



ارزیابی مقاومت فشاری ستون‌های میکروجت گروتینگ به‌وسیله مدل فیزیکی

سهیل شریفی^۱، محسن صابرمهانی^{۲*}، سیدرسول سورانی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
^۲ دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۰۲
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۶-۰۴
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۳۱

کلمات کلیدی:

بهسازی خاک
جت گروتینگ
مدل فیزیکی
مقاومت فشاری
آزمایش تک محوری
خاک سیمان
عملیات مغزه گیری

خلاصه: روش جت گروتینگ به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های بهسازی خاک در بین سایر روش‌ها جایگاه ویژه‌ای یافته و در بیشتر مسائل ژئوتکنیکی همچون افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست، ایجاد پرده‌ی آب‌بند و پایدارسازی شیروانی‌ها کاربرد دارد. از جمله چالش‌های پیشروی طراحان جت گروتینگ یافتن مقدار مقاومت و هندسه ستون‌های ساخته‌شده با استفاده از این روش می‌باشد. از جمله مؤلفه‌های مؤثر در مقاومت ستون‌های جت گروتینگ می‌توان به نوع و پارامترهای تزریق، مشخصات خاک (همچون دانه‌بندی)، میزان سیمان درون نمونه، میزان نسبت آب به سیمان دوغاب، نوع سیمان، نحوه نمونه‌گیری (مغزه گیری یا نمونه گیری تر) اشاره نمود. در این مقاله پس از ساخت ستون‌های کوچک مقیاس جت گروتینگ (ستون‌های میکروجت گروتینگ) در آزمایشگاه و مغزه گیری از آنها به بررسی عوامل مختلفی نظیر تاثیر سرعت اجرا، موقعیت و جهت مغزه گیری و همچنین تأثیر عملیات مغزه گیری بر مقاومت فشاری تک‌محوری پرداخته می‌شود. همچنین از آزمایش بار نقطه‌ای جهت بررسی بیشتر پارامترهای مقاومتی ستون‌های میکروجت گروتینگ استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقاومت فشاری ستون‌های میکروجت گروتینگ مقادیر بالایی (تا حدود ۵۹ مگا پاسکال) بدست آمده و این مقادیر بر اساس آزمایش بار نقطه‌ای مورد تأیید قرار گرفته‌اند. همچنین مشاهده گردید که با افزایش سرعت ساخت ستون‌های میکروجت گروتینگ، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج مقاومت فشاری، مغزه گیری باعث کاهش ۶۰ درصدی مقاومت می‌گردد. همچنین مغزه‌های گرفته‌شده در راستای افقی در حدود ۳۳ درصد مقاومت فشاری تک محوری کمتری از مغزه قائم نشان داده اند و مغزه‌های اخذ شده از بالای ستون‌ها دارای مقاومت بیشتری بوده اند.

۱- مقدمه

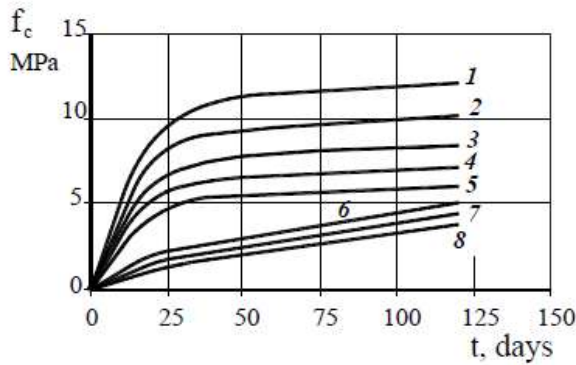
تزریق با فشار بالا^۱ روشی برای بهسازی و اصلاح خاک است که در آن آب یا دوغاب با فشار بسیار بالا و سرعت زیاد از نازل‌هایی به داخل خاک تزریق شده و باعث تخریب ساختار خاک شده و سبب ایجاد ترکیب خاک - سیمان می‌گردد. در تمامی روش‌های بهسازی خاک، جت گروتینگ را باید به‌عنوان تطبیق‌پذیرترین روش

در نظر گرفت [۱]. این روش می‌تواند مؤلفه‌های مکانیکی و فیزیکی محدوددهی وسیعی از خاک‌های چسبنده و دانه‌ای را بهبود بخشد. همچنین در جهت‌های مختلف افقی، مایل و قائم اجرا شود و اشکال مختلفی همچون پرده آب‌بند، ستون و بلوک‌های صلب و باربر ایجاد نماید و در موقعیت‌های دارای محدودیت همچون مجاورت ساختمان‌ها ساخته شود. این روش دارای تجهیزات بعضاً سبک و کم حجمی بوده [۲] و به نسبت میزان اثربخشی و بهبود پارامترهای خاک هزینه تمام شده کمتری نسبت به سایر روش‌های تزریق دارد [۳]. در واقع جت گروتینگ می‌تواند یک زمین بهسازی شده (خاک

1 Jet grouting

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: msabermahani@iust.ac.ir





شکل ۱. وابستگی مقاومت خاک تزریق شده با دوغاب به نوع خاک، مقدار سیمان و زمان گیرش. مقدار سیمان: ۱ تا ۵: $۳۰۰ \text{ kg/m}^۳$ ، ۶ و ۷: $۳۹۰ \text{ kg/m}^۳$ ، ۸: $۵۳۰ \text{ kg/m}^۳$. نوع خاک: ۱- ماسه شن دار، ۲- ماسه، ۳- ماسه سیلتی، ۴- سیلت ماسه‌ای، ۵- سیلت، ۶- سیلت رسی، ۷- رس سیلتی، ۸- رس [۶]

Fig. 1. Estimation of soil settlement around the excavation site based on Peck studies

در حالی که در ماسه این مقدار $۳۰۰ \text{ kg/m}^۳$ می باشد و با وجود دو برابر بودن حدودی مقدار سیمان در رس نسبت به ماسه، مقاومت فشاری ستون در رس از نصف این مقدار در ماسه کمتر است.

میزان سیمان در خاک بهسازی شده تأثیر زیادی در مقاومت آن دارد. این مسئله اثر مستقیمی بر هزینه‌ها دارد و برای بهینه‌سازی پروژه و برقراری تعادل بین هزینه و میزان مقاومت باید در نظر گرفته شود [۷]. گالاورسی^۲ نموداری برای بدست آوردن مقاومت بدنه ستون جت گروتینگ بر اساس میزان سیمان موجود درون خاک بهسازی شده ارائه داد. همچنین رابطه‌ی ۱ را برای بدست آوردن مقاومت فشاری محدود نشده (در ۲۸ روز) ارائه داد [۸].

$$q_u = \frac{q_c}{(w/c)^n} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، q_c و n مقادیر ثابتی هستند که به صورت تجربی بدست می‌آیند. گالاورسی مقدار n را برابر ۲ و q_c را در حدود ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برای خاک دانه‌ای ریز و چسبنده پیشنهاد نمود. (w/c) نسبت کل آب به سیمان می‌باشد.

