tuse.shahroodut.ac.ir

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

دوره‌ی ۳- شماره‌ی ۲/زمستان ۱۳۹۳

# تاثیر ذرات ریزدانه بر روی مقدار افت مخروط اسلامپ در خاک بعمل آوری شده با فوم برای حفاری با ماشین EPB

**صادق طریق‌ازلی[1*]؛ محمد غفوری[2]؛ غلامرضا لشکری‌پور[3]؛ جعفر حسن‌پور[4]**

۱- دانشجوی دکترای زمین‌شناسی مهندسی؛ دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد؛ گروه زمین‌شناسی مهندسی؛ دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد؛ گروه زمین‌شناسی مهندسی؛ دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استادیار؛ گروه زمین‌شناسی مهندسی؛ دانشگاه تهران

**دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۰۵/۲۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۹**

**واژگان کلیدی**

ذرات ریزدانه

بعمل آوری خاک

اسلامپ

فوم

*EPB*

کارپذیری

**چکیده**

یک خاک ایده‌آل برای ماشین *EPB* خاکی است که پس از حفاری و ورود به اتاقک فشار، تبدیل به یک ماده پلاستیک و خمیری با قابلیت اعمال فشار به سینه کار باشد. بدیهی است که یک خاک واقعی در طبیعت به ندرت دارای چنین ویژگی‌هایی می‌باشد. بنابراین همیشه سعی می‌شود با تزریق فوم به مصالح جمع شده در اتاقک فشار، خاکی با خصوصیات مذکور را بدست آورد. به افزودن فوم و پلیمر به خاک، عملیات بعمل‌آوری می‌گویند. در تونلسازی با ماشین *EPB* رفتار خاک حفاری شده از هنگامیکه در جلوی کاترهد ماشین با فوم مخلوط می شود تا زمانیکه از نقاله مارپیچ خارج می شود بستگی به ویژگی کارپذیری خاک بعمل‌آوری شده دارد که معمولا با آزمایش اسلامپ ارزیابی می‌گردد. عواملی که بر روی 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 بر روی کارپذیری خاک بعمل آوری شده با فوم می‌باشد. در این مطالعه، به منظور دست یافتن به یک رابطه تجربی بین دو متغیر مستقل (شامل: درصد ریزدانه و پارامترهای کمی تزریق فوم) و متغیر وابسته (مقدار افت اسلامپ) ابتدا آزمون‌های آزمایشگاهی ترکیب فوم و خاک با محتوای رطوبت ۱۵ درصد و شاخص استحکام ۰/۷۵ تا ۱ انجام شد. سپس رابطه بین متغیرهای مختلف بوسیله مدل‌های رگرسیون چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که یک رابطه معنی‌دار بین آنها وجود دارد و کارپذیری مناسب در شرایطی بدست می‌آید که مقدار ذرات ریزدانه‌ی خاک بین ۲۵ تا ۶۰ درصد باشد.

## ۱- پیشگفتار

مشخصه اصلی ماشین متعادل کننده فشار زمین (*EPB-TBM*) دارا بودن اتاقک فشار به منظور مقابله با فشار آب و زمین در جبهه‌کار تونل می باشد. در این روش، مواد حفر شده 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 جبهه کار را تامین می کند. 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 انتقال داشته باشند. لازم به توضیح است

* مشهد؛ میدان آزادی؛ دانشگاه فردوسی؛ پردیس دانشگاه؛ دانشکده علوم؛ کدپستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴؛ شماره‌ی تلفن: ۸۷۹۷۰۲۲(۹۸۵۱+)؛ دورنگار: ۸۷۹۶۴۱۶(۹۸۵۱+)؛ رایانامه: sadeghazali@gmail.com

که در ادبیات حفاری مکانیزه، به ویژگی‌هایی همچون قابلیت اعمال فشار و انتقال خاک، کارپذیری (*Workability*) مصالح می‌گویند. کارپذیری مناسب برای ماشین *EPB* وقتی ایجاد می‌شود که خاک جمع شده در اتاقک حفاری به یک ماده همگن، پلاستیک و خمیری تبدیل شود. چنین خاکی هم قابلیت اعمال فشار به سینه کار را دارد و هم قابلیت انتقال مصالح از طریق نوار نقاله مارپیچ را دارند. بنابراین، کارپذیری شاخصی برای خصوصیت پلاستیکی خاک جمع شده در اتاقک فشار است و معیاری برای کابری ماشین *EPB* در زمین‌های مختلف می باشد [1]، [2] و [3]. از سوی دیگر واضح است که وقتی دانه‌بندی خاک متفاوت باشد، خصوصیات کارپذیری آنها نیز متفاوت می‌باشد. بنابراین در حفاری با این ماشین همیشه سعی می‌شود با تزریق مواد افزودنی مانند فوم‌ها و یا پلیمرها به مصالح موجود در اتاقک فشار، کارپذیری مناسبی برای خاک حفاری شده ایجاد نمود. در ادبیات تونلسازی مکانیزه، به افزودن فوم و پلیمر به خاک، عملیات بعمل آوری (*Soil conditioning*) می‌گویند که یکی از کلیدی‌ترین مراحل حفاری با ماشین *EPB* می‌باشد.

بطور کلی آزمون‌های آزمایشگاهی بسیار کمی بر روی بعمل-آوری خاک با فوم انجام شده است و طراحی بعمل‌آوری یا اصلاح مشخصات خاک اغلب بر مبنای تجربیات کارکنان تونل استوار است و یا بر اساس یک فرایند سعی و خطا که مستقیما در کارگاه و در بخش‌های اولیه تونل انجام می‌شود تعیین می‌گردد. ولی با این وجود در سال‌های اخیر یکسری آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده تا سبب شود که اقدامات سعی و خطای که در ابتدای حفاری در کارگاه رخ می‌دهد کاهش یابد. طبق توصیه‌های مندرج در تحقیقات و دستینه‌های مختلف [4]، [5]، [6]، [7]، [8]، [9]، [10]، [11]، [12]، [13]، [14] و [15]، کارپذیری خاک حفاری شده می‌تواند با آزمایش اسلامپ برآورد گردد. این آزمایش در صنعت بتن بسیار شناخته شده و مرسوم است. تحقیقاتی که در سال‌های گذشته بر روی کارپذیری انجام شد، نشان داد که مقادیر مناسب برای آزمایش اسلامپ شامل محدوده-ای بین ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر می‌باشد [1]، [6]، [7]، [12] و [16]. یکی از اولین مطالعات آزمایشگاهی در خصوص بعمل‌آوری خاک با تزریق فوم به تحقیقاتی مربوط می‌شود که در دانشگاه آکسفورد و بر روی خواص فوم و ماسه برای کاربردهای تونل‌سازی توسط *Psomas* در سال ۲۰۰۱ انجام شد، او نشان داد که با افزایش فوم تخلخل خاک افزایش ولی زاویه اصطکاک داخلی آن کاهش می‌یابد [17]. بعدها تحقیقات بیشتری توسط محققین دیگر انجام شد برای مثال در دانشگاه‌های آکسفورد و کمبریج *Borghi* در سال ۲۰۰۶ و *Pena* در سال ۲۰۰۷ آزمایش‌هایی روی نمونه‌های رس متراکم شده برای اندازه‌گیری آثار عوامل بعمل آوری روی مقاومت برشی، جریان از میان نقاله مارپیچ و مشخصات اصطکاک فصل مشترک خاک-فولاد انجام دادند [10] و [19]. ولی یکی از معروفترین آزمون‌های بعمل آوری خاک توسط *Piela* به همراه همکارانش در دانشگاه تورین در طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ انجام شده است. در این دانشگاه، آزمون‌های بزرگ مقیاس با استفاده از یک دستگاه نقاله مارپیچ آزمایشگاهی انجام و کارایی آن نیز در مقاله‌های مختلف ثابت شده است، زیرا پارامترهایی که مستقیما به حفاری ماشین *EPB* متصل است در این آزمون‌ها قابل اندازه‌گیری می‌باشد [15] و [18]. آزمون‌های مشابهی در آزمایشگاه دانشگاه بوخوم نیز توسط *Thewes* و همکارانش در حال انجام است، بطوریکه از سال ۲۰۱۰ تا کنون چند مقاله از تحقیقات انجام گرفته توسط آنها در مجلات و کنفرانس‌های مختلف منتشر شده است [1] و [16]. هدف اصلی تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه دانشگاه بوخوم بررسی پارامترهای بعمل‌آوری بر روی کارپذیری خاک می‌باشد و ارزیابی دامنه‌ی کاربری ماشین *EPB* است.

