



## Study On Compressive Strength Of Micro-jet Grouting Columns By Physical Modeling

Sharifi Soheil<sup>1</sup>, Sabermahani Mohsen<sup>2,\*</sup>, Soorani SeyedRasool<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.sc. of geotechnical engineering, Iran University of Science and Technology

<sup>2</sup> Associate professor, Iran University of Science and Technology/ Department of Civil Engineer

<sup>3</sup> M.sc. of geotechnical engineering, Iran University of Science and Technology

**ABSTRACT:** Jet grouting method is considered as one of the most widely used improvement methods among the others and is applicable in most geotechnical problems such as increasing bearing capacity, reducing settlement, creating seals, stabilizing slopes, etc. One of the challenges faced by designers is finding the strength and geometry of the elements made using this method. The most effective components in the resistance of jet grouting columns are the type and parameters of injection, soil characteristics (such as aggregation), the amount of cement inside the sample, water to cement ratio of slurry, the type of cement and the method of sampling (coring or wet sampling). In this paper, after the construction of small scale jet grouting columns (micro jet grouting volumns) in the laboratory and taking core of them, the impact of various factors such as the effect of construction speed, the position and direction of coring, as well as the effect of coring operation on unconfined compressive strength is studied. Also, the point load test was used to study more about the strength parameters of the microjet grouting columns. Based on the results, the compressive strength of microjet grouting columns is high (approximately up to 59 MPa), and these values are confirmed by the point load test. It was also observed that with increasing speed of soil-cement columns construction, compressive strength decreases. Based on the compressive strength results, it is found that coring operation reduces resistance by 60%. Also, the cores taken in the horizontal direction showed about 33% less uniaxial compressive strength than the vertical cores and cores taken from the upper parts of the columns have more compressive strength.

### Review History:

Received: 2018-12-23

Revised: 2019-08-26

Accepted: 2019-08-27

Available Online: 2019-09-22

### Keywords:

Soil improvement

Jet Grouting

Physical modeling

Unconfined Compressive strength-

Soil cement

Coring operation

## 1. INTRODUCTION

Jet grouting is a method of soil remediation in which high-pressure water or slurry is injected from the nozzles into the soil, damaging the soil structure and causing soil-cement composition [1]. This method can improve the mechanical and physical components of a wide range of cohesive and granular soils. Also run in different horizontal, oblique and vertical directions and create different shapes such as seal curtains, columns and rigid blocks and be constructed in restricted positions such as adjacent buildings. This technique is sometimes lightweight and low volume equipment [2] and costs less than other injection methods in terms of effectiveness and improvement of soil parameters [3].

Physical modeling is a very important and efficient tool in geotechnical engineering, which, depending on the geotechnical conditions of the phenomenon under investigation, if done correctly, it can increase confidence in developing a theoretical model [4]. Therefore, a laboratory-scale Jet Grouting capability was developed at the Iran University of Science and Technology [5].

Two parameters of resistance and the geometry of the jet grouting element are of great importance in the design of jet

grouting. According to Slizyte et al., And based on previous research by researchers, soil-cement compressive strength generally depends on four factors of soil type, cement content, water-cement ratio, retention time [6]. The amount of cement in the improved soil has a great impact on its strength. This has a direct impact on costs and should be considered to optimize the project and to balance the cost and the amount of resistance [7]. Kirsch and Sondermann stated that when cement is used for jet grouting and the cement content in the body is about 150 to 400 kg/m<sup>3</sup>, the following values can be considered for unconstrained compressive strength of the soil [8]:

$$\begin{aligned} \text{In the sand and gravel: } & q_u = 1.0 \text{ to } 15.0 \text{ MPa} \\ \text{In the silt and clay: } & q_u = 0.5 \text{ to } 3.0 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (1)$$

The purpose of this study is to investigate the effect of some variables such as run speed, change of height and coring direction on the compressive strength of the specimens, as well as to investigate the dependence of the parameters and the relationship between the physical and mechanical properties of the soil-cement columns made with a micro jet grouting. Based on the simple regression analysis performed on the data of this study and data provided by other researchers, relationships for sand and silt were obtained.

