

# بررسی آزمایشگاهی اثر رطوبت و نسبت تزریق فوم بر روی به عمل آوری خاک در تونل سازی با EPB-TBM

صادق طریق ازلی (دکتری)

محمد غفوری\* (استاد)

غلامرضا لشکری پور (استاد)

گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

جعفر حسن پور (استادیار)

دانشکده‌ی زمین شناسی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (دوره ۲، شماره ۳/۴، ص. ۸۹-۹۷، یادداشت نمی)

در تونل سازی با EPB-TBM، مصالح حفاری شده با فوم به عمل آوری می شوند، تا کارپذیری مناسب (محیط خمیری) به منظور اعمال فشار به جبهه‌ی کار را داشته باشند. عواملی که در کارپذیری مؤثرند، شامل: شاخص استحکام (Ic)، رطوبت، ذرات ریزدانه، و نسبت تزریق فوم (FIR) هستند. در این نوشتار، تأثیر پارامترهای مذکور در کارپذیری خاک با انجام ۶۶ آزمون آزمایشگاهی اسلامپ در دو محتوای رطوبت ۱٪ و ۲۵٪ (Ic = ۱ - ۱٫۲۵) و ۲۰٪ (Ic = ۰٫۷۵ - ۰٫۵) بررسی شده است. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی با روش رگرسیون چندمتغیره به منظور تخمین FIR با هدف دستیابی به کارپذیری مناسب خاک تجزیه و تحلیل و به صورت نمودار و رابطه‌ی معنی دار آماری در رطوبت‌های مختلف ارائه شده است.

sadeghzali@gmail.com  
ghafoori@um.ac.ir  
lshkaripour@um.ac.ir  
hassanpour@ut.ac.ir

واژگان کلیدی: تونل سازی، فوم، کارپذیری، اسلامپ، EPB-TBM.

## ۱. مقدمه

نقاله‌ی ماریچ را دارد. بنابراین، کارپذیری شاخصی برای خصوصیت خمیری خاک جمع شده در اتاقک فشار است و معیاری برای کاربری ماشین EPB در زمین‌های مختلف است.<sup>[۱-۳]</sup> از سوی دیگر، وقتی دانه بندی و محتوای رطوبت خاک متفاوت باشد، خصوصیات کارپذیری آنها نیز متفاوت است. بنابراین در حفاری با ماشین متعادل کننده‌ی فشار زمین همیشه سعی می شود با تزریق مواد افزودنی مانند فوم‌ها و یا پلیمرها به مصالح موجود در اتاقک فشار، کارپذیری مناسبی برای خاک حفاری شده ایجاد کرد. در ادبیات تونل سازی مکانیزه، به افزودن فوم و پلیمر به خاک، عملیات به عمل آوری می گویند، که یکی از کلیدی ترین مراحل حفاری با ماشین EPB است. براساس توصیه های مندرج در پژوهش های مختلف،<sup>[۴-۱۵]</sup> خصوصیات کارپذیری خاک حفاری شده می تواند با آزمایش اسلامپ برآورد شود. این آزمایش در صنعت بتن بسیار شناخته شده و مرسوم است. مطالعات انجام شده در سال های گذشته بر روی کارپذیری نشان داده اند که مقادیر مناسب برای آزمایش اسلامپ شامل محدوده بی بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر است.<sup>[۱۶, ۱۷, ۱۸]</sup> لازم به توضیح است که چنانچه مقدار افت اسلامپ کمتر از ۱۰ و یا بیشتر از ۲۰ سانتی متر باشد، شرایط یک توده‌ی خاک خمیری با کارپذیری مناسب در اتاقک فشار ایجاد نمی شود. یکی از اولین مطالعات آزمایشگاهی در خصوص به عمل آوری خاک با تزریق فوم به تحقیقاتی مربوط می شود که در دانشگاه آکسفورد و بر روی خواص فوم و ماسه برای کاربردهای

ساخت ماشین متعادل کننده‌ی فشار زمین (EPB-TBM)<sup>۱</sup> برای اولین بار در ژاپن در اواسط دهه‌ی ۱۹۷۰ آغاز شده و در سال های اخیر، استفاده از آن به منظور تونل سازی در خاک توسعه‌ی زیادی یافته است. مشخصه‌ی اصلی ماشین های مذکور، داشتن اتاقک فشار جهت مقابله با فشار آب و زمین در جبهه‌ی کار تونل است، و با استفاده از آن‌ها، مواد حفر شده در اتاقک حفاری یا اتاقک فشار جمع آوری و فشرده می شوند و تشکیل پوششی را می دهند، که نگه داری و پایداری جبهه‌ی کار را تأمین می کند. ولی نکته‌ی مهم این است که مصالح جمع شده در اتاقک فشار باید خصوصیات ویژه‌ی داشته باشند تا بتوانند الزامات EPB را فراهم کنند. به عبارت دیگر، خاک جمع شده در اتاقک حفاری باید قابلیت اعمال فشار و همچنین قابلیت انتقال را داشته باشد. لازم به توضیح است که در ادبیات حفاری مکانیزه، به ویژگی هایی همچون قابلیت اعمال فشار و انتقال خاک، کارپذیری مصالح می گویند. کارپذیری مناسب برای ماشین EPB وقتی ایجاد می شود که خاک جمع شده در اتاقک حفاری به یک ماده‌ی همگن، پلاستیک و خمیری تبدیل شود. چنین خاکی هم قابلیت اعمال فشار به سینه‌ی کار و هم قابلیت انتقال مصالح از طریق نوار

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۳/۱۶، پذیرش ۱۳۹۴/۳/۲۶.

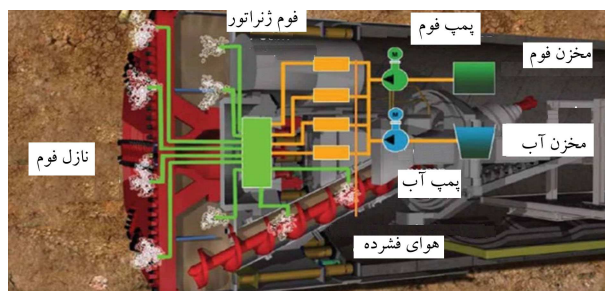
تونل‌سازی انجام شده است.<sup>[۱۷]</sup> بعدها پژوهش‌های بیشتری در دانشگاه‌های دیگر انجام شده است،<sup>[۱۹،۱۸،۱۵،۱۰]</sup> که یکی از آخرین آن‌ها مربوط به آزمون‌هایی است که در آزمایشگاه دانشگاه بوخوم در حال انجام است، به طوری که از سال ۲۰۱۰ تاکنون چند نوشتار از مطالعات انجام‌گرفته‌ی آزمایشگاه مذکور در مجلات و کنفرانس‌های مختلف منتشر شده است.<sup>[۱۴]</sup> هدف اصلی پژوهش‌های انجام‌شده در آزمایشگاه بوخوم، بررسی پارامترهای به عمل‌آوری بر روی کارپذیری خاک است. لذا هدف از این مطالعه ارائه‌ی یک رابطه یا مدل تجربی بین محتوای رطوبت و نسبت تزریق فوم (FIR)<sup>۲</sup> با کارپذیری مصالح به منظور استفاده در حفاری با ماشین EPB است. به منظور ارائه‌ی مدل مذکور، روند انجام مطالعات در این نوشتار، به ترتیب شامل این مراحل است:

- طراحی آزمون‌های آزمایشگاهی،
- تهیه‌ی تجهیزات آزمایشگاهی و مصالح مورد نیاز،
- انجام آزمون‌های آزمایشگاهی،
- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی به وسیله‌ی روش‌های آماری،
- ارائه‌ی مدل اولیه براساس آزمون‌های آزمایشگاهی.