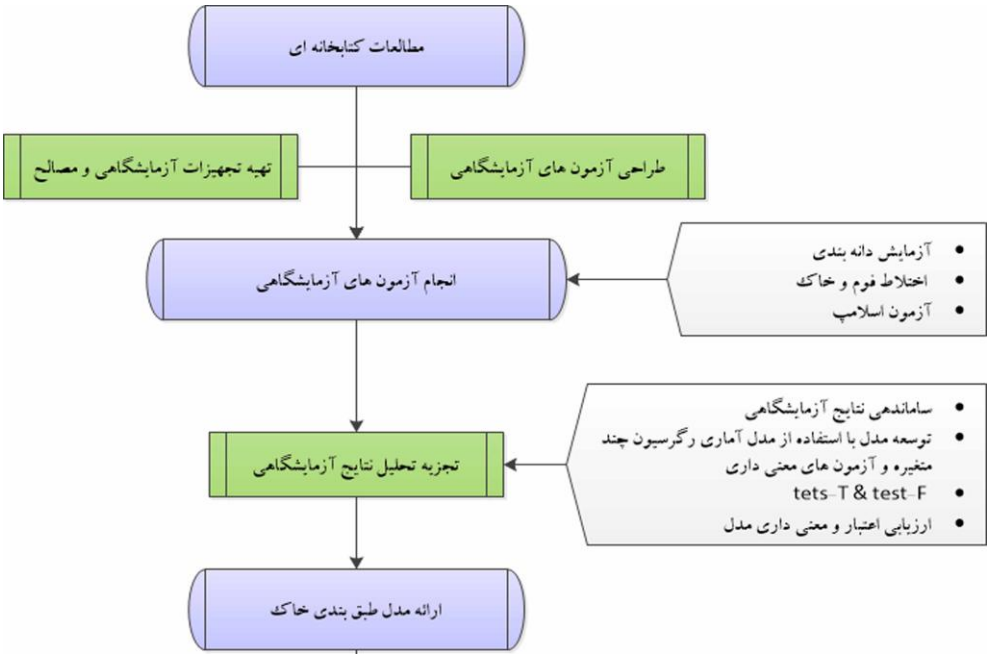
هدف از این مطالعه ارائه یک مدل تجربی برای طبقه بندی خاک با هدف کارپذیری مصالح در حفاری با ماشین *EPB* است. به منظور ارائه این مدل، روند انجام مطالعات به ترتیب شامل مراحل ذیل می‌باشد. لازم به توضیح است که در نمودار جریانی **شکل ۱** روند مطالعات ارائه شده است.

- مطالعات کتابخانه‌ای
- طراحی آزمون‌های آزمایشگاهی و تهیه‌ی تجهیزات آزمایشگاهی و مصالح مورد نیاز
- انجام آزمون‌های آزمایشگاهی
- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

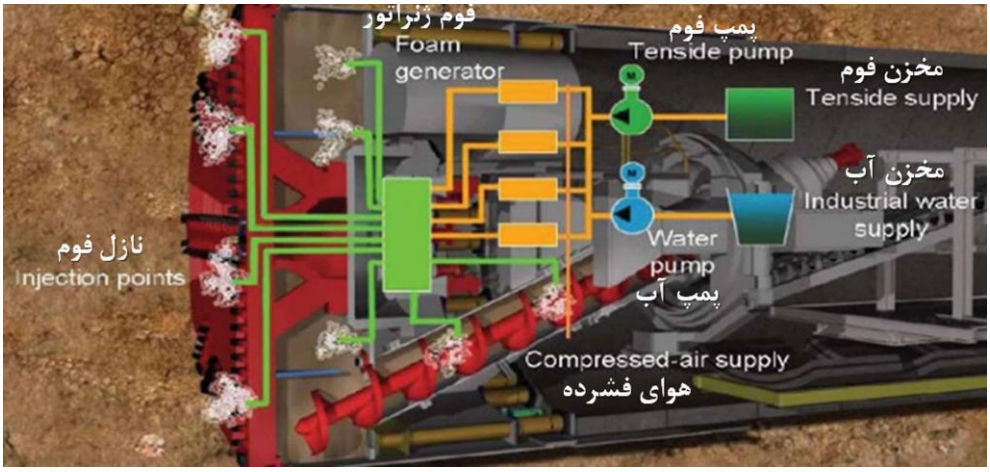
- ارائه مدل آماری بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی

## ۲- نحوه تزریق فوم و بعمل آوری خاک در حفاری با ماشین EPB

اولین ماشین *EPB* که توانایی تزریق فوم‌های رئولوژیکی در زمان حفاری برای بعمل آوری خاک را داشت در سال ۱۹۸۴ ساخته شد. امروزه دیگر ماشینی از نوع *EPB* وجود ندارد که از سیستم بعمل آوری زمین در زمان حفاری استفاده نکند. به منظور روشن شدن بیشتر موضوع در **شکل ۲** تصویری شماتیک از سیستم و نازل‌های تزریق فوم در یک ماشین *EPB* ارائه شده است. سیستم تزریق فوم شامل مخزن آب، هوای فشرده، فوم و پلیمر به همراه پمپ‌های لازم و حسگر اندازه‌گیری فشار، نازل‌های تزریق، لوله‌های انتقال به سیستم جبهه‌کار، چمبر و نقاله مارپیچ می‌باشد.




**شکل ۱- نمودار جریانی روند مطالعات و روش انجام تحقیق**




**شکل ۲- نمایی شماتیک از مدار تولید و تزریق فوم در ماشین EPB**

بطور کلی ماشین *EPB* برای زمین‌هایی که دارای ذرات ریزدانه قابل توجهی باشند، مناسبتر است و مقدار ذرات ریزدانه یکی از فاکتورهای موثر بر روی عملکرد ماشین محسوب می‌گردد و در بسیاری از مراجع یکی از پارامترهای بسیار مهم برای انتخاب ماشین درصد مواد ریزدانه می‌باشد [20] و [21]. زیرا کاهش ذرات ریزدانه بطور کلی سبب کاهش کارپذیری، افزایش اصطکاک و نفوذپذیری می‌شود [22]. در دهه گذشته مبنای انتخاب ماشین *EPB* داشتن حداقل ۳۰ درصد ریزدانه در زمین دربرگیرنده تونل بوده است. امروزه با رشد و توسعه تکنولوژی بعمل آوری و بهسازی شرایط خاک امکان حفاری با ماشین *EPB* در زمین‌هایی که درصد خاک ریزدانه در آنها تا ۱۰ درصد نیز باشد وجود دارد [23].

