



Laboratory Evaluation of CBR Values in Geopet-Reinforced Sandy Soils: Modeling with the RSM Method

Mohammad Reza Karami¹, Mohsen Keramati^{1*}, Mostafa Ebrahimi¹, Hossein Moradi Moghaddam², Reza Maadi³

¹ Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

³ Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT: The increasing production of solid waste has become an international concern for engineers. One effective approach to addressing this issue is the reuse of solid waste for the improvement of construction sites and loose soils. Among the methods of soil reinforcement or stabilization is the use of polyethylene terephthalate (PET) and fly ash (FA), both of which are derived from industrial and urban waste. In this study, the California Bearing Ratio (CBR) test was conducted on both unreinforced and reinforced sands from Bandar Anzali, using Geopet with mesh sizes of 1×1, 2×2, and 3×3 cm. The sands were also stabilized with fly ash at weight percentages of 5%, 10%, and 15%, with sodium hydroxide as a fly ash activator. Additionally, in the current analysis, the Response Surface Methodology (RSM) was employed to determine the significant relationships between the percentage of fly ash, Geopet layers, and their interactions on CBR. Ultimately, RSM was used to evaluate CBR in a consistent and efficient manner in this study. The P-value in the applied model is less than 0.0001, indicating the model's effectiveness. The results show that the optimal scenario involves the use of Geopet with a mesh size of 1×1 cm combined with 15% fly ash, in which the CBR value increased by 2.7 times compared to the unreinforced condition.

Review History:

Received: Sep. 07, 2022

Revised: Aug. 11, 2024

Accepted: Sep. 14, 2024

Available Online: Oct. 03, 2024

Keywords:

Bandar Anzali Sand

Geopet

Fly Ash

California Bearing Ratio (CBR)

Response Surface Methodology (RSM)

1- Introduction

Various mechanical methods and natural or synthetic materials are available to improve soil behavior, with the selection depending on factors such as environmental considerations, economic viability, and structural aspects [1]. One method of soil improvement is reinforcement using fibers and filaments. Since the disposal of plastic waste without harming the ecosystem has become increasingly challenging [2], the reuse of polyethylene terephthalate (PET) waste in soil stabilization can significantly reduce its environmental impact [3, 4]. Increasing the soil's bearing capacity using natural or synthetic fibers is a suitable approach for soil reinforcement and improvement [5]. Plastic, as a synthetic fiber, has been consistently used for soil reinforcement.

To evaluate the obtained response expressed through various parameters, researchers utilize a mathematical model [6, 7]. Branches of Design of Experiments (DOE) aim to create a precise experimental design using a set of mathematical and statistical techniques. In recent years, Response Surface Methodology (RSM) has been actively applied to engineering problems and is considered a key component of DOE [8]. By integrating mathematics and statistics, RSM not only reflects the outcomes derived from various experiments but also visualizes the correlation effects

between variables through 3D plots. The assessment of the mechanical properties of soil and concrete has thoroughly confirmed the efficiency of this method [9, 10]. Ultimately, RSM has been selected to evaluate the California Bearing Ratio (CBR) of soils stabilized with fly ash and Geopet.

2- Materials and Methods

2- 1- Geopet

PET (Polyethylene Terephthalate) is the most common form of plastic waste found on land. It is essentially a polyester polymer with a transparent surface, resistant to chemicals, easily producible, and economically viable [11]. In this study, Geopet sheets with mesh sizes of 1×1, 2×2, and 3×3 cm² and a thickness of 0.8 mm were used. The PET sheets were produced in rolls at a manufacturing plant, and then Geopet sheets were cut using laser cutting equipment with an accuracy of 0.1 mm, as shown in Figure 1.

2- 2- Sample Preparation

The CBR test was conducted on soil with moisture content below the optimum level. The soil was compacted in four layers, with each layer compacted to 70% of the dry density to ensure the total mass of the soil in the mold reached a specified volume. After compacting each layer, a

*Corresponding author's email: keramati@sharoodut.ac.ir



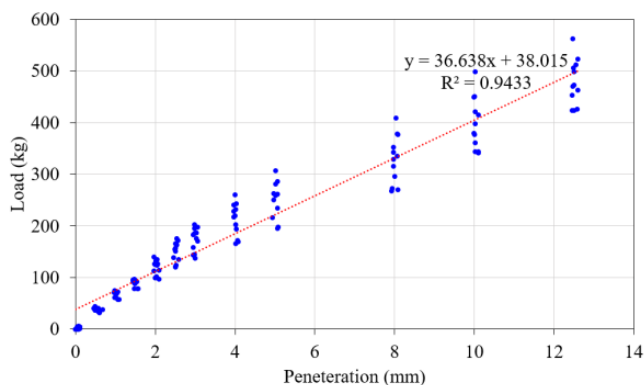


Fig. 1. Relationship between penetration and bearing capacity ($R^2 = 0.94$)

plastic sheet was horizontally placed within the sample. The diameter of the plastic sheet was slightly smaller than that of the sample. All unreinforced and reinforced samples were subjected to rupture at a strain level of 15% with a strain rate of 0.5% per hour. Modifications were made for permeability and membrane strength, cell swelling, and cross-sectional area. Geogrid with dimensions of 1×1, 2×2, and 3×3 cm² was used in three layers at different heights.

