



## The use of steel waste as granular stone materials in stone columns along with geotextile in the direction of sustainable development

M. J. Rezaei Hoseinabadi<sup>1</sup>, M. Bayat<sup>1\*</sup>, B. Nadi<sup>1</sup>, A. Rahimi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

**ABSTRACT:** The materials that make up the columns are generally sand, gravel or crushed stone, which are sometimes called stone or gravel columns. The implementation of this system is widely used in geotechnical engineering to increase bearing capacity and reduce settlement. The use of industrial wastes such as steel slag in soil stabilization can be an environmentally friendly, sustainable and cost-effective technique for solid waste disposal. Surveys show that many studies have been conducted on the bearing capacity and settlement of improved soils with stone columns with or without geosynthetic cover. However, a very limited number of studies on conventional stone columns and steel slag columns with or without confinement and geosynthetic cover have been investigated in laboratories under lateral loading. In this article, the lateral load capacity of steel slag granular sand-column environments has been investigated using a large-scale direct shear test device. The effect of column material type (steel slag and sand), column diameter, and changing the type of geosynthetic coating on the shear strength parameters of sand-column composites has been investigated. The experimental results show the effectiveness of using steel slag columns to improve the lateral load performance of sand, so that by increasing the diameter of the column in the sand environment from 5 to 25 cm, the percentage of maximum stress increases by 20 to 70% and also the percentage of internal friction angle increases by 200 Up to 800% compared to the sand environment without slag column was observed.

### Review History:

Received: Dec. 15, 2021

Revised: Oct. 14, 2022

Accepted: Oct. 16, 2022

Available Online: Oct. 22, 2022

### Keywords:

Lateral load capacity

Stone and slag column

Geotextile

Shear strength

Large-scale direct shear test

### 1- Introduction

To date, many studies have been conducted on the use of industrial waste in civil engineering projects as a cost-effective and environmentally friendly alternative to construction materials. Today, to stabilize and improve the bearing capacity and reduce the settlement of soft and weak soils, piles and ordinary granular columns are used [1]. The most important factors affecting the performance of granular columns are: diameter, configuration and distance of columns, characteristics of aggregate materials, the relative density of column materials and lateral confinement caused by the surrounding soil [2-4]. However, the use of granular columns in soils with shear strength of less than 15 kPa may not be very effective due to insufficient lateral support provided by the surrounding soft soil [5]. This problem can be largely solved by adding a chamber to the granular column and using a geosynthetic cover, which leads to higher shear strength and prevents excessive column swelling [2]. This paper focuses on understanding the lateral load capacity of sand reinforced with steel slag column reinforced with different geosynthetic coatings. The new point of this research is the use of steel slag as granules in reinforced columns with different geosynthetic layers to modify weak sands. The effect of various types of

geosynthetic cover models on the lateral load capacity of the composite sand and stone column with different diameters was investigated.

### 2- Laboratory program

In order to implement the research program, two types of materials are needed, the first category of host materials in which the columns are placed and the second category of materials used as column materials. In this study, uniform fine sand collected from Varzane region in Isfahan province was used as the host environment. For the second category, steel slag has been used as the column material. This slag is one of the side products of the electric arc furnace of Mobarake Steel Company, one of the largest steel producers in Iran. Granulation curves of materials are shown in Figure 1. Three types of geotextiles have been used to reinforce the slag column with different density percentages (250, 400 and 600 grams per square meter) in this research.

### 3- Performing tests

In this research, a series of large-scale direct shear tests were conducted to study the behavior of sand-column with geosynthetic cover with different percentages of density or

\*Corresponding author's email: bayat.m@pci.iaun.ac.ir



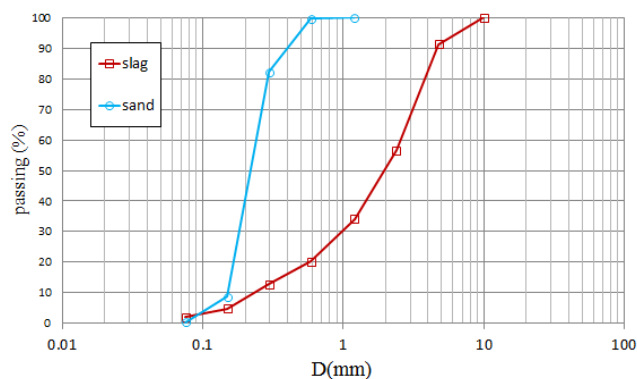


Fig. 1. Sand and slag grading curves

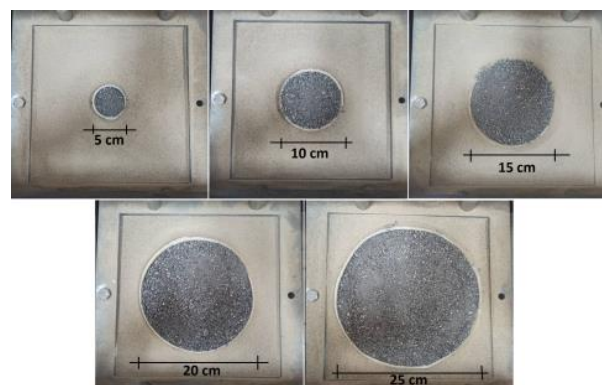


Fig. 2. Steel slag columns with various diameters in the box of the device

Table 1. details of the test program

Group	Geotextile weight (gr/m <sup>2</sup> )	Column diameter (Cm)	Ar(%)
(N)	Without geotextile	5, 10, 15, 20, 25	2.2, 8.7, 19.6, 34.9, 54.5
(G2)	250		
(G4)	400		
(G6)	600		

without it. For this purpose, a large-scale direct shear machine with box dimensions of 30×30 cm<sup>2</sup> and depth of 14 cm was used. In this investigation, the behavior of steel slag column in sand was evaluated based on ASTM D3080 standard. The samples were cut under three different normal stresses (33, 65 and 130 kPa) and uniform displacement control with a constant strain rate of 1 mm/min.

#### 4- Preparation and testing program

In this study, large-scale direct shear tests were conducted to investigate the behavior of sand due to the change in column diameter and different geotextile models, and the details of the test program are provided in Table 1. The effect of column diameter or surface replacement ratio (Ar) on column shear strength parameters was also investigated. As shown in Figure 2, steel slag columns in different diameters (5, 10, 15, 20, and 25 cm) were placed in the center of the machine box with different models of geosynthetic cover and without it (Table 1).

#### 5- Results and Discussion

The results of the tests presented in this section include the effect of different parameters such as the diameter of the column, the use or non-use of geotextile, as well as the effect of the density and model of the geotextile cover on the shear strength. The percentage of the maximum shear stress of each group of tests (G2, G4, G6) compared to the maximum stress of sand can be seen in Figure 3..

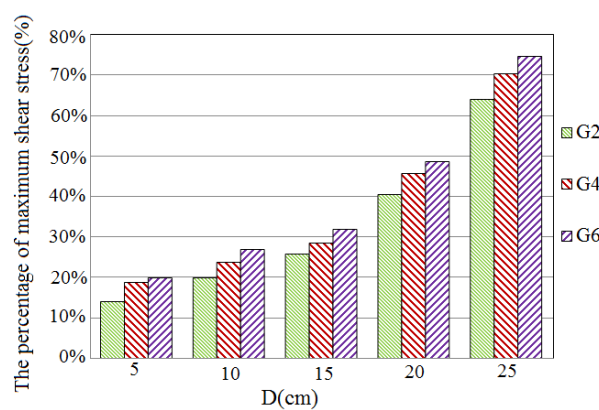


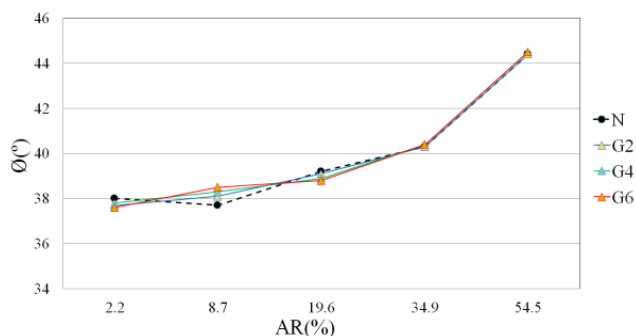
Fig. 3. The percentage of the maximum shear stress of group samples compared to the maximum stress of sand

Figure 4 shows the variation of the angle of internal friction for the enclosed columns of groups (N,G2,G4,G6) with the replacement ratio (Ar), which is defined as the ratio between the area of the steel slag column. Figure 5 shows the cohesion value of the sand-slag column composite against the area replacement ratio (Ar) for groups (N,G2,G4,G6) at different levels of normal stress.

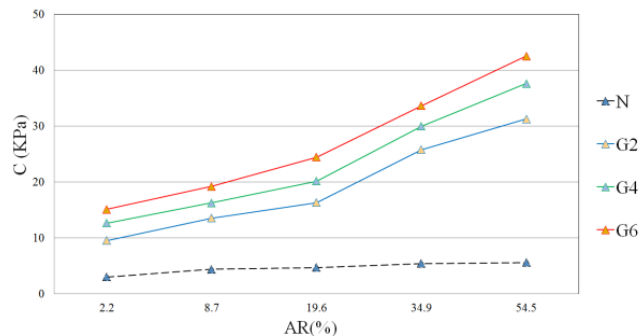
#### 6- Conclusions

The use of industrial waste in civil engineering applications as economical and environmentally friendly building materials. This study is focused on the use of steel slag materials as granular column materials for improving loose sands. Based on the investigations, the following results have been obtained:

1- As it has been determined from the results of this research, the use of slag in the stone column will increase the shear resistance parameters and increase the value of the internal friction angle. This material, if it replaces stone materials, is very suitable from the point of view of the environment, because it will cause the consumption of industrial waste.



**Fig. 4. Variations of internal friction angle of slag-sand column composite**



**Fig. 5. Changes in the cohesion value of the slag-sand column composite**

2-Examining the results shows that simply confining the column in the soil can have a great effect on increasing the maximum stress value and the higher the density, the more this increase will have a slower slope

3- The presence of a slag column increases the angle of internal friction, and the enclosing layer does not have much effect on the trend of this parameter, but it increases the cohesion of the aggregates of the column and increases the shear resistance parameters.

#### References

- [1] Rezaei-Hosseiniabadi, M. J., Bayat, M., Nadi, B., Rahimi, A., Sustainable utilisation of steel slag as granular column for ground improvement in geotechnical projects. *Case Studies in Construction Materials*, 17 (2022) e01333.
- [2] Rezaei-Hosseiniabadi, M. J., Bayat, M., Nadi, B., & Rahimi, A, Utilisation of steel slag as a granular column to enhance the lateral load capacity of soil. *Geomechanics and Geoengineering*, 1-11 (2021).
- [3] Orekanti, E. R., & Dommaraju, G. V., Load-settlement response of geotextile encased laterally reinforced granular piles in expansive soil under compression. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(3) (2019) 1-8.
- [4] Verma, P., & Sahu, A. K., Effect of grouted granular column on the load carrying capacity of the expansive soil. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3) (2019) 2606-2612.
- [5] Almeida, M. S. S., Hosseiniabadi, I., & Riccio, M., Performance of a geosynthetic-encased column (GEC) in soft ground: numerical and analytical studies. *Geosynthetics international*, 20(4) (2013) 252-262.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. J. Rezaei Hoseinabadi, M. Bayat, B. Nadi, A. Rahimi, *The use of steel waste as granular stone materials in stone columns along with geotextile in the direction of sustainable development*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 933-936.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20884.7561







## استفاده از ضایعات فولاد به عنوان مصالح سنگی دانه‌ای در ستون‌های سنگی به همراه ژئوتکستایل در راستای توسعه پایدار

محمد جواد رضایی حسین آبادی<sup>۱</sup>، میثم بیات<sup>۲\*</sup>، بهرام نادى<sup>۱</sup>، آرزو رحیمی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

### کلمات کلیدی:

ظرفیت بار جانبی

ستون سنگی و سرباره‌ای

ژئوتکستایل

مقاومت برشی

آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

**خلاصه:** مصالح تشکیل دهنده ستون‌ها عموماً ماسه، شن یا سنگ خرد شده است که گاهی به آن‌ها ستون‌های سنگی و یا ستون‌های شنی نیز گفته می‌شود. اجرای این سیستم به طور گسترده در مهندسی ژئوتکنیک برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست استفاده می‌شود. استفاده از ضایعات صنعتی مانند سرباره فولاد در تثبیت خاک می‌تواند یک تکنیک سازگار با محیط زیست، توسعه پایدار و مقرون به صرفه برای دفع مواد زائد جامد باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعات زیادی در مورد ظرفیت باربری و نشست زمین‌های بهبود یافته با ستون‌های سنگی با یا بدون پوشش ژئوستتیک انجام شده است. با این حال، تعداد بسیار محدودی از مطالعات پیرامون ستون‌های سنگی معمولی و ستون‌های سرباره فولادی با یا بدون محصور شدگی و پوشش ژئوستتیک در آزمایشگاه‌ها تحت بارگذاری جانبی بررسی شده‌اند. در این مقاله، ظرفیت بار جانبی محیط‌های ماسه-ستون دانه‌ای سرباره فولادی با استفاده از دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر نوع مصالح ستون (سرباره فولاد و ماسه)، قطر ستون و تغییر نوع پوشش ژئوستتیک بر پارامترهای مقاومت برشی کامپوزیت‌های ماسه-ستون بررسی شده است. نتایج تجربی اثربخشی استفاده از ستون‌های سرباره فولادی را برای بهبود عملکرد باربری جانبی ماسه نشان می‌دهد، به صورتی که با افزایش قطر ستون در محیط ماسه از ۵ به ۲۵ سانتی‌متر، درصد افزایش تنش ماکزیمم ۲۰ تا ۷۰ درصد و همچنین درصد افزایش زاویه اصطکاک داخلی ۲۰۰ تا ۸۰۰ درصد نسبت به محیط ماسه بدون ستون سرباره‌ای مشاهده گردید.