## ۲. مروری بر تزریق فوم در تونل‌سازی با ماشین EPB

اولین ماشین EPB، که توانایی تزریق فوم‌های عملکردهای زمانی در طی حفاری برای به عمل‌آوری خاک را داشته است، در سال ۱۹۸۴ ساخته شده است. امروزه دیگر ماشینی از نوع EPB وجود ندارد که از سیستم به عمل‌آوری زمین در زمان حفاری استفاده نکند. در شکل ۱، تصویری شماتیک از سیستم تزریق فوم در یک ماشین EPB ارائه شده است. سیستم تزریق فوم شامل: مخزن آب، هوای فشرده، و فوم به همراه پمپ‌های لازم و حس‌گر اندازه‌گیری فشار، نازل‌های تزریق، شیرهای فشارشکن و لوله‌های انتقال به سیستم جبهه‌ی کار، اتاقک فشار، و نقاله‌ی ماریج است. در دهه‌ی گذشته، مبنای انتخاب ماشین EPB داشتن دست‌کم ۳۰٪ ذرات ریزدانه در زمین در برگیرنده‌ی تونل بوده است. امروزه با رشد و توسعه‌ی تکنولوژی، به عمل‌آوری شرایط خاک با فوم امکان حفاری با ماشین EPB نیز در زمین‌هایی با درصد ذرات ریزدانه تا ۱۰٪ وجود دارد و این موضوع در دستورالعمل انتخاب ماشین حفار، که توسط سازه‌های زیرزمینی آلمان (DAUB) منتشر شده است، تشریح شده است.<sup>[۲۰]</sup>

به طور کلی فوم از ۳ بخش عامل کف‌ساز، آب، و هوا تشکیل می‌شود. عمده‌ترین پارامترهای مورد استفاده در میحث تزریق فوم عبارت‌اند از: Cf (غلظت عامل کف‌ساز)<sup>۲</sup>، FER (نسبت انبساط فوم)<sup>۴</sup> و FIR (نسبت تزریق فوم). لازم به توضیح



شکل ۱. نمایی شماتیک از مدار تولید و تزریق فوم.

است که پارامترهای Cf و FER معمولاً در یک دامنه‌ی مشخص و محدودی ثابت فرض می‌شوند، ولی مقدار FIR می‌تواند بسته به شرایط دانه‌بندی و استحکام خاک تغییر قابل توجهی کند، لذا می‌تواند تأثیر بسیار بیشتری در رفتار خاک داشته باشد. به همین منظور پارامتر FIR از بین ۳ پارامتر مذکور به عنوان یکی از عوامل مؤثر در رفتار به عمل‌آوری خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

پارامتر FIR نشان‌دهنده‌ی حجم فوم استفاده‌شده در ۱ مترمکعب خاک است. برای مثال مقدار  $FIR = ۴۰\%$  نشان‌دهنده‌ی آن است که به ازاء ۱ مترمکعب از خاک، مقدار ۴۰۰ لیتر فوم در خاک تزریق شده است. مقدار پارامتر FIR به صورت رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$FIR = ۱۰۰ \times V_{Foam} / V_{Soil} \quad (۱)$$

که در آن،  $V_{foam}$  و  $V_{Soil}$  به ترتیب حجم برجای خاک و حجم فوم با کف تولیدی است.

## ۳. آزمون‌های آزمایشگاهی به عمل‌آوری خاک

در این بخش از مطالعه، به منظور دست‌یافتن به یک رابطه‌ی تجربی اولیه بین ۳ متغیر مستقل (شامل: خصوصیات دانه‌بندی خاک، محتوای رطوبت خاک، و FIR) و میزان افت اسلامپ، تعداد ۶۶ آزمون آزمایشگاهی انجام شده است، که قبل از شرح روند انجام آن‌ها، شناخت ملزومات موردنیاز به منظور انجام آزمایش‌ها ضروری است. ملزومات آزمون‌های آزمایشگاهی به عمل‌آوری خاک در واقع شامل ۳ ساختار اصلی بدین شرح است:

- مصالح مورد نیاز: شامل: ماده‌ی کف‌ساز فوم و خاک با خصوصیات دانه‌بندی مختلف؛
- تجهیزات تولید حباب فوم: شامل: مولد فوم، میکسر، و کمپرسور؛
- آزمایش‌های به عمل‌آوری خاک: شامل: آزمون‌های دانه‌بندی خاک، درصد رطوبت، و اسلامپ.

در این مطالعه از یک عامل کف‌ساز تجاری با کلیه‌ی مشخصات قیدشده در استاندارد EFNARC<sup>[۲۱]</sup> استفاده شده است. مشخصات ذکرشده شامل نیمه‌ی عمر ۳۹۰ ثانیه فوم و همچنین ۰/۵ میلی‌متر متوسط اندازه‌ی حباب است. ضمناً به منظور تولید فوم از یک دستگاه مولد فوم استفاده شده است، که قادر است مقدار دقیق هوا، آب، و عامل کف‌ساز را به وسیله‌ی شیرها، گیج‌ها و جریان‌سنج‌هایی کنترل کند و این مواد را به داخل استوانه‌ی بی‌اثر از قطعات شیشه‌ی هدایت می‌کند، که خروجی مصالح از آن، به صورت حباب‌های فوم است.

به منظور روشن شدن موضوع، کلیه‌ی مراحل انجام آزمون‌های به عمل‌آوری خاک (شامل: تهیه‌ی نمونه، آماده‌سازی، تولید فوم، مخلوط‌کردن، و درنهایت آزمون اسلامپ) در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین به منظور روشن شدن بیشتر موضوع، مراحل تصویری فعالیت‌های آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این پژوهش (مطابق شکل ۲)، آزمون‌های آزمایشگاهی با انجام آزمون‌های دانه‌بندی جهت تهیه و آماده‌سازی خاک‌هایی با خصوصیات مختلف شروع شده است. سپس با استفاده از دستگاه مولد فوم، فوم‌هایی با مقادیر مختلف FIR تولید شده است. فوم تولیدشده در دستگاه همزن برقی با خاکی که ۱۰٪ و ۲۰٪ رطوبت دارد، مخلوط شده است تا خاک به عمل‌آوری شود و درنهایت، آزمون اسلامپ و کنترل کیفیت بصری به منظور ارزیابی کارپذیری آن انجام شده است.