3- Discussion and Results

The results indicated that an increase in the penetration of the steel plunger into the soil leads to increased tensile force; initially, there is a sharp increase (up to about 4 mm of penetration), after which the slope of the load-penetration curves gradually decreases beyond 4 mm of penetration. This behavior reflects the gradual penetration of the plunger into the soil. The load-penetration curves demonstrate that the use of Geopet prevents the failure of the samples by restricting the movement of soil particles. As the load penetrates the soil surface, the Geopet layers in the sand are gradually subjected to tensile stress, and due to the stiffness of Geopet, the layers deform and apply an upward force to support the load. This mutual loading (by the steel plunger and Geopet) causes greater interlocking of soil particles with the Geopet apertures. Moreover, the tension in the Geopet layers shows that their resistance to the applied load has been mobilized. Table 1 presents the CBR values of various soil samples.

4- Conclusion

Curing for seven days resulted in an increase in penetration strength with longer curing times. This allowed the internal reactions within the material to progress further, enhancing the strength of the samples. Additionally, over time, the water within the geopolymer gradually evaporates, leading to the collapse of capillary pores and the formation of a denser structure, which increases compressive strength and subsequently improves CBR values. As the results indicate, the CBR of the uncured sample under similar conditions was

Table 1. CBR Values of Reinforced and Unreinforced Soil

CBR Value			Sample
10.54			Unreinforced Soil
One Layer of Geopet			Reinforced Soil
Size of Aperture (cm ²)			
3x3	2x2	1x1	
11.89	12.69	13.69	
two Layers of Geopet			
Size of Aperture (cm ²)			
3x3	2x2	1x1	
13.5	13.98	14.99	
three Layers of Geopet			
Size of Aperture (cm ²)			
3x3	2x2	1x1	
13.96	15.29	16.2	

15.3% lower.

The mathematical models based on RSM (Response Surface Methodology) demonstrated a strong correlation with the experimental findings. These results provide clear evidence that the proposed approach for estimating the CBR of soil stabilized with fly ash and Geopet is promising and highly valuable.

References

- [1] H. Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental evaluation of the effects of structural parameters, installation methods and soil density on the micropile bearing capacity, *International Journal of Civil Engineering*, (2021) 1313-1325.
- [2] M.I. Hoque, M. Hasan, S.D. Datta, Effect of waste plastic strip on the shear strength and permeability characteristics of black cotton soil, *J. Appl. Sci. Eng*, 27 (2023) 2019-2028.
- [3] A. Chandra, S. Siddiqua, Sustainable utilization of chemically depolymerized polyethylene terephthalate (PET) waste to enhance sand-bentonite clay liners, *Waste Management*, 166 (2023) 346-359.
- [4] T.G.L. Bikoko, J.C. Tchamba, N.K.F. Gildas, S. Amziane, Assessing the mechanical and durability properties of recycled polyethylene terephthalate (PET) plastic soil, in: *International Conference on Bio-Based Building Materials*, Springer, (2023) 3-13.
- [5] M. Maher, Y. Ho, Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8) (1994) 1381-1393.
- [6] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC

- reinforced with hybrid steel micro-fibers, *Construction and Building Materials*, 66 (2014) 375-383.
- [7] M. Romagnoli, P. Sassatelli, M.L. Gualtieri, G. Tari, Rheological characterization of fly ash-based suspensions, *Construction and Building Materials*, 65 (2014) 526-534.
- [8] F. Sabbaqzade, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, P. Hamidian, Evaluation of the mechanical behaviour of cement-stabilised collapsible soils treated with natural fibres, *Geomechanics and Geoengineering* (2021).1-16.
- [9] X. Long, L. Cai, W. Li, RSM-based assessment of pavement concrete mechanical properties under joint action of corrosion, fatigue, and fiber content, *Construction and Building Materials*, 197 (2019) 406-420.
- [10] H.M. Moghaddam, A. Fahimifar, T. Ebadi, M. Keramati, S. Siddiqua, Assessment of leachate-contaminated clays using experimental and artificial methods, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2024).
- [11] I. Aghayan, R. Khafajeh, Recycling of PET in asphalt concrete, in: *Use of recycled plastics in eco-efficient concrete*, Elsevier, (2019) 269-285.