### ۱- مقدمه

فولاد و دو فعال کننده مختلف (آهک زنده و متاسیلیکات سدیم) به عنوان ماده بهبود خاک استفاده کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ریزدانه‌های سرباره فولاد باعث افزایش استحکام و دوام و همچنین کاهش پتانسیل انبساط خاک می‌شود. نتایج ارائه شده توسط شن و همکاران [۲۲] نشان داد که استفاده از مخلوط سرباره فولاد و سایر ضایعات جامد به عنوان مواد پایه جاده منجر به استحکام اولیه بالاتر نسبت به مخلوط آهک - خاکستر بادی یا مخلوط آهک - خاک و حتی استحکام بلند مدت بالاتری نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان می‌شود. آکینوومی و همکاران [۲۳] اثر افزودن سرباره فولادی پودر شده را بر برخی خواص ژئوتکنیکی یک خاک لاتریتی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش میزان سرباره فولاد در نمونه‌های خاک از ۰.۵٪ به ۱.۰٪ منجر به کاهش انعطاف‌پذیری و پتانسیل تورم خاک و افزایش نفوذپذیری و استحکام خاک شده است. اشانگو و پاترا [۳] از سرباره فولاد، خاکستر پوسته برنج و آهک سربع برای تثبیت خاک استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های فشاری محصور

تا به امروز مطالعات زیادی در مورد استفاده از پسماندهای صنعتی در پروژه‌های عمرانی به عنوان جایگزینی برای مصالح ساختمانی به جهت صرفه اقتصادی و حفظ محیط زیست انجام شده است [۱۵-۱]. سرباره فولاد عبارت است از ضایعات جامد در عملیات فولادسازی از تبدیل آهن به فولاد در کوره اکسیژن پایه (سرباره کوره اکسیژن پایه) یا ذوب قراضه در کوره قوس الکتریکی (سرباره کوره قوس الکتریکی) و قبلاً به عنوان سنگدانه در بتن‌ریزی و ساخت و ساز راه‌سازی استفاده شده است [۱۸-۱۶]. در سال‌های اخیر رشد سریع و افزایش شدید تقاضا و تولید فولاد منجر به افزایش تولید سرباره فولاد شده است. مصرف سرباره فولاد در کشورهای توسعه یافته به عنوان ماده جایگزین در صنعت ساختمان تقریباً ۶۰ درصد کل تولید سرباره فولاد است، در حالی که این میزان در کشورهای در حال توسعه حدود ۲۰ درصد است [۲۰ و ۱۹]. پو و همکاران [۲۱] از مخلوط ریزه‌های سرباره

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bayat.m@pci.iaun.ac.ir



نشده نشان داد که نسبت مخلوط بهینه، خاک ۶۵ درصد، سرباره فولاد ۲۰ درصد، آهک ۵ درصد و خاکستر پوسته برنج ۱۰ درصد است. مقاومت فشاری محصور نشده مخلوط بهینه حدود ۴۵ و ۹۰ درصد برای دوره عمل‌آوری ۳۰ روز در محفظه‌ای که در رطوبت نسبی ۹۰ تا ۱۰۰ درصد و دمای ۲۸ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. نتایج آزمایش‌های سه محوری نشان داد که تراکم مخلوط بهینه نسبت به نمونه‌های خاک طبیعی به ۵۸-۷۸ درصد افزایش یافته است. وو و همکاران [۲۴] یک ترکیب بهینه از سرباره و سیمان برای اصلاح خاک را معرفی کردند. نتایج آزمایش‌ها در این تحقیق نشان داد که مخلوط کردن سیمان و سرباره منجر به کاهش قابل توجه پتانسیل تورم و بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک می‌شود. لانگ و همکاران [۲۵] اثر افزودن سرباره فولادی را برای تثبیت لجن لایروبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که محتوای سرباره فولادی ۵ تا ۱۰ درصد محتوای بهینه برای بهبود مقاومت برشی لجن لایروبی تثبیت شده با سیمان است.

روش‌های مختلف بهسازی خاک مانند ستون‌های سنگی در مطالعات قبلی برای افزایش ویژگی‌های مقاومتی و نفوذپذیری و کاهش ویژگی‌های تراکم‌پذیری خاک گزارش شده است [۳۱-۲۶]. امروزه برای تثبیت و بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک‌های نرم و ضعیف، شمع‌ها و ستون‌های دانه‌ای معمولی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهبود خاک از طریق ستون‌های سنگی دارای مزایای بسیاری مانند تراکم‌پذیری و پتانسیل روانگرایی کمتر و ظرفیت حمل بار و نفوذپذیری بالاتر است [۳۲].

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد ستون‌های دانه‌ای عبارتند از: قطر، پیکربندی و فاصله ستون‌ها، ویژگی‌های مصالح دانه‌بندی، تراکم نسبی مواد ستون و محصور شدن جانبی که توسط خاک اطراف ایجاد می‌شود [۳۵-۳۳]. با این حال، استفاده از ستون‌های دانه‌ای در خاک‌هایی با مقاومت برشی کمتر از ۱۵ کیلوپاسکال ممکن است به دلیل مقاومت جانبی ناکافی ارائه شده توسط خاک نرم اطراف بسیار موثر نباشد [۳۶]. با اضافه نمودن محصور شدگی در ستون‌های دانه‌ای و استفاده از پوشش‌های ژئوستنتیکی، می‌توانیم این مسئله را تا حد زیادی برطرف نمود که منجر به ایجاد مقاومت برشی بالاتر و جلوگیری از تورم زیاد ستون می‌شود [۳۷-۴۰، ۳۳ و ۳۱]. از سوی دیگر، تجمع تدریجی ذرات خاک در ستون‌های سنگی بدون استفاده از ژئوتکستایل منجر به گرفتگی ستون دانه‌ای می‌شود که نفوذپذیری ستون‌ها را کاهش می‌دهد [۴۱-۴۳]. پوشش ژئوستنتیک در ستون‌های دانه‌ای منجر به محصور شدن جانبی و در نتیجه مقاومت برشی اضافی می‌شود و همچنین مانع از گرفتگی ستون‌های سنگی به وسیله ذرات ریز خاک می‌شود [۴۴-

۳۸]. موروگسان [۳۰] یک سری آزمایش برشی را برای مطالعه ظرفیت باربری و سختی برشی ستون‌های دانه‌ای با و بدون پوشش ژئوستنتیک انجام داد، نتایج حاکی از افزایش قابل توجه ظرفیت بار برشی به دلیل پوشش ستون‌های دانه‌ای با پوشش ژئوستنتیکی است. مطالعات قبلی مزیت استفاده از پوشش ژئوستنتیک را در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست ستون‌های دانه‌ای در مقایسه با پوشش بدون پوشش ژئوستنتیک گزارش کرده‌اند [۴۵، ۳۹ و ۳۸]. در مطالعات ذکر شده، ستون‌های دانه‌ای با استفاده از پوششی از ژئوستنتیک‌ها، تقویت شده است. قضاوی و همکاران [۴۶] ستون‌های سنگی تقویت شده افقی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری ستون‌های دانه‌ای با استفاده از لایه‌های ژئوستنتیک افقی و همچنین لایه‌های ژئوستنتیک عمودی افزایش یافته است. تاکنون مطالعات زیادی در مورد ظرفیت باربری محوری و نشست‌های ستون‌های سنگی معمولی و محصور شده انجام شده است [۴۷-۴۲ و ۳۱]. اگر چه تحقیقات بسیار کمی برای مطالعه ظرفیت بارگذاری جانبی ستون‌های دانه‌ای انجام شده است. موهاپاترا و همکاران [۳۱] ظرفیت بار جانبی ستون‌های دانه‌دار معمولی و ژئوستنتیکی را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که ظرفیت بار جانبی ستون‌های دانه‌ای با پوشش ژئوستنتیک افزایش می‌یابد. یک افزایش حاشیه‌ای در مقاومت برشی ستون‌های دانه‌ای معمولی با افزایش نسبت جایگزینی مساحت (نسبت سطح ستون‌های دانه‌ای به سطح کل برش) مشاهده شد. با این حال، افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی ستون‌های دانه‌ای ژئوستنتیکی مشاهده شد. انواع مختلفی از شکست‌های برشی در ستون‌های دانه‌ای معمولی و ژئوستنتیکی تحت بارگذاری جانبی مشاهده شد.

چنگیز و همکاران [۲۶] رفتار ستون‌های دانه‌دار معمولی و ژئوستنتیکی تحت بارهای جانبی استاتیکی و سیکیلیک را با استفاده از آزمون‌های مدل‌سازی فیزیکی مورد مطالعه قرار داد. نتایج بهبود قابل توجهی در زاویه اصطکاک کلی محیط‌های ستون-خاک به دلیل نصب ستون‌های روکش ژئوستنتیک با مقدار جایگزینی ناحیه کران پایین نشان داد. رضایی‌حسین‌آبادی و همکاران [۲۰] یک سری آزمایشات برش مستقیم بزرگ را برای مطالعه ظرفیت بار جانبی ستون‌های دانه‌ای معمولی و ژئوستنتیکی انجام دادند. نتایج نشان داد که چسبندگی محیط‌های ماسه-ستون بدون پوشش تقریباً ثابت است، در حالی که به دلیل افزایش قطر ستون، چسبندگی محیط‌های ماسه-ستون با پوشش ژئوستنتیک افزایش یافت.

علی‌رغم تمامی مطالعات انجام شده، هیچ گونه بررسی و پژوهشی

جدول ۱. مشخصات مصالح ماسه و سرباره

Table 1. Properties of sand and steel slag

سرباره	ماسه ورزنه	عنوان
۳/۵۵	۲/۶۷	مقدار توده ویژه جامد
NP	NP	شاخص خمیری (%)
۲۳/۰۱	۱۷/۹۹	مقدار بیشینه وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> )
۱۸/۹۶	۱۵/۴۱	مقدار کمینه وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> )
۴۹	۳۶	زاویه اصطکاک داخلی (°)
۳/۷	۴/۶	چسبندگی (kPa)

به عنوان مصالح ستون استفاده شده است. این سرباره از محصولات جانبی کوره قوس الکتریکی<sup>۲</sup> شرکت فولاد مبارکه از بزرگترین تولید کنندگان فولاد در ایران است. منحنی‌های دانه‌بندی و عکس مصالح در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

ضایعات سرباره فولاد یکی از رایج‌ترین مواد ضایعاتی است که در پروژه‌های مهندسی عمران مانند راه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵۳]. حداکثر سایز ماسه سرباره که برای مدل‌سازی ستون در ماسه استفاده شده است ۶ میلی‌متر است. ابعاد جعبه برشی باید کمتر از ۱۰ برابر بزرگترین ذره باشد تا اثر اندازه ذرات بر پارامترهای مقاومت برشی به حداقل برسد [۵۶-۵۴ و ۳۱].

در این تحقیق از سه نوع ژئوتکستایل برای تسلیح ستون سرباره‌ای با درصد تراکم‌های مختلف (۲۵۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم در متر مربع) استفاده شده است که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای ساخت نمونه‌ها همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ژئوتکستایل‌ها بر روی لوله نازک فولادی قرار گرفته و لبه‌های آن با ششوار صنعتی به هم متصل می‌گردد.