### ۱.۳. آزمایش دانه بندی مکانیکی خاک

منحنی دانه بندی مربوط به ۱۱ نمونه ی خاکی آزمایش شده در این پژوهش در شکل ۴ ارائه شده است، که طبق مندرجات آن، این نتایج به دست آمده است:

-- بیشترین و کمترین مقدار ریزدانه، به ترتیب ۸۰ و ۵ درصد است.

-- بیشترین و کمترین مقدار ماسه، به ترتیب ۵۰ و ۵ درصد است.

-- بیشترین درصد شن ۵۰٪ و کمترین آن صفر درصد است.

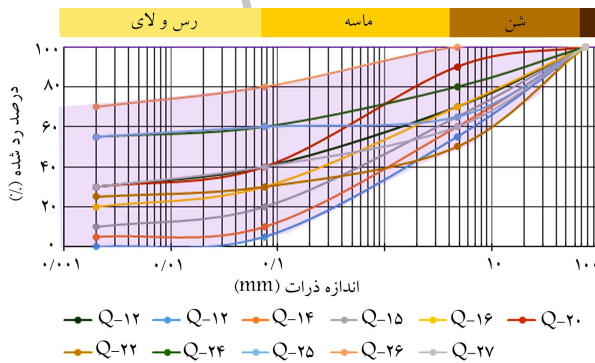
همان طور که در شکل مذکور مشاهده می شود، در این پژوهش سعی شده است علاوه بر اینکه آزمایش های به عمل آوری بر روی دامنه ی وسیعی از خاک هایی در محدوده ی کاربری ماشین EPB انجام شده است، بر روی خاک هایی خارج از محدوده ی کاربری ماشین EPB نیز انجام شده است، تا مشخص شود که آیا فوم به تنهایی قادر به مناسب سازی کاربردی این نوع خاک هاست یا خیر.

### ۲.۳. نتایج آزمایش شاخص استحکام

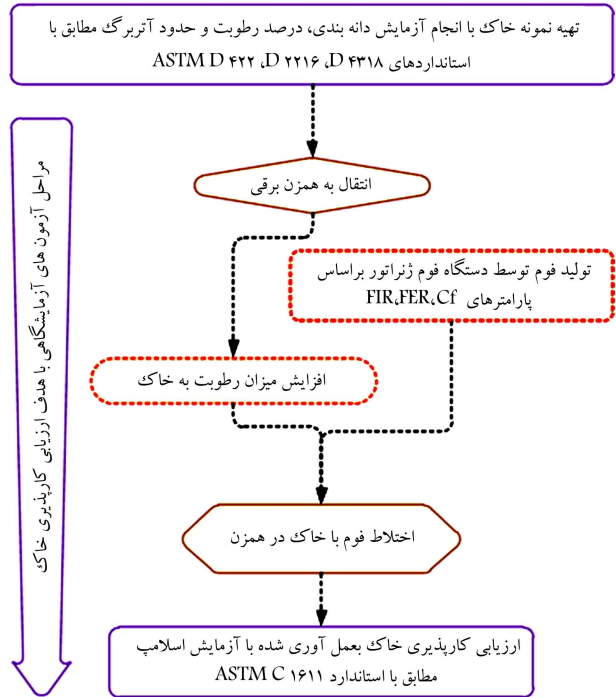
وقتی کانی های رسی در خاک های ریزدانه وجود داشته باشد، خاک می تواند با وجود مقداری رطوبت بدون خرد شدن به صورت خمیری در آید. این حالت چسبندگی ناشی از آب جذب شده در پیرامون ذرات رس است. وقتی که محتوای رطوبت از حد روانی و خمیری کمتر باشد، خاک شبیه به یک جسم سفت رفتار می کند. چنانچه درصد رطوبت از حد خمیری 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 می آیند. بنابراین رفتار خاک در محتوای رطوبت مختلف با پارامتری به نام شاخص استحکام (Ic) تعیین می شود. شاخص استحکام براساس حد روانی (LL) ۶، شاخص خمیری (PI) ۷، و درصد رطوبت طبیعی خاک (w) و با استفاده از رابطه ی ۲ محاسبه می شود:

$$Ic = \frac{LL - w}{PI} = \frac{LL - w}{LL - PL} \quad (2)$$

که در آن، پارامترهای LL و PI جزء خصوصیات ذاتی یک خاک محسوب می شوند و تغییر پذیر نیستند، ولی محتوای رطوبت یک خاک می تواند به راحتی تغییر کند که این تغییر تأثیر مستقیم در قوام و استحکام خاک خواهد داشت. به عبارت دیگر، با لحاظ کردن شاخص استحکام علاوه بر محتوای رطوبت، پارامترهای ذاتی خاک مانند حدود خمیری و روانی نیز در آن مستتر است. شرایط خاک براساس شاخص های مختلف استحکام مطابق جدول ۱ قابل رده بندی است.



شکل ۴. منحنی های دانه بندی خاک های مورد بررسی در این پژوهش.



شکل ۲. نمودار جریانی از روند آزمون های آزمایشگاهی با هدف ارزیابی کاربردی خاک.



- ۱- توزین نمونه خاک
- ۲- اختلاط فوم در فوم ژنراتور با تنظیم دبی آب، فوم و هوا به کمک شیرهای الکترونیکی و دستی
- ۳- تولید فوم
- ۴- افزایش میزان رطوبت
- ۵- اختلاط مخلوط فوم تولید شده با خاک در همزن برقی
- ۶- آزمایش اسلامپ

شکل ۳. مراحل تصویری از فعالیت های آزمایشگاهی با هدف ارزیابی کاربردی خاک با تزریق فوم.

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک براساس شاخص استحکام (Ic).

توصیف شرایط استحکام خاک	شاخص استحکام (Ic)
سخت (hard)	بزرگ‌تر از ۱٫۲۵
خیلی سفت (very stiff)	۱ تا ۱٫۲۵
سفت (stiff)	۰٫۷۵ تا ۱
نرم (soft)	۰٫۵ تا ۰٫۷۵
خیلی نرم (very soft)	۰ تا ۰٫۵
روان (liquid)	کوچک‌تر از ۰



۱- استفاده از مخروط اسلامپ براساس استاندارد ASTM C ۱۴۳

۲- ریختن خاک به عمل آوری شده به درون مخروط اسلامپ

۳- بالا کشیدن مخروط اسلامپ بطور عمودی

۴- اندازه گیری میزان افت خاک

شکل ۵. مراحل تصویری از روند آزمون اسلامپ بر روی خاک.



شکل ۶. رفتار متفاوت مصالح به عمل آوری شده در آزمایش اسلامپ.