ارزیابی آزمایشگاهی مقادیر CBR در خاک های ماسه ای مسلح شده با Geopet: مدلسازی باروش RSM

محمد رضا کرمی^۱، محسن کرامتی^{۱*}، مصطفی ابراهیمی^۱، حسین مرادی مقدم^۲، رضا معادی^۳

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،

۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران،

۳- دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

ماسه بندر انزلی

Geopet

خاکستر بادی

نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

روش سطح پاسخ (RSM)

خلاصه: تولید روزافزون پسماندهای جامد به دغدغه بین المللی مهندسی تبدیل شده است یکی از راهکارهای مفید، استفاده مجدد از پسماندهای جامد جهت بهسازی ساخت گاه ها و خاک های سست است. یکی از روش های تسلیح یا تثبیت خاک استفاده از ضایعات پلی اتیلن ترفتالات (PET) و خاکستر بادی (FA) است که از ضایعات صنعتی و شهری می باشند. در این مطالعه آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی ماسه بندر انزلی مسلح نشده و مسلح شده با Geopet با اندازه چشمه های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتی متر و همچنین تثبیت شده با خاکستر بادی با درصد وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و سدیم هیدرکسید به عنوان فعال کننده خاکستر بادی انجام شده و همچنین در تحلیل فعلی، روش سطح پاسخ (RSM) نیز برای تعیین روابط موثر درصد خاکستر بادی، لایه های Geopet و همچنین برهم کنش آنها بر روی CBR استفاده شده است و در نهایت، از RSM می توان برای ارزیابی CBR در این مطالعه به شیوه های سازگار و موثر استفاده کرد. مقدار P-Value در مدل استفاده شده کمتر از ۰/۰۰۰۱ می باشد که کارایی مدل استفاده شده را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد حالت بهینه استفاده از Geopet با اندازه چشمه ۱×۱ به همراه ۱۵ درصد خاکستر بادی است که در این حالت مقدار CBR افزایش ۲/۷ برابری نسبت به حالت مسلح نشده داشته است.

۱- مقدمه

اکثر خاک ها از دید مهندسی به دلیل ظرفیت باربری و مقاومت برشی کم، ضعیف می باشند. این خاک ها می توانند در ساخت و سازهای عمرانی مانند فونداسیون، سد، راه و غیره مشکلاتی را به وجود آورند. عدم توجه کافی به این مسائل، ممکن است خطرات زیادی را ایجاد کند. علاوه بر این، به جهت بالا رفتن سطح کیفیت زندگی مردم و افزایش جمعیت، مهندسی برای استفاده از حداکثر ظرفیت اراضی و اجرای پروژه های عمرانی، با خاک هایی با ظرفیت باربری پایین رو به رو ساخته است [۱-۵].

روش های مکانیکی و مواد طبیعی و مصنوعی زیادی برای بهبود رفتار خاک وجود دارند که انتخاب آنها به عواملی همچون ملاحظات زیست محیطی و جنبه های اقتصادی و ساختاری بستگی دارد [۶]. یکی از روش های بهسازی خاک، تسلیح با استفاده از الیاف و رشته ها است. از آنجا که دفع زباله های پلاستیکی بدون آسیب رساندن به اکوسیستم بسیار چالش برانگیز شده است [۷] استفاده مجدد از ضایعات پلی اتیلن ترفتالات (PET) در

تثبیت خاک می تواند اثرات زیست محیطی آن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۸، ۹]. افزایش ظرفیت باربری خاک با استفاده از الیاف طبیعی یا مصنوعی، روشی مناسب برای تقویت و بهسازی خاک است [۱۰]. پلاستیک نوعی رشته مصنوعی است که همواره برای تقویت خاک مورد استفاده قرار می گیرد.

آندرسلند [۱۱] برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ برای تقویت خاک اشباع کاتولینیت از پالپ فشرده استفاده کرد و بعد از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نتیجه گرفت افزودن این ماده باعث افزایش کرنش محوری و مقاومت فشاری می گردد. آیرم^۲ و همکاران [۱۲] با استفاده از نوارهایی از جنس ضایعات پلاستیکی PET با درصد های مختلف وزنی، خاک رس کاتولین تثبیت شده با درصد مختلف سیمان را تقویت کردند. برای بررسی تاثیر درصد های مختلف PET و سیمان از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان می دهد افزایش درصد سیمان و افزایش زمان عمل آوری هر یک باعث افزایش مقاومت می گردد، همچنین