### ۳- روند انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس برای مطالعه رفتار ماسه-ستون با پوشش ژئوستتیک با درصد تراکم

بر روی مقایسه ظرفیت بار جانبی ماسه تقویت شده با ستون‌های سرباره فولادی مسلح شده با ژئوستتیک‌های متفاوت از نظر تراکم بافت وجود ندارد. این مقاله بر درک ظرفیت بار جانبی ماسه تقویت شده با ستون سرباره فولادی مسلح شده با پوشش‌های مختلف ژئوستتیک تمرکز دارد. نکته جدید این مطالعه استفاده از سرباره فولادی به عنوان گرانول در ستون‌های مسلح شده به لایه‌های مختلف ژئوستتیک برای اصلاح ماسه‌های ضعیف است. مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم در مقیاس بزرگ برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی مخلوط‌های ماسه-ستون انجام شد. اثرات انواع مدل پوشش ژئوستتیک بر ظرفیت بار جانبی ماسه و کامپوزیت ستون سنگی با قطرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

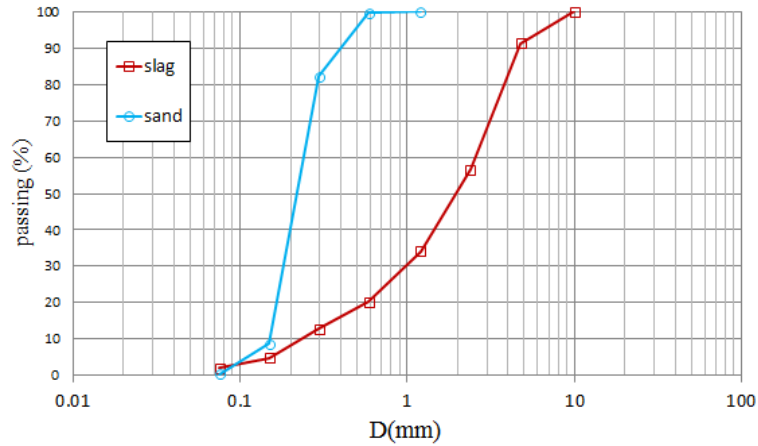
### ۲- برنامه آزمایشگاهی

#### ۲-۱- مصالح مورد استفاده قرار گرفته

به منظور اجرای برنامه پژوهشی در این تحقیق، دو نوع مصالح، دسته اول مصالح خاک میزبان که ستون‌ها در آن قرار می‌گیرند و دسته دوم مصالحی به عنوان مصالح ستون به کار برده شده است. در این مطالعه از ماسه ریزدانه یکنواخت جمع آوری شده از منطقه ورزنه در استان اصفهان به عنوان خاک میزبان استفاده شده است. ماسه ورزنه بر اساس سیستم طبقه‌بندی خاک<sup>۱</sup> به عنوان ماسه با بد دانه‌بندی شده طبقه‌بندی می‌شود. جدول ۱ خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه ورزنه را نشان می‌دهد. برای دسته دوم، از سرباره فولادی

2 EAF (Electric arc furnace)

1 USCS(Unified Soil Classification System)



شکل ۱. منحنی‌های دانه‌بندی ماسه و سرباره

Fig. 1. Grading curves of sand and steel slag



شکل ۲. تصاویر مربوط به ماسه و سرباره

Fig. 2. Photo of sand and steel slag

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوتکستایل‌های مورد استفاده قرار گرفته

Table 2. Physical and mechanical properties of geotextiles

مشخصات	واحد	جهت	لایه نوع اول	لایه نوع دوم	لایه نوع سوم
چگالی	g/m <sup>2</sup>	-	۲۵۰	۴۰۰	۶۰۰
ضخامت	mm	-	۳	۴	۵/۶
حداکثر کشش	kN/m	طولی	۱۳	۲۵	۳۲
حداکثر کشش	kN/m	عرضی	۱۶	۲۸	۳۵
حداکثر ازدیاد پارگی	%	طولی	۹۲	۸۰	۷۰
حداکثر ازدیاد پارگی	%	عرضی	۹۰	۷۸	۶۸
بیشینه نیروی قابل انبساط و کشش	N	-	۳۴۰	۴۹۰	۷۲۰
بیشینه نیروی قابل انبساط و کشش	N	-	۳۵۰	۵۱۰	۸۳۰





شکل ۳. اتصال لبه‌های ژئوتکستایل

Fig. 3. Connecting geotextile edges

جدول ۳. گروه‌بندی آزمایش‌های انجام شده با ستون سرباره‌ای-ماسه

Table 3. Groups of tests using steel slag column

گروه آزمایش	وزن ژئوتکستایل (گرم در متر مربع)	قطر ستون (سانتی‌متر)	درصد مساحت ستون به مساحت صفحه برش (%) Ar
گروه ۱ (N)	بدون ژئوتکستایل	۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵	۵۴/۵، ۳۴/۹، ۱۹/۶، ۸/۷، ۲/۲
گروه ۲ (G2)	۲۵۰	۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵	۵۴/۵، ۳۴/۹، ۱۹/۶، ۸/۷، ۲/۲
گروه ۳ (G4)	۴۰۰	۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵	۵۴/۵، ۳۴/۹، ۱۹/۶، ۸/۷، ۲/۲
گروه ۴ (G6)	۶۰۰	۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵	۵۴/۵، ۳۴/۹، ۱۹/۶، ۸/۷، ۲/۲

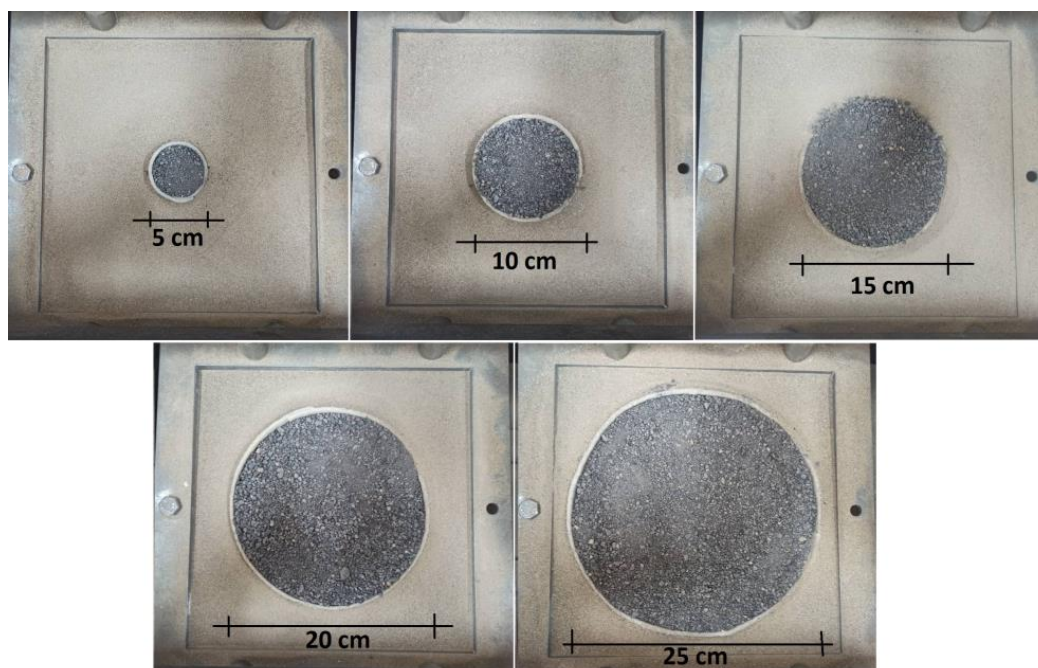
تنش‌های نرمال سعی شده است که طبق استاندارد آزمایش برش مستقیم، تنش‌های نرمال افزایش دو برابری نسبت به تنش نرمال ماقبل خود داشته باشد و همچنین سعی شده میزان تنش نرمال در حدود تنش‌های موجود در سطوح ستون‌های سنگی در عمق‌های معمول و نزدیک به مقادیر در نظر گرفته شده در مطالعات قبلی باشد.

#### ۴- برنامه آماده‌سازی و آزمایش

در این پژوهش، آزمایش‌های برش مستقیم برای بررسی رفتار ماسه در اثر تغییر قطر ستون و ژئوتکستایل مختلف انجام شد که جزئیات برنامه انجام آزمایشات در جدول ۳ ارائه شده است. تأثیر قطر ستون یا نسبت جایگزینی

مختلف یا بدون آن انجام شد. برای این منظور از دستگاه برش مستقیم در مقیاس بزرگ با ابعاد جعبه  $30 \times 30$  سانتی‌متر مربع و عمق ۱۴ سانتی‌متر استفاده شده است. در این بررسی رفتار ستون سرباره فولادی در ماسه بر اساس استاندارد ASTM D3080 مورد ارزیابی قرار گرفت. دستگاه برش مستقیم مورد استفاده شامل جعبه‌های بالا و پایین، دو کرنش‌سنج دیجیتال<sup>۱</sup>، یک لودسل<sup>۲</sup> و یک سیستم ثبت داده<sup>۳</sup> است. نمونه‌ها تحت سه تنش نرمال مختلف (۳۳، ۶۵ و ۱۳۰ کیلوپاسکال) و بارگذاری کرنش کنترل با نرخ کرنش ثابت ۱ میلی‌متر در دقیقه آزمایش شده‌اند. در انتخاب مقادیر

- 1 LVDT(Liner Variable Differential Transformer)
- 2 Load Cell
- 3 Datalogger



شکل ۴. ستون‌های سرباره‌ای با قطرهای مختلف در جعبه دستگاه

Fig. 4. Steel slag columns with various diameter in the box of device

از جعبه برشی خارج می‌شود به صورتی که نمونه‌های ماسه و سرباره دچار کمترین دست‌خوردگی شود.

#### ۵- نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم در این بخش ارائه شده است که شامل تأثیر پارامترهای مختلف مانند قطر ستون، استفاده یا عدم استفاده از ژئوتکستایل و همچنین تأثیر نوع ژئوتکستایل بر پارامترهای مقاومت برشی محیط ماسه- ستون است. منحنی‌های تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های مدل شده تک ستون (تحت تنش‌های معمولی ۳۳، ۶۵ و ۱۳۰ کیلوپاسکال) گروه‌های مختلف در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.

همانطور که در نتایج مشخص شده است، مقاومت برشی کلیه نمونه‌ها با افزایش مقدار تنش نرمال افزایش یافته است. افزودن ستون سرباره فولادی به ماسه منجر به افزایش قابل توجهی در ماکزیمم تنش برشی در هر مقدار متناظر تنش نرمال، نسبت به وضعیت آن در ماسه خالص شده است. بیشترین مقاومت برشی نمونه‌های حاوی ستون سرباره در سطح کرنش برشی بالاتر نسبت به نمونه‌های ماسه مشاهده شده است. بیشترین مقدار

سطح (AI) بر پارامترهای مقاومت برشی ستون نیز بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، ستون‌های سرباره فولادی در قطرهای مختلف (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) با مدل‌های مختلف همراه با پوشش ژئوستنتیک و یا بدون آن در مرکز جعبه دستگاه قرار داده شده تا اثر این ستون‌های سرباره فولادی منفرد تحت تغییر شکل جانبی بررسی شود.

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا مصالح به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شده است. لوله‌های فولادی با قطر داخلی متناسب با قطر متناظر با ستون در مرکز جعبه برش قرار داده شده و سپس جعبه با استفاده از روش بارشی با مقدار مورد نیاز در ۳ لایه پر و متراکم شده تا رسیدن به وزن مخصوص ۱/۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب که در این حالت درصد دانسیته نسبی ماسه ۰/۷۸ بوده و همچنین مقدار سرباره مورد نیاز برای هر لایه در لوله قرار داده شده و متراکم می‌گردد تا درصد دانسیته نسبی سرباره ۰/۶۳ به دست آید. مقادیر دانسیته نسبی انتخاب شده بر اساس مقادیر معمول در اکثر پروژه‌های عمرانی انتخاب شده است. پس از اتمام مرحله تراکم، مطابق شکل‌های ۵ و ۶ لوله به تدریج و با سرعت بسیار کم

1 Relative density ( $D_r$ )



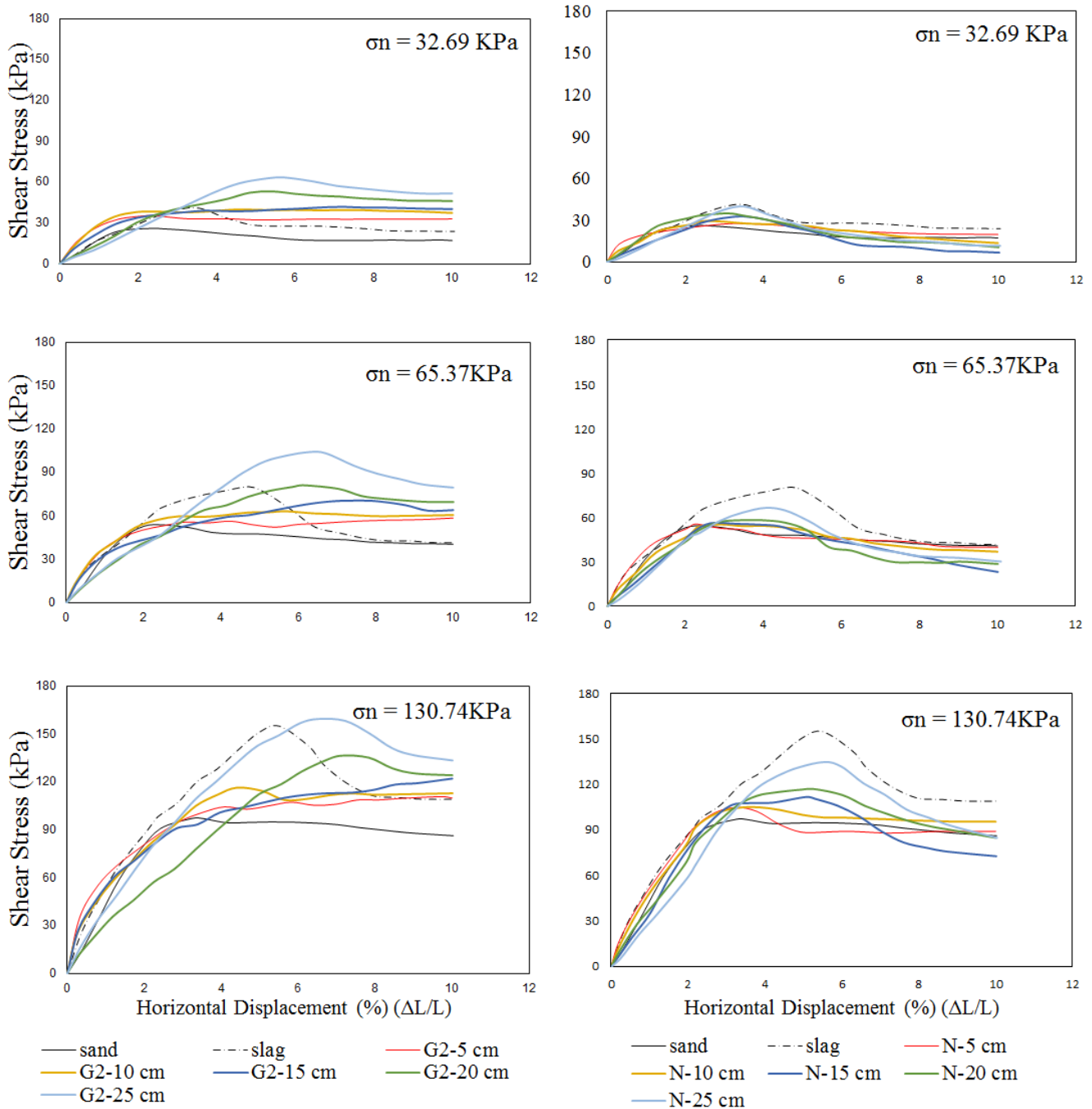
شکل ۵. مدل کردن ستونها در جعبه دستگاه با ژئوتکستایل