براساس آزمون‌های حدود اتربرگ، حد روانی (LL) خاک‌های مورد آزمایش برابر با ۳۰ تا ۳۵ درصد و دامنه‌ی حد خمیری (PL) آنها نیز بین ۱۰ تا ۱۲ درصد بوده است. از آنجایی که آزمون‌های آزمایشگاهی با محتوای رطوبت ۱۰٪ و ۲۰٪ انجام شده است، لذا شاخص استحکام برای این دو محتوای رطوبت در دامنه‌ی بین ۱ تا ۱٫۲۵ ( $Ic = 1 - 1.25$ ) و همچنین ۰٫۷۵ تا ۰٫۷۵ ( $Ic = 0.75 - 0.75$ ) قرار داشته و طبق جدول مذکور در رده‌ی خاک‌های خیلی سفت و نرم طبقه‌بندی شده‌اند.

### ۳.۳. نتایج آزمایش افت مخروط اسلامپ

تقریباً تمام مطالعاتی که اخیراً انجام شده است، نشان داده است که آزمایش اسلامپ می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مناسب جهت ارزیابی کارپذیری مصالح به‌عمل‌آوری شده استفاده شود. این آزمون تقریباً مشابه آزمایش اسلامپ است، که معمولاً بر روی بتن تازه انجام می‌شود.<sup>[۲۲]</sup> ولی تفاوت آن با آزمایش استاندارد بتن فقط در این است که در آن از میله‌ی مربوط به منظور ضربه و کوبش خاک استفاده نمی‌شود. در شکل ۵، مراحل انجام آزمایش نشان داده شده است، که مطابق آن خاک به‌عمل‌آوری شده که شامل مخلوط مصالح و فوم است، به داخل مخروط اسلامپ ریخته می‌شود. بعد از ۱ 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.

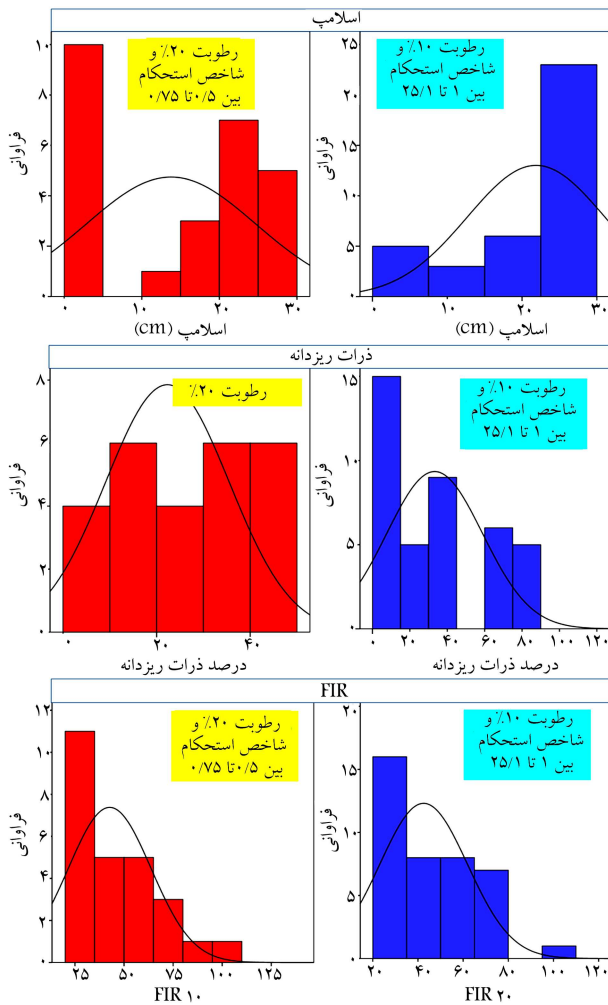
در این پژوهش، آزمایش‌های به‌عمل‌آوری با نسبت‌های مختلف FIR و محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام بین ۱ تا ۱٫۲۵) و ۲۰٪ (شاخص استحکام بین ۰٫۷۵ تا ۰٫۷۵) بر روی خاک‌هایی با مقدار ریزدانه‌ی مختلف انجام شده است. در هر یک از آزمایش‌ها، مقدار افت اسلامپ متفاوت بوده است. به‌طورکلی براساس تجربیات حاصل از این پژوهش و مطالعات گذشته،<sup>[۲۲]</sup> ۳ رفتار مختلف برای نتیجه‌ی آزمایش اسلامپ می‌تواند متصور باشد:

۱. رفتار سفت: چنانچه مقدار افت اسلامپ کمتر از ۱۰ سانتی‌متر باشد و معمولاً به دلیل ناکافی بودن مقدار آب و یا فوم و یا هر دوی آن و زیاد بودن درصد ریزدانه (شکل ۶الف)، این رفتار مشاهده می‌شود؛ ضمناً رفتار سفت توده‌ی خاک برای کارپذیری خاک در حفاری با ماشین EPB مناسب نیست.

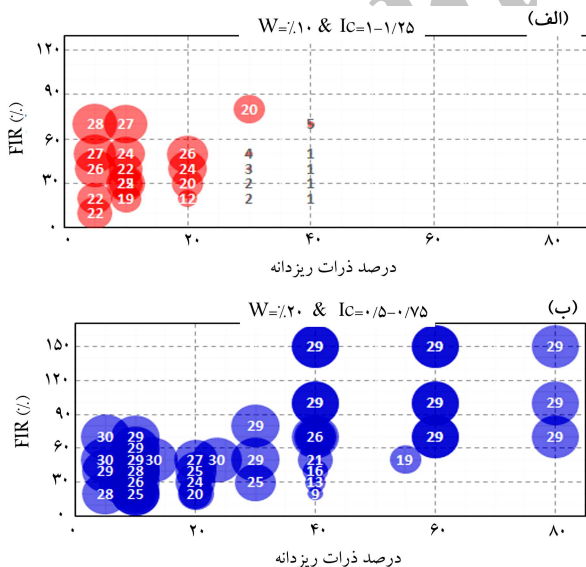
۲. رفتار روان شدن: چنانچه مقدار افت اسلامپ بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر باشد و معمولاً به علت توزیع دانه‌بندی، درصد رطوبت و یا نسبت FIR، رفتار مذکور برای تشکیل یک توده‌ی پلاستیکی و نیز برای کارپذیری خاک در حفاری با ماشین EPB مناسب نیست (شکل ۶ب).

۳. رفتار خمیری: رفتار خمیری شامل افت اسلامپ بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر با





شکل ۷. نمودار فراوانی اسلامپ، مقادیر ذرات ریزدانه و FIR.



شکل ۸. نمودار حبابی تغییرات ذرات ریزدانه (محور افقی)، مقدار FIR (محور قائم) و میزان افت اسلامپ (اندازه‌ی حباب‌ها).

شکل منظم توده و با مقدار کم و یا بدون خروج آب (شکل ۶ج) بوده و نشانه‌ی کارپذیری مناسب مصالح به عمل‌آوری شده جهت حفاری با EPB است.