1 O. B. Andersland

2 Irem

* نویسنده عهده دار مکاتبات: keramati@sharoodut.ac.ir



آزمایش (DOE) تکنیکی برای پیش‌بینی نتایج آزمون‌های تجربی با استفاده از متغیرهای مستقل است. مزایای قابل توجه این رویکرد شامل کاهش تعداد آزمایش‌ها، بررسی اندرکنش بین متغیرها و ارزیابی راه‌حل بهینه داده‌های تجربی با توسعه یک مدل تجربی است. برای ارزیابی پاسخ به‌دست‌آمده که با پارامترهای مختلف بیان می‌شود، از یک مدل ریاضی توسط محققان استفاده می‌شود [۲۲، ۲۳]. شاخه‌های DOE تلاش می‌کنند تا با استفاده از مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری، یک طراحی دقیق از آزمایش بسازند. RSM که در سال‌های اخیر به طور فعال در مسائل مهندسی کاربرد داشته است، به عنوان یکی از بخش‌های DOE در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. با ادغام ریاضیات و آمار، RSM همچنین نتیجه‌ای را که شاخص‌ها از آزمایش‌های مختلف دریافت می‌کنند و همچنین تأثیر همبستگی بین متغیرها را با تصاویر سه‌بعدی منعکس می‌کند. ارزیابی خواص مکانیکی خاک و بتن به طور کامل کارا بودن روش را تأیید کرده است [۲۵، ۲۶]. در نهایت، RSM برای ارزیابی CBR خاک‌های تثبیت شده با خاکستر بادی و Geopet انتخاب شده است.

این مطالعه با هدف استفاده از ورق‌های Geopet با اندازه چشمه‌های مختلف برای اولین بار به دلیل استفاده مجدد از زباله‌های پلاستیکی، علاوه بر استفاده از خاکستر بادی برای بهبود خاک و دستیابی به اهداف توسعه پایدار انجام شده است. با توجه به نتایج، بررسی‌ها به دلیل استفاده از ورق‌های Geopet به اضافه خاکستر بادی با توجه به قرار دادن ورق‌های پلاستیکی در لایه‌های مختلف، بهبود قابل توجهی را در مقادیر CBR نشان می‌دهد. همچنین نتیجه‌گیری می‌شود که تأثیر خاکستر بادی بر چسبندگی و افزایش پیوستگی ذرات خاک و ورق‌های پلاستیکی، عامل اصلی بهبود ظرفیت باربری خاک است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل فعلی از روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی تأثیر درصد خاکستر بادی، لایه‌های Geopet و تعامل آنها بر CBR استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش از ماسه بندر انزلی استفاده شده است. همچنین از Geopet‌ها با اندازه چشمه‌های 1×1 ، 2×2 و 3×3 سانتی‌متر مربع در ترکیب با مقادیر مختلف خاکستر بادی به میزان ۵ تا ۱۵ درصد استفاده شده است.

افزایش درصد نوارهای پلاستیکی باعث شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها می‌گردد. پدیا^۱ و همکاران [۱۳] با افزودن خرده PET به خاک لای دار با درصد‌های مختلف وزنی به ابعاد $5/5 \times 2/5 \times 1/5$ سانتی‌متر مربع پارامترهای مقاومتی خاک با آزمایش CBR بررسی نمودند و نتیجه گرفتند افزودن خرده PET موجب افزایش مقدار CBR می‌گردد. حاجیان‌نژاد و همکاران [۱۴] ماسه بندر انزلی تسلیح شده با خرده PET (1×1 سانتی‌متر)، نوارهای PET (5×1 سانتی‌متر) و الیاف PET با درصد‌های مختلف وزنی تحت آزمایش برش مستقیم قرار دادند و نتیجه گرفتند ماسه تسلیح شده با الیاف PET مقاومت بیشتری نسبت به ماسه تسلیح شده با خرده PET یا تسلیح شده با نوار PET دارد. همچنین تسلیح خاک با استفاده از الیاف PET موجب افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۹۱ درصد شده است. همچنین نتیجه گرفتند استفاده از نوار، الیاف و خرده PET موجب شکل‌پذیری بیشتر ماسه بندر انزلی می‌شود. افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک اغلب از طریق تراکم کنترل شده یا ترکیب یک مخلوط، تکنیکی است که به طور گسترده برای تثبیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵، ۱۶]. کرمی و همکاران [۱۷] خاک متورم شونده رس با پلاستیسیته کم (CL) از منطقه‌ای در شهر ملبورن را با خاکستر بادی کلاس F به عنوان افزودنی اصلی به همراه چهار افزودنی دیگر (آهک، سیمان CSA^2 ، آنزیم و پلیمر) تحت آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR قرار داد و نتیجه گرفت افزودن خاکستر بادی باعث کاهش رطوبت بهینه و افزایش حداکثر چگالی خشک خاک می‌گردد. همچنین افزودن خاکستر بادی به تنهایی باعث افزایش ناچیزی در مقدار CBR می‌گردد، اما در صورت اضافه کردن افزودنی ثانویه مقدار CBR به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. آرورا^۲ و همکاران [۱۸] خاکستر بادی کلاس F را به خاک اضافه کردند و از آهک و سیمان به عنوان فعال‌کننده استفاده نمودند. بعد از عمل‌آوری به مدت چهار هفته و انجام آزمایش، مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با سیمان را ۱۲ برابر بیشتر از نمونه‌ای که با آهک تثبیت شده بود را اعلام کردند. ساتوس^۴ و همکاران [۱۹] بیان نمودند افزایش مقدار خاکستر بادی از ۲۰٪ به ۴۰٪ به مراتب بیشتر از افزایش ۴۰٪ به ۶۰٪ در بهبود رفتار خاک تأثیر دارد.