کریش^۳ و ساندرمان^۴ بیان داشتند که وقتی سیمان در تزریق جت گروتینگ استفاده شود و میزان سیمان داخل بدنه‌ی آن در حدود

سیمان) با مقاومت بالا ایجاد کند. این روش، از جمله روش‌های بسیار پیچیده بهسازی خاک هم در طراحی و هم در ساخت می‌باشد. زیرا اشتباه در انتخاب و طراحی هر یک از پارامترها، باعث خرابی در ساخت می‌گردد [۱]. جهت فهم بهتر رفتار ستونهای جت گروتینگ، بهترین راه انجام آزمایشهای میدانی است، ولیکن به دلیل هزینه‌های زیاد انجام این گونه آزمایش‌ها، بهره‌گیری از مطالعات آزمایشگاهی با ساخت مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس بسیار مفید و توجیه پذیر است.

مدل‌سازی فیزیکی، ابزاری بسیار مهم و کارآمد در مهندسی ژئوتکنیک است، که بسته به شرایط ژئوتکنیکی پدیده مورد پژوهش، در صورتیکه به درستی انجام پذیرد، می‌تواند به افزایش اطمینان جهت توسعه یک مدل تئوری بیانجامد [۴]. جایی که بی‌اعتمادی نسبت به تئوری یا تجزیه و تحلیل به دلایل مفروضات بیش از حد یا پاسخ بسیار پیچیده مواد و یا دور از ذهن بودن حقایق وجود دارد و راه‌حل‌های عددی قابل اعتماد نیستند، مدل‌سازی فیزیکی یک راه مناسب به نظر می‌رسد. بسیاری از مدل‌های فیزیکی در مقیاسی بسیار کوچک‌تر از نمونه اولیه ساخته می‌شوند چراکه به دست آوردن اطلاعات در مورد الگوهای مورد انتظار پاسخ، سریع‌تر و با کنترل دقیق‌تر بر روی جزئیات مدل نسبت به انجام آزمایش در مقیاس واقعی خواهد بود [۴]. از این‌رو دستگاهی با قابلیت انجام عملیات جت گروتینگ در مقیاس آزمایشگاهی در دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته شد [۵].

طبق نظر اسلیزیت^۱ و همکاران، و بر مبنای پژوهش‌های قبلی محققان به‌طور کلی مقاومت فشاری خاک-سیمان به چهار عامل اساسی بستگی دارد [۶]:

- نوع خاک
- مقدار سیمان
- نسبت آب به سیمان
- زمان گیرش

شکل ۱ وابستگی مقاومت مصالح خاک-سیمان را به نوع خاک نشان می‌دهد. مطابق این شکل ماسه شن دار و ماسه دارای بیشترین مقاومت و رس سیلتی و رس کمترین مقاومت را دارند. نکته‌ی جالب‌توجه این است که مقدار سیمان در رس $۵۳۰ \text{ kg/m}^۳$ بوده

2 Gallavresi
3 Kirsch
4 Sondermann

1 Slizyte

جدول ۱. روابط تجربی بین مقاومت فشاری و کششی نمونه های خاک سیمان [۱۰]
Table 1. A summary of the results of Wang et. al. studies

رابطه	خاک ماسه‌ای تزریق شده	خاک رسی تزریق شده
مقاومت کششی (f_t) و مقاومت فشاری (f_c)	$f_t = 0.3(f_c)^{2/5}$	$f_t = 0.4(f_c)^{2/10}$
مدول الاستیسیته (E_{cm}) و مقاومت فشاری (f_c)	$E_{cm} = 800(f_c)^{1/2}$	$E_{cm} = 500(f_c)^{1/3}$
مقاومت فشاری (f_c) و نسبت آب به سیمان (wcr)	$f_c = 7 + 8.1(wcr)^2$	$f_c = 2 + 3.6(wcr)^2$

جدول ۲. محدودهی مقاومت فشاری محصور نشدهی خاک-سیمان برای انواع خاکها طبق تحقیقات مختلف [۱۱-۱۴]
Table 2. Different physical parameters in reality and centrifuge model

مقاومت فشاری محصور نشدهی خاک-سیمان (MPa)									نوع خاک
آکین (۲۰۱۶)	نیکبختان و اوسانلو (۲۰۰۹)	اکمن (۲۰۰۴)	شيبازاکی (۲۰۰۳)	استول و ری (۲۰۰۰)	ملگاری و گراسینو (۱۹۹۷)	فنگ و دیگران (۱۹۹۴)	بل (۱۹۹۳)	میکی (۱۹۸۵)	
-	۱/۲۵-۴	۱-۵	۱۰	۳-۱۴	۱/۸-۳	۲-۱۰	۰/۵-۸	<۵	رس
۶/۵-۳۴	-	-	-	-	۳-۴/۵	-	۴-۱۸	-	سیلت
۱۱-۳۸	-	۵-۲۳	۳۰	۳-۳۳	۶-۹	۵-۲۱	۵-۲۵	۵-۱۰	ماسه
-	-	-	-	-	۱۰	-	۵-۳۰	-	شن

نیکبختان و اوسانلو^۱، تأثیر فشار و دبی دوغاب را بر روی پارامترهای مکانیکی و فیزیکی ستون های جت گروتینگ به وسیله ساخت ستون های جت گروتینگ در محل و اندازه گیری آنها مطالعه نمودند. برای انجام این پژوهش، ۶ نمونه ستون جت گروتینگ با فشار تزریق و دبی متفاوت در محل سایت سد شهریار ساخته شد. از ستون های ساخته شده نمونه ی مکعبی و نمونه های استوانه ای در ترازهای مختلف تهیه شد. سپس بر روی نمونه های تهیه شده آزمایش تک محوری فشاری، آزمایش فشاری سه محوری، برش مستقیم، کشش غیرمستقیم برزلی و آزمایش چکش اشमित انجام گرفت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مطالعات عددی مشخص شد، با افزایش فشار و دبی تزریق مقاومت فشاری تک محوری به طور لگاریتمی افزایش می یابد. همچنین عملیات جت گروتینگ باعث افزایش قابل ملاحظه ی پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است [۱۲]. بنابراین علاوه بر چهار موردی که در پژوهش اسلیزیت از آنها نام برده شد دو عامل فشار و دبی دوغاب نیز بر مقاومت ستون ها اثرگذار است.

۱۵۰ تا 400 kg/m^3 باشد، مقادیر زیر می تواند برای مقاومت فشاری محدود نشده خاک در نظر گرفته شوند [۹]:

در ماسه و شن:

$$q_u = 1.0 \text{ to } 15.0 \text{ MPa} \quad (2)$$

در سیلت و رس:

$$q_u = 0.5 \text{ to } 3.0 \text{ MPa} \quad (3)$$

استول^۱، برخی روابط تجربی بین مقاومت کششی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک سیمان را بر اساس نتایج آزمایش های صورت گرفته، ارائه داد [۱۰]. این روابط هم برای خاک های ماسه ای و هم برای خاک های رسی، در جدول ۱ نشان داده شده است.

مقاومت فشاری محصور نشده بر اساس آزمایش تک محوری تعیین می شود. در این آزمایش مدول الاستیسیته نیز قابل محاسبه است. مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) به نوع خاک بستگی زیادی دارد. در جدول ۲ مقادیر مختلف این پارامتر بر اساس پژوهش های مختلف و انواع خاک ها آورده شده است.