به‌طورکلی در این پژوهش ۶۶ آزمون اسلامپ بر روی مصالح به عمل‌آوری شده با فوم انجام شده است. به عبارت دیگر، ۶۶ مرتبه مطابق شکل ۵ به‌وسیله‌ی دستگاه مولد فوم، فوم‌هایی با FIRهای مختلف تولید و سپس در میکسر با خاک‌هایی با دانه‌بندی مختلف مخلوط و در نهایت بر روی هر یک از آنها آزمایش اسلامپ انجام شده است. تعداد آزمایش‌های انجام‌شده بر روی هر یک از نمونه‌های خاکی در جدول ۲ ارائه شده است، که مطابق آن تعداد آزمایش‌های به عمل‌آوری بر روی نمونه‌های مختلف برابر نبوده است. اگرچه در ابتدا برنامه‌ریزی شده بود که تعداد آنها برابر باشد، ولی به دلیل اینکه نتایج اسلامپ بر روی برخی از خاک‌ها قابل پیش‌بینی بوده است، لذا از انجام آن صرف‌نظر شده است. به‌عنوان مثال، تمام آزمایش‌هایی که با رطوبت ۱۰٪ و نسبت‌های تزریق متفاوت (FIR = ۲۰ - ۷۰) بر روی نمونه‌ی Q-۲۰ (با محتوای ۴٪ ریزدانه) انجام شده است، مقدار افت اسلامپ کمتر از ۲ سانتی‌متر داشته‌اند. بنابراین از انجام آزمایش‌های بیشتر بر روی نمونه‌هایی با محتوای ریزدانه بیشتر از ۴٪ صرف‌نظر شده است. چون مطمئناً فاقد افت اسلامپ خواهند بود. در مقابل سعی شده است بر روی برخی از نمونه‌ها به دلیل حساسیت آنها به نسبت تزریق فوم، آزمایش‌های بیشتری با FIRهای مختلف انجام شود.

نمودار مقایسه‌ی فراوانی (هیستوگرام) آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش در شکل ۷ نشان داده شده است. نمودار هیستوگرام، تصویری از داده‌ها فراهم می‌کند که توسط آن می‌توان ۳ ویژگی را ساده‌تر مشاهده کرد. این ۳ ویژگی شامل: ۱. شکل توزیع (توزیعی که داده‌های به‌دست آمده و یا همان فرایند از آن پیروی می‌کند)، ۲. مکان یا تمایل مرکزی توزیع، ۳. پراکندگی یا گسترش توزیع است. مطابق شکل ۷، شکل توزیع و تمرکز پراکندگی مقادیر FIR بیشتر به سمت مقادیر کمتر است (چولگی به چپ)، ضمناً میانگین پارامتر مذکور در هر دو شرایط حدود ۴۲ است. ضمناً میانگین ذرات ریزدانه در آزمون‌هایی که با رطوبت ۱۰٪ و ۲۰٪ انجام شده‌اند، به ترتیب برابر با ۲۲٪ و ۳۳٪ و شکل توزیع آنها نیز تقریباً یک‌نواخت بوده است.

به منظور بررسی رابطه‌ی بین پارامترهای مختلف، نمودار حبابی بین تغییرات مقدار FIR (در محور عمودی) و تغییرات درصد ذرات ریزدانه‌ی کوچک‌تر از ۷۶٪ (محور افقی) و مقدار اسلامپ (اندازه‌ی حباب‌ها) برای رطوبت ۱۰٪ (شکل ۸الف) و ۲۰٪ (شکل ۸ب) در شکل ۸ ارائه شده است، که مطابق آن، این نتایج قابل ارائه است:

جدول ۲. تعداد آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک‌های مختلف.

شماره‌ی خاک	توصیف خاک	تعداد آزمایش‌ها
Q-۱۲	رس و لای شن‌دار	۲
Q-۲۲	شن رسی و لای دار همراه با ماسه	۳
Q-۱۳	ماسه‌ی شن‌دار	۸
Q-۱۴	ماسه‌ی شن‌دار	۱۷
Q-۱۵	ماسه‌ی شن‌دار همراه با لای و رس	۹
Q-۱۶	ماسه‌ی شن‌دار همراه با لای و رس	۵
Q-۲۰	ماسه‌ی رسی و لای دار	۱۰
Q-۲۵	رس و لای شن‌دار	۲
Q-۲۶	رس و لای شن‌دار	۵
Q-۲۷	رس و لای شن‌دار	۱
Q-۲۴	رس و لای ماسه‌یی	۴

• در یک نسبت تریق فوم ثابت، به طور کلی با افزایش مقدار ریزدانه در خاک، میزان افت اسلامپ به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و حتی رفتار خاک سفت نیز مشاهده شده است و برعکس با کاهش مقدار آن نیز مقدار اسلامپ کاهش یافته است و رفتار خاک به سمت روان شدن تمایل دارد.

• وقتی مقدار ذرات ریزدانه در خاک کمتر از ۳۰٪ و محتوای رطوبت حدود ۲۰٪ (شاخص استحکام بین ۰/۵ تا ۰/۷۵) باشد، مقدار اسلامپ به کمتر از ۲۰ سانتی‌متر نمی‌رسد و خاک شبیه شکل ۶ب همواره رفتار روان‌شدگی از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، خاک‌هایی با محتوای رطوبت ۲۰٪ و ریزدانه‌ی کمتر از ۳۰٪، به هیچ‌وجه به وسیله‌ی فوم کارپذیری مناسبی برای حفاری با ماشین EPB نخواهد داشت، زیرا در چنین شرایطی ایجاد محیط فشار در اتاقک خاک فقط با تریق فوم ممکن خواهد بود. این نتیجه با توصیه‌های مندرج در مرجع DAUB<sup>۸</sup> (انجمن سازه‌های زیرزمینی آلمان) مطابقت دارد.

• برای شرایطی که مقدار رطوبت حدود ۲۰٪ (شاخص استحکام بین ۰/۵ تا ۰/۷۵) و میزان ذرات ریزدانه در خاک بیشتر از ۳۰٪ باشد، می‌توان با دامنه‌ی از FIR (بین ۳۰ تا ۶۰ درصد) به کارپذیری مناسب رسید و اسلامپی حدود ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر (همانند شکل ۶ج) را از خاک به عمل‌آوری شده انتظار داشت.

• در آزمایش‌هایی که محتوای رطوبت حدود ۱۰٪ (شاخص استحکام بین ۱ تا ۱/۲۵) بوده است، وقتی میزان ذرات ریزدانه در خاک به بیشتر از ۳۰٪ افزایش یافته است، حتی با مقدار FIR حدود ۱۰٪ نیز، اسلامپ بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر مشاهده نشده و خاک رفتاری شبیه شکل ۶الف، یعنی رفتار سفت از خود نشان داده است. در چنین شرایطی هم خاک به عمل‌آوری شده با فوم نمی‌تواند کارپذیری مناسبی برای حفاری با ماشین EPB داشته باشد.