تا کنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی پارامترهای مهندسی بر مبنای روش‌های ریاضی و عددی ارائه شده است [۲۰، ۲۱]. طراحی

- 1 S. Peddaiah
- 2 Calcium Sulfoaluminate Cement
- 3 S. Arora
- 4 F. santos

جدول ۱. خلاصه مطالعات انجام شده

Table 1. Summary of Previous Studies

روش	مواد	منبع	نوع خاک	نتایج
	ژئوتکستایل	[۲۷]	رس	بهبود مقاومت نمونه در سمت خشک رطوبت بهینه
	ژئوگرید	[۲۸]	-	بهبود عملکرد به واسطه سخت شدگی و هندسه ژئوگرید، عمق مدفون ژئوگرید و ضخامت لایه‌ها
	ژئوپلیمر	[۱۶]	رس	افزایش تنش تسلیم و سخت شدگی اولیه
	PET	[۱۳]	ماسه سیلتی	افزایش CBR
	ژئوسنتتیک	[۲۹]	ماسه	کاهش جابجایی‌ها
تسلیح	ژئوتکستایل و ژئوگرید	[۳۰]	رس	افزایش CBR و UCS و ثابت ماندن مقاومت گسیختگی و شکل پذیری
	میکرو گرید	[۳۱]	ماسه	افزایش زاویه اصطکاک داخلی و مدول سکانتی
	زباله‌های پلاستیکی	[۳۲]	ماسه بد دانه‌بندی شده	کاهش نشست با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری و توانایی تحمل رفتار های غیر پلاستیک
	لاستیک و قطعات پلاستیکی	[۳۳]	شن	چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و CBR افزایش یافت
	خاکستر بادی، آهک و آنزیم‌ها	[۱۷]	رس	افزایش ظرفیت باربری
	خاکستر بادی کلاس F	[۳۴]	رس	خاکستر کلاس F نتایج قابل اعتمادی برای مقادیر UCS، CBR، پالس سرعت و تست سه محوری با چسب های سنتی داشت.
	خاکستر بادی	[۳۵]	ماسه سیلتی	افزایش مقاومت، فشردگی و سرعت موج برشی
تثبیت با افزودنی‌ها	خاکستر بادی	[۳۶]	رس	هفزیایش CBR و کاهش حدود آتربرگ، شاخص خمیری، شاخص تورم و UCS
	خاکستر بادی کلاس F	[۳۷]	رس ماسه دار	افزایش UCS
	خاکستر بادی کلاس F، آهک و سیمان	[۱۸]	ماسه سیلتی	UCS نمونه تثبیت شده با سیمان ۱۲ برابر نمونه تثبیت شده با آهک است
	خاکستر بادی	[۳۸]	ماسه	کاهش CBR
	ژئولیت، گلس واتر و ژئوگرید	[۳۹]	لاتوسول	افزایش CBR و UCS
	ژئوگرید و آهک	[۴۰]	رس	افزایش چشمگیر در خصوصیات ژئوتکنیکی
تسلیح و تثبیت	خاکستر بادی و الیاف پلی پروپیلن	[۴۱]	رس کائولینیت	افزایش خصوصیات مکانیکی
	بایندر قلیایی و ژئوتکستایل جوت	[۴۲]	ماسه	افزایش ظرفیت باربری ۲۷٪، نفوذپذیری تقریباً ثابت باقی ماند.
	الیاف و خاکستر بادی	[۴۳]	رس اشباع	افزایش CBR و مدول برشی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه بندر انزلی

Table 2. Physical Properties of Bandar Anzali Sand

G_s	e_{max}	e_{min}	$(\gamma_d)_{min}$ (gr/cm^3)	$(\gamma_d)_{max}$ (gr/cm^3)	D50 (mm)	C_u	C_c	(kPa) C	$(^\circ) \phi$
۲/۶۸	۰/۶۷	۰/۹۴	۱/۲۵	۱/۵۵	۰/۲۸	۱/۲۵	۱/۰۷	۱۴/۶۷	۳۲/۲۱