هدف از این تحقیق، بررسی اثر برخی متغیرها مانند سرعت اجرا، تغییر ارتفاع و راستای مغزه گیری بر روی مقاومت فشاری نمونه ها و همچنین بررسی وابستگی پارامترها و ارتباط بین خواص فیزیکی و مکانیکی ستون های خاک-سیمان ساخته شده با دستگاه میکرو جت گروتینگ است. بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده انجام شده بر روی داده های این پژوهش و داده های ارائه شده توسط سایر پژوهشگران، روابطی برای ماسه و سیلت بدست آمده است.

۲- مدل فیزیکی

۲-۱- تجهیزات لازم جهت ساخت مدل فیزیکی

برای ساخت ستون های جت گروتینگ در مقیاس آزمایشگاهی، از دستگاه میکرو جت گروتینگ ساخته شده در دانشگاه علم و صنعت ایران، یک همزن، پمپ دوغاب و همچنین محفظه فولادی به ابعاد $100 \times 120 \times 80$ سانتی متر استفاده شده است. تصویر دستگاه در حالت استقرار بر روی محفظه فولادی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۳- مصالح خاکی

مصالح خاکی به کاررفته در این پژوهش، ماسه سیلیسی ۱۶۱ فیروزکوه^۴ می باشد، که دارای دانه بندی نسبتاً یکنواخت و رنگ طلایی می باشد و از نظر فیزیکی به ماسه توریورا و سنگنیاما شباهت دارد. درصد ریزدانه این ماسه در حدود یک درصد می باشد [۱۷]. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه در جدول ۲ و منحنی دانه بندی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۳- دوغاب

برای ساخت دوغاب سیمان از آب شرب و همچنین از سیمان پرتلند تیپ ۲ با شماره استاندارد ملی 389ISIRI استفاده شد. در تمامی ستون های میکرو جت گروتینگ نسبت وزنی آب به سیمان (W/C) برابر ۱ بوده و بر اساس آزمایش وزن مخصوص، در این نسبت، وزن مخصوص دوغاب ۱/۴۹ گرم بر میلی لیتر بدست آمده است.

۲-۴- نحوه ساخت ستون ها

توده خاک خشک با تراکم نسبی ۲۷-۳۳ درصد به روش بارش

آکین^۱، مطالعاتی برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی ستون های جت گروتینگ در دو محل مختلف با خاک ماسه ای و سیلتی و با استفاده از آزمایش های آزمایشگاهی بر روی مغزه های بدست آمده، انجام داد. در این مطالعه، از آزمایش تراسونیک جهت بدست آوردن سرعت موج فشاری استفاده شده است. بر روی مغزه های گرفته شده، آزمایش فشاری محدود نشده انجام شده است و مقاومت حاصله (q_u)، در دو نوع خاک ماسه ای و سیلتی ارائه شده است. همچنین در این مطالعه به منظور بررسی وابستگی پارامترهای مختلف، روابط آماری بین خواص فیزیکی و مکانیکی خاک-سیمان از جمله وزن مخصوص-مقاومت فشاری، تخلخل-مقاومت فشاری ارائه شده است [۱۳]. بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده انجام شده بر روی داده های این پژوهش و داده های ارائه شده توسط سایر پژوهشگران [۱۴]، روابطی برای ماسه و سیلت بدست آمد.

نیکیختان و همکاران بر روی نتایج آزمایش های آزمایشگاهی بدست آمده از تعدادی ستون جت گروتینگ، تحقیقاتی را انجام دادند. پارامترهای مورد تغییر در این پژوهش شامل سرعت بالا آمدن راد حفاری، سرعت چرخش راد، نسبت آب به سیمان، فشار دوغاب، دبی جریان، فشار و دبی هوا و فشار و دبی آب بودند [۱۵].

ارکان^۲ و تان^۳، با ساخت سه نوع ستون، تأثیر فشار تزریق، نسبت آب به سیمان، سرعت بالا آمدن و دوران راد (نازل ها) را بر روی عملکرد ستون های جت گروتینگ بررسی نمودند. ارکان و تان بر اساس نتایج حاصله اظهار داشتند که با افزایش سرعت بالا آمدن راد، مقاومت فشاری محدود نشده، به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و قطر ستون اندکی کاهش می یابد [۱۶].

مروری بر ادبیات فنی نشان می دهد که مطالعات انجام شده جهت بررسی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ستون های جت گروتینگ، یا به صورت عددی و یا بر روی نمونه های ساخته شده به صورت دستی با مخلوط کردن خاک و سیمان و یا با مغزه گیری از ستون های جت گروتینگ بزرگ مقیاس بوده است. همچنین، تحقیقات، بر روی ستون های ساخته شده با استفاده از دستگاهی که قادر به ساخت ستون های جت گروتینگ در مقیاس آزمایشگاهی باشد، بسیار محدود بوده است.

1 Akin
2 Erkan
3 Tan



شکل ۲. دستگاه میکرو جت گروتینگ به همراه محفظه فولادی و سیستم انتقالی آن [۵]

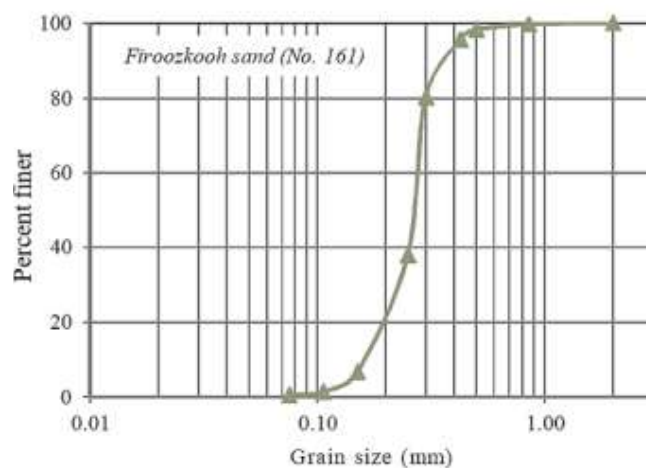
Fig. 2. Type of diaphragm wall displacement and surface settlement behind the wall

جدول ۳. مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Table 3. Physical characteristics of 161 Firoozkooch sand

ϕ	e_{max}	e_{min}	C_u	C_c	G_s
۳۲	۰/۹۴۳	۰/۶۰۴	۲/۵۸	۰/۹۷	۲/۶۵

حفار دستگاه بر روی نقطه موردنظر، حفاری تا عمق ۵۵ سانتی متری به صورت دورانی انجام شد و سپس تزریق به روش جت گروتینگ از طریق نازلی به قطر ۱/۵ میلی متر تحت فشار ۶ بار در حین دوران و بالا آمدن سرمه حفاری صورت گرفت. برای ساخت ستون های جت گروتینگ در مقیاس آزمایشگاهی از سرعت های مختلف بالا آمدن میله حفاری در حین تزریق استفاده گردید. بدین ترتیب که سرعت ساخت ستون ها در بازه ۱/۵ تا ۳/۹ میلی متر بر ثانیه تنظیم گردید. به همین شکل تمامی ستون های میکرو جت گروتینگ در محفظه فولادی ساخته شدند. پس از حدود ۱۲ ساعت ستون های ساخته شده از درون محفظه خارج شده و جهت عمل آوری درون جعبه هایی در