• نکته‌ی بسیار مهم دیگر این است که اثر قابل توجه محتوای رطوبت بر روی مقدار افت اسلامپ است. به طوری که با افزایش مقدار رطوبت از ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ تا ۱/۲۵) به ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰/۵ تا ۰/۷۵)، مقدار اسلامپ (برای خاک‌هایی با محتوای ریزدانه بیشتر از ۳۰٪) به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد. به طوری که خاک‌هایی که با رطوبت ۱۰٪ حالت سفت داشتند و مقدار اسلامپ آنها کمتر از ۱۰ سانتی‌متر بوده است، در مقابل مقدار اسلامپ آنها در رطوبت ۲۰٪ به بیش از ۲۰ سانتی‌متر افزایش یافته و خاک رفتار روان‌شدگی از خود نشان داده است.

• بنابراین مطابق شکل مذکور، اختلاف قابل توجهی بین کارپذیری خاک در شاخص‌های استحکام مختلف و رطوبت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد وجود دارد.

#### ۴. توسعه‌ی مدل تجربی توسط تحلیل رگرسیون چندمتغیره

موضوع اصلی این بخش از نوشتار، توسعه‌ی یک مدل تجربی توسط روش رگرسیون چندمتغیره بین متغیر مستقل (مقدار ذرات ریزدانه و FIR) با متغیر وابسته (مقدار افت اسلامپ) است. برای این منظور می‌توان یک معادله‌ی رگرسیون خطی چندگانه مانند معادله‌ی فرضی ۳ نوشت، که مقدار افت اسلامپ را از روی تمام متغیرهای مستقل ذکر شده پیش‌بینی کند:

$$B_3P_3 + B_2P_2 + B_1P_1 + B_0 = \text{مقدار افت اسلامپ} \quad (3)$$

رابطه‌ی ۳، یک معادله‌ی خطی چندگانه است که به جای یک عرض از مبدأ و ضریب زاویه، یک مقدار ثابت (مترادف با عرض از مبدأ) و چندین ضریب ( $B_1$  تا  $B_3$ )

دارد، که هر یک متعلق به یکی از دو متغیر مستقل ( $P_1$  و  $P_2$ ) هستند. این ضرایب به نام ضرایب رگرسیون جزئی نامیده می‌شوند. برای برآورد مقادیر ضرایب می‌توان از روش کمترین مربعات استفاده کرد. یعنی ضرایبی را انتخاب کرد که مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌شده‌ی متغیر وابسته، کمترین مقدار را داشته باشد و در سایر ضرایب، مقدار مربع باقی‌مانده‌ها بزرگ‌تر باشد.

اولین گام به منظور تحلیل رگرسیون چندگانه، انتخاب روش ورود متغیرها به مدل رگرسیونی است. در این زمینه ۴ روش مختلف وجود دارند، که عبارت‌اند از: ۱. روش هم‌زمان متغیرها؛ ۲. روش گام به گام؛ ۳. روش حذف تدریجی (انتخاب رو به عقب)؛ ۴. روش ورود تدریجی (انتخاب رو به جلو). در این نوشتار از روش ورود تدریجی یا انتخاب رو به جلو (در محیط نرم‌افزار SPSS) استفاده شده است.<sup>[۲۴]</sup> به این دلیل که اگرچه در رگرسیون چندگانه، چند متغیر مستقل مدلی را می‌سازند که مقدار متغیر وابسته را پیش‌بینی می‌کند، ولی از آنجا که امکان دارد متغیرهای مستقل مذکور با یکدیگر رابطه داشته باشند، همیشه این نگرانی وجود دارد که آیا مدل به دست‌آمده اعتبار دارد یا خیر. برای نمونه فرض شود که در یک مدل رگرسیون، ۳ متغیر وجود دارند. ممکن است تک‌تک متغیرهای مستقل با متغیر وابسته رابطه‌ی مثبتی داشته باشند، ولی زمانی که این متغیرها با هم وارد مدل رگرسیون می‌شوند، این امکان وجود دارد که به دلیل وجود رابطه بین متغیرهای مستقل، ضریب رگرسیون ۱ یا ۲ متغیر منفی محاسبه شود و یا امکان دارد ضرایب رگرسیون اصلاً معنی‌دار نشوند. اگرچه امکان دارد که این مدل در دنیای واقعی درست باشد، ولی این نگرانی وجود دارد که ممکن است نتیجه برعکس باشد و ناشی از اشتباه در تحلیل آماری رقم خورده باشد. لذا برای حل مشکل ذکر شده و همچنین با توجه به شرایط مسئله، از روش انتخاب رو به جلو 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  $R^2$  ایجاد کند و این تغییر در  $R^2$  باید به حدی باشد که بتوان این فرضیه‌ی صفر را رد کرد که مقدار واقعی تغییر برابر با صفر است (این کار با یک سطح معنی‌داری از قبل مشخص شده انجام می‌شود و مقدار پیش‌فرض آن برابر با ۰/۰۵ یا کمتر است). ورود متغیرها به مدل هنگامی متوقف می‌شود که متغیر دیگری وجود نداشته باشد که افزایش معنی‌داری در مقدار  $R^2$  ایجاد کند. خروجی نرم‌افزار SPSS در این بررسی شامل جدول تحلیل واریانس و نمودار برازش مدل‌های مختلف بر روی نقاط پراکنش است.

#### ۱.۴. تحلیل واریانس (ANOVA)

در این مطالعه، رابطه‌ی بین متغیرهای مستقل (مقادیر ذرات ریزدانه و FIR) و با متغیر وابسته (مقدار اسلامپ) برای محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ تا ۱/۲۵) و ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰/۵ تا ۰/۷۵) به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تحلیل واریانس به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است، که مطابق آن‌ها مقدار Sig. ۱<sup>۰</sup> محاسبه‌شده کمتر از ۰/۰۵ (شرط اثبات معنی‌داری آماری رابطه‌ی میان متغیرهای وابسته و مستقل) است. همچنین مقدار ضریب F برابر با ۱۲۴ و ۸۸ محاسبه شده است، که این مقادیر برای هر دو محتوای رطوبت (۱۰٪ و ۲۰٪) بیشتر از ضریبی است که از جدول استاندارد فیشر (به ترتیب ۴/۲۶ و ۴) به دست می‌آید. به عبارت دیگر، رابطه‌ی معنی‌داری از لحاظ آماری بین متغیرهای مستقل (مقادیر ذرات ریزدانه و FIR) با متغیر وابسته (مقدار اسلامپ) وجود دارد.

جدول ۳. تحلیل واریانس مربوط برآورد افت اسلامپ برای محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ تا ۱٫۲۵).

مدل	جمع مربعات رگرسیون	df	Mean Square	F	Sig.
رگرسیون	۲۷۳۵	۲	۱۳۶۷	۱۲۴	۰٫۰۰۰
باقی مانده	۲۵۳	۲۳	۱۱		
کل	۲۹۸۸	۲۵			

جدول ۴. تحلیل واریانس مربوط برآورد افت اسلامپ برای محتوای رطوبت ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ تا ۰٫۷۵).

مدل	جمع مربعات رگرسیون	df	Mean Square	F	Sig.
رگرسیون	۲۷۶۰	۲	۱۳۸۰	۸۸	۰٫۰۰۰
باقی مانده	۵۷۸	۳۷	۱۵		
کل	۳۳۳۸	۳۹			

جدول ۵. ضرایب رگرسیون در انتخاب رو به جلو برای محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ تا ۱٫۲۵).

مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده		Sig.
	B	Std. E	Beta	T-test	
مقدار ثابت	۲۳٫۸	۱٫۸۵		۱۲	۰٫۰۰۰
درصد ریزدانه	-۰٫۷۵	۰٫۰۵۰	۰٫۹۱۲	-۱۵	۰٫۰۰۰
FIR	۰٫۱۶	۰٫۰۳۱	۰٫۳۰۷	۵	۰٫۰۰۰

<sup>a</sup> Dependent Variable: Slump

جدول ۶. ضرایب رگرسیون در انتخاب رو به جلو برای محتوای رطوبت ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ تا ۰٫۷۵).

مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده		Sig.
	B	Std. E	Beta	T-test	
مقدار ثابت	۲۲٫۰	۱٫۶۴		۱۳	۰٫۰۰۰
درصد ریزدانه	-۰٫۳	۰٫۰۲۶	-۰٫۸۴۰	-۱۲	۰٫۰۰۰
FIR	۰٫۲	۰٫۰۳۳	۰٫۵۰۳	۷	۰٫۰۰۰

<sup>a</sup> Dependent Variable: Slump

است (روابط ۴ و ۵):

$$\text{Slump}(w_{10}) = 23.8 + (-0.75) \text{ fine grain} + (0.16) \text{FIR} \quad (4)$$

$$\text{Slump}(w_{20}) = 22 + (-0.3) \text{ fine grain} + (0.2) \text{FIR} \quad (5)$$

که در آن‌ها، محتوای ذرات ریزدانه با علامت fine grain نشان داده شده است.

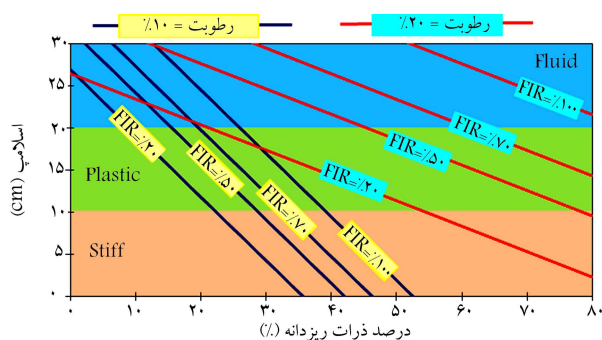
### ۳.۴. برآورد پارامترهای به عمل آوری خاک

در این بخش از نوشتار، براساس نتایج به دست آمده از روابط ۴ و ۵ اقدام به ترسیم نمودار شکل ۹ شده است، که مطابق آن با داشتن مقدار ذرات ریزدانه و FIR می‌توان مقدار افت اسلامپ و یا به عبارت دیگر، کارپذیری خاک را برای محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ - ۱٫۲۵) و ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ - ۰٫۷۵) تخمین زد.

### ۲.۴. تعیین ضرایب رگرسیون چندمتغیره

ضرایب رگرسیون برای آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده در این مطالعه، برای محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ - ۱٫۲۵) و ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ - ۰٫۷۵) به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است، که مطابق آن‌ها برای هر دو ضریب رابطه (ضرایب ثابت و شیب) مقدار sig. کمتر از ۰٫۰۵ است، زیرا سطح معنی‌داری مشاهده شده برای تمام ضرایب کمتر از ۰٫۰۵ است.

همچنین مقدار T-test به دست آمده از جدول ضرایب، بیشتر از مقدار t به دست آمده از جدول‌های استاندارد  $t(45) = 0.70$  است. به عبارت دیگر، ضرایب رابطه جدید از لحاظ آماری معنی‌دار هستند و تأیید می‌شوند. در نهایت به منظور روشن شدن بیشتر موضوع، براساس نتایج مندرج در جدول‌های مذکور ضرایب مدل نهایی برای محتوای رطوبت ۱۰٪ و ۲۰٪ به این شرح اخذ شده



شکل ۹. نمودار رابطه‌ی بین ذرات ریزدانه، FIR و افت اسلامپ برای محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ تا ۰٫۲۵) و ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ تا ۰٫۷۵).

ضمناً همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، اختلاف قابل توجهی بین مقادیر اسلامپ در شاخص‌های استحکام مختلف و رطوبت‌های ۱۰٪ و ۲۰٪ وجود دارد. لازم به توضیح است که براساس این نمودار می‌توان دامنه‌ی مناسب برای مقادیر FIR را برای شاخص‌های استحکام مختلف و محتوای رطوبت ۱۰٪ و ۲۰٪ به دست آورد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر محتوای رطوبت و مقدار FIR بر روی کارپذیری خاک، تعداد ۶۶ آزمایش اختلاط فوم با خاک و آزمون اسلامپ در آزمایشگاه انجام شده است. این آزمایش‌ها بر روی خاک‌هایی با مقدار ریزدانه‌ی مختلف و محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ - ۰٫۲۵) و ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ - ۰٫۷۵) انجام شده است. همچنین در این آزمون‌ها نسبت بین حجم فوم و خاک نیز متفاوت بوده است. به عبارت دیگر، آزمایش اسلامپ با مقادیر FIR مختلف انجام شده است.

نتایج به دست آمده در این نوشتار نشان می‌دهد که در یک نسبت تزریق فوم ثابت، به طور کلی با افزایش مقدار ریزدانه در خاک، میزان افت اسلامپ به طور قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد. ولی کاهش اسلامپ در محتوای رطوبت ۱۰٪ چشم‌گیرتر از محتوای رطوبت ۲۰٪ بوده است. خاک‌هایی با محتوای رطوبت ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ - ۰٫۷۵) و ریزدانه‌ی کمتر از ۳۰٪، به وسیله‌ی فوم به هیچ وجه کارپذیری مناسب برای حفاری با ماشین EPB را نخواهد داشت، زیرا در چنین شرایطی ایجاد محیط پلاستیک در اتاقک خاک فقط با تزریق فوم ممکن نخواهد بود. برای شرایطی که میزان ذرات ریزدانه در خاک بیشتر از ۳۰٪ باشد، می‌توان

با دامنه‌ی FIR (بین ۳۰ تا ۷۰ درصد) به کارپذیری مناسب دست یافت. در آزمایش‌هایی که محتوای رطوبت حدود ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ - ۰٫۲۵) بوده است، وقتی میزان ذرات ریزدانه در خاک به بیشتر از ۳۰٪ افزایش یافته است، حتی با مقادیر FIR حدود ۱۰٪ نیز اسلامپ کمتر از ۱۰ سانتی‌متر حاصل نمی‌شود و خاک رفتار سفت از خود نشان می‌دهد. در چنین شرایطی فوم نمی‌تواند کارپذیری مناسب برای حفاری با ماشین EPB را داشته باشد و نیاز به افزایش درصد رطوبت (یا کاهش مقدار شاخص استحکام) است. به عبارت دیگر، در چنین شرایطی می‌توان با تزریق آب از طریق نازل‌های نصب شده بر روی کله‌ی حفار ماشین، سبب افزایش محتوای رطوبت خاک موجود در اتاقک فشار شد و بالطبع مقدار اسلامپ افزایش و کارپذیری خاک نیز برای حفاری با ماشین EPB مساعد خواهد شد.