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی PET

Table 3. Physical and Chemical Properties of PET

مشخصات	توضیحات
ترکیبات شیمیایی	اسید ترفتالیک و اتیلن گلیکول
فرمول شیمیایی	$(C_{10}H_8O_4)_n$
وزن مخصوص (g/cm^3)	۱/۳۸
نقطه ذوب ($^\circ C$)	بیشتر از ۲۵۰
نقطه جوش ($^\circ C$)	بیشتر از ۳۵۰
هدایت گرمایی (W/mK)	۰/۲۴ - ۰/۱۵

۲-۱-۱- مشخصات ماسه

براساس سیستم طبقه بندی متحد خاک¹ USCS و طبق استاندارد ASTM D422-87 ماسه از نوع بد دانه بندی شده (SP) و از نوع ماسه کربناته می باشد. انجام آزمایش بر روی این خاک در حالت رطوبت بهینه انجام شده است و نتایج حاصل از آزمایش دانه بندی و برش مستقیم خاک در تراکم نسبی ۷۰ درصد در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۲ آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM D422-87 و آزمایش های تعیین نسبت منافذ حداکثر و حداقل به ترتیب طبق استاندارد ASTM D4254 و D4253 انجام شده است.

۲-۱-۲- Geopet

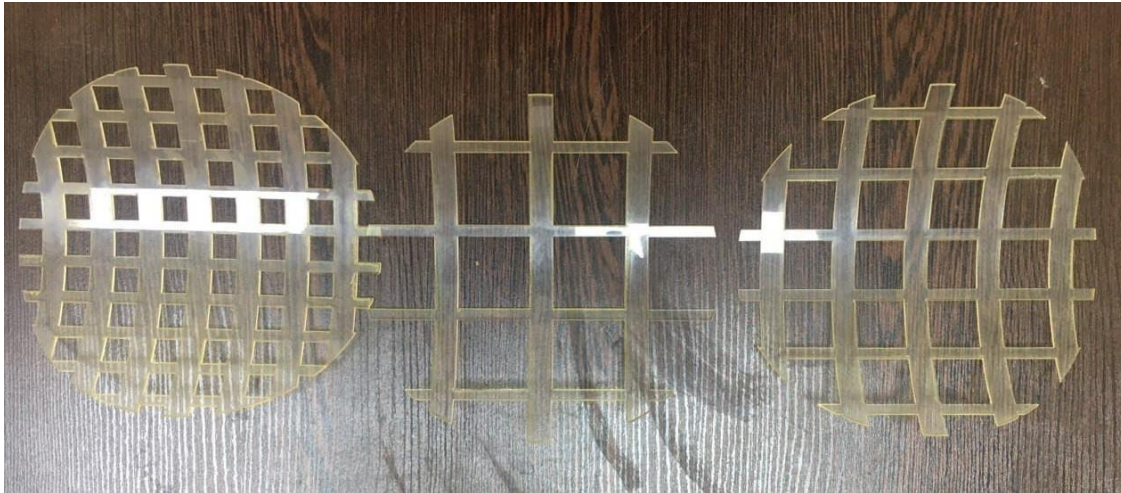
PET رایج ترین شکل زباله های پلاستیکی است که روی زمین یافت می شود و در واقع یک پلیمر پلی استری با سطح شفاف و مقاوم در برابر

مواد شیمیایی است که به راحتی قابل تولید بوده و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است [۴۴]. جدول ۳ برخی از خواص PET را نشان داده است. در این پژوهش از Geopet با اندازه چشمه های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتیمتر مربع به ضخامت ۰/۸ میلیمتر استفاده شده است. ورق های PET به صورت رول در کارخانه تولید شدند و سپس ورق های Geopet با استفاده از تجهیزات برش لیزری با دقت ۰/۱ میلیمتر برش داده شدند، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۳- خاکستر بادی

در این مطالعه از خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی استفاده شده است زیرا مواد افزودنی دیگر از قبیل سیمان به سرعت تجزیه می شوند [۴۵]. به طور کلی دو نوع خاکستر بادی وجود دارد. خاکستر کلاس C دارای سطوح پایین از سیلیکات (Si) و سطوح بالای کلسیم (Ca) و خاکستر کلاس F دارای سطوح پایین کلسیم (Ca) و سطوح بالای سیلیکات (Si) است [۴۶].