شکل ۳. منحنی دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Fig. 3. Different modules in soil stress-strain curve

خشک، جهت اجرای عملیات جت گروتینگ، در محفظه فولادی احداث شد که در این درصد تراکم، وزن مخصوص خاک بین ۱۵/۷۴ - ۱۵/۶۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب بدست آمد. پس از تنظیم میله

آزمایش‌های مقاومتی از درون جعبه خارج شدند. از آن جهت که فرایند جت گروتینگ، کمتر باعث ایجاد ستون‌های استوانه‌ای با سطح هموار، متقارن و یکدست می‌شود و سطح مقطع در ترازهای مختلف با توجه به نوع تزریق و پارامترهای خاک یکسان نیست، از مغزه گیری، جهت بدست آوردن نمونه‌هایی استوانه‌ای با ابعاد مشخص و مطابق استاندارد، استفاده شد. جهت انجام مغزه گیری، ابتدا ستون های میکرو جت گروتینگ در موقعیتی ثابت و بی حرکت قرار گرفتند. بدین منظور، پس از به دونیم تبدیل کردن ستون‌ها از نیمه ارتفاع، نیم ستون‌ها در یک جعبه قرار داده شده و پیرامون آنها با ملات ماسه سیمان پر شد. با این کار در حین مغزه گیری، ستون ثابت مانده و احتمال آسیب رسیدن به آن کاهش می‌یابد. انجام عملیات مغزه گیری در شکل ۵-الف و مغزه‌های خارج شده در شکل ۵-ب نشان داده شده است.

پس از انجام مغزه گیری مغزه‌های حاصله جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری آماده گردیدند. بدین منظور ابتدا ابعاد نمونه‌ها، به نسبت طول به قطر ۲ تبدیل و سپس ابتدا و انتهای



شکل ۴. ستون‌های قرار داده شده در جعبه برای انجام عمل‌آوری
Fig. 4. Centrifuge of Iran University of Science and Technology

زیرخاک مدفون گردیدند. به این شکل، شرایط، مشابه با ستون‌هایی که در مقیاس واقعی اجرا می‌شوند، فراهم شد. شکل ۴ نشان‌دهنده ستون‌های قرار داده شده در جعبه جهت انجام عمل‌آوری می‌باشد.

۵-۲- مغزه گیری

پس از گذشت ۲۸ روز، ستون‌ها جهت آماده‌سازی برای انجام



(الف)



(ب)

شکل ۵. مغزه گیری (الف) عملیات مغزه گیری از نمونه‌های میکرو جت گروتینگ (ب) مغزه‌های حاصله
Fig. 5. Schematic of the box test in the centrifuge



(ب)



(الف)

شکل ۶: کلاهک‌گذاری (الف) نمونه مغزه گیری شده به همراه گرمخانه (ب) نمونه میکرو جت گروتینگ در حال کلاهک گذاری
Fig. 6. Plates used as overhead and nails in the centrifuge sample

(مغزه ی جانبی) گرفته شد که با قرار دادن اندیس L در انتهای نام نمونه مشخص شدند. هدف از این عمل بررسی اثر مغزه گیری قائم و جانبی بر روی مقاومت فشاری بوده است. در شکل ۷ تقسیم‌بندی قسمت‌های مختلف یک ستون جت گروتینگ نمایش داده شده است. آزمایش فشاری که بر روی قسمت بالایی مغزه صورت گرفت با قرار دادن اندیس (t) و آزمایش فشاری که بر روی قسمت پایینی با قرار

نمونه‌ها، به وسیله دستگاه برش سنگ برش خورده و مسطح شد.

۲-۶- کلاهک گذاری

جهت گونیا و مسطح نمودن سطوح فوقانی و تحتانی مغزه ها نسبت به محور طولی آن، از ملات ماسه گوگرد استفاده گردید. شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی انجام عملیات کلاهک گذاری بر روی دو سر یک مغزه و قسمتی از یک ستون می‌باشد.

۳- مطالعه آزمایشگاهی

بر روی ۱۴ عدد مغزه که مربوط به ۱۲ ستون مختلف میکرو جت گروتینگ بودند، آزمایش فشاری تک‌محوری انجام گرفت (البته بر روی تعداد بیشتری از مغزه‌ها این آزمایش انجام گرفت ولی به دلیل شکست موضعی نتایج این داده‌ها کنار گذاشته شد). همچنین قسمت پایینی دو ستون، بدون مغزه گیری و با رعایت نسبت طول به قطر ۲ مستقیماً زیر جک فشاری قرار داده شد. هدف از این کار بررسی اثر مغزه گیری بر روی مقاومت فشاری بوده است (این دو نمونه با اندیس I در انتهای نامشان مشخص شده‌اند). بنابراین با اضافه نمودن این دو مورد مجموعاً تعداد ۱۶ آزمایش فشاری انجام گرفت. از تعداد ۱۶ مورد آزمایش فشاری، ۱۴ مورد به‌وسیله دستگاه تنش کنترل و ۲ مورد به‌وسیله جک بتن شکن صورت گرفت (سرعت بارگذاری جک بتن شکن و جک تنش کنترل متفاوت بود که در جدول ۴ ارائه شده است). از ۱۶ آزمایش فشاری، سه مورد نمونه در راستای محور عرضی



شکل ۷: تقسیم‌بندی قسمت‌های مختلف ستون
Fig. 7. Model 1 in the centrifuge after reaching the failure acceleration of 80 g

جدول ۴. مشخصات و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های فشاری تک محوری
Table 4. Yield stress of steel and brass nails

کرنش گسیختگی (درصد)	تغییر شکل (mm)	σ_{\square} (MPa)	حداکثر مقاومت (ton)	سرعت بارگذاری (kgf/s)	v (mm/s)	قطر (cm)	ارتفاع (cm)	نام مغزه	ردیف
۰/۹۹	۱/۲۵	۴۸/۳۸	۱۳/۹	۱۰۰	۱/۵	۶/۰۵	۱۲/۶	J-۱	۱
۰/۶۸	۰/۵۸	۳۳/۵۹	۱۰/۸	۱۰۰	۲	۶/۴	۸/۵	J-۲-t	۲
۰/۴۱	۰/۴۹	۲۳/۷۱	۶/۷	۱۰۰	۲	۶	۱۲	J-۲-d	۳
۰/۶۷	۰/۷۹	۱۵/۵۷	۴/۴	۱۰۰	۲	۶	۱۲	J-۳-L	۴
۱/۴۰	۱/۸۳	۱۹/۵۹	۶/۲	۱۰۰	۲	۶/۳۵	۱۲/۴	J-۴-L	۵
۰/۵۲	۱/۱۹	۵۹/۹۰	۵۶/۹	۱۰۰	۲	۱۱	۲۳	J-۵-t	۶
-	-	۲۱/۹۴	۶/۲	۴۴۰*	۲	۶	۱۲	J-۵-t	۷
۰/۶۳	۰/۷۶	۲۶/۸۹	۷/۶	۱۰۰	۲	۶	۱۲	J-۶	۸
-	-	۱۵/۲۲	۴/۳	۴۴۰*	۳/۹	۶	۱۲	J-۷-t	۹
۰/۵۳	۰/۹۸	۴۹/۵۲	۳۲/۹	۱۰۰	۳/۹	۹/۲	۱۸/۵	J-۷-t	۱۰
۰/۶۰	۰/۷۷	۱۷/۳۳	۵/۴	۱۰۰	۳/۹	۶/۳	۱۲/۸	J-۸	۱۱
۰/۵۷	۰/۶۸	۱۸/۴۰	۵/۲	۱۰۰	۳/۹	۶	۱۲	J-۹	۱۲
۰/۵۹	۰/۷۵	۵۶/۸۷	۱۸	۱۰۰	۱/۵	۶/۳۵	۱۲/۸	J-۱۰-t	۱۳
۰/۶۵	۰/۸۱	۴۱/۰۵	۱۳/۲	۱۰۰	۱/۵	۶/۴	۱۲/۴	J-۱۰-d	۱۴
۰/۷۸	۰/۹۳	۱۸/۵۶	۴/۹	۱۰۰	۲	۵/۸	۱۱/۹	J-۱۱-L	۱۵
۰/۶۱	۰/۷۶	۱۷/۱۱	۵/۵	۱۰۰	۳/۹	۶/۴	۱۲/۴	J-۱۲	۱۶