بطور کلی فوم از سه بخش عامل کف ساز، آب و هوا تشکیل می‌شود. عمده‌ترین پارامترهای مورد استفاده در مبحث تزریق فوم عبارتند از: $Cf$ ( غلظت عامل کف ساز)، $FER$ (ضریب افزایش حجم فوم) و $FIR$ (نرخ تزریق فوم).

### ۲-۱- غلظت ماده کف‌ساز در محلول فوم (Cf)

غلظت مواد کف ساز ($Cf$) نشان دهنده مقدار مواد کف ساز در محلول فوم می باشد و مقدار معمول آن بین ۰/۵ تا ۵ درصد می‌باشد. نحوه محاسبه مقدار این پارامتر بصورت رابطه ذیل است:

$$C_f = 100 \times m_{Surfactant} / m_{Foamsolution} \quad (۱)$$

### ۲-۲- نسبت انبساط فوم (FER)

مقدار هوا و غلظت محلول فوم توسط پارامتری به نام $FER$ بیان می‌شود، که بر اساس نسبت حجم فوم به حجم مایع تعیین می‌گردد. مقدار آن بطور معمول بین ۵ تا ۳۰ می‌باشد. مقدار آن بصورت رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$FER = V_{Foam} / V_{FoamSolution} \quad (۲)$$

لازم به توضیح است هر قدر مقدار هوا در در حجم مایع بیشتر باشد مقدار کف نیز افزایش خواهد یافت.

### ۲-۳- نسبت تزریق فوم (FIR)

مقدار فوم تزریق شده در خاک به صورت $FIR$ بیان می‌شود، که نشان دهنده حجم فوم استفاده شده در یک متر مکعب خاک می باشد. برای مثال مقدار $FIR$ برابر ۴۰٪ نشان دهنده ۴۰۰ لیتر فوم اضافه شده به ۱ متر مکعب خاک می باشد. مقدار این پارامتر بصورت رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

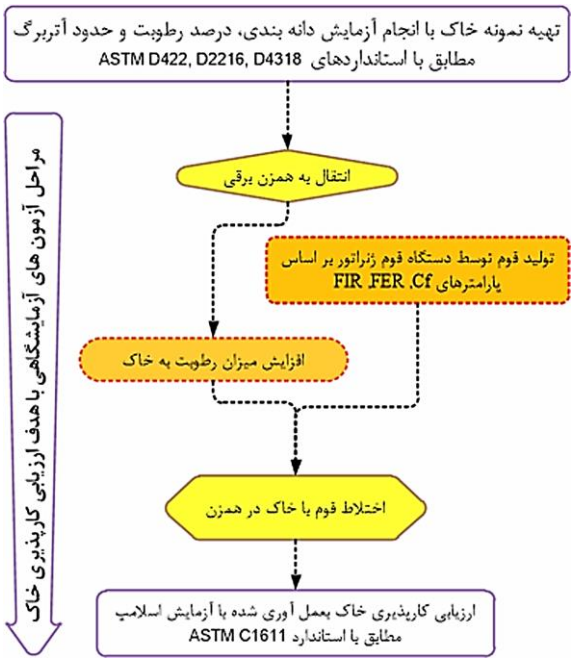
$$FIR = 100 \times V_{Foam} / V_{Soil} \quad (۳)$$

## ۳- آزمون‌های آزمایشگاهی

در این بخش از مطالعه، به منظور دست یافتن به یک رابطه تجربی اولیه بین سه متغیر مستقل (شامل: خصوصیات دانه-بندی خاک، حدود آتربرگ، میزان رطوبت خاک و پارامترهای کمی تزریق فوم)، آزمون‌های آزمایشگاهی قابل توجهی ولی هدفمند انجام شد. قبل از شرح روند انجام آزمایش‌ها، شناخت ملزومات مورد نیاز به منظور انجام آنها ضروری می‌باشد. ملزومات آزمون‌های آزمایشگاهی بعمل‌آوری خاک در واقع شامل سه ساختار اصلی زیر می‌باشد:

- مصالح: شامل ماده کفساز فوم، بنتونیت، پلیمر و انواع خاک با خصوصیات مختلف.
- تجهیزات تولید حباب فوم: شامل فوم ژنراتور، میکسر و کمپرسور.
- آزمایش‌های بعمل آوری خاک: شامل آزمون‌های دانه بندی خاک، درصد رطوبت و اسلامپ.

کلیه مراحل انجام آزمون‌های بعمل‌آوری خاک (شامل تهیه نمونه، آماده سازی، تولید فوم، مخلوط کردن و در نهایت آزمون اسلامپ) در نمودار جریانی **شکل ۳** ارائه شده است. همچنین در **شکل ۴** مراحل تصویری فعالیت‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، آزمون‌های آزمایشگاهی با انجام آزمون‌های دانه‌بندی به منظور تهیه و آماده‌سازی خاک‌هایی با خصوصیات مختلف شروع شد. سپس با استفاده از دستگاه فوم ژنراتور، فوم‌هایی با مقادیر مختلف $FIR$ تولید گردید. فوم تولید شده در دستگاه میکسر با خاک مرطوب مخلوط شد تا بعمل‌آوری گردد و در نهایت آزمون اسلامپ به منظور ارزیابی کارپذیری آن انجام شد.




**شکل ۳- نمودار جریانی از روند آزمون‌های آزمایشگاهی با هدف ارزیابی کارپذیری خاک**

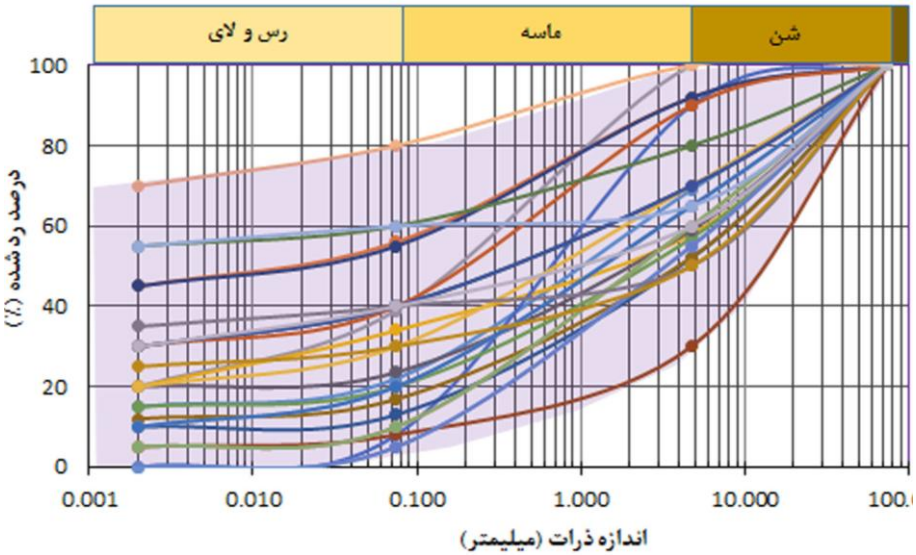
**شکل ۴- مراحل تصویری از فعالیت‌های آزمایشگاه با هدف ارزیابی کارپذیری خاک با تزریق فوم**

### ۳-۱- نتایج آزمایش دانه بندی مکانیکی خاک

دانه‌بندی با استفاده از یک سری الک مطابق با استاندارد *ASTM D422* که به ترتیب از درشت به ریز روی یکدیگر قرار داده شده‌اند و با حرکت لرزشی انجام می‌شود [24]. لازم به توضیح است که منحنی دانه بندی نمونه‌های خاکی آزمایش شده در **شکل ۵** آورده شده است. طبق مندرجات این شکل، نتایج ذیل قابل ذکر می‌باشد:

- بیشترین مقدار ریزدانه ۸۰ درصد و کمترین مقدار آن ۵ درصد بوده است.
- بیشترین مقدار ماسه ۸۲ درصد و کمترین مقدار آن ۵ درصد بوده است.
- بیشترین درصد گراول ۷۰ درصد و کمترین آن صفر درصد بوده است.

همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، در بررسی‌های آزمایشگاهی سعی شده است که همه‌ی دامنه‌ی خاک‌هایی که در محدوده کاربری ماشین *EPB* قرار دارند مورد آزمایش قرار گیرند.




**شکل ۵- منحنی‌های دانه بندی خاک های مورد بررسی**

### ۳-۲- نتایج حدود استحکام (حدود آتربرگ) خاک

بر اساس آزمون‌های حدود آتربرگ، حد روانی (*LL*) خاک-های مورد آزمایش برابر با ۳۰ تا ۳۵ درصد و دامنه‌ی حد خمیری (*PL*) آنها نیز بین ۱۰ تا ۱۲ درصد بوده است.

وقتی کانیهای رسی در خاکهای ریز دانه وجود داشته باشد خاک میتواند با وجود مقداری رطوبت بدون خرد شدن به صورت خمیری در آید. این حالت چسبندگی ناشی از آب جذب شده در پیرامون ذرات رس است. وقتی‌که محتوای رطوبت از حد روانی و خمیری کمتر باشد، خاک شبیه به یک جسم سفت (جامد) رفتار میکند. چنانچه درصد رطوبت از حد خمیری بیشتر ولی از حد روانی کمتر شود، رفتار خاک به یک خمیر پلاستیک نزدیک خواهد شد و قوام آن کمتر خواهد بود. چنانچه درصد رطوبت آنقدر افزایش یابد که از حد روانی نیز بیشتر شود، خاک و آب شبیه یک مایع به حرکت در می‌آیند. بنابراین رفتار خاک در محتوای رطوبت مختلف با پارامتری به نام شاخص استحکام (*Consistency Index*) تعیین می‌گردد. شاخص استحکام بر اساس حد روانی (*LL*)، شاخص خمیری (*PI*) و درصد رطوبت طبیعی خاک (*w*) و با استفاده از رابطه ذیل محاسبه میگردد:

$$Ic = \frac{LL - w}{PI} = \frac{LL - w}{LL - PL} \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، پارامترهای $LL$ و $PI$ جزء خصوصیات ذاتی یک خاک محسوب می‌گردند و تغییر پذیر نمی‌باشند 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 ۱** قابل رده‌بندی می‌باشد. از آنجاییکه آزمون-های آزمایشگاهی با محتوای رطوبت ۱۵ درصد انجام شده است لذا شاخص استحکام در دامنه‌ی بین ۰/۷۵ تا ۱ قرار داشته و طبق جدول مذکور در رده خاک‌های سفت (*stiff*) طبقه‌بندی می‌شوند. دلیل انتخاب این محدوده از شاخص استحکام به این دلیل بوده است که خاک‌های دربرگیرنده‌ی تونل‌هایی که اخیرا مطالعه شده است عمدتا در این رده واقع شده‌اند *[3]*.

**جدول ۱- طبقه‌بندی شرایط خاک بر اساس تغییرات شاخص استحکام (*Ic*)**

| شاخص استحکام (*Ic*) | توصیف شرایط استحکام خاک |
|---|---|
| *> 1.25* | *hard* - سخت |
| *1 – 1.25* | *very stiff* - خیلی سفت |
| *0.75 - 1* | *stiff* - سفت |
| *0.5 – 0.75* | *soft* - نرم |
| *0 – 0.5* | *very soft* - خیلی نرم |
| *< 0* | *liquid* - روان |

## ۳-۳- نتایج آزمایش اسلامپ

همانطور که در مقدمه‌ی این مقاله نیز اشاره گردید، تقریبا تمام تحقیقاتی که اخیرا انجام شده نشان داده است که آزمایش مخروط اسلامپ می‌تواند به عنوان یک شاخص مناسب به منظور ارزیابی کارپذیری مصالح بعمل‌آوری شده استفاده شود. این آزمون تقریبا مشابه آزمایش مخروط اسلامپ که معمولا بر روی بتن تازه انجام می‌شود [25] می‌باشد. لذا در این تحقیق نیز آزمایش مخروط اسلامپ بر روی مصالح بعمل‌آوری شده انجام شد تا بدینوسیله کیفیت کارپذیری و رفتار مصالح بعمل‌آوری شده مورد ارزیابی قرار گیرد.

در **شکل ۶** مراحل انجام آزمایش مخروط اسلامپ بر روی خاک بعمل آوری شده نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، خاک بعمل‌آوری شده که شامل مخلوط مصالح و فوم است به داخل مخروط اسلامپ ریخته می‌شود. بعد از یک دقیقه بدون هیچگونه ضربه و یا آمیختگی، مخروط باید به سمت بالا بلند شود. سپس مقدار نزول مخلوط مشاهده و اندازه‌گیری می‌شود که مقدار آن می‌تواند بین ۰ تا ۳۰ سانتیمتر متغیر باشد.

در تحقیقات آزمایشگاهی، آزمون‌های بعمل آوری با نسبت-های مختلف *FIR* بر روی خاک‌هایی با مقدار ریزدانه مختلف انجام شد. در هر یک از آزمایش‌ها مقدار افت اسلامپ متفاوت بوده است. بطور کلی بر اساس تجربیات حاصل از این تحقیق و پیشنهادات مطالعات گذشته [26] سه رفتار مختلف برای نتیجه آزمایش اسلامپ می‌تواند متصور باشد:

- رفتار سفت (*stiff*) مصالح: به دلیل ناکافی بودن مقدار آب و یا فوم و یا هر دو آن، زیاد بودن درصد ریزدانه، اختلاط نامناسب فوم و خاک و یا کاهش *FER* (**شکل ۷-الف**).
- رفتار روان شدن (*fluid*) مصالح: عدم موفقیت در بدست آوردن شکل پلاستیکی که به وسیله فروریختن نا منظم مخروط مصالح به علت اینکه توزیع دانه‌بندی، درصد رطوبت و یا نسبت *FIR* برای تشکیل یک توده پلاستیکی مناسب نبوده است (**شکل ۷-ب**).
- رفتار پلاستیک: شامل افت اسلامپ بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلیمتر با شکل منظم توده و مقدار کمی خروج آب و یا بدون خروج آب (**شکل ۷-ج**). این رفتار، نشانه کارپذیری مناسب مصالح بعمل آوری شده می‌باشد.