Fig. 5. Modelling of columns and geotextile in the box



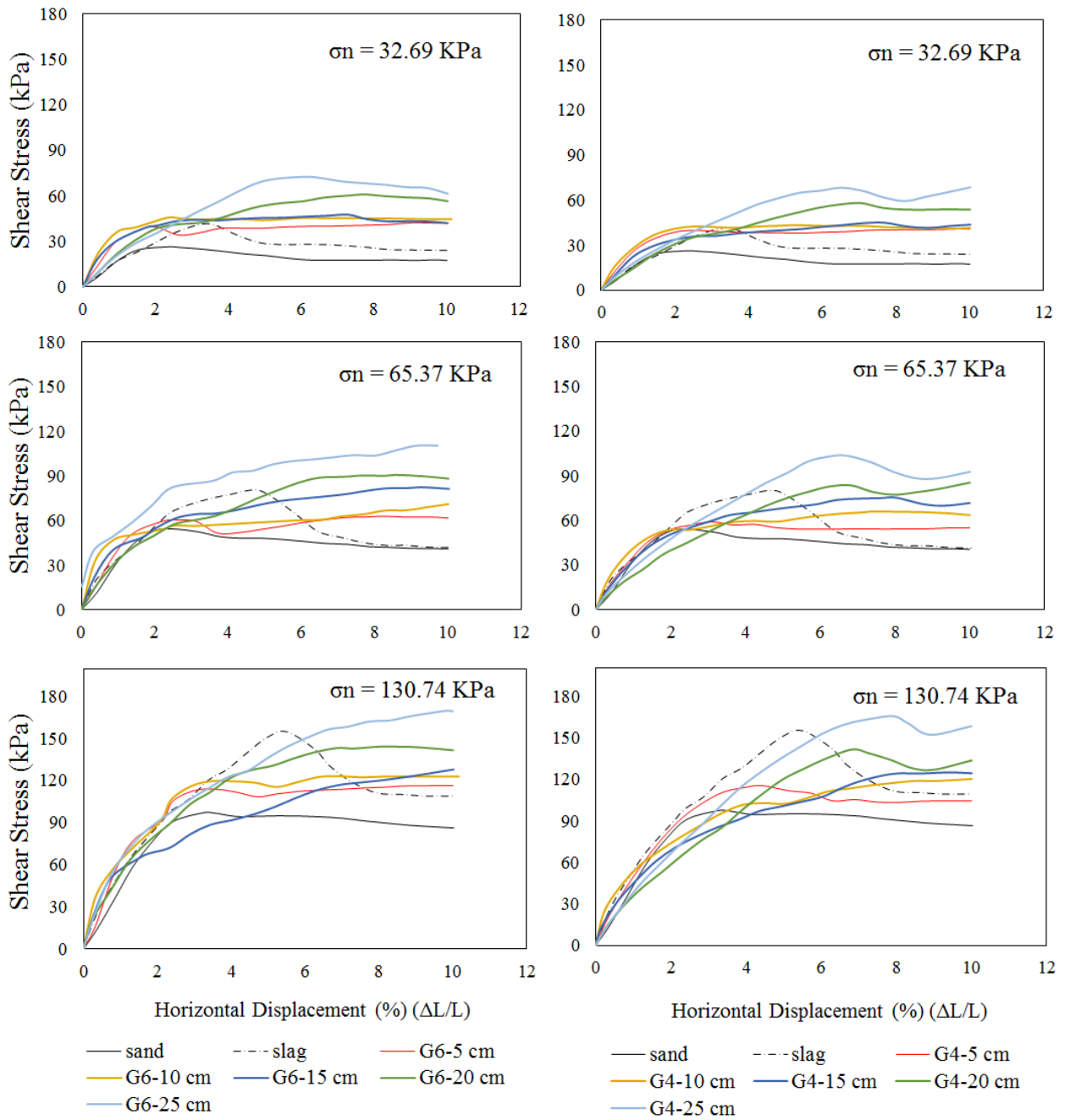
شکل ۶. ژئوتکستایل  $G_2$  بر روی لوله جدار نازک فولادی

Fig. 6.  $G_2$ - Geotextile on the thin wall steel pipe



شکل ۷. نمودارهای تنش- کرنش گروه‌های N و G<sub>2</sub>

Fig. 7. Stress-strain curves of N and G<sub>2</sub> Groups



شکل ۸. نمودارهای تنش- کرنش گروه‌های  $G_4$  و  $G_6$

Fig. 8. Stress-strain curves of  $G_4$  and  $G_6$  Groups

تنش را از خود نشان دهد. به عبارت دیگر، ژئوتکستایل و مقاومت کششی آن سبب مقاومت در برابر نیروی برش می‌گردد که تراکم ژئوتکستایل در این حالت با مقدار جذب تنش برش رابطه مستقیم دارد. افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها در مقادیر تغییر مکان‌های بالا به دلیل افزایش قطر ستون در نمونه‌های حاوی ستون محصور شده با پوشش ژئوتکستایل نسبت به نمونه‌های بدون لایه ژئوستتیک، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در واقع پوشش ژئوستتیک، فشار محدود کننده بیشتری را در ستون‌های سرباره فولادی ایجاد می‌کند.

پوش گسیختگی بر اساس مقادیر مقاومت برشی برای نمونه‌های حاوی ستون‌های سرباره‌ای با پوشش ژئوتکستایل در تراکم‌های مختلف و بدون آن که چهار گروه مختلف را تشکیل می‌دهند در شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش دانسیته ژئوستتیک به تناسب زیاد شدن قطر ستون باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی<sup>۱</sup> و مقدار چسبندگی<sup>۲</sup> شده است که در این حالت روند افزایش مقدار چسبندگی به صورت محسوسی بیشتر است، در صورتی که افزایش مقدار اصطکاک داخلی ناچیز است، مگر در حالت تبدیل قطر ستون از ۲۰ به ۲۵ سانتی‌متر که حدود ۴ درجه افزایش را به همراه دارد. در حالت (N) که در این حالت محصور شدگی وجود ندارد، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر ستون، مقدار چسبندگی دانه‌ها تقریباً ثابت و مقدار زاویه اصطکاک داخلی حدود ۶ درجه افزایش یافته است. به عبارت دیگر مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ستون بدون ژئوتکستایل با مقادیر متناظر قطر ستون در سایر گروه‌ها تقریباً ثابت است. در ستون‌های سرباره‌ای با پوشش ژئوتکستایل به دلیل افزایش قطر ستون و افزایش طول ژئوتکستایل در محیط درگیر با تنش برشی باعث تجمع نیروهای کششی در پوشش ژئوتکستایل می‌گردد که افزایش مقدار چسبندگی را به همراه دارد. به عبارت دیگر این روند به دلیل ایجاد نیروهای کششی در جهت‌های محیطی و عمودی در پوشش ژئوستتیک است. علاوه بر این، با افزایش قطر ستون، کرنش برشی مربوط به حداکثر مقاومت برشی افزایش یافت. پوشش ژئوستتیک باعث افزایش در مقاومت برشی ماکزیمم و کرنش برشی متناظر با آن شده است که منجر به افزایش جذب نیروی برشی بیشتری در نمونه‌ها شده است.

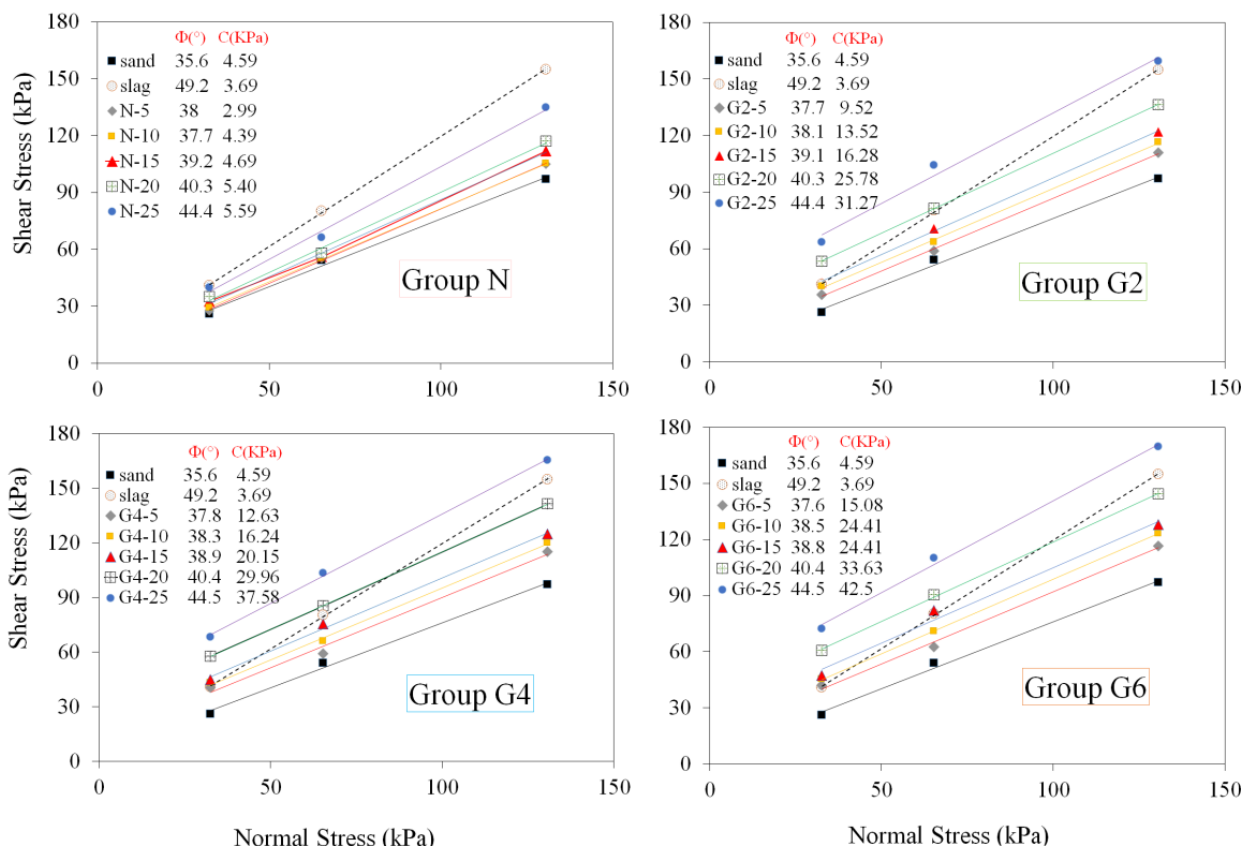
هنگامی که ستون سرباره‌ای ۲۵ سانتی‌متری با ژئوتکستایل در ماسه مدل شده است، زاویه اصطکاک داخلی ماسه از ۳۶ به ۴۴/۵ افزایش یافته است و همچنین مقدار چسبندگی از ۴/۶ به ۴۲/۵ کیلوپاسکال افزایش یافته است. به عبارت دیگر، مقدار چسبندگی نمونه ماسه با ستون سرباره‌ای

تنش برشی برای تمامی نمونه‌ها با افزایش قطر ستون‌های سرباره فولادی از ۵ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش یافته است. افزایش اولیه مقاومت برشی در زمانی که کرنش کم است به دلیل افزایش سختی ستون سرباره فولادی حاصل از لایه محصور کننده ژئوستتیک است، در حالی که در تنش‌های نرمال بیشتر، افزایش مقاومت برشی ممکن است به دلیل نیروهای کششی ایجاد شده در پوشش ژئوتکستایل باشد. وقتی قطر ستون محصور شده با ژئوتکستایل از ۲۰ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش یافته است، مقاومت برشی نمونه‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که در این حالت شیب رسیدن به تنش ماکزیمم کمتر شده است. به عبارت دیگر در این حالت ستون نیروی بیشتری را جذب کرده تا در کرنش افقی بیشتر تنش بالاتری را نسبت به سایر ستون‌ها با قطر کمتر تحمل نماید.