در جدول بالا؛

v: سرعت بارگذاری

σ_{\square} : حداکثر تنش مقاومتی

۴- نتایج و تحلیل

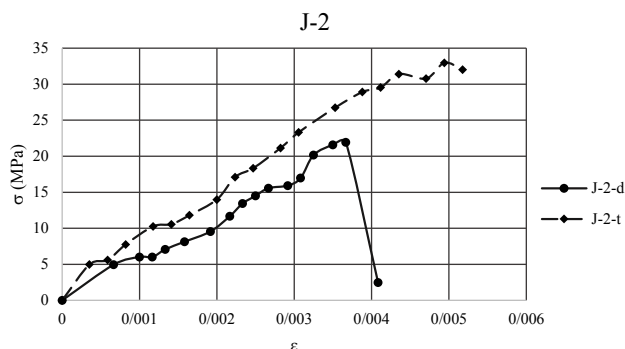
۴-۱- بررسی اثر سرعت اجرا در مقاومت

در شکل ۸ رابطه‌ی بین سرعت اجرا (سرعت بالا آمدن راد) در برابر مقاومت فشاری تک محوری ارائه شده است. بر اساس شکل ۸ ملاحظه می‌شود که با کاهش سرعت بالا آمدن، مقاومت فشاری به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش مقاومت را می‌توان به افزایش میزان تزریق دوغاب به درون خاک ربط داد. میانگین مقاومت فشاری در سرعت بالا آمدن ۱/۵ میلی متر بر ثانیه، ۱۷۵ درصد به نسبت میانگین مقاومت فشاری در سرعت بالا آمدن ۳/۹ میلی متر بر ثانیه، افزایش یافته است. وجود یک محدوده مقاومتی در نمونه‌های مختلف مربوط به هر سرعت اجرا مربوط به

دادن اندیس (d) مشخص شده است. با بررسی مقاومت‌های فشاری قسمت بالایی و پایینی، تأثیر عمق مغزه گیری در مقاومت مشخص خواهد گردید. ستون‌هایی که از آنها تنها یک مغزه در محور طولی بدست آمده است، بدون اندیس می‌باشند.

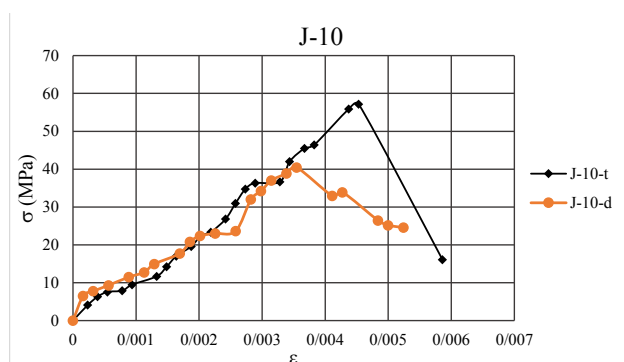
با توجه به آیین‌نامه ASTM ۱۶۳۳ D سرعت بارگذاری (اعمال بار بر واحد زمان به نمونه) در نمونه‌های خاک سیمان در آزمایش فشاری محدود نشده بایستی در حدود ۷۰۶۱۴۰ kPa/s باشد، بر همین اساس با تبدیل واحد و در نظر گرفتن قطر ۶ سانتی‌متر برای مغزه‌های بدست آمده، حداکثر سرعت بارگذاری برابر ۶۰ kgf/s بدست می‌آید. ولی به دلیل محدودیت دستگاه در اعمال حداقل سرعت بارگذاری، بار اعمالی با سرعتی در حدود ۱۰۰ kgf/s بر نمونه‌ها وارد گردید. در جدول ۴ خلاصه‌ای از مشخصات و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری ارائه شده است.

* این مقدار بر اساس مدت زمان اعمال بار به نمونه در دستگاه و باری که نمونه در آن شکسته شد، بدست آمده است.



شکل ۹. تغییرات تنش-کرنش مربوط به قسمت بالایی و پایینی ستون J-2

Fig. 9. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation for Model 1



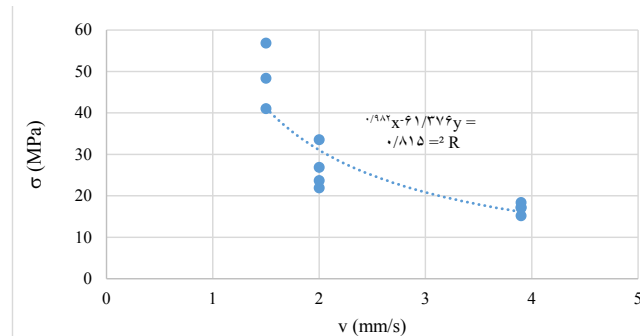
شکل ۱۰. تغییرات تنش-کرنش مربوط به قسمت بالایی و پایینی ستون J-10

Fig. 10. Vertical displacement of the soil behind the excavation wall in Model 1

از نوع و مقدار اسپویل اطلاعاتی از ستون تشکیل شده در ترازهای مختلف بدست آورد [۱۸]، اسپویل باعث خروج مصالح ریزدانه خاک شده و بدین ترتیب مقاومت ستون خاک سیمان ساخته شده افزایش می‌یابد. بدین ترتیب افزایش مقاومت در نمونه‌های گرفته شده از قسمت بالایی می‌تواند ناشی از خروج اسپویل باشد. البته در اجرای ستون‌ها در مقیاس بزرگ، معمولاً یک متر بالایی ستون به دلیل شستشوی مسیر به وسیله‌ی آب، نسبت آب به سیمان افزایش یافته و مقاومت ستون کاهش می‌یابد، ولی در آزمایشگاه، این عملیات به دلیل مدت زمان جابه‌جایی کم، صورت نگرفته است.