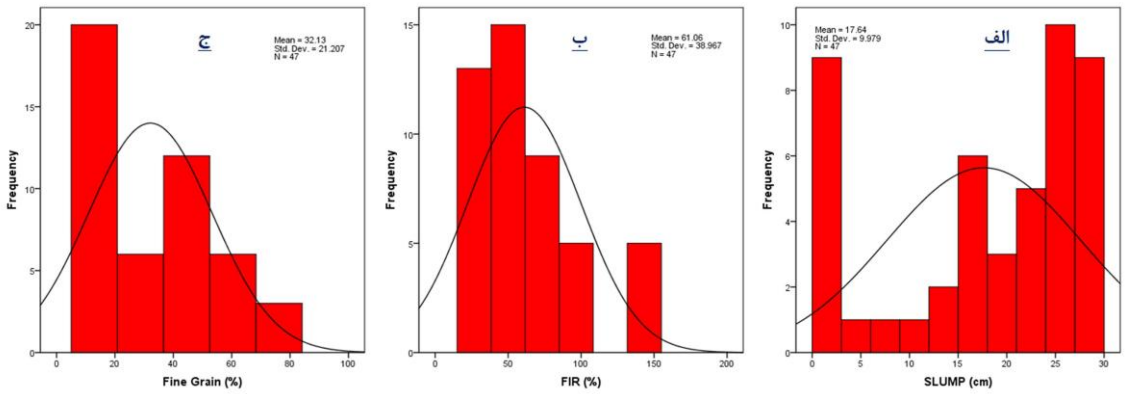
بطور کلی در طی مطالعات آزمایشگاهی، تعداد ۴۷ آزمون اسلامپ بر روی مصالح بعمل آوری شده با فوم انجام شد که نمودار فراوانی مقادیر آن در **شکل ۸** نشان داده شده است. به عبارت دیگر در هر آزمایش، مطابق **شکل ۶** بوسیله

دستگاه فوم ژنراتور، فوم‌هایی با *FIR* های مختلف تولید گردید و سپس در میکسر با خاک‌هایی با دانه‌بندی مختلف مخلوط گردید و در نهایت بر روی هر یک از آنها آزمایش اسلامپ انجام گردید.

۱- استفاده از مخروط اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C143
۲- شستشوی مخروط به منظور کاهش چسبندگی خاک بعمل آوری شده با سطح فلز
۳- ریختن خاک بعمل آوری شده به درون مخروط اسلامپ
٤- پر کردن مخروط اسلامپ بدون اعمال فشار
٥- تمیز کردن مصالح اضافی باقی مانده بر روی دهانه مخروط
٦- بالا کشیدن مخروط اسلامپ بطور عمودی( پس گذشت زمانی در حدود یک دقیقه)
۷- اندازه گیری میزان افت خاک (پس از گذشت زمانی در حدود ۲۰ ثانیه)

**شکل ۶- مراحل تصویری از روند انجام آزمون اسلامپ بر روی خاک بعمل آوری شده**

**شکل ۷- رفتار مصالح بعمل آوری شده در آزمایش اسلامپ**



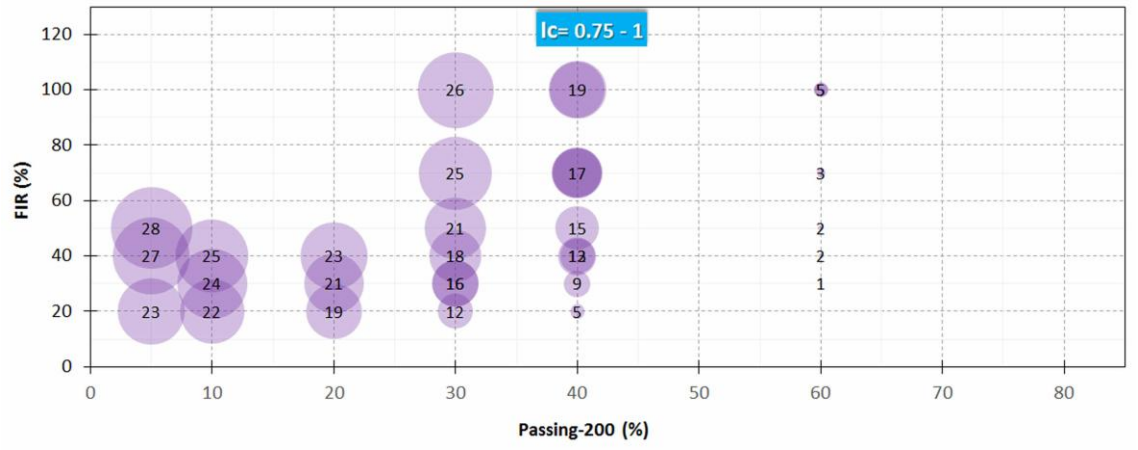

**شکل ۸- الف: نمودار فراوانی الف: آزمایش اسلامپ، ب: مقادیر FIR و ج: مقادیر ذرات ریزدانه**

به منظور بررسی رابطه بین پارامترهای مختلف، در **شکل ۹** نمودار حبابی بین تغییرات مقدار *FIR* (در محور عمودی) و تغییرات درصد ذرات ریزدانه‌ی کوچکتر از ۰.۰۷۶ میلیمتر (محور افقی) و مقدار اسلامپ (اندازه حباب‌ها) ارائه شده است. با توجه به **شکل ۹** نتایج ذیل برای خاک‌هایی با شاخص استحکام بین ۰/۷۵ تا ۱، قابل ارائه می‌باشد:

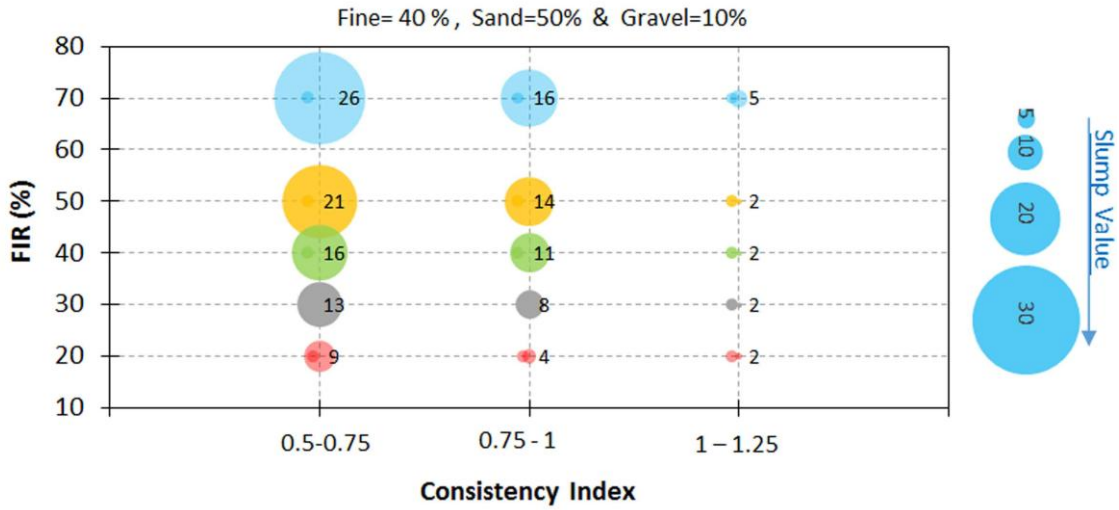
- این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ریزدانه در خاک، میزان افت اسلامپ بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و حتی رفتار خاک سفت نیز مشاهده شده است و برعکس با کاهش مقدار آن نیز مقدار اسلامپ کاهش یافته و رفتار خاک به سمت روان شدن تمایل دارد.
- در آزمایش‌هایی که مقدار ذرات ریزدانه در خاک کمتر از ۲۵ درصد باشد، مقدار اسلامپ به کمتر از ۲۰ سانتیمتر نمی‌رسد و خاک شبیه **شکل ۷-ب** همواره رفتار روان‌شدگی از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر خاک‌هایی با محتوای ریزدانه کمتر از ۲۵ درصد، تنها با استفاده از فوم، کارپذیری مناسب برای حفاری با ماشین *EPB* بدست نخواهد آمد. این نتیجه با توصیه‌های مندرج در دستینه‌های BTS [23] و DAUB [20] مطابقت دارد.
- برای شرایطی که میزان ذرات ریزدانه در خاک بین ۲۵ تا ۶۰ درصد باشد، می‌توان با دامنه‌ای از *FIR* پایین (بین ۲۰ تا ۱۵۰ درصد) به کارپذیری مناسب رسید و اسلامپی حدود ۱۰ تا ۲۰ سانتیتر (همانند **شکل ۷-ج**) را از خاک بعمل آوری شده انتظار داشت.
- وقتی میزان ذرات ریزدانه در خاک به بیشتر از ۶۰ درصد افزایش یافت، حتی با مقادیر *FIR* حدود ۱۵۰ درصد نیز، اسلامپ کمتر از ۱۰ سانتیمتر مشاهده نشد و خاک رفتاری شبیه **شکل ۷-الف**، یعنی رفتار سفت از خود نشان داد. در چنین شرایطی هم خاک بعمل آوری شده با فوم نمی‌تواند کارپذیری مناسب برای حفاری با ماشین *EPB* را داشته باشد.
- بنابراین برای خاک‌هایی که دارای ذرات ریزدانه بیشتری هستند در مقایسه با مصالحی که حاوی ذرات ریزدانه کمتر هستند، برای دست یافتن به کارپذیری مناسب (مقدار افت اسلامپ بین ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر باشد) نیاز به مقادیر *FIR* بسیار بیشتری می‌باشد.