نتایج نمونه‌های حاوی تک ستون بدون پوشش ژئوستتیک (N) نشان می‌دهد که مقاومت برشی اوج هنگامی که قطر ستون از ۲۰ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش یافته به طور قابل توجهی افزایش یافته است، در حالی که وقتی قطر کمتر از ۲۰ سانتی‌متر بود، تأثیر ناچیزی بر مقاومت برشی بیشینه داشته است. در مورد نمونه‌های بدون پوشش ژئوستتیک، نمونه‌ها کرنش برشی نرم شوندگی قابل توجهی داشتند، در حالی که برای نمونه‌های حاوی ستون با پوشش ژئوتکستایل نرم شدگی کمتری نشان داده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از نمونه‌ها بدون پوشش ژئوستتیک و نمونه‌های حاوی ستون محصور شده با پوشش ژئوتکستایل نشان می‌دهد که وجود ژئوتکستایل در گروه‌های G منجر به افزایش مقاومت برشی متناظر با گروه N (بدون ژئوتکستایل) است و افزایش تراکم ژئوتکستایل در این مورد رابطه مستقیم دارد. در نمودار تنش-کرنش نمونه‌های N پس از رسیدن به مقدار بیشینه تنش برشی، به سرعت مقدار آن افت کرده و به پایین‌ترین سطح خود می‌رسد، در صورتی که در گروه‌های G این حالت وجود نداشته و نمونه‌ها پس از رسیدن به حد بیشینه تنش برشی، روند جذب انرژی را ادامه داده و افت کمتری دارند. در گروه‌های G در تنش نرمال کمتر، بیشترین افزایش تنش برشی در نمونه حاوی ستون با قطر ۲۵ سانتی‌متر بیشتر از سایر قطرها است و این مورد با بیشتر شدن تنش نرمال، تنش ماکزیمم ستون با قطر ۲۵ سانتی‌متر به نوار تنش-کرنش سایر ستون‌ها نزدیکتر می‌شود. افزایش قطر ستون در نمونه‌های حاوی ستون محصور شده با پوشش ژئوتکستایل (G) افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها در ماکزیمم و در تغییر مکان زیاد را نسبت به گروه N دارد که از اهمیت خاصی برخوردار است. در حقیقت محصور شدن ستون باعث افزایش جذب انرژی تنش برشی می‌گردد و همین امر باعث می‌شود تا در کرنش بزرگتر ماکزیمم

1 Soil friction angle  $\Phi$ (°)

2 Cohshen (C) (kPa)



شکل ۹. پوش گسختگی بر اساس مقادیر مقاومت برشی برای نمونه‌های حاوی ستون‌های سرباره‌ای با پوشش و بدون آن

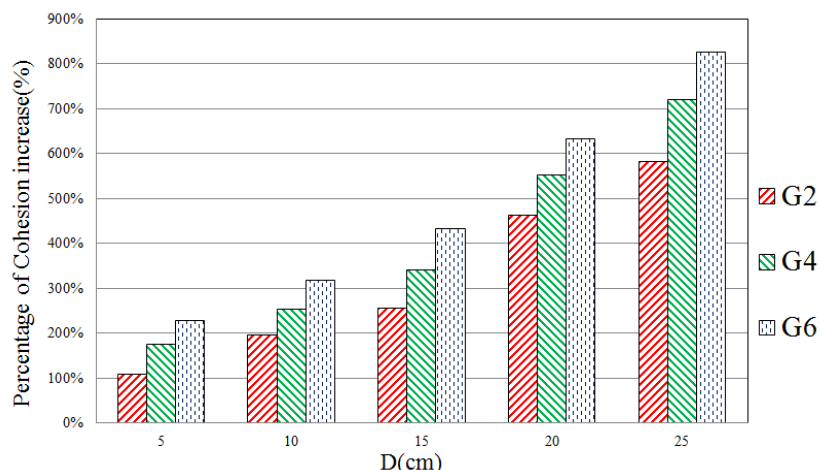
Fig. 9. Failure envelopes based on shear strength values for samples containing slag columns with and without coating

تنش نرمال متناظر ۳۲/۶۹ و ۶۵/۳۷ کیلوپاسکال دارند که این اختلاف تنش با زیاد شدن قطر ستون کمتر شده است و این اختلاف روند مقاومت برشی در قطر ۲۵ سانتی‌متری به کمترین حد می‌رسد. اما کماکان مقادیر حداکثر تنش برشی متفاوت است، ولی با توجه به مقیاس نمودارها و روند متفاوت تنش برشی اعمال شده به محیط ماسه- ستون سرباره‌ای و بررسی‌های بیشتر مشخص می‌گردد که این اختلاف روند مقاومتی بیشتر به خاطر کاهش شیب رسیدن به تنش برشی بیشینه است. همچنین برای بررسی پارامترهای مقاومت برشی، مقدار ماکزیمم تنش برشی در تنش نرمال وارد شده اهمیت دارد. از آنجا که مقدار زاویه اصطکاک داخلی با افزایش قطر ستون بیشتر می‌گردد لذا باید اختلاف بین تنش‌های برشی بیشینه همزمان با افزایش قطر ستون نیز زیادتر گردد. تغییر رفتار نمونه‌های حاوی ستون با قطر ۱۰ یا ۱۵ سانتی‌متر را می‌توان در بالا رفتن درصد مساحت ستون به مقدار ۲ برابر و در

محصور شده (G<sub>6</sub>) ۲۵ سانتی‌متری نسبت به نمونه مدل نشده ۸۲۴ درصد افزایش یافته است که افزایش قابل توجهی است. درصد افزایش چسبندگی در هر گروه از آزمایشات (G<sub>6</sub>، G<sub>4</sub>، G<sub>2</sub>) نسبت به ماسه در همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

تأثیر تراکم لایه‌های ژئوتکستایل مورد استفاده برای محصور کردن ستون‌های سرباره‌ای در نمودارهای تنش-کرنش (G<sub>6</sub>، G<sub>4</sub>، G<sub>2</sub>) در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه هر چه تراکم ژئوتکستایل‌ها بیشتر شود مقدار کشش قابل تحمل آن‌ها نیز بیشتر می‌شود، جذب انرژی و مقاومت در برابر تنش برشی نیز به دنبال آن بیشتر خواهد شد. در نگاه اول به نظر می‌رسد که مقدار تنش برشی نهایی و ماکزیمم ستون‌های سرباره‌ای با قطر ۵ و ۱۰ سانتی‌متری در تنش نرمال ۱۳۰/۷۴ کیلوپاسکال اختلاف زیادی نسبت به دو



شکل ۱۰. درصد افزایش چسبندگی (C kPa) هر گروه از آزمایشات (G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) نسبت به ماسه

Fig. 10. Percentage increase in adhesion (C kPa) of each group of tests (G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) compared to sand

پژوهش‌ها ارائه شده در ادامه داشته است.

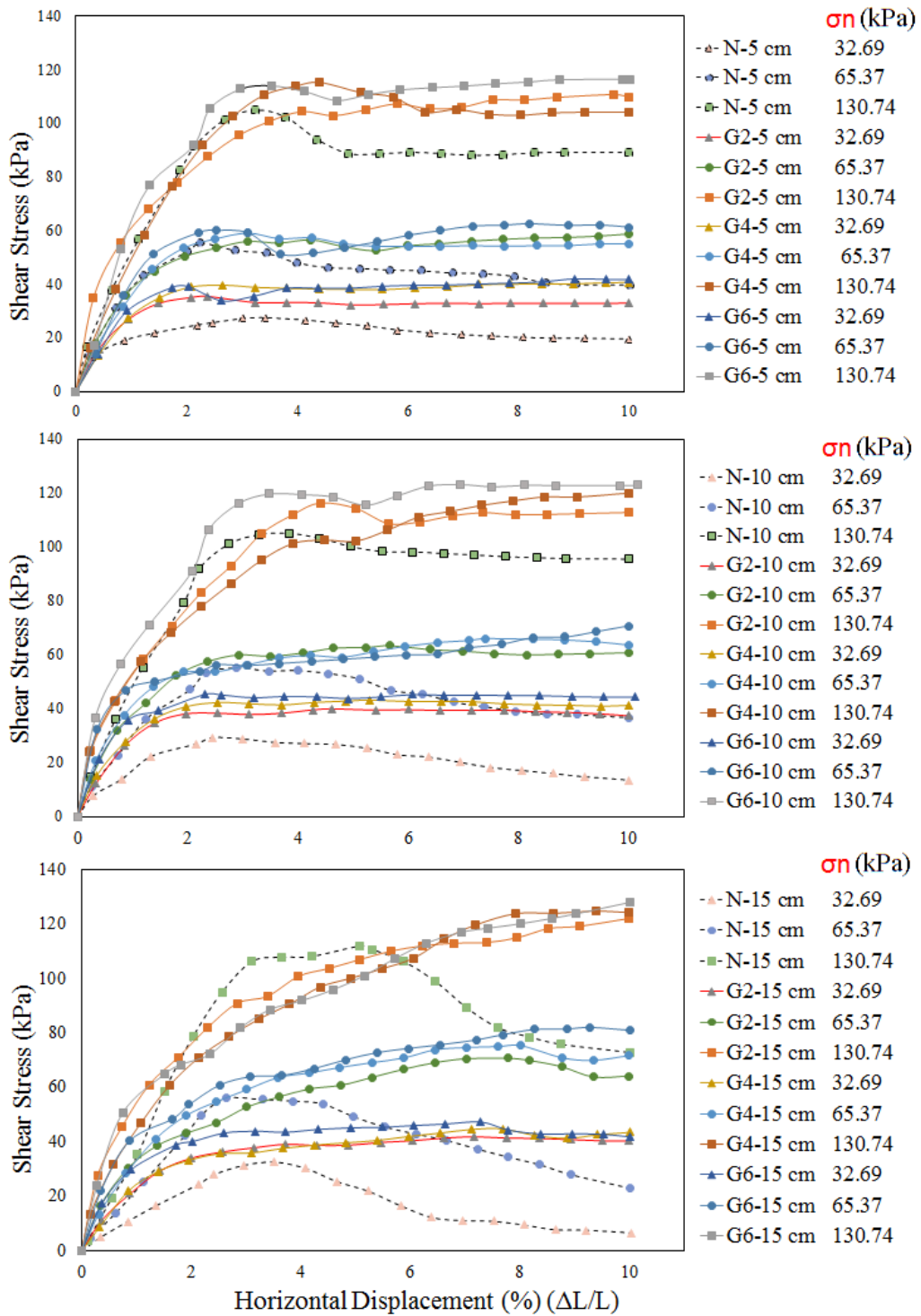
مورگسان و همکاران [۳۰] آزمایش‌هایی را برای بررسی ظرفیت بار برشی ستون‌های سنگی با و بدون پوشش ژئوستتیک را در دستگاه برش مستقیم انجام دادند. آزمایشات با نیروی برشی وارد بر خاک با ستون سنگی انجام شد. نتایج نشان دهنده بهبود کیفی سختی برشی ستون سنگی به دلیل پوشش ژئوستتیکی بود. شارما و همکاران [۳۱] در مورد تغییر پارامترهای برشی ماسه با مدل نمودن ستون سنگی در ماسه و تغییر چیدمان، همچنین تغییر جنس لایه محصور کننده ستون‌ها پژوهشی را انجام دادند که در این بررسی ستون بدون محصور شدگی (OGC) و ستون با ۳ نوع لایه محصور کننده شامل ژئوتکستایل (E1)، پارچه نازک (E2) و کاغذ (E3) مورد استفاده قرار گرفت. همانطور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است، در این پژوهش مشخص شد که مقدار چسبندگی محیط ماسه-ستون در یک گروه با تغییر جنس لایه محصور کننده تغییر خواهد کرد، ولی مقدار زاویه اصطکاک داخلی با تغییر جنس لایه محصور کننده ثابت خواهد ماند. همچنین نتایج نشان داد که مقدار تنش برشی بیشینه ماسه با ستون و لایه محصور کننده با پارچه به میزان ۵۶ درصد بیشتر از مقدار متناظر تنش برشی بیشینه در ستون بدون محصور شدگی و به میزان ۳۴ درصد بیشتر از مقدار متناظر در ستون بدون محصور شدگی در محیط ماسه است. همانطور که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است، مقدار تنش برشی

نتیجه افزایش سطح لایه محصور کننده ستون در صفحه برش دانست که این مقادیر به ترتیب برابر با ۴۳۹/۶ سانتی‌متر مربع برای قطر ۱۰ سانتی‌متر و ۶۵۹/۴ سانتی‌متر مربع برای قطر ۱۵ سانتی‌متر است.