\*Corresponding author's email: msabermahani@iust.ac.ir





Fig. 1. Micro-jet grouting machine with steel enclosure and its [5] transmission system



Fig. 2. Columns inserted in the box for curing

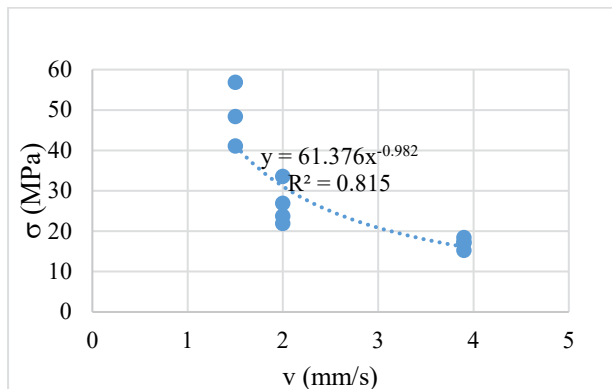


Fig. 2. Changes in run speed and compressive strength of micro-jet grouting columns

## 2. METHODOLOGY

In order to construct laboratory-scale jet grouting columns, a micro-jet grouting machine manufactured at Iran University of Science and Technology, a mixer, slurry pump and steel

enclosure were used. The image of the device in position on the steel housing is shown in Fig. 1.

The soil materials used in this study are 161 silica sand of Firoozkooch. Drinking water and Portland Type 2 cement were used to make cement slurry. The weight ratio of water to cement (w/c) was 1 in all micro-jet grouting columns.

The dry soil mass with a relative density of 27-33% was deposited in a steel chamber for the purpose of jet grouting operation. After adjusting the drill rod to the desired point, the drilling was rotated and then injected by jet grouting through a 1.5 mm diameter nozzle at 6 bar pressure during drilling and raising the drilling head. In order to construct jet grouting columns in laboratory scale, different speeds of drilling rod rise during injection were used. After the columns were curing (Fig. 2), coring and capping were performed on them.

## 3. DISCUSSION AND RESULTS

A uniaxial compression test was performed on 14 cores taken from micro-jet grouting columns in both vertical and horizontal directions. The lower part of the two columns were also inserted directly under the pressure jack with respect to the length-to-diameter ratio of 2. The purpose of this work was to investigate the effect of coring on compressive strength.

Fig. 2 illustrates the relationship between the execution speed ( $v$ ) against the uniaxial compressive strength ( $\sigma$ ).

According to Fig. 2, it is observed that with decreasing speed of compression, the compressive strength increases markedly. The reason for this increase in resistance can be attributed to the increase in the amount of slurry injected into the soil. The average compressive strength at 1.5 mm/s rise rate was 175% higher than the average compressive strength at 3.9 mm/s rise speed.

## 4. CONCLUSIONS

In this study, the compressive strength of fabricated specimens was investigated by the development of a laboratory-scale high-pressure jet grouting machine. For this purpose, the columns were first constructed in sandy soil in the laboratory. The following results were obtained from these experiments:

1. Based on the results of unconfined compressive tests, the amount of compressive strength in the cement soil samples varied from 15.57 to 59.9 MPa. The results also show that as the column speeds up, the compressive strength decreases due to the decrease in the amount of cement injected into the soil. According to the obtained relation, the trend of decreasing resistance with increasing speed of construction was observed exponentially.
2. The average compressive strength of the vertical cores was 26.53 MPa (columns made when the average raising velocity was 2 mm/s) and the mean compressive strength of the cores was 17.9 MPa. By comparing these two numbers, the vertical core strength is 1.5 times the average compressive strength of the lateral specimens.
3. Based on the results, the resistivity parameters in the upper part of the column have relatively higher values. For example, in two columns, the compressive strength was about 38.5 to 42 percent higher in the upper than in the lower part. This increase in resistance may be due to the

effects of effluent during the top portion of the sample and the washing of the soil particles. The bottom of the two micro-jet grouting columns from the top of the core was inserted without jacking. Based on the results, it was found that the samples with no coring have a resistance of 2.7 to 3.27 times that of cores, which is a considerable amount. This result could explain the destructive effects of coring stresses on reducing the strength of the control sample.

4. Based on the results of the point loading test, the high compressive strength values obtained from the uniaxial compression test were confirmed.