علاوه بر آزمایش‌های فوق، به منظور بررسی اثر رطوبت و شاخص استحکام بر روی مقدار افت اسلامپ، ۱۰ آزمایش دیگر با محتوای رطوبت ۱۰ درصد (*Ic=1-1.25*) و ۲۰ درصد (*Ic=0.5-0.75*) انجام شده که نتایج آن در **شکل ۱۰** آورده شده است. در این شکل نمودار حبابی بین مقدار شاخص استحکام (محور افقی)، تغییرات مقدار *FIR* در محور قائم و تغییرات افت اسلامپ (اندازه حباب‌ها) برای خاکی با مقدار ریزدانه‌ی ۴۰ درصد ارائه شده است. همانطور

که در این شکل مشاهده می‌شود، برای شرایطی که شاخص استحکام بین ۱ تا ۱/۲۵ (رطوبت حدود ۱۰ درصد) می‌باشد برای رسیدن به اسلامپ بیشتر از ۱۰ سانتیمتر نیاز به تزریق فوم با *FIR* بیشتر از ۱۰۰ درصد می‌باشد. ولی چنانچه با افزایش رطوبت، شاخص استحکام خاک به ۰/۷۵ تا ۱ کاهش یابد مقدار *FIR* تا ۴۰ درصد می‌تواند کاهش یابد. در همین خاک چنانچه شاخص استحکام به ۰/۵ تا ۰/۷۵ کاهش یابد، آنگاه حتی با *FIR* حدود ۳۰ درصد نیز می‌توان به کارپذیری مناسب دست یافت. بنابراین با افزایش رطوبت (کاهش شاخص استحکام)، مقدار افت اسلامپ افزایش می‌یابد. ضمنا در شرایطی که شاخص استحکام خاک پایین (محتوای رطوبت بالا) باشد در مقایسه با شاخص استحکام بالا (محتوای رطوبت کمتر) برای رسیدن به کارپذیری مناسب نیاز به مقادیر *FIR* کمتری می‌باشد.




**شکل ۹- نمودار حبابی برای بررسی رابطه‌ی بین تغییرات ذرات ریزدانه (محور افقی)، مقدار FIR (محور قائم) و میزان افت اسلامپ (اندازه حباب‌ها)**




**شکل ۱۰- نمودار حبابی بین شاخص استحکام (محور افقی)، مقدار FIR (محور قائم) و میزان افت اسلامپ (اندازه حباب‌ها)**

## ۴- تحلیل رگرسیون آماری برای توسعه مدل تجربی

در این بخش از مقاله به منظور توسعه مدل تجربی لازم است که با استفاده از تکنیک رگرسیون چند متغیره، رابطه‌ای بین متغیرهای مستقل (مقدار ذرات ریزدانه و *FIR*) و متغیر وابسته (مقدار افت اسلامپ) ارائه شود. اولین گام به منظور ایجاد مدل، انتخاب روش ورود متغیرها به مدل رگرسیونی است. در این زمینه چهار روش مختلف وجود دارند که عبارتند از روش همزمان متغیرها، روش گام به گام، حذف تدریجی (انتخاب رو به عقب)، ورود تدریجی (انتخاب رو به جلو). در این مقاله به منظور تحلیل رگرسیون چند گانه، از روش ورود تدریجی یا انتخاب رو به جلو (در محیط نرم افزار *SPSS*) استفاده شده است. در انتخاب رو به جلو از مدلی شروع می‌شود که تنها مقدار ثابت را دارد. در هر قدم، متغیری به مدل اضافه می‌شود که بیشترین تغییر را در *R2* ایجاد کند و این تغییر در *R2* باید به حدی باشد که بتوان این فرضیه صفر را رد کرد که مقدار واقعی تغییر برابر با صفر است (این کار با یک سطح معنی داری از قبل مشخص شده انجام می‌شود و مقدار پیش فرض آن برابر با ۰/۰۵ یا کمتر است. اگر این سطح معنی داری افزایش یابد باعث می‌شود متغیرها راحت‌تر وارد مدل شوند). ورود متغیرها به مدل هنگامی متوقف می‌شود که متغیر دیگری وجود نداشته باشد که افزایش معنی داری در مقدار *R2* ایجاد کند. خروجی نرم افزار *SPSS* در این بررسی شامل جدول *ANOVA* (تحلیل واریانس) و نمودار برازش مدل‌های مختلف بر روی نقاط پراکنش است.

### ۴-۱- تفسیر جدول تحلیل واریانس (ANOVA)

نتایج تحلیل واریانس برای نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، در **جدول ۲** ارائه شده است. همانطور که در این جداول مشاهده می‌شود، مقدار *Sig.* محاسبه شده کمتر از ۰/۰۵ (شرط اثبات معنی داری آماری رابطه میان دو متغیر وابسته و مستقل) می‌باشد. همچنین مقدار ضریب *F* حدود ۱۴۰ محاسبه شده است، که این مقدار بیشتر از ضریبی است که از جدول استاندارد فیشر بدست می‌آید. به عبارت دیگر رابطه معنی‌داری از لحاظ آماری بین مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده وجود دارد. همچنین در **جدول ۳** خلاصه‌ای از ضرایب رگرسیون مدل مذکور آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب $r^2$ اصلاح شده‌ی این مدل حدود ۰/۸۵ می‌باشد.

### ۴-۲- تفسیر جدول ضرائب رگرسیون

ضرایب رگرسیون برای نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، در **جدول ۴** ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، برای هر دو ضریب رابطه (ضرایب ثابت و شیب) مقدار *sig.* کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. زیرا سطح معنی داری مشاهده شده برای تمام ضرایب کمتر از ۰/۰۵ درصد است. همچنین مقدار *T-test* بدست آمده از جدول ضرائب، بیشتر از مقدار *t* بدست آمده از جداول استاندارد *(t(n-2)α/2=t(45)0.025≈1.68)* می‌باشد. به عبارت دیگر ضرایب رابطه جدید از لحاظ آماری معنی‌دار بوده و تایید می‌شوند.