1 Unified Soil Classification System



شکل ۱. Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتی‌متر

Fig. 1. Geopet with grid sizes of 1×1, 2×2, and 3×3 cm

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی

Table 4. Chemical Composition of Fly Ash

مواد دیگر	CaO کلسیم	MgO منگنزیم	SO ₃ گوگرد تری‌اکسید	Fe ₂ O ₃ فریک	Al ₂ O ₃ آلومینا	SiO ₂ سیلیکا	مواد شیمیایی
			ASTM C311				استاندارد
۱/۰	۰/۷	۱/۵	۱/۲	۱/۰	۶/۸	۸۷/۸	درصد وزنی

۲-۲- آزمایش‌ها

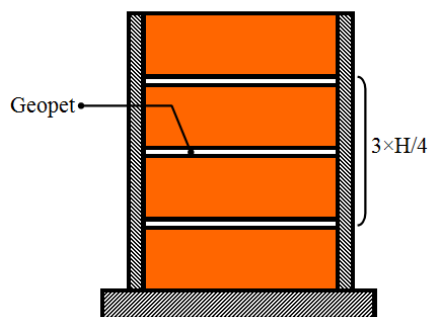
۲-۲-۱- آزمایش CBR

CBR اغلب در جاده سازی برای ارزیابی مقاومت نسبی خاک استفاده می‌شود. ظرفیت باربری خاک زیر اساس را می‌توان با استفاده از نتایج و اساس تعیین کرد تا لایه‌های زیر اساس با توجه به خواص آنها توسعه یابد. آزمایشات CBR بر اساس استاندارد ASTM D1883 بر روی ماسه بندر انزلی برای ارزیابی استحکام نسبی آن در هر دو شرایط مسلح نشده و مسلح شده انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه مجهز به سنسور و لودسل انجام شد. در این آزمایشات، از یک سنسور LVDT با کورس ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر برای نظارت بر جابجایی عمودی استفاده شد. یک لودسل ۵ تنی با دقت ۰/۱۵ کیلوگرم نیرو، تنش عمودی را با سرعت ۰/۰۲۵

خاکستر مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C618 دارای ترکیبات شیمیایی کلاس F با حداقل درصد وزنی ۷۰٪ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ بود. نتایج آنالیز شیمیایی خاکستر بادی در جدول ۴ نشان داده شده است و تایید کرد که خاکستر از نوع کلاس F می‌باشد.

۲-۱-۴- فعال کننده قلیایی

NaOH یا سدیم هیدروکسید به عنوان فعال کننده خاکستر بادی مورد استفاده قرار گرفته است. سدیم هیدروکسید در حالت جامد بوده که در آزمایشگاه به صورت محلول و با غلظت هدف درآمده است. غلظت مورد استفاده در این آزمایش ۸ مولار بوده، که این غلظت در تحقیقات گذشته به عنوان غلظت بهینه برای فعال سازی خاکستر بادی از آن یاد شده است.

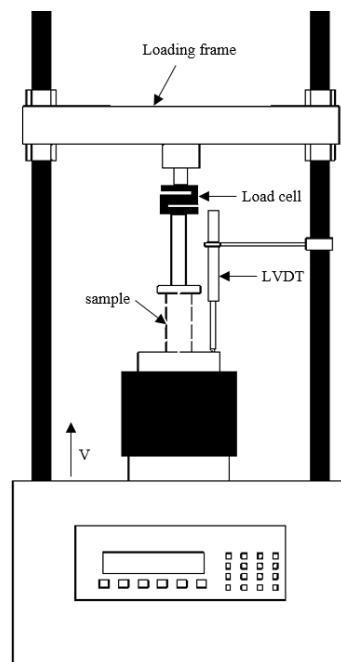


شکل ۳. تصویر شماتیک از محل قرار گیری لایه‌های Geopet

Fig. 3. Schematic illustration of the placement of Geopet layers

بالاترین تراکم و بهترین سطح رطوبت برای نمونه خاک اصلی و خاک مخلوط با مقادیر مختلف خاکستربادی در درصدهای ۰.۵٪، ۱.۰٪ و ۱.۵٪ و با استفاده از تست تراکم استاندارد اصلاح شده تعیین می‌شوند. مقادیر OMC و MDD به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد اصلاح شده برای ساخت نمونه خاک با تراکم ۹۷ درصد برای آزمایش CBR خیس شده استفاده می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش، ما دریافتیم که خاک با مقدار مناسب خاکستر بادی می‌تواند آن را قوی‌تر کند، همانطور که در آزمایش CBR خیس شده نیز مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، برای تعیین بهترین عمق برای قرار دادن Geopet برای حداکثر افزایش استحکام در یک آزمایش، Geopet ها در اعماق مختلف در خاک قرار گرفتند که دارای مقادیر بهینه خاکستر بادی بودند. غشای Geopet در اعماق یک چهارم، نیم و سه چهارم از بالای ظرف نمونه قرار گرفتند. این اعماق برای دیدن اینکه کدام یک دارای بالاترین استحکام در آزمایش CBR خیس شده بود، مورد مقایسه قرار گرفت.