## REFERENCES

- [1] D.M. Wood, Geotechnical modelling, CRC press, 2003.
- [2] Y. Hu, G. Zhang, J.-M. Zhang, C. Lee, Centrifuge modeling of geotextile-reinforced cohesive slopes, Geotextiles and geomembranes, 28(1) (2010) 12-22.
- [3] 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.
- [4] 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).
- [5] 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.
- [6] B.-C.B. Hsiung, S.-D. Dao, Evaluation of Constitutive Soil Models for Predicting Movements Caused by a Deep Excavation in Sands, (2014).
- [7] F. Ahimoghadam, 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).

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 621-624.

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







## ارزیابی مقاومت فشاری ستون‌های میکروجت گروتینگ به وسیله مدل فیزیکی

سهیل شریفی<sup>۱</sup>، محسن صابرمهانی<sup>۲\*</sup>، سیدرسول سورانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۳</sup> 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 به عنوان یکی از پرکاربردترین روش های بهسازی خاک در بین سایر روش ها 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 ساخته شده 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 مغزه های گرفته‌شده در راستای افقی در حدود ۳۳ درصد مقاومت فشاری تک محوری کمتری از مغزه قائم نشان داده اند و مغزه های اخذ شده از بالای ستون ها دارای مقاومت بیشتری بوده اند.

### ۱- مقدمه

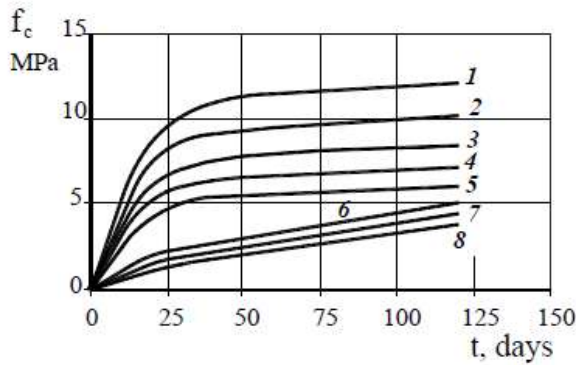
در نظر گرفت [۱]. این روش می تواند مؤلفه‌های مکانیکی و فیزیکی محدوددهی وسیعی از خاک‌های چسبنده و دانه‌ای را بهبود بخشد. همچنین در جهت‌های مختلف افقی، مایل و قائم اجرا شود و اشکال مختلفی همچون پرده آب‌بند، ستون و بلوک های صلب و باربر ایجاد نماید و در موقعیت های دارای محدودیت همچون مجاورت ساختمان‌ها ساخته شود. این روش دارای تجهیزات بعضا 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

تزیق با فشار بالا<sup>۱</sup> 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 تطبیق پذیرترین روش

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:  $530 \text{ kg/m}^3$ ، ۶ و ۷:  $300 \text{ kg/m}^3$ ، ۸:  $290 \text{ kg/m}^3$ ، 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

درحالی که در ماسه این مقدار  $300 \text{ kg/m}^3$  می باشد و باوجود 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<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> و ساندرمان<sup>۴</sup> 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، ازجمله 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 هزینه های زیاد انجام این گونه آزمایش ها، بهره گیری از مطالعات آزمایشگاهی با ساخت مدل های فیزیکی کوچک مقیاس بسیار مفید و توجیه پذیر است.

مدل سازی فیزیکی، ابزاری بسیار مهم و کارآمد در مهندسی ژئوتکنیک است، که بسته به شرایط ژئوتکنیکی پدیده مورد پژوهش، در صورتیکه به درستی انجام پذیرد، می تواند 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، مدل سازی 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 این رو دستگاهی باقابلیت انجام عملیات جت گروتینگ در مقیاس آزمایشگاهی در دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته شد [۵].

طبق نظر اسلیزیت<sup>۱</sup> و همکاران، و بر مبنای پژوهش های 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 جالب توجه این است که مقدار سیمان در رس  $530 \text{ kg/m}^3$  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<sup>۱</sup>، 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  $400 \text{ kg/m}^3$  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<sup>۱</sup>، 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<sup>۴</sup> 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<sup>۱</sup>، 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 ( $q_{up}$ )، 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<sup>۲</sup> و تان<sup>۳</sup>، 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]