۴-۳- بررسی اثر عرضی یا طولی بودن مغزه گیری

تعداد سه مغزه به صورت جانبی (در راستای افقی) با نام‌های J-۳-L، J-۴-L و J-۱۱-L گرفته شد. مقاومت فشاری ناشی از این انجام آزمایش تک‌محوری بر روی این سه نمونه به ترتیب برابر ۱۵/۵۷،



شکل ۸. مدل ۱ در نرم‌افزار اجزای محدود به همراه مش بندی

Fig. 8. Model 1 in finite element software with mesh

سایر پارامترهای اجرایی از قبیل سرعت دوران و محل مغزه گیری می‌باشد.

۴-۲- بررسی اثر تغییر ارتفاع در مغزه گیری

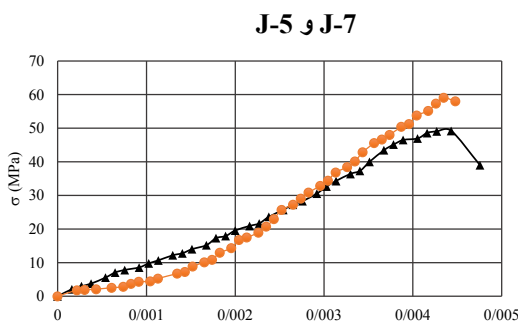
تعداد ۲ مغزه از قسمت بالایی و پایینی دو ستون جت گروتینگ به نام‌های J-۱۰ و J-۲ گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش قسمت بالایی و پایینی ستون‌های J-۲ و J-۱۰ در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.

بر اساس مشاهدات نمودارهای بالا در هر دو ستون پارامترهای مقاومتی در قسمت بالایی ستون (J-۲-t و J-۱۰-t) دارای مقادیر بیشتری نسبت به قسمت پایینی (J-۲-d و J-۱۰-d) می‌باشند. بر اساس این نتایج، مقاومت فشاری در حدود ۳۸/۵ تا ۴۲ درصد در قسمت بالایی ستون‌ها به نسبت قسمت پایینی بیشتر می‌باشد. این افزایش مقاومت می‌تواند ناشی از پساب یا اسپویل^۱ (مازاد دوغاب تزریقی و خاک که از کنار میله حفار به بیرون ریخته میشود) ایجاد شده در هنگام عملیات تزریق باشد. بر اساس مشاهدات در حین ساخت ستون جت گروتینگ در آزمایشگاه، اسپویل از ابتدای شروع تزریق به سطح خاک نمی‌رسد و شروع خروج اسپویل معمولاً از نیمه بالایی ستون‌ها بود. به عبارت دیگر هنگام ساخت نیمه ی پایینی ستون خروج اسپویل مشاهده نشد در حالی که وقتی تزریق به نیمه ی بالایی ستون می‌رسد اسپویل از اطراف راد حفاری خارج می‌شد. بر اساس آیین‌نامه BS EN ۱۲۷۱۶:۲۰۰۱ خروج اسپویل در حین ساخت ستون از اهمیت بالایی برخوردار است چراکه علاوه بر اینکه می‌توان

1 Spoil



شکل ۱۱. قسمت پایینی ستون J-7-r (الف) در دستگاه تنش کنترل (ب) ستون پس از انجام آزمایش فشاری
 Fig. 11. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation for Model 2



شکل ۱۲. تغییرات تنش- کرنش مربوط به قسمت پایینی ستون‌های J-5 و J-7 (بدون مغزه گیری)
 Fig. 12. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation for Model 3

فشاری مشخص شد. نمودارهای تنش کرنش بارگذاری بدنه ستون مربوط به قسمت پایینی نمونه‌های J-5 و J-7 در شکل ۱۲ ارائه شده است. برای قسمت بالای نمونه به دلیل انجام آزمایش با جک بتن شکن متأسفانه امکان ثبت منحنی تنش-کرنش وجود نداشت. مشخصات و نتایج آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های J-5 و J-7 در جدول ۵ ارائه شده است.

ES (۱۰۰٪) مدول الاستیسیته سکانتی در مقاومت نهایی نمونه و ES (۵۰٪) مدول الاستیسیته سکانتی در نقطه متناظر با ۵۰ درصد مقاومت نهایی می‌باشد، که این مدول ها از تقسیم مقدار تنش بر

۱۹/۵۹ و ۱۸/۵۶ مگا پاسکال بدست آمد. این نمونه‌ها در حالی که سرعت متوسط بالا آمدن راد حفاری برابر ۲ میلی‌متر بر ثانیه بود ساخته شده بودند. برای بررسی اثر جانبی یا قائم بودن مغزه گیری، میانگین مقاومت فشاری مغزه‌های قائم و جانبی با یکدیگر مقایسه شدند. بدین ترتیب میانگین مقاومت فشاری مغزه‌های قائم برای ستون‌های ساخته شده در سرعت متوسط بالا آمدن ۲ میلی‌متر بر ثانیه برابر ۲۶/۵۳ مگا پاسکال و میانگین مقاومت فشاری مغزه‌های جانبی برابر ۱۷/۹ مگا پاسکال بدست آمد. با مقایسه این دو عدد مشخص می‌گردد مغزه های افقی به‌طور میانگین حدود ۸/۶۳ مگا پاسکال (۳۳ درصد، مقاومت کمتری از نمونه‌های قائم نشان داده اند.

۴-۴- بررسی اثر مغزه گیری

از قسمت بالای نمونه‌های J-5 و J-7 یک مغزه در راستای محور مرکزی به قطر ۶ سانتیمتر گرفته شد. قسمت پایینی این نمونه‌ها که دارای شکل استوانه‌ای کامل و مناسبی بود، بدون هیچ‌گونه مغزه گیری و تراش دیواره استوانه‌ای و صرفاً با برش سر و ته (برای رعایت نسبت طول به قطر ۲) و کلاهدک‌گذاری (برای مسطح سازی) جهت انجام آزمایش فشاری آماده گردید (شکل ۱۱). پس از انجام آزمایش فشاری تک‌محوری، بدین‌وسیله اثر مغزه گیری بر روی مقاومت

جدول ۵: نتایج مقاومت فشاری بر روی مغزه طولی از قسمت بالا و بارگذاری مستقیم بدنه ستون در قسمت پایینی
Table 5. Soil characteristics for different behavioral models

J-V-r	J-V-t	J-S-r	J-S-t	مشخصات
۹/۲	۶	۱۱	۶	قطر (cm)
۱۸/۵	۱۲	۲۳	۱۲	طول (cm)
۲۹۳۱	-	۴۵۴۸	-	وزن (gr)
۲/۳۸	-	۲/۰۸	-	چگالی (gr/cm^3)
۴۹/۲۲	۱۵/۲۱	۵۹/۰۶	۲۱/۹۳	مقاومت فشاری (MPa)
۱۰۰۲۸/۹۸	-	۱۰۶۹۱/۳۱	-	(MPa)Es (%۵۰)
۱۱۱۰۳/۵۱	-	۱۳۵۸۴/۲۵	-	(MPa) Es (%۱۰۰)

کرنش متناظر با آن بدست می آید.