مقایسه مقادیر نسبت مساحت ستون به مساحت جعبه برش (Ar) در برابر مقاومت برشی برای ستون‌های محصور شده و غیرمحصور شده گروه‌های (N، G<sub>2</sub>، G<sub>4</sub>، G<sub>6</sub>) در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این مورد ستون‌های محصور شده و غیرمحصور، نسبت حداکثر مقاومت برشی نمونه حاوی ستون سرباره‌ای با قطر ۲۵ سانتی‌متر به نمونه ماسه، بسته به مقدار تنش نرمال، حدود ۱/۳۳ تا ۱/۴۸ است. نتایج نمونه‌های مدل شده ستون‌های سرباره‌ای با پوشش ژئوستتیکی نشان می‌دهد که مقاومت برشی ماکزیم زمانی که قطر ستون از ۵ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش یافته، به طور قابل توجهی افزایش داشته است. مقاومت برشی ماکزیم نمونه حاوی ستون سرباره‌ای محصور شده G<sub>6</sub> به قطر ۲۵ سانتی‌متر ۷۴ درصد نسبت به نمونه ماسه افزایش یافته است. شکل ۱۴ درصد افزایش تنش ماکزیم نمونه گروه‌های (G<sub>2</sub>، G<sub>4</sub>، G<sub>6</sub>) را نسبت به تنش ماکزیم ماسه نشان می‌دهد.

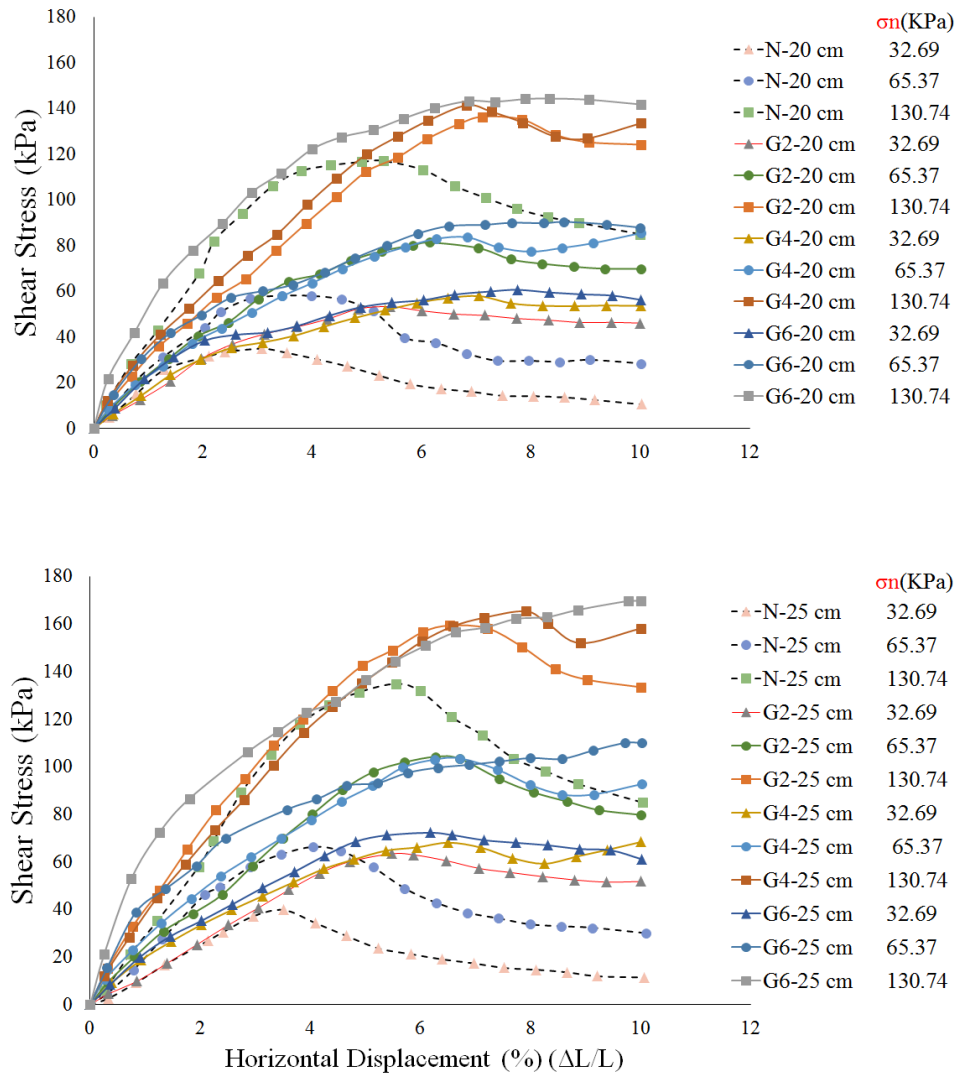
بنابراین مشخص گردید اثربخشی افزایش قطر ستون برای بهبود استحکام برشی جابه‌جایی بزرگ محیط‌های ماسه-ستون زمانی که از پوشش ژئوستتیک استفاده شد مطابقت خوبی با موارد گزارش شده در سایر





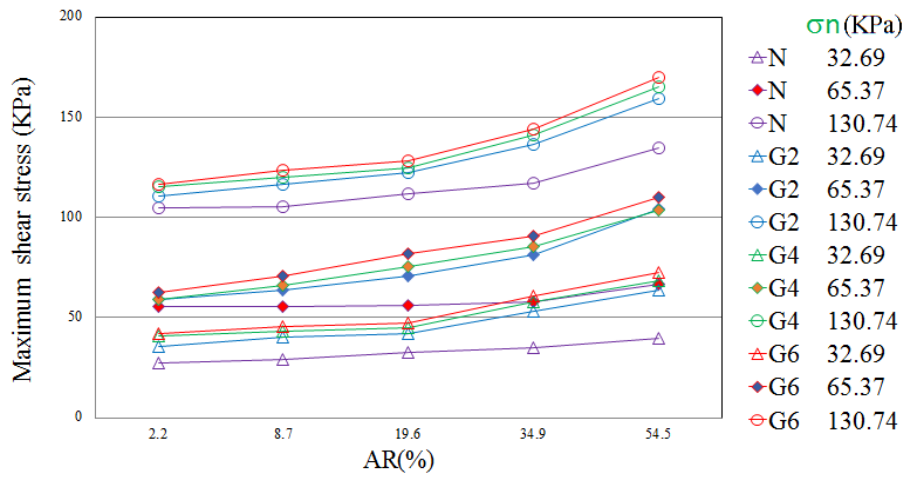
شکل ۱۱. نمودارهای تنش- کرنش گروه‌های  $N$ ,  $G_2$ ,  $G_4$ ,  $G_6$

Fig. 11. Stress-strain diagrams of groups  $N$ ,  $G_2$ ,  $G_4$ ,  $G_6$



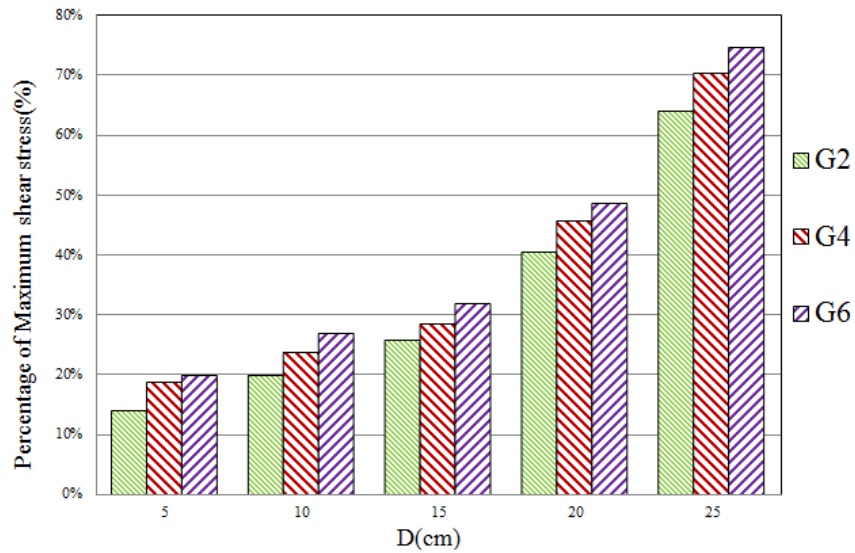
شکل ۱۲. نمودارهای تنش-کرنش گروه‌های  $N$ ,  $G_2$ ,  $G_4$ ,  $G_6$

Fig. 12. Stress-strain diagrams of groups  $N$ ,  $G_2$ ,  $G_4$ ,  $G_6$



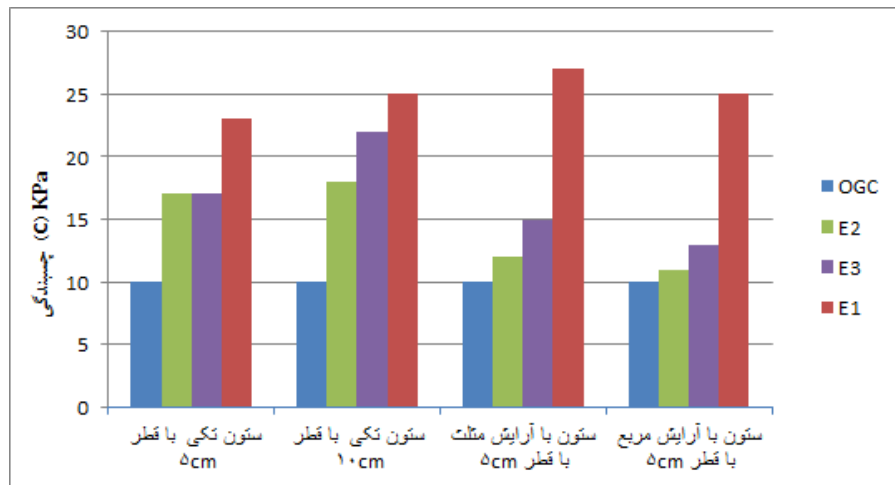
شکل ۱۳. مقایسه مقادیر "Ar" در برابر ماکزیمم مقاومت برشی برای ستون گروه‌های N, G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>

Fig. 13. Comparison of "Ar" against shear strength for columns of groups N, G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>



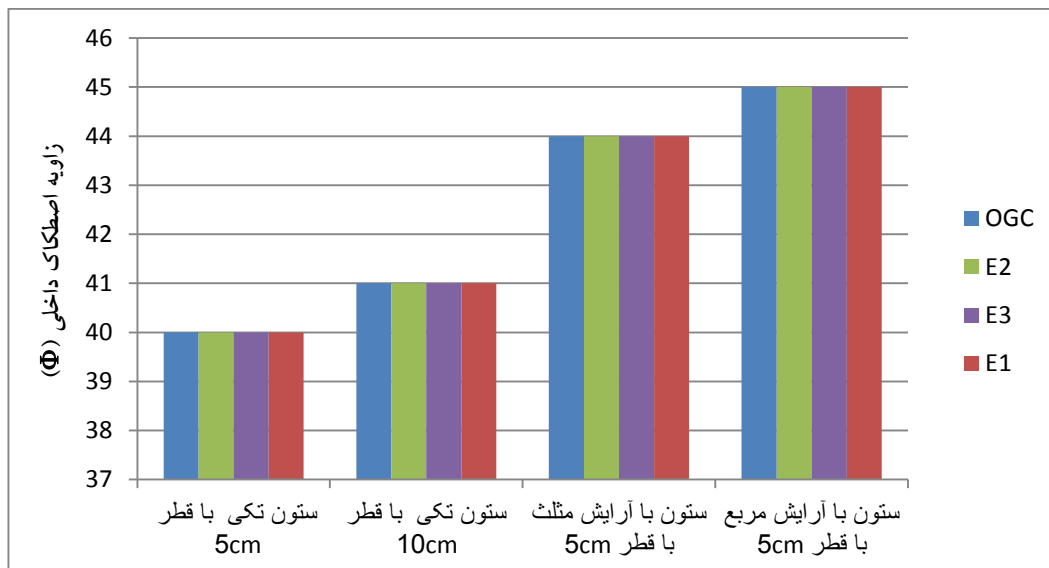
شکل ۱۴. درصد افزایش تنش ماکزیمم نمونه‌های گروه (G<sub>6</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>2</sub>) نسبت به تنش ماکزیمم ماسه

Fig. 14. Percentage increase of the maximum stress of group samples (G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) compared to the maximum stress of sand



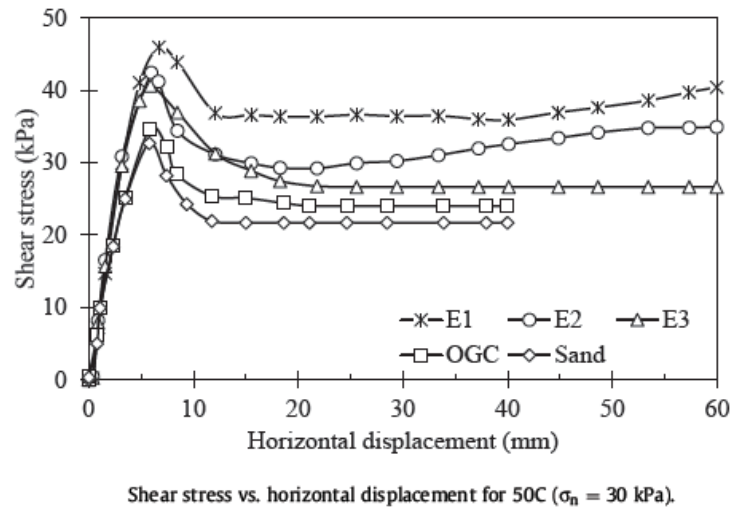
شکل ۱۵. مقایسه تغییر مقدار چسبندگی ستون با لایه‌های متفاوت محصور کننده و بدون آن با ماسه [۳۱]

