دلیل اصلی آن، ویژگی‌های خاک ایستگاه 16 می‌باشد که دارای سیلت با خمیری پایین است و نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر فوم‌های مورد مطالعه در خاک دارای ریزدانه بیشتر می‌باشد.



شکل 7- نمودار نسبت تنش برشی بر تنش قائم - جابه‌جایی افقی برای خاک ایستگاه 16: الف) تراز تنش 50 کیلوپاسکال - فوم UGC-N2؛ اشباع، ب) رطوبت اولیه 10 درصد، ج) تراز تنش 50 کیلوپاسکال - فوم KF168B؛ اشباع، د) رطوبت اولیه 10 درصد

4- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر مشخصات سه نوع فوم حفاری و یک نوع پلیمر مورد استفاده در پروژه خط 2 متروی تبریز و تأثیر این فومها بر روی مقاومت برشی نمونه های خاک ایستگاه های 1، 2، 3 و 16 با انجام آزمایشات برش مستقیم مطالعه شده و مهم ترین نتایج حاصل به شرح ذیل می باشد:

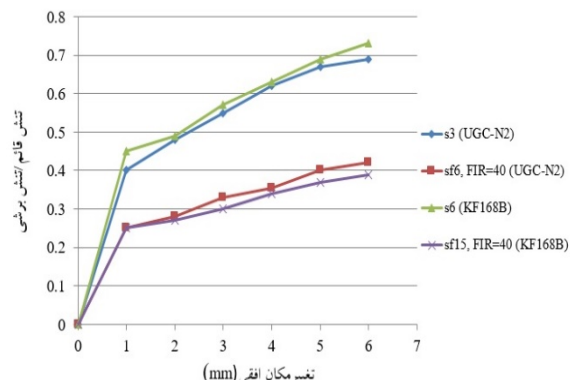
۱. نتایج آزمایشات مشخصه انجام گرفته بر روی سه نوع فوم مورد آزمایش، نشان داد که برای تولید فومی با میزان FER یکسان، ولی با مواد مختلف و شرایط مختلف تولید باید میزان دبی هوا و سیال متناسب با آن ماده انتخاب شود. در صورتی که برای تولید فوم در مقیاس صنعتی فقط میزان FER مدنظر باشد، این امر می تواند با افزایش دبی هوا به جای افزایش غلظت انجام گیرد تا فوم کمتری مصرف شود. قابل ذکر است که علت افزایش میزان FER در دبی های هوای بالاتر، افزایش درصد حجم هوای وارد شده به فوم می باشد. همچنین تزریق میزان FIR برای تبدیل خاک به یک توده خمیری و پلاستیک باید کنترل شده انجام شده و از رساندن خاک به حد روانی اجتناب شود تا این که پایداری جبهه حفاری حفظ شود.

۲. بر اساس آزمایشات مشخصه فوم می توان به این نتیجه رسید که تفاوت عمده این مواد در زمان پایداری آنها می باشد. به طوری که فوم KF168B زمان پایداری بالاتری را نسبت به دو نوع دیگر از خود نشان داده است. همچنین این فوم در مورد تأثیر غلظت بر زمان پایداری کارایی بهتری نسبت به فوم های دیگر از خود نشان داده است. با افزودن درصد کمی پلیمر به محلول فوم-ساز، افزایش قابل ملاحظه ای در زمان پایداری فوم تولید شده، حاصل شد ولی این امر با کاهش در میزان FER بوده است.

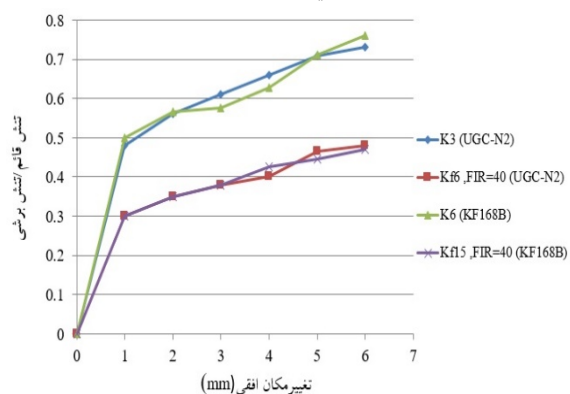
۳. با افزایش غلظت محلول فوم برای دبی هوای ثابتی، زمان پایداری فوم کاهش و نسبت اتساع فوم افزایش می یابد. با افزایش دبی هوا برای غلظت ثابتی، زمان پایداری و نسبت اتساع فوم افزایش می یابد. در اثر افزایش دبی هوا از 300 به 400 لیتر بر ساعت در یک میزان ثابت غلظت، افزایش 18 تا 30 درصدی در نسبت اتساع فوم دیده می شود. همچنین میزان افزایش در مقدار FER در اثر افزایش دبی هوا در مقایسه با میزان افزایش آن در اثر افزایش غلظت محلول فوم ساز بیشتر می باشد.