با مقایسه مقادیر مقاومت فشاری مغزه ها و ستون کامل در ستون های J-۵ و J-۷ مشخص می گردد که نمونه در حالت عدم مغزه گیری، دارای مقاومت ۲/۷ تا ۳/۲۷ برابری نسبت به حالت مغزه گیری شده می باشد، که مقدار بسیار قابل توجهی می باشد. البته همان طور که پیش از این نیز بیان شد نمونه های J-۵-t و J-۷-t به وسیله جک بتن شکن و با سرعت بارگذاری در حدود 440 kgf/s شکسته شده اند. هرچه سرعت بارگذاری در آزمایش فشاری کمتر باشد، مقاومت فشاری بدست آمده کمتر می گردد. بارگذاری آهسته می تواند باعث کاهش مقاومت فشاری بین ۵ تا ۱۰ درصد گردد [۱۹]. در نتیجه سرعت بیشتر بارگذاری مغزه ها در دستگاه بتن شکن در مقاومت آنها مؤثر بوده است. باین حال که سرعت بارگذاری در آزمایش بر روی مغزه ها ۴ برابر قسمت پایینی خود ستون می باشد، مقاومت حاصله از مغزه ها همان طور که بیان شد تقریباً یک سوم مقاومت فشاری خود ستون بدست آمد.

بر اساس نتایج کریش و ساندرمان، محدوده مقاومت فشاری محدود نشده در خاک دانه ای، برابر ۳ تا ۱۵ مگا پاسکال می باشد. باین حال مقاومت فشاری بدست آمده از نمونه های J-۵-I و J-۷-I از محدوده معمول مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های خاک سیمان بسیار بیشتر می باشد [۹].

۴-۵- آزمایش بارگذاری نقطه ای

در روش بار نقطه ای، نمونه ای با رعایت نسبت ابعاد مشخص شده در آیین نامه، بین دو میله فولادی با انتهای مخروطی تحت فشار

استاتیکی قرار می گیرد تا نمونه شکسته شود. بر اساس دستورالعمل ASTM ۹۵ - ۵۷۳۱ D اگر مقدار نیروی موجب شکسته شدن، P و De، قطر مقطع دایره ای معادل با صفحه شکست باشد، شاخص بار نقطه ای (Is) عبارت است از [۲۰]:

بر روی ۷ تکه از قطعات شکسته نمونه ها، آزمایش بارگذاری نقطه ای انجام گردید. در شکل ۱۳ نمونه J-۹ درون دستگاه بارگذاری نقطه ای نشان داده شده است.

بر اساس نتایج تجربی، اگر شاخص بار نقطه ای (I_s) در ۲۴ ضرب گردد، مقاومت فشاری تک محوری معادل بر مبنای آزمایش بار نقطه



شکل ۱۳: نمونه J-۹ درون دستگاه بارگذاری نقطه ای

Fig. 13. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation Model 4

جدول ۶. مقادیر مقاومت فشاری بر اساس آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و بارگذاری نقطه‌ای
Table 6. Modified soil characteristics for MC and HS behavioral models

Sample Name	D	W ^۱	W ^۲	L	P	A	D _e	F	Is(°)	σ (Mpa)	
	mm	mm	mm	mm	(kN)	(mm ^۲)	(mm)		(MPa)	PL	USC
J-۲-d	۶۳			۵۰	۳/۸۵	۳۱۵۰	۶۳/۳۵	۱/۱۳	۱/۰۸	۲۵/۹۲	۲۳/۷۱
J-۴-L	۳۲/۴	۶۲			۷	۲۰۰۸/۸	۵۰/۵۹	۱/۰۱	۲/۷۵	۶۶/۰۳	۱۹/۵۹
J-۷-t	۶۳			۵۰	۲/۹	۳۱۵۰	۶۳/۳۵	۱/۱۳	۰/۸۱	۱۹/۵۲	۱۵/۲۲
J-۸	۶۳			۵۰	۴/۳۳	۳۱۵۰	۶۳/۳۵	۱/۱۳	۱/۲۱	۲۹/۱۵	۱۷/۳۳
J-۹	۶۳			۳۴	۲/۶۸	۲۱۴۲	۵۲/۲۴	۱/۰۲	۱/۰۰	۲۴/۰۹	۱۸/۴۰
J-۱۰-t	۳۷	۶۴	۶۸/۵		۶/۸	۲۴۵۱/۲	۵۵/۸۸	۱/۰۶	۲/۳۰	۵۵/۲۵	۵۶/۸۷
J-۱۰-d	۴۲/۳	۴۹	۲۴		۴/۱۷	۱۵۴۶/۱	۴۴/۳۸	۰/۹۴	۱/۹۹	۴۷/۸۷	۴۱/۰۵

ستون‌ها (۲۸ روز) از قسمت‌های مختلف نمونه‌ها و در جهات مختلف، مغزه گیری شد. بر روی مغزه‌های بدست آمده پس از کلاhek گذاری آزمایش فشاری محدود نشده انجام گردید. از این آزمایش‌ها نتایج ذیل بدست آمد:

۱- بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های فشاری محدود نشده مقدار مقاومت فشاری در نمونه‌های خاک سیمان در بازه‌ی ۱۵/۵۷ تا ۵۹/۹ مگا پاسکال متغیر بود. مقاومت فشاری بالای بدست آمده در برخی از نمونه‌ها که از مقدار معمول نمونه‌های خاک سیمان به مراتب بالاتر می‌باشد، علاوه بر تأثیر پارامترها اجرایی و نوع ساخت ستون (استفاده از مکانیزم فرسایش برای اختلاط دوغاب و ماسه)، می‌تواند ناشی از شرایط آزمایشگاهی ساخت ستون‌ها از قبیل خاک کاملاً خشک و ماسه با ریزدانه کم باشد. همچنین نتایج حاکی از آن هستند که با افزایش سرعت ساخت ستون‌ها، مقاومت فشاری آنها به دلیل کاهش مقدار سیمان تزریق شده در خاک کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه به دست آمده، روند کاهش مقاومت با افزایش سرعت ساخت، بصورت نمایی مشاهده گردید.

۲- میانگین مقاومت فشاری مغزه‌های قائم برابر ۲۶/۵۳ مگا پاسکال (ستون‌های ساخته شده زمانی که سرعت متوسط بالا آمدن راد برابر ۲ میلی‌متر بر ثانیه) و میانگین مقاومت فشاری مغزه‌های مایل برابر ۱۷/۹ مگا پاسکال بدست آمد. با مقایسه این دو عدد مشخص می‌گردد مقاومت مغزه‌های قائم ۱/۵ برابر میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های جانبی می‌باشد.

۳- بر اساس نتایج، پارامترهای مقاومتی در قسمت بالایی ستون به نسبت پایین آن دارای مقادیر بیشتری بدست آمد. برای

ای (PL) حاصل می‌شود. بر همین اساس می‌توان مقادیر مقاومت فشاری تک محوری معادل را برای نمونه‌های تحت آزمایش بار نقطه‌ای به صورت جدول ۶ بدست آورد و با مقایسه تک محوری استاندارد (USC) مقایسه نمود.

پارامترهای D, W^۱, W^۲ و L مربوط به ابعاد نمونه‌ها است که نحوه اندازه گیری آنها در استاندارد ASTM ارائه شده است [۲۰]. A سطح شکست و F فاکتور تصحیح سایز می‌باشد.