ضمناً مشخص شده است که اختلاف قابل توجهی بین مقادیر اسلامپ در رطوبت‌های ۱۰٪ و ۲۰٪ یا به عبارت دیگر، در شاخص‌های استحکام مختلف وجود دارد. به طوری که در بسیاری موارد با کاهش شاخص استحکام یا افزایش محتوای رطوبت از ۱۰٪ به ۲۰٪، مقادیر اسلامپ به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد. به طوری که برخی از خاک‌هایی که با رطوبت ۱۰٪ حالت سفت داشته و مقدار اسلامپ آنها کمتر از ۱۰ سانتی‌متر بوده است، در مقابل مقدار اسلامپ آنها در رطوبت ۲۰٪ به بیش از ۲۰ سانتی‌متر افزایش یافته و خاک رفتار روان‌شدگی از خود نشان داده است.

همان‌طور که اشاره شده است، در این نوشتار جهت ساخت مدل تجربی از روش‌ها و آزمون‌های آماری استفاده و مشخص شده است که از نظر آماری، رابطه‌ی معنی‌داری بین متغیر مستقل (مقدار ذرات ریزدانه و FIR) با متغیر وابسته (مقدار افت اسلامپ) وجود دارد، که توسط روش رگرسیون چندمتغیره، دو رابطه‌ی آماری برای هر یک از رده‌های شاخص‌های استحکام نیز توسعه یافته است، که در شاخص‌های استحکام مختلف متفاوت هستند. در نهایت با استفاده از روابط مذکور، یک نمودار برای تخمین مقدار اسلامپ با استفاده از مقدار ذرات ریزدانه و FIR ارائه شده است (شکل ۹). لازم به توضیح است که براساس شکل مذکور می‌توان دامنه‌ی مناسب برای مقادیر FIR را برای محتوای رطوبت ۱۰٪ (شاخص استحکام ۱ - ۰٫۲۵) و ۲۰٪ (شاخص استحکام ۰٫۵ - ۰٫۷۵) به دست آورد.

## تقدیر و تشکر

از آنجایی که برای انجام این پژوهش از آزمایشگاه کارگاه خط ۷ مترو استفاده شده است، لذا از حمایت‌های مهندسان مشاور ساحل و مؤسسه‌ی حرا تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان برخود لازم می‌دانند تا از کمک‌های علمی و حمایت‌های معنوی جناب آقایان مهندس محسن کریمی، مهندس غلامرضا شمسی، مهندس محمد فروری، و مهندس سعید میرمحرابی سپاسگزاری کنند.

## پانویس‌ها

1. earth pressure balance-tunnel boring machine
2. foam injection ratio
3. concentration foam

4. foam expansion ratio
5. consistency index
6. liquid limit
7. plasticity index
8. deutscher ausschuss für unterirdisches bauen



9. R square
10. significance

### منابع (References)

1. Thewes, M., Budach, C. and Galli, M. "Laboratory tests with various conditioned soils for tunnelling with earth pressure balance shield machines", *Tunnel 6, 4th BASF TBM Conference in London/GB – Laboratory Tests with Conditioned Soils for EPB Tunnelling* (2010).
2. Tarigh Azali, S. and Moammeri, H. "EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan Metro Line 1", *ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC)*, Bangkok, Thailand (2012).
3. Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. and Hassanpour, J. "Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East-West lot of line 7, Tehran Metro, Iran", *Engineering Geology*, **166**(8), pp. 170-185 (2013).
4. Bakhshandeh Amnieh, H., Zamzam, M.S., Moosavi, S.E. and Tarigh Azali, S. "Selection of the most appropriate soil conditioning set in mechanized boring of tehran subway line 7 tunnel", *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, **2**, pp. 145-154 (2014).
5. Peron, J.Y. and Marcheselli, P. "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*, London, United Kingdom, pp. 679-707 (2013).
6. Quebaud, S., Sibai, M. and Henry, J.P. "Use of chemical foam for improvements in drilling by earth pressure balanced shields in granular soils", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **13**(2), pp. 173-180 (1998).
7. Jancsecz, S., Krause, R. and Langmaack, L. "Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: Experiences of LRTS Izmir", *ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC)*, Oslo, Norway (1999).
8. Williamson, G.E., Traylor, M.T. and Higuchi, M. "Soil conditioning for EPB shield tunneling on the south bay ocean outfall", *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, Littleton (1999).
9. Leinala, T., Grabinsky, M., Delmar, R. and Collins, J.R. "Effects of foam soil conditioning on EPBM performance", *North American Tunneling (NAT)*, Seattle (2000).
10. Peña, M. "Soil conditioning for sands", *Tunnels Tunnelling International*, **7**, pp. 40-42 (2003).
11. Hanamura, T., Kurose, J., Aono, Y. and Okubo, H. "Integral studies on mechanized functions of mudding agents and the properties of muddified soils in the EPB shield tunneling technology", *ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC)*, Prague (2007).
12. Vinai, R., Oggeri, C. and Peila, D. "Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**(3), pp. 308-317 (2008).
13. Peila, D., Oggeri, C. and Borio, L. "Using the slump test to assess the behaviour of conditioned soil for EPB tunnelling", *Environmental & Engineering Geoscience*, **15**(3), pp. 167-174 (2009).
14. Zumsteg, R. and Puzrin, A.M. "Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **31**, pp. 86-96 (2012).
15. Peila, D., Picchio, A. and Chierigato, A. "Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **35**(12), pp. 55-66 (2013).
16. Thewes, M. and Budach, C. "Soil conditioning with foam during EPB tunnelling", *Geomechanics and Tunnelling*, **3**(3), pp. 256-267 (2010).
17. Psomas, S. "Properties of foam/sand mixtures for tunneling applications", PhD Thesis, University of Oxford (2001).
18. Peila, D., Oggeri, C. and Borio, L. "Influence of granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBS applications", In: *Underground Facilities for Better Environment and Safety. ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC)*, Delhi, **2**, pp. 881-891 (2008).
19. Borghi, F.X. "Soil conditioning for pipe jacking and tunnelling", PhD Dissertation, Cambridge University, UK (2006).
20. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen*, DAUB (Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen) (2010). Available online at: [www.daubita.de/uploads/media/gtcrec14.pdf](http://www.daubita.de/uploads/media/gtcrec14.pdf)
21. *Specification and Guidelines for the Use of Specialist Products in Mechanized Tunneling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock*, EFNARC, Association House, U.K. (2005).
22. ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (2003).
23. Peila, D., Oggeri, C. and Vinai, R. "Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soils for EPB tunneling operations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(2), pp. 1622-1625 (2007).
24. SPSS Software, *Statistical Package*, version 11.5, SPSS Inc., Chicago, IL, USA, (2002) <http://www.spss.com>.