۴. بر اساس آزمایشات مشخصه فوم، از بین فوم های مورد استفاده در این تحقیق، فوم KF168B هم از لحاظ مدت زمان پایداری و هم از نسبت انبساط فوم نسبت به فوم های KF159A و UGC-N2 عملکرد بهتری داشته و هم با توجه به تولید در داخل از لحاظ قابلیت تهیه و مباحث اقتصادی نیز مناسب تر می باشد.

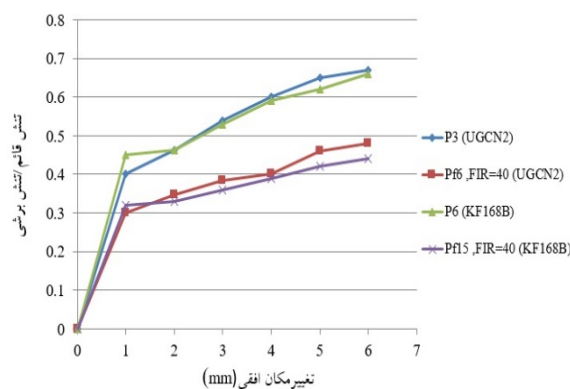
۵. نتایج آزمایشات بر روی مقاومت برشی نمونه های فوم دار، نشان داد که تزریق فوم از یک نسبت به بالاتر، تأثیر چندانی در



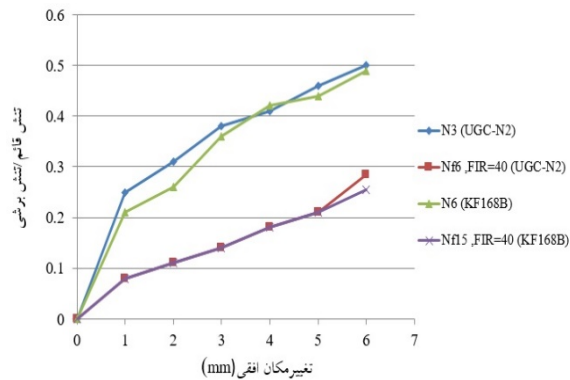
ایستگاه 1



ایستگاه 2



ایستگاه 3



ایستگاه 4

شکل 8- نمودار تنش برشی - جابه جایی افقی در تراز تنش 100 کیلوپاسکال و رطوبت اشباع برای خاک ایستگاه های مختلف

رضایی فرعی ا ح، بابائی س، "بررسی اثرات پارامترهای مختلف در تعیین میزان بهینه فشار جبهه کار تونل‌های مکانیزه در خاک‌های رسی - سیلتی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، 1396، 47 (3)، 33-45.

رضایی فرعی ا ح، شیرزه حق م، "تعیین فشار جبهه کار حفاری با EPB به روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی (مطالعه موردی: متروی تبریز)", نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، 1398، 49 (4)، 21-32.

<https://doi.org/10.22034/ceej.2020.7656>

طریق ازلی ص، غفوری م، لشکری پور غ، حسن پور ج، "تأثیر ذرات ریزدانه بر روی مقدار افت مخروط اسلامپ در خاک به عمل - آوری شده با فوم برای حفاری با ماشین EPB"، مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، 1393، 3 (2)، 145-159.

Ball RPA, Young DY, Isaacson J, Champa J, Gause C, "Research in soil conditioning for EPB tunneling through difficult soils", In: Almeraris G, Mariucci B, (Eds.), Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Las Vegas, USA, 320-333, 2009.

EFNARC ed., "Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunneling (TBM) in soft ground and hard rock", 2005.

Hajjalilue-Bonab M, Sabetamal H, Bezuijzen A, "Experimental study on foamed sandy soil for EPBM tunnelling", *Advances in Railway Engineering*, 2014, 2 (1), 27-40.

Jancsecz S, Krause R, Langmaack L, "Advantage of soil conditioning in shield tunnelling- experiences of Irts Izmir", In T. Alten (Ed.), *Challenges for the 21st Century: Proceedings of the World Tunnel Congress '99*. Rotterdam: A. A. Balkema. 1999. http://www.langmaacks.eu/assets/oslo_mbt-version.pdf.