بر اساس نتایج جدول ۶، بالا بودن مقادیر مقاومت فشاری بدست آمده در آزمایش‌های فشاری محدود نشده مورد تأیید قرار می‌گیرد. نکته جالب در نمونه ی J-۴-L می‌باشد، مقاومت معادل بدست آمده از آزمایش بار نقطه‌ای در حدود سه برابر مقاومت فشاری بدست آمده از مقاومت فشاری محدود نشده می‌باشد. این اختلاف می‌تواند ناشی از عدم یکنواختی مغزه گرفته شده در محور عرضی باشد. چراکه با فاصله گرفتن از نازل تزریق در مقطع عرضی، میزان مواد چسبنده تزریق شده در خاک کاهش می‌یابد و بدین ترتیب همگنی نمونه کاهش می‌یابد. بدین ترتیب ضعف در یک قسمت از مغزه گرفته شده باعث شکست نمونه در مقاومت کمتری به نسبت مقاومت بدست آمده از روش بارگذاری نقطه‌ای شده است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، با ساخت دستگاه تزریق پرفشار (جت گروتینگ) در مقیاس آزمایشگاهی، به بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده پرداخته شد. به همین منظور، ابتدا ستون‌ها در خاک ماسه‌ای در آزمایشگاه ساخته شد. پس از گذشت مدت زمان عمل‌آوری

- [5] Y. Hu, G. Zhang, J.-M. Zhang, C. Lee, Centrifuge modeling of geotextile-reinforced cohesive slopes, *Geotextiles and geomembranes*, 28(1) (2010) 12-22.
- [6] L. Wang, G. Zhang, J.-M. Zhang, Centrifuge model tests of geotextile-reinforced soil embankments during an earthquake, *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3) (2011) 222-232.
- [7] A.I. Mana, G.W. Clough, Prediction of movements for braced cuts in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 107(ASCE 16312 Proceeding) (1981).
- [8] A.J. Whittle, Y.M. Hashash, R.V. Whitman, Analysis of deep excavation in Boston, *Journal of geotechnical engineering*, 119(1) (1993) 69-90.
- [9] R.B. Brinkgreve, Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application, in: *Soil constitutive models: Evaluation, selection, and calibration*, 2005, pp. 69-98.
- [10] R.F. Obrzud, G.C. Eng, On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice, *Numerics in Geotechnics and Structures*, (2010).
- [11] A. Lim, C.-Y. Ou, P.-G. Hsieh, Evaluation of clay constitutive models for analysis of deep excavation under undrained conditions, *Journal of GeoEngineering*, 5(1) (2010) 9-20.
- [12] P. Teo, K. Wong, Application of the Hardening Soil model in deep excavation analysis, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 5(3) (2012) 152-165.
- [13] S. Likitlersuang, C. Surarak, D. Wanatowski, E. Oh, A. Balasubramaniam, Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT, *Soils and Foundations*, 53(5) (2013) 756-773.
- [14] B.-C.B. Hsiung, S.-D. Dao, Evaluation of Constitutive Soil Models for Predicting Movements Caused by a Deep Excavation in Sands, (2014).
- [15] M. Afifpour, P. Marefvand, M.G. Estahbani, Investigation of Unreasonable Expansion in Numerical Modeling of Excavation Problems, in: *9th International Congress of Civil Engineering*, Isfahan University of Technology, 2012.

مثال در دو ستون، مقاومت فشاری در حدود ۳۸/۵ تا ۴۲ درصد در قسمت بالایی به نسبت قسمت پایینی بیشتر بود. این افزایش مقاومت می‌تواند ناشی از تاثیرات پساب خروجی در حین اجرای قسمت بالایی نمونه و شستن ریزدانه های خاک باشد. قسمت پایین دو ستون میکرو جت گروتینگ که از بالای آن مغزه گیری شده بود، بدون مغزه گیری درون جک قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که نمونه ها در حالت عدم مغزه گیری دارای مقاومت ۲/۷ تا ۳/۲۷ برابری نسبت به حالت مغزه گیری می‌باشند که مقدار بسیار قابل توجهی می‌باشد. این نتیجه می‌تواند تاثیرات مخرب تنش های ناشی از مغزه گیری را در کاهش مقاومت نمونه شاهد تبیین نماید.

۴- بر اساس نتایج آزمایش بارگذاری نقطه‌ای، مقادیر مقاومت فشاری بالای بدست آمده از آزمایش فشاری محدود نشده مورد تأیید قرار گرفت.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از همکاری مسئولان محترم مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران در راستای انجام این پژوهش و همچنین از شرکت خدمات بهسازی خاک سامان پی، بابت حمایت مالی از ساخت دستگاه میکروجت گروتینگ، تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

- [1] K. Dan, R. Sahu, Ground Movement Prediction For Braced Excavation in Soft Clay, (2010).
- [2] Y.-G. Tang, G.T.-C. Kung, Investigating the effect of soil models on deformations caused by braced excavations through an inverse-analysis technique, *Computers and Geotechnics*, 37(6) (2010) 769-780.
- [3] G.T. Kung, E.C. Hsiao, M. Schuster, C.H. Juang, A neural network approach to estimating deflection of diaphragm walls caused by excavation in clays, *Computers and Geotechnics*, 34(5) (2007) 385-396.
- [4] J.G. Zornberg, N. Sitar, J.K. Mitchell, Performance of geosynthetic reinforced slopes at failure, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(8) (1998) 670-683.

- [22] M. Long, Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(3) (2001) 203-224.
- [23] J. Wang, Z. Xu, W. Wang, Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7) (2009) 985-994.
- [24] P. V8, *Material Models Manual*, Delft University of Technology & PLAXIS bv, The Netherlands, (2008) 48.
- [25] T. Benz, *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences*, Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik, 2007.
- [26] F. Ahimoghdam, *Investigating the factors affecting the behavior of nailing walls using centrifuges machine* Master's thesis, Faculty of Civil Engineering (University of Science and Technology) (2014).
- [27] D.M. Wood, *Geotechnical modelling*, CRC press, 2003.
- [28] A. Aysen, *Soil mechanics: basic concepts and engineering applications*, CRC Press, 2002.
- [16] I. Rahmani, A. Golpazir, Evaluating the Effect of Selecting Constitutive Models on Prediction of the Ground Movement Adjacent to Deep Excavations JR_ROAD, (2012).
- [17] E. Zolqadr, S.S. Yasrobi, M. Norouz Olyaei, Analysis of soil nail walls performance-Case study, *Geomechanics and Geoengineering*, 11(1) (2016) 1-12.
- [18] T. Bhatkar, D. Barman, A. Mandal, A. Usmani, Prediction of behaviour of a deep excavation in soft soil: a case study, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1) (2017) 10-19.
- [19] R.B. Peck, Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proc. 7th ICSMFE*, 1969, (1969) 225-290.
- [20] G.W. Clough, T.D. O'Rourke, Construction induced movements of insitu walls, in: *Design and Performance of Earth Retaining Structures*; ASCE, 1990, pp. 439-470.
- [21] P.-G. Hsieh, C.-Y. Ou, Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation, *Canadian geotechnical journal*, 35(6) (1998) 1004-1017.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Sharifi , M. Sabermahani, S.R. Soorani, *Study On Compressive Strength Of Micro-jet Grouting Columns By Physical Modeling*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) (2021) 2549-2562.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15491.5932](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15491.5932)