نمونه‌های خاک برای آزمایش CBR خیس شده با Geopet در اعماق مختلف با استفاده از روش زیر تهیه شد. ارتفاع قالب CBR به چهار سطح $H/4$ ، $H/2$ و $3/4 H$ از بالا به پایین تقسیم می‌شود. برای Geopet که در عمق $3/4 H$ از بالا (عمق $H/4$ از پایین) قرار گرفته است، وزن خاک نمونه برداری شده در عمق $H/4$ از پایین بر اساس مقدار MDD و مقدار آب معادل OMC محاسبه شد به وزن این خاک اضافه شد و به عنوان لایه ای از خاک در قالب CBR با ۵۵ ضربه قرار داده شد. سپس یک لایه Geopet در بالای این لایه خاک ($3/4 H$ عمق از بالا به پایین) قرار می‌گیرد. وزن



شکل ۲. دستگاه انجام آزمایش CBR

Fig. 2. CBR testing apparatus

در ثانیه ($1/27$ میلی متر در دقیقه) کنترل می‌کرد و داده‌ها از طریق یک دیتالاگر ۸ کانالی به رایانه منتقل می‌شد. داده‌های خروجی توسط کامپیوتر با کانال جداگانه برای هر یک از سنسورها جمع‌آوری و پردازش شد.

۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

آزمایش CBR بر روی خاکی با رطوبت کمتر از رطوبت بهینه ($14/44$ Wopt = درصد در ترکیب با خاکستر بادی) انجام شد. خاک با تراکم کردن هر لایه تا ۷۰ درصد تراکم خشک در چهار لایه فشرده شد تا جرم کل خاک قرار داده شده در قالب به حجم مشخصی برسد. پس از فشرده سازی هر لایه، صفحه پلاستیکی به صورت افقی در داخل نمونه قرار داده شد. قطر صفحه پلاستیکی کمی کوچکتر از قطر نمونه بود. تمام نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده تا سطح کرنش ۱۵ درصد با نرخ کرنش ۰/۵ درصد در ساعت پاره شدند. اصلاحاتی برای نفوذپذیری و استحکام غشا، تورم سلولی و سطح مقطع انجام شد. شماتیک از قرارگیری ورق‌های Geopet در داخل قالب در شکل ۳ نشان داده شده است. ژئوپت در ابعاد 1×1 ، 2×2 و 3×3 سانتی متر مربع در سه لایه با ارتفاع‌های مختلف استفاده شد.

جدول ۵. مقایسه درصد رطوبت بهینه در خاک مرجع و در حضور درصدهای مختلف خاکستر بادی

Table 5. Comparison of Optimum Moisture Content in Reference Soil and in the Presence of Various Percentages of Fly Ash

وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتیمتر مکعب)	درصد رطوبت بهینه (%)	نمونه
۱/۵۵	۱۴	خاک مرجع
۱/۵۳	۱۷	خاک + ۵ درصد خاکستر بادی
۱/۵۱	۱۶٫۵	خاک + ۱۰ درصد خاکستر بادی
۱/۴۹	۱۸	خاک + ۱۵ درصد خاکستر بادی

و جذب کند. از سوی دیگر، ذرات باردار در خاکستر بادی دانه‌های خاک را جدا می‌کنند و در عین حال مقداری انرژی تراکم را نیز جذب می‌کنند و از تراکم بهتر خاک جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، چگالی شن و ماسه به طور قابل توجهی بیشتر از خاکستر بادی بود که منجر به بیشترین کاهش در چگالی خشک شد. شکل و اندازه کوچک ذرات خاکستر بادی، که فضای موجود بین دانه‌ها را کاهش می‌دهد، باعث کاهش میزان آب مورد نیاز می‌شود. با افزایش محتوای آب، ذرات دیگر نمی‌توانند آن را ذخیره کنند و به سطح مخلوط بالا می‌روند [۴۹، ۴۸].

۳-۲- اثر Geopet بر عملکرد مکانیکی خاک شنی بندر انزلی

اثر Geopet بر عملکرد مکانیکی خاک شنی بندر انزلی از نظر ظرفیت باربری و نفوذ سنبه فولادی تحت بارگذاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۴ نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. خاک شنی با Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ سانتی‌متر مربع در ارتفاع‌های H/4، H/2 و H از 3/4 از سطح قالب در رطوبت بهینه مسلح شد.

نتایج نشان داد که افزایش نفوذ سنبه فولادی در خاک باعث افزایش کشش؛ در ابتدا با یک نرخ بالا افزایش (تا نفوذ حدود ۴ میلی‌متر) و سپس به تدریج شیب منحنی‌های بار-نفوذ از حدود نفوذ ۴ میلی‌متر کاهش