Katebi H, Rezaei AH, Hajjalilue-Bonab M, Tarifard A, "Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specification on shield tunnel lining loads (by FEM)", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.004>

Maidl B, Herrenknecht M, Maidl U, Wehrmeyer G, "Mechanised shield tunnelling", Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2012. <https://doi.org/10.1002/9783433601051>

Mostafaei M, Rezaei AH, Rastegarnia A, "Assessment of the impact of case parameters affecting abrasion and brittleness factors in alluviums of line 2 of the Tabriz subway, Iran", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78 (5), 3851-3861. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1350-2>.

Peila D, Oggeri C, Vinai R, "screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for epb tunneling operations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133 (12), 1622-1625. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1622\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1622)).

Plötze M, Puzrin A, Zumsteg R, "Reduction of the clogging potential of clays: New chemical applications and novel quantification approaches",

کاهش مقاومت برشی نداشته و استفاده از میزان FIR بالاتر از حد مورد نیاز همگنی مخلوط خاک- فوم را از بین می‌برد.

۶. از لحاظ تأثیر فوم‌های مختلف بر مقاومت برشی نهایی مخلوط‌های خاک و فوم تفاوت عمده‌ای بین این مواد فوم‌ساز، در نتایج به‌دست‌آمده مشاهده نشد. با این حال فوم KF168B نسبت به فوم UGC-N2 دارای عملکرد KF168B بهتری بوده و نسبت تزریق 20 تا 40 درصد به‌عنوان نسبت مناسب برای پروژه مورد مطالعه در نواحی برداشت نمونه‌ها پیشنهاد می‌شود.

۷. از لحاظ کاهش زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی، عملکرد فوم‌ها در نمونه‌های مخلوط فوم و خاک ایستگاه 16 که سیلت با حد روانی پایین و ماسه سیلت‌دار می‌باشد، مناسب‌تر از نمونه‌های خاک برداشته شده از ایستگاه‌های بخش غربی مسیر بوده است. خاک نمونه‌های بخش غربی عمدتاً شن و ماسه سیلت-دار و درشت‌دانه‌تر بوده و ریزدانه کمتری داشته‌اند.

5- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از زحمات پیمانکار طرح و ساخت خط 2 متروی تبریز، به‌ویژه مدیریت محترم پروژه، آقای مهندس یونس حسام، به‌جهت همکاری در تهیه فوم‌های حفاری و نمونه‌های خاک و حمایت‌های انجام گرفته از جانب سازمان قطار شهری تبریز و به‌ویژه آقای مهندس قاسمی هلق، تشکر و قدردانی می‌شود.

6- مراجع

اسدالهی م، مومیوند ح، "تحلیل کلیدی تأثیر فشار متعادل‌کننده زمین سپر EPB در جابه‌جایی‌های سینه-کار تونل به‌روش عددی (مطالعه موردی: تونل انتقال آب ابوذر تهران)", نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، 1399، 50 (4)، 83-93. DOI:10.22034/jcee.2020.21903.1540.

بخشنده ح، زمزم م ص، موسوی س ا، طریق ازلی ص، "انتخاب مناسب‌ترین مجموعه بهسازی خاک در حفاری مکانیزه تونل خط 7 متروی تهران"، مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، 1392، 2 (2)، 145-154.

پورمند س، چاکری ح، حاجی علیوی بناب م، رجایی م م، "بهسازی اصلاح خاک با استفاده از مواد افزودنی فوم، پلیمر در حفاری مکانیزه (مطالعه موردی: متروی خط 2 تبریز)", دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران، تهران، 1395.

حسن پور ج، فرج پور م، حمزه ن، "بررسی کمی اثر کاربرد فوم‌های ضدسایش بر ساینده‌گی مصالح زمین‌شناسی در حفاری با ماشین‌های تونل‌بری"، نهمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران، 1395.

- Géotechnique, 2013, 63 (4), 276-286.
<https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.005>.
- Rezaei AH, Shirzehhagh M, Baghban Golpasand MR, "EPB tunneling in cohesionless soils: A study on Tabriz Metro settlements", Geomechanics Engineering, 2019, 19 (2), 153-165.
<https://doi.org/10.12989/gae.2019.19.2.153>.
- Thewes M, Budach C, "Soil conditioning with foam during EPB tunneling", Geomechanik und Tunnelbau, 2010, 3 (3), 256-267.
<https://doi.org/10.1002/geot.201000023>.
- Vinai R, Oggeri C, Peila D, "Soil conditioning of sand for EPB applications: laboratory research", Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23 (3), 308-317.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.010>.
- Zhou X, Yang Y, "Effect of foam parameters on cohesionless soil permeability and its application to prevent the water spewing", Applied Sciences, 2020, 10 (5), 1787.
<https://doi.org/10.3390/app10051787>.