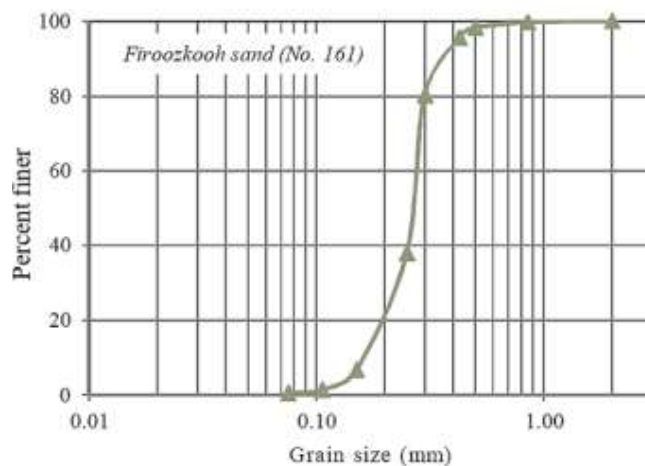
Fig. 2. Type of diaphragm wall displacement and surface settlement behind the wall

جدول ۳. مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Table 3. Physical characteristics of 161 Firoozkooch sand

$\phi$	$e_{max}$	$e_{min}$	$C_u$	$C_c$	$G_s$
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 کلاهک‌گذاری  
**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- کلاهک‌گذاری

جهت گونیا و مسطح نمودن سطوح فوقانی و تحتانی مغزه‌ها نسبت به محور طولی آن، از ملات ماسه گوگرد استفاده گردید. شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی انجام عملیات کلاهک‌گذاری 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 به وسیله دستگاه تنش کنترل و ۲ مورد به وسیله 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)	$\sigma_{\square}$ (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

$\sigma_{\square}$ : حداکثر تنش مقاومتی

#### ۴- نتایج و تحلیل

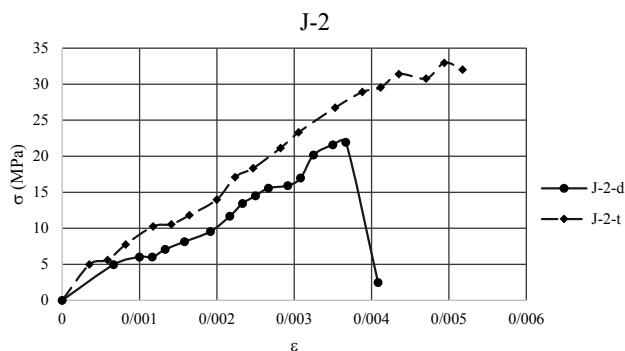
##### ۴-۱- بررسی اثر سرعت اجرا در مقاومت

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.

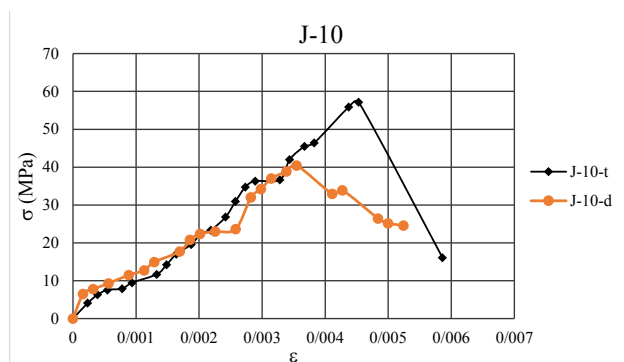
با توجه به آیین‌نامه ASTM ۱۶۳۳ D سرعت بارگذاری (اعمال بار بر واحد زمان به نمونه) در نمونه‌های خاک سیمان در آزمایش فشاری محدود نشده بایستی در حدود ۷۰۶۱۴۰ kPa/s باشد، بر همین اساس با تبدیل واحد و در نظر گرفتن قطر ۶ سانتی‌متر برای مغزه‌های بدست آمده، حداکثر سرعت بارگذاری برابر ۶۰ kgf/s بدست می‌آید. ولی 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



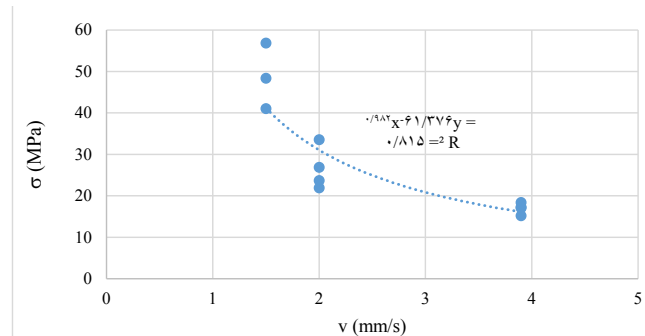
شکل ۱۰. تغییرات تنش-کرنش مربوط به قسمت بالایی و پایینی ستون J-10

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 به‌وسیله‌ی 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 به‌صورت 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.