Fig. 15. Comparison of the change in the cohesion of column with different encapsulating layers and without it with sand [31]



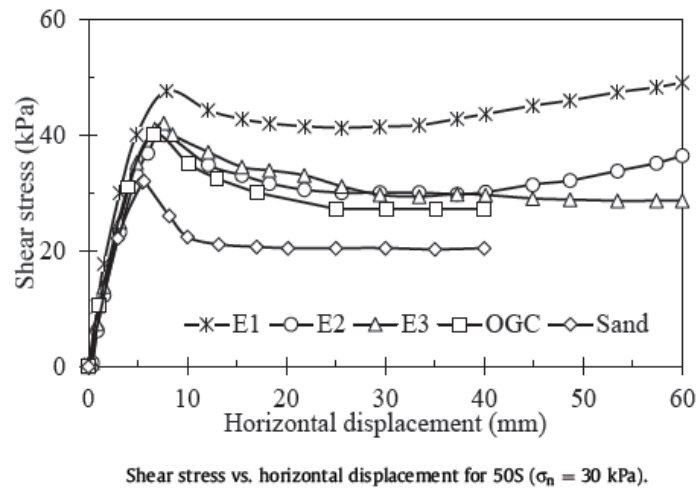
شکل ۱۶. مقایسه تغییر مقدار زاویه اصطکاک داخلی ستون با لایه‌های متفاوت محصور کننده و بدون آن با ماسه [۳۱]

Fig. 16. Comparison of the change in the internal friction angle of the column with different enclosing layers and without it with sand [31]



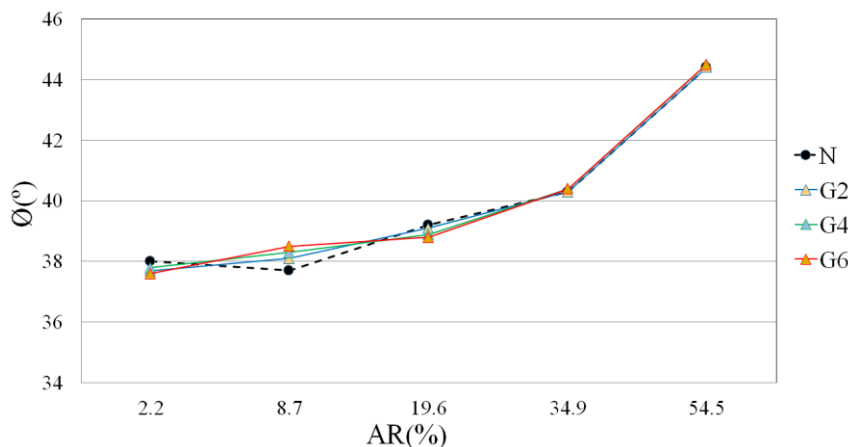
شکل ۱۷. مقایسه نمودار تنش- کرنش ستون تک با لایه‌های متفاوت محصور کننده و بدون آن با ماسه [۳۱]

Fig. 17. Comparison of the stress-strain diagram of a single column with and without different enclosing layers with sand [31]



شکل ۱۸. مقایسه نمودار تنش- کرنش ستون‌ها (آرایش مربعی) با لایه‌های متفاوت محصور کننده و بدون آن با ماسه [۳۱]

Fig. 18. Comparison of the stress-strain diagram of columns (square layout) with different enclosing layers and without it with sand [31]



شکل ۱۹. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی محیط ستون سرباره‌ای-ماسه گروه‌های (N, G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) با نسبت جایگزینی (Ar)

Fig. 19. Variations of the internal friction angle of the slag-sand column environment of groups (N, G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) with the replacement ratio (Ar)

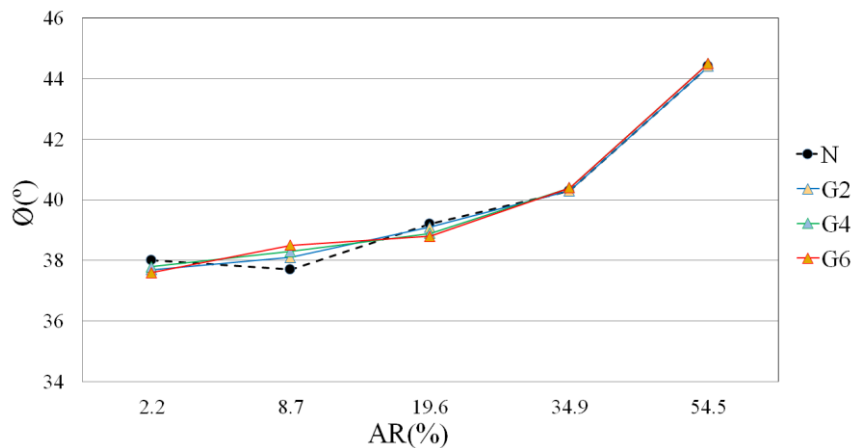
داخلی به اندازه ۴ درجه مشاهده می‌شود. در نمونه‌های فاقد ژئوسنتتیک، با افزایش قطر نمونه تاثیر زاویه اصطکاک بیشتر می‌گردد، در حقیقت با افزایش قطر، مقدار مصالح درشت‌دانه در سطح برش افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش زاویه اصطکاک در توده خاک و ستون می‌شود.

شکل ۲۰ مقدار چسبندگی محیط ماسه-ستون سرباره‌ای را در مقابل نسبت جایگزینی مساحت (Ar) برای گروه‌های (N, G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) در سطوح مختلف تنش نرمال نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است در محیط ماسه-ستون سرباره‌ای بدون پوشش ژئوسنتتیکی (N) ماکزیمم مقدار چسبندگی ۵/۵۹ می‌باشد که نسبت به نمونه Ar برابر با ۲/۲٪ به میزان ۲/۶ کیلوپاسکال افزایش یافته است. در حقیقت ستون بدون محصور شدگی با اضافه شدن قطر تاثیر زیادی در چسبندگی ندارد. در محیط ستون سرباره‌ای- ماسه با پوشش ژئوسنتتیکی (G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) با افزایش Ar از ۲/۲٪ به ۵۴/۵٪ که به ترتیب مربوط به قطر ستون ۵ و ۲۵ سانتی‌متر است، افزایش چسبندگی تصاعدی بوده که شیب این روند از Ar برابر با ۱۹/۶٪ تا ۵۴/۵٪ افزایش یافته است. همچنین شیب روند افزایش چسبندگی در گروه G<sub>2</sub> از Ar برابر ۳۴/۹٪ تا ۵۴/۵٪ کمتر از گروه‌های G<sub>4</sub> و G<sub>6</sub> است که این موضوع مربوط به مقدار نیروی کشش کمتر ژئوتکستایل گروه G<sub>2</sub> نسبت به ژئوتکستایل گروه‌های G<sub>4</sub> و G<sub>6</sub> است.

بیشینه محیط ماسه- ستون بدون محصور شدگی نسبت به ماسه خالص به میزان ۱۴ درصد بیشتر است. نتایج این پژوهش در خصوص تغییرات مقادیر چسبندگی و اصطکاک داخلی در این پژوهش با نتایج پژوهش‌های گذشته ارائه شده در اینجا مطابقت خوبی دارد. به صورتی که در این مقاله نیز به این نتیجه رسیده شد که تراکم لایه محصور شده در مقدار زاویه اصطکاک داخلی تاثیر نداشته و در افزایش یا کاهش مقدار چسبندگی و تنش‌های برشی بیشینه موثر است.

در واقع پوشش ژئوسنتتیکی، مصالح داخل ستون را احاطه کرده و باعث می‌شود که ستون سرباره‌ای مانند یک شمع نیمه صلب عمل کند و انسجام بیشتر را باعث شود که منجر به افزایش مقاومت برشی محیط ماسه- ستون می‌گردد. می‌توان گفت که افزایش مقاومت برشی ممکن است به نیروهای کششی ایجاد شده در ژئوتکستایل نسبت داده شود.

شکل ۱۹ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی را برای ستون‌های محصور شده گروه‌های (N, G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) با نسبت جایگزینی (Ar) را نشان می‌دهد، که به عنوان نسبت بین مساحت ستون سرباره فولادی و منطقه بارگذاری شده عمودی تعریف می‌شود. همانطور که نشان داده شده است، چسبندگی با افزایش Ar از ۰ به ۴۴/۵ درجه افزایش می‌یابد. هنگامی که "Ar" از ۳۵ به ۵۴/۵ افزایش یابد، افزایش قابل توجهی در زاویه اصطکاک



شکل ۲۰. تغییرات مقدار چسبندگی محیط ستون سرباره‌ای-ماسه گروه‌های (N, G<sub>۲</sub>, G<sub>۴</sub>, G<sub>۶</sub>) با نسبت جایگزینی (Ar)

Fig. 20. Changes in the cohesion value of the slag-sand column environment of groups (N, G<sub>2</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>6</sub>) with the replacement ratio (Ar)

ستون از ۲۰ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش می‌یابد بیشتر مشخص می‌شود. کرنش برشی مربوط به تنش برشی ماکزیمم با افزایش قطر ستون نیز افزایش می‌یابد.

۳- پوشش ژئوسنتتیک تنش برشی ماکزیمم و کرنش برشی مربوط به آن را افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها، هم در پیک و هم در جابه‌جایی زیاد به دلیل افزایش قطر ستون در نمونه‌های حاوی ستون محصور شده با ژئوتکستایل نسبت به نمونه‌های بدون پوشش ژئوسنتتیک بیشتر است. مقاومت برشی ستون سرباره‌ای محصور شده با ژئوسنتتیک با افزایش کرنش برشی افزایش می‌یابد. تأثیر پوشش ژئوسنتتیک در سطح تنش نرمال کم بسیار چشمگیر است.

۴- با افزایش قطر ستون، زاویه اصطکاک داخلی در هر دو مورد ستون سرباره فولادی با پوشش ژئوسنتتیک و ستون سرباره فولادی بدون پوشش ژئوسنتتیک افزایش یافت. در نمونه‌های حاوی ستون‌های سرباره‌ای بدون پوشش، چسبندگی تقریباً ثابت است. همچنین چسبندگی در ستون سرباره فولادی با پوشش ژئوسنتتیک با افزایش قطر ستون افزایش یافته است.

۵- چسبندگی ستون سرباره فولادی با روکش ژئوسنتتیک با افزایش Ar از ۲/۲ به ۵۴/۵٪ افزایش می‌یابد. هنگامی که Ar از ۳۵ به ۵۴/۵٪ افزایش یابد، افزایش قابل توجهی در زاویه اصطکاک داخلی مشاهده می‌شود. به طور کلی، تنش برشی ستون سرباره فولادی با پوشش ژئوسنتتیک بیشتر

## ۶- نتیجه‌گیری

استفاده از ضایعات صنعتی در کاربردهای مهندسی عمران به عنوان مصالح ساختمانی مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست است. این مطالعه بر روی استفاده از مواد سرباره فولادی به عنوان مصالح ستون‌های دانه‌ای برای بهبود ماسه‌های سست متمرکز شده است. از سوی دیگر، اثرات خواص مصالح ستون، قطر ستون و پوشش ژئوسنتتیک بر ظرفیت بار جانبی محیط ماسه-ستون سرباره‌ای بررسی شد. در این مطالعه، آزمایشات برش مستقیم سایز بزرگ برای بررسی پاسخ محیط‌های ماسه-ستون سرباره‌ای با مدل‌های مختلف پوشش ژئوسنتتیک و بدون آن تحت شرایط بارگذاری جانبی انجام شد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته نتایج زیر به دست آمده است:

۱- همانطور که از نتایج این تحقیق مشخص شده است استفاده از سرباره در ستون سنگی باعث بیشتر شدن پارامترهای مقاومت برشی شده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی را بالا خواهد برد. سرباره استفاده شده در این تحقیق از ضایعات کارخانه‌های فولادسازی است. این مصالح در صورتی که جایگزین مصالح سنگی گردد از نظر محیط زیست بسیار مناسب می‌باشد چرا که باعث مصرف شدن ضایعات و پسماند کارخانجات صنعتی خواهد شد.

۲- افزودن ستون سرباره فولادی در ماسه منجر به افزایش قابل توجه تنش برشی ماکزیمم در هر سطح تنش نرمال می‌شود. این اثر زمانی که قطر

باشد و هر چه تراکم بیشتر شود این روند افزایش، شیب کندتری خواهد داشت، بنابراین با توجه به نتایج پیشنهاد می‌گردد در پروژه‌ها از ژئوتکستایل با تراکم کمتر برای محصور شدن ستون استفاده گردد.

۱۱- وجود ستون سرباره‌ای باعث بالا بردن زاویه اصطکاک داخلی می‌شود و لایه محصور کننده در روند این پارامتر تاثیر چندانی ندارد بلکه باعث افزایش انسجام سنگدانه‌های ستون و بیشتر شدن پارامترهای مقاومت برشی می‌گردد.