در نهایت به منظور روشن شدن بیشتر موضوع، بر اساس نتایج مندرج در جداول مذکور ضرایب مدل نهایی به شرح ذیل اخذ شده است:

$$\text{Slump} = 30.1 + (-0.5)\,\text{FineGrain} + (0.06)\,\text{FIR} \qquad (۵)$$

**جدول ۲- جدول تحلیل واریانس (*ANOVA*) مربوط برآورد افت اسلامپ**

| Model | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Regression | 3961.846 | 2 | 1980.923 | 140.808 | .000[a] |
| | Residual | 619.005 | 44 | 14.068 | | |
| | Total | 4580.851 | 46 | | | |

a. Predictors: (Constant), FIR, Passing200 (fine grain)

b. Dependent Variable: SLUMP

**جدول ۳- جدول خلاصه ضرایب رگرسیون مدل** (Model Summary)

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---|---|---|---|---|
| 1 | .930a | .865 | .859 | 3.75077 |

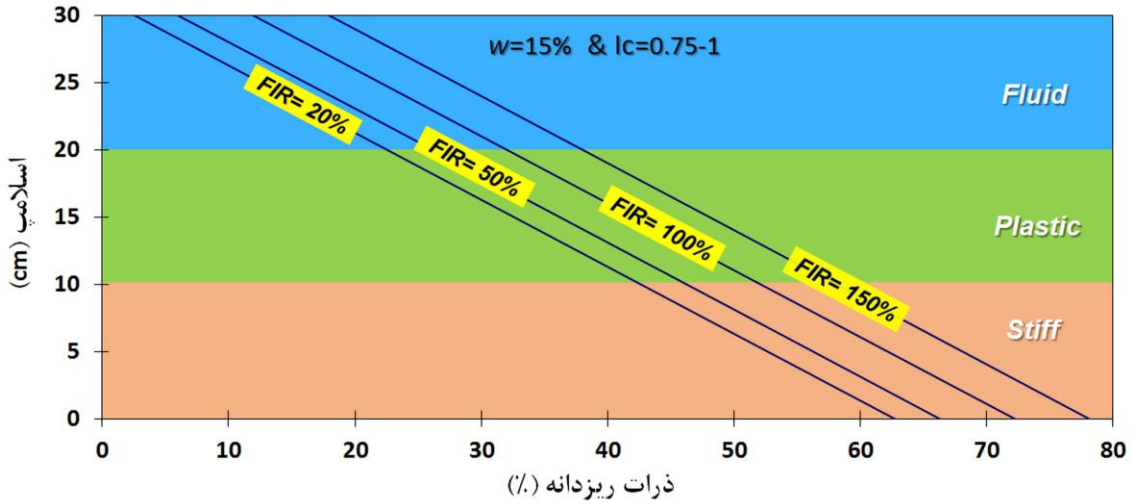
**جدول ۴-درصد ضرایب رگرسیون (*Coefficients*) در انتخاب رو به جلو**

| Model | | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. | Correlations | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | B | Std. Error | Beta | | | Zero-order | Partial | Part |
| 1 | (Constant) | 30.1 | 1.090 | | 27.585 | .000 | | | |
| | Passing200 (fine grain) | -.5 | .034 | -1.059 | -14.734 | .000 | -.913 | -.912 | -.817 |
| | FIR | .06 | .018 | .229 | 3.183 | .003 | -.445 | .433 | .176 |

a. Dependent Variable: SLUMP

## ۵- ارائه چارت برای برآورد کارپذیری خاک بعمل آوری شده

در این بخش از مقاله، بر اساس نتایج بدست آمده از رابطه‌ی ۵ اقدام به ترسیم نمودار **شکل ۱۱** گردید. همانطور که در این نمودارمشاهده می‌گردد، با دارا بودن مقدار ذرات ریزدانه و *FIR* می‌توان مقدار افت اسلامپ و یا به عبارت دیگر کارپذیری خاک را برای شرایطی که شاخص استحکام بین ۰/۷۵ تا ۱ (محتوای رطوبت ۱۵ درصد) باشد، تخمین زد. لازم به توضیح است که بر اساس این نمودار می‌توان دامنه مناسب برای کارپذیری خاک را بدست آورد.




**شکل ۱۱- نمودار رابطه‌ی بین ذرات ریزدانه، FIR و افت اسلامپ**

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، در ابتدا آزمون‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی رفتار کارپذیری خاک‌های بعمل آوری شده با فوم انجام گردید. سپس با تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی، یک مدل تجربی تدوین شد. در طی مطالعات آزمایشگاهی آزمایش اختلاط فوم با خاک و آزمون اسلامپ انجام شد. این آزمایش‌ها بر روی خاک‌هایی با مقدار ریزدانه‌ی مختلف و شاخص استحکام (*Ic*) بین ۰/۷۵ تا ۱ (*w=15%*، *PL=10-12%* و *LL=30-35%*) انجام شد. همچنین در این آزمون-ها نسبت بین حجم فوم و خاک نیز متفاوت بوده است به عبارت دیگر آزمایش اسلامپ با مقادیر *FIR* مختلف انجام شده است. لازم به توضیح است که کارپذیری مناسب برای حفاری با ماشین *EPB* زمانی بدست می‌آید که خاک جمع شده در اتاقک فشار دارای رفتار پلاستیک بوده و مقدار افت اسلامپ آن در محدوده‌ی ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر باشد.

ضمنا برای تحلیل داده‌های بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی و ساخت مدل تجربی از روش‌ها و آزمون‌های آماری استفاده شد و مشخص گردید که از نظر آماری رابطه-ی معنی‌داری از لحاظ آماری بین متغیر مستقل (مقدار ذرات ریزدانه و *FIR*) با متغیر وابسته (مقدار افت اسلامپ) وجود دارد که توسط روش رگرسیون چند متغیره یک رابطه آماری نیز توسعه یافت. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی مذکور، یک نمودار برای تخمین مقدار اسلامپ با استفاده از مقدار ذرات ریزدانه و *FIR* ارائه گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ریزدانه در خاک، میزان افت اسلامپ بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. ضمنا خاک‌هایی که مقدار ذرات ریزدانه‌ی آنها کمتر از ۲۵ درصد باشد، زمانیکه با فوم ترکیب می‌شوند رفتار روان‌شدگی از خود نشان داده‌اند و مقدار اسلامپ همواره بیشتر از ۲۰ سانتیمتر می‌باشد. همچنین وقتی میزان ذرات ریزدانه در خاک به بیشتر از ۶۰ درصد افزایش یافت، حتی با مقادیر *FIR* حدود ۱۵۰ درصد نیز اسلامپ کمتر از ۱۰ سانتیمتر مشاهده نشد. بنابراین در شرایطی که مقدار ذرات ریزدانه کمتر از ۲۵ درصد و یا بیشتر از ۶۰ درصد باشد، و با شاخص استحکام ۰/۷۵ تا ۱ (درصد رطوبت ۱۵ درصد)، نمی‌توان تنها با تزریق فوم به کارپذیری مناسب دست یافت. به عبارت دیگر چنانچه شاخص استحکام خاک جمع شده در اتاقک فشار ماشین *EPB* بین ۰/۷۵ تا ۱ باشد، محدوده کاربری ماشین به خاک‌هایی با محتوای ریزدانه‌ی ۲۵ تا ۶۰ درصد محدود می‌گردد. این محدوده دانه‌بندی در عملیات حفاری با ماشین *EPB*، کاربرد بسیاری دارد زیرا در خارج از محدوده‌ی مذکور برای گسترش دامنه‌ی کاربری ماشین لازم است تا بوسیله تزریق آب یا بنتونیت تغییراتی در کارپذیری خاک به شرح ذیل ایجاد نمود:

- چنانچه مصالح جمع شده در اتاقک فشار حاوی ذرات ریزدانه‌ی بیشتر از ۶۰ درصد و *Ic=0.75-1* باشد، برای دست یافتن به کارپذیری مناسب علاوه بر تزریق فوم، لازم است که آب نیز در این اتاقک تزریق شود تا شاخص استحکام خاک کاهش یابد. بنابراین در چنین شرایطی هدف این است که با افزایش رطوبت و در نتیجه کاهش شاخص استحکام، مقدار افت اسلامپ که قبلا کمتر از ۱۰ سانتیمتر بوده افزایش یابد و بین ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر قرار گیرد. ولی نکته‌ی مهم این است که افزایش مقدار رطوبت باید با لحاظ کردن پارامترهای حد روانی (*LL*) و حد خمیری (*PL*) خاک صورت گیرد.
- در شرایطی که مقدار ذرات ریزدانه در مصالح جمع شده در اتاقک فشار کمتر از ۲۵ درصد و *Ic=0.75-1* باشد، برای دست یافتن به کارپذیری مناسب لازم است که در زمان حفاری همزمان فوم و بنتونیت از طریق نازل‌ها به درون اتاقک فشار تزریق شود تا شاخص استحکام خاک افزایش یابد. از آنجاییکه پارامترهای حد روانی (*LL*) و حد خمیری (*PL*) بنتونیت از خاک‌های ریزدانه‌ی معمولی بیشتر است لذا هدف از تزریق آن این است که سبب افزایش شاخص استحکام مصالح شود. در نتیجه با افزایش شاخص استحکام، مقدار افت اسلامپ که قبلا بیشتر از

۲۰ سانتیمتر بوده کاهش یابد و بین ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر قرار گیرد.

بنابراین محدود شدن ذرات ریزدانه بین ۲۵ تا ۶۰ درصد تنها برای شرایطی است که شاخص استحکام مصالح جمع شده در اتاقک فشار در دامنه‌ی ۰/۷۵ تا ۱ باشد و چنانچه این شاخص کاهش و یا افزایش یابد، دامنه کاربری ماشین *EPB* برای خاک‌هایی با محتوای کمتر از ۲۵ درصد و یا بیشتر از ۶۰ درصد نیز امکانپذیر است.

## ۷- فهرست نمادها

| نماد | واحد | شرح |
|---|---|---|
| *FIR* | % | نسبت تزریق فوم |
| *w* | % | محتوای رطوبت |
| *LL* | % | حد روانی |
| *PL* | % | حد خمیری |
| *Ic* | - | شاخص استحکام |

## ۸- منبع‌ها


[1] Thewes, M., Budach, C, Galli, M. (2010). Laboratory tests with various conditioned soils for tunnelling with earth pressure balance shield machines. Tunnel 6.

[2] Tarigh Azali, S., Moammeri, H. (2012). EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan Metro Line 1. In: Phienwej, N., Boonyatee, T. (Eds.), ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC), Bangkok, Thailand.

[3] Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, G., Hassanpour, J. (2013). Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line 7, Tehran Metro, Iran. Engineering Geology 166, 170–185.

[۴] بخشنده امینه، ح.، زمزم، م.، موسوی، س.ا.، طریق ازلی، ص. (۱۳۹۲). انتخاب مناسب‌ترین مجموعه‌ی بهسازی خاک در حفاری مکانیزه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران. مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۱۴۵-۱۵۴.

[5] Peron, J. Y., Marcheselli, P. (1994). Construction of the ‘Passante Ferroviario’ link in Milan. Italy. Lots 3P, 5P, and 6P: Excavation by large EPBS with chemical foam injection: Tunnelling ’94: IMM, Chapman & Hall, London, United Kingdom.

[6] 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 and Underground Space Technology 13 (2), 173–180.

[7] Jancsecz, S., Krause, R., Langmaack, L. (1999). Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: Experiences of LRTS Izmir. In Alten, T. and Broch, E. (Editors), ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC), Oslo, Norway.

[8] Williamson, G. E., Traylor, M. T., Higuchi, M. (1999). Soil conditioning for EPB shield tunneling on the South Bay Ocean Outfall. In Hilton, D. and Samuelson, K. (Editors), Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) 1999: SME, Littleton, CO, pp. 897–925

[9] Leinala, T., Grabinsky, M., Delmar, R., Collins, J. R. (2000). Effects of foam soil conditioning on EPBM performance. In Ozdemir, I. A. (Editor), North American Tunneling (NAT) 2000: Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

[10] Peña, M. (2003). Soil conditioning for sands. Tunnels Tunnelling International, Vol. 7, pp. 40–42.

[11] Hanamura, T., Kurose, J., Aono, Y., Okubo, H. (2007). Integral studies on mechanized functions of mudding agents and the properties of muddified soils in the EPB shield tunneling technology. In Bartak, J.; Hrdina, I.; Romancov, G.; and Zlamal, J. (Editors), ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC), Prague, Czech Republic.

[12] Vinai, R., Oggeri, C., Peila, D. (2008). Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research. Tunnelling and Underground Space Technology 23, 308–317.

[13] Peila, D., Oggeri, C., Borio, L. (2009). Using the slump test to assess the behaviour of conditioned soil for EPB tunnelling. Environmental & Engineering Geoscience XV (3), 167–174.

[14] Zumsteg, R., Puzrin, A.M. (2012). Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes. Tunnelling and Underground Space Technology 31, 86–96.

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

[16] Thewes, M., Budach, C. (2010). Soil conditioning with foam during EPB tunnelling. Geomechanics and Tunnelling 3 (3), 256–267.

[17] Psomas, (2001). Properties of foam/sand mixtures for tunneling applications, University of Oxford.

[18] Peila, D., Oggeri, C. and Borio, L. (2008). Influence of granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBS applications. In: Underground Facilities for Better Environment and Safety. In: Kanjlia, V.K., Ramamurthy, T., Wahi, P.P., Gupta, A.C., (Editors), ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC), Agra, India.

[19] Borghi, F.X. (2006). Soil conditioning for pipe jacking and tunnelling. PhD Dissertation, Cambridge University, UK.

[20] DAUB (2010). Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Available online atwww.daub-ita.de/uploads/media/gtcrec14.pdf.

[21] ITA (2001). Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBM). Working group n°14 - mechanized tunnelling - international tunnelling association.

[22] Ball, R.P.A., Young, D.Y., Isaacson, J., Champa, J., Gause, C. (2009). 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, pp. 320–333.

[23] BTS (2005). Closed-Face Tunneling Machines and Ground Stability. British Tunneling Society (Closed-Face Working Group) in association with the Institution of Civil Engineers: Thomas Telford Publishing, London (77 pp.).

[24] ASTM D422 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil.

[25] ASTM C143 (2003). Standard test method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.

[26] Peila, D., Oggeri, C., Vinai, R. (2007). Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soils for EPB tunneling operations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 133, pp. 1622–162.