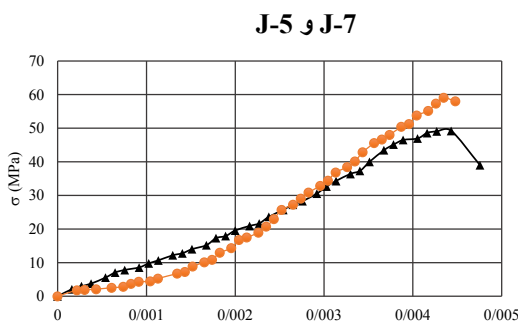
بر اساس مشاهدات نمودارهای بالا در هر دو ستون پارامترهای مقاومتی در قسمت بالایی ستون (J-۲-t و J-۱۰-t) دارای مقادیر بیشتری نسبت به قسمت پایینی (J-۲-d و J-۱۰-d) می‌باشند. بر اساس این نتایج، مقاومت فشاری در حدود ۳۸/۵ تا ۴۲ درصد در قسمت بالایی ستون‌ها به نسبت قسمت پایینی بیشتر می‌باشد. این افزایش مقاومت می‌تواند ناشی از پساب یا اسپویل<sup>۱</sup> (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 ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
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 آیند.

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 دایره‌ای معادل با صفحه شکست باشد، شاخص بار نقطه‌ای (Is) عبارت است از [۲۰]:

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

بر اساس نتایج تجربی، اگر شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s$ ) در ۲۴ ضرب گردد، مقاومت فشاری تک‌محوری معادل بر مبنای آزمایش بار نقطه

با مقایسه مقادیر مقاومت فشاری مغزه‌ها 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 می‌باشد، که مقدار بسیار قابل توجهی می‌باشد. البته همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد نمونه‌های J-۵-t و J-۷-t به وسیله جک بتن شکن و با سرعت بارگذاری در حدود ۴۴۰ kgf/s شکسته شده‌اند. هرچه سرعت بارگذاری در آزمایش فشاری کمتر باشد، مقاومت فشاری بدست آمده کمتر می‌گردد. بارگذاری آهسته می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری بین ۵ تا ۱۰ درصد گردد [۱۹]. در نتیجه سرعت بیشتر بارگذاری مغزه‌ها در دستگاه بتن شکن در مقاومت آنها مؤثر بوده است. باین‌حال که سرعت بارگذاری در آزمایش بر روی مغزه‌ها ۴ برابر قسمت پایینی خود ستون می‌باشد، مقاومت حاصله از مغزه‌ها همان‌طور که بیان شد تقریباً یک‌سوم مقاومت فشاری خود ستون بدست آمد.

بر اساس نتایج کریش و ساندرمان، محدوده مقاومت فشاری محدود نشده در خاک دانه‌ای، برابر ۳ تا ۱۵ مگا پاسکال می‌باشد. باین‌حال مقاومت فشاری بدست آمده از نمونه‌های J-۵-I و J-۷-I از محدوده معمول مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های خاک سیمان بسیار بیشتر می‌باشد [۹].



شکل ۱۳: نمونه J-9 درون دستگاه بارگذاری نقطه‌ای

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

۴-۵- آزمایش بارگذاری نقطه‌ای

در روش بار نقطه‌ای، نمونه‌ای با رعایت نسبت ابعاد مشخص شده در آیین‌نامه، بین دو میله فولادی با انتهای مخروطی تحت فشار

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 <sup>۱</sup>	W <sup>۲</sup>	L	P	A	D <sub>e</sub>	F	Is(°)	σ (Mpa)	
	mm	mm	mm	mm	(kN)	(mm <sup>۲</sup> )	(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، مغزه‌گیری 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<sup>۱</sup>, W<sup>۲</sup> 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- نتیجه‌گیری

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)