## ۷- فهرست علائم

- $\sigma_n$ : تنش نرمال
- $\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی
- C: چسبندگی
- $D_r$ : دانسیته نسبی
- $A_r$ : مساحت نسبی ستون به سطح کل

## منابع

- [1] J. Patricio, Y. Kalmykova, L. Rosado, A method and databases for estimating detailed industrial waste generation at different scales—with application to biogas industry development, *Journal of Cleaner Production*, 246 (2020) 118959.
- [2] M. Salehi, M. Bayat, M. Saadat, M. Nasri, Experimental study on mechanical properties of cement-stabilized soil blended with crushed stone waste, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(6) (2021) 1974-1984.
- [3] A.A. Ashango, N.R. Patra, Behavior of expansive soil treated with steel slag, rice husk ash, and lime, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7) (2016) 06016008.
- [4] H.M. Jafer, W. Atherton, M. Sadique, F. Ruddock, E. Loffill, Development of a new ternary blended cementitious binder produced from waste materials for use in soft soil stabilisation, *Journal of Cleaner Production*, 172 (2018) 516-528.
- [5] M. ShahriarKian, S. Kabiri, M. Bayat, Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(2) (2021) 1-11.
- از ستون‌های سرباره فولادی بدون محصور شدگی است. تفاوت بین مقاومت برشی ستون‌های محصور شده و ستون‌های غیرمکوش در مقادیر بالای تنش معمولی بیشتر آشکار می‌شود.
- ۶- وارد شدن سرباره فولادی به عنوان ستون در محیط ماسه منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود. وقتی قطر ستون بیش از ۲۰ سانتی‌متر (یا  $A_r$  بزرگتر از ۳۴/۹٪) باشد، ستون سرباره‌ای اثرات قوی‌تری دارد. پوشش ژئوستتیک منجر به افزایش بیشتر مقاومت برشی می‌شود. زاویه اصطکاک کلی محیط‌های ماسه-ستون دانه‌ای با افزایش قطر ستون افزایش می‌یابد که تقریباً مستقل از پوشش ژئوستتیکی است. انسجام کلی محیط‌های ماسه-ستون دانه‌ای بدون پوشش ژئوستتیک تقریباً ثابت است. با این حال، به دلیل افزایش قطر ستون زمانی که ستون دانه‌ای با ژئوستتیک پوشانده می‌شود، افزایش می‌یابد. به طور کلی، مقاومت برشی ستون‌های سرباره‌ای روکش‌دار ژئوستتیکی بیشتر از ستون‌های دانه‌ای غیرمکوش‌دار است. تفاوت در مقاومت برشی نمونه‌های با پوشش ژئوستتیک و بدون آن تحت تنش نرمال بالا بیشتر است.
- ۷- تغییر در تراکم لایه ژئوتکستایل به عنوان عنصر محصور کننده ستون سرباره‌ای در افزایش یا کاهش مقدار تنش برشی ماکزیمم و چسبندگی تاثیر مستقیم دارد به معنای دیگر با افزایش تراکم در لایه‌های محصور کننده ستون افزایش تنش برشی و مقدار چسبندگی را در مقادیر متناظر  $A_r$  می‌بینیم ولیکن در مقدار زاویه اصطکاک داخلی ماسه در مقادیر متناظر با دیگر لایه‌های محصور کننده تاثیر بسیار کم و ناچیزی دارد.
- ۸- تنش برشی ماسه هنگامی که با ستون‌های محصور شده تقویت شده است بعد از تنش ماکزیمم افت زیادی نخواهد داشت و با شیب بسیار ملایم تنش برشی را در کرنش‌های بالاتر تحمل می‌کند در صورتی که وقتی ماسه با ستون‌های بدون محصور شدگی تقویت شد بعد از مرحله تنش برشی ماکزیمم افت تنش برشی با شیب زیادی همراه است.
- ۹- با توجه به نتایج مشخص گردید که صرف محصور کنندگی برای بالا بردن پارامترهای ژئوتکنیکی بسیار موثر است و این خود باعث بهتر شدن پاسخ خاک به نیروهای برشی وارد شده است همچنین باعث عدم گرفتگی در ستون می‌گردد و سبب جلوگیری از نفوذ ذرات ریز خاک در ستون سنگی می‌شود، اضافه بر این انسجام ستون سنگی را بالا برده و باعث افزایش پارامترهای مقاومت برشی می‌گردد.
- ۱۰- بررسی نتایج نشان می‌دهد که صرف محصور شدگی ستون در محیط خاک می‌تواند تاثیر بسیار زیادی در بالا بردن مقدار بیشینه تنش داشته



- wearing courses with electric arc furnace slag aggregates. *Waste Management & Research*, 27(3) (2009) 288-294.
- [17] J. O'Connor, T.B.T. Nguyen, T. Honeyands, B. Monaghan, D. O'Dea, J. Rinklebe, A. Vinu, S.A. Hoang, G. Singh, M. Kirkham, Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. *Journal of Hazardous Materials*, (2021) 126478.
- [18] C. Shi, Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of materials in civil engineering*, 16(3) (2004) 230-236.
- [19] H. Kumar, S. Varma, A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2) (2021) 232-242.
- [20] M. Rezaei-Hosseinabadi, M. Bayat, B. Nadi, A. Rahimi, Utilisation of steel slag as a granular column to enhance the lateral load capacity of soil. *Geomechanics and Geoengineering*, (2021) 1-11.
- [21] H. Poh, G.S. Ghataora, N. Ghazireh, Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. *Journal of materials in Civil Engineering*, 18(2) (2006) 229-240.
- [22] W. Shen, M. Zhou, W. Ma, J. Hu, Z. Cai, Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material. *Journal of hazardous materials*, 164(1) (2009) 99-104.
- [23] I. Akinwumi, J. Adeyeri, O. Ejohwomu, Effects of steel slag addition on the plasticity, strength, and permeability of lateritic soil. in: *ICSDEC 2012: Developing the Frontier of Sustainable Design, Engineering, and Construction*, 2013, pp. 457-464.
- [24] J. Wu, Q. Liu, Y. Deng, X. Yu, Q. Feng, C. Yan, Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. *Soils and Foundations*, 59(4) (2019) 955-965.
- [25] L. Lang, C. Song, L. Xue, B. Chen, Effectiveness of waste steel slag powder on the strength development and associated micro-mechanisms of cement-stabilized dredged sludge. *Construction and Building Materials*, 240 (2020) 117975.
- [6] A. Sharma, R.K. Sharma, Strength and drainage characteristics of poor soils stabilized with construction demolition waste. *Geotechnical and Geological engineering*, 38 (2020) 4753-4760.
- [7] R. Sharma, Utilization of FLY ash and waste ceramic in improving characteristics of clayey soil: a laboratory study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38 (2020) 5327-5340.
- [8] K.S. Wani, B. Mir, Stabilization of weak dredged soils by employing waste boulder crusher dust: a laboratory study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(6) (2020) 6827-6842.
- [9] D. Yang, A. Sasaki, M. Endo, Reclamation of a waste arsenic-bearing gypsum as a soil conditioner via acid treatment and subsequent Fe (II) As stabilization. *Journal of Cleaner Production*, 217 (2019) 22-31.
- [10] T. Zhang, S. Liu, H. Zhan, C. Ma, G. Cai, Durability of silty soil stabilized with recycled lignin for sustainable engineering materials. *Journal of Cleaner Production*, 248 (2020) 119293.
- [11] S.C. Bostanci, Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 251 (2020) 119785.
- [12] D. Foti, Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 96 (2013) 396-404.
- [13] M. Jalal, N. Nassir, H. Jalal, Waste tire rubber and pozzolans in concrete: a trade-off between cleaner production and mechanical properties in a greener concrete. *Journal of Cleaner Production*, 238 (2019) 117882.
- [14] F. Mahdi, H. Abbas, A.A. Khan, Flexural, shear and bond strength of polymer concrete utilizing recycled resin obtained from post consumer PET bottles. *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 798-811.
- [15] K.G. Tonet, J.P. Gorninski, Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Construction and building materials*, 40 (2013) 378-389.
- [16] F. Kehagia, Skid resistance performance of asphalt

- numerical and analytical studies, *Geosynthetics international*, 20(4) (2013) 252-262.
- [37] S. Aryal, P. Kolay, Long-term durability of ordinary Portland cement and polypropylene fibre stabilized kaolin soil using wetting–drying and freezing–thawing test, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(1) (2020) 1-15.
- [38] S.K. Dash, M.C. Bora, Influence of geosynthetic encasement on the performance of stone columns floating in soft clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 50(7) (2013) 754-765.
- [39] J. Jayarajan, R. Karpurapu, Settlement analysis of geosynthetic encased granular column treated soft clay deposits, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(5) (2020) 473-489.
- [40] S. Murugesan, K. Rajagopal, Model tests on geosynthetic-encased stone columns, *Geosynthetics International*, 14(6) (2007) 346-354.
- [41] K. Deb, S. Shiyamala, Effect of clogging on rate of consolidation of stone column–improved ground by considering particle migration, *International Journal of Geomechanics*, 16(1) (2016) 04015017.
- [42] S. Pal, K. Deb, Postearthquake reconsolidation settlement of stone column-treated liquefiable sand, *International Journal of Geomechanics*, 20(10) (2020) 04020183.
- [43] S. Pal, K. Deb, Filtration performance of geotextile encasement to minimize the clogging of stone column during soil liquefaction, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3) (2021) 771-788.
- [44] M.S. Almeida, I. Hosseinpour, M. Riccio, D. Alexiew, Behavior of geotextile-encased granular columns supporting test embankment on soft deposit, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(3) (2015) 04014116.
- [45] J. Jayarajan, R. Karpurapu, Bearing capacity and settlement response of ordinary and geosynthetic encased granular columns in soft clay soils: analysis and design charts, *Indian Geotechnical Journal*, 51(2) (2021) 237-253.
- [26] C. Cengiz, I.E. Kilic, E. Guler, On the shear failure mode of granular column embedded unit cells subjected to static and cyclic shear loads, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2) (2019) 193-202.
- [27] C. Cengiz, E. Guler, Sample preparation method for large scale shear testing of soft-clay and granular-column composites, *MethodsX*, 7 (2020) 100939.
- [28] S.-H. Chong, J.-Y. Kim, Nonlinear vibration analysis of the resonant column test of granular materials, *Journal of Sound and Vibration*, 393 (2017) 216-228.
- [29] I. Hosseinpour, M. Almeida, M. Riccio, Full-scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns, *Geosynthetics International*, 22(6) (2015) 428-438.
- [30] S. Murugesan, K. Rajagopal, Shear load tests on stone columns with and without geosynthetic encasement, *Geotechnical Testing Journal*, 32(1) (2009) 76-85.
- [31] S.R. Mohapatra, K. Rajagopal, J. Sharma, Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3) (2016) 396-405.
- [32] K.-H. Xie, M.-M. Lu, A.-F. Hu, G.-H. Chen, A general theoretical solution for the consolidation of a composite foundation, *Computers and Geotechnics*, 36(1-2) (2009) 24-30.
- [33] I. Hosseinpour, C. Soriano, M.S. Almeida, A comparative study for the performance of encased granular columns, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2) (2019) 379-388.
- [34] E.R. Orekanti, G.V. Dommaraju, Load-settlement response of geotextile encased laterally reinforced granular piles in expansive soil under compression, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(3) (2019) 1-8.
- [35] P. Verma, A. Sahu, Effect of grouted granular column on the load carrying capacity of the expansive soil, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3) (2019) 2606-2612.
- [36] M. Almeida, I. Hosseinpour, M. Riccio, Performance of a geosynthetic-encased column (GEC) in soft ground:

- of single and group of geosynthetic encased stone columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1) (2010) 129-139.
- [52] C. Yoo, S.-B. Kim, Numerical modeling of geosynthetic-encased stone column-reinforced ground. *Geosynthetics International*, 16(3) (2009) 116-126.
- [53] E.A. Oluwasola, M.R. Hainin, M. Aziz, Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*, 2 (2015) 47-55.
- [54] A.B. Cerato, A.J. Lutenege, Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands. *Geotechnical Testing Journal*, 29(6) (2006) 507-516.
- [55] A. Fakhimi, H. Hosseinpour, Experimental and numerical study of the effect of an oversize particle on the shear strength of mined-rock pile material. *Geotechnical Testing Journal*, 34(2) (2011) 131-138.
- [56] A.D. Orlando, D.M. Hanes, H.H. Shen, Scaling effects in direct shear tests. in: *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, (2009) 413-416.
- [46] M. Ghazavi, A.E. Yamchi, J.N. Afshar, Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(3) (2018) 312-318.
- [47] G. Araujo, E. Palmeira, R. Cunha, Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil. *Geosynthetics International*, 16(6) (2009) 433-451.
- [48] Y.-S. Hong, C.-S. Wu, Y.-S. Yu, Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1) (2016) 13-27.
- [49] I. Hosseinpour, M. Riccio, M.S. Almeida, Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(4) (2014) 363-373.
- [50] M. Khabbazian, V. Kaliakin, C. Meehan, Numerical study of the effect of geosynthetic encasement on the behaviour of granular columns. *Geosynthetics International*, 17(3) (2010) 132-143.
- [51] S. Murugesan, K. Rajagopal, Studies on the behavior

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. J. Rezaei Hoseinabadi, M. Bayat, B. Nadi, A. Rahimi, *The use of steel waste as granular stone materials in stone columns along with geotextile in the direction of sustainable development, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4615-4638.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.20884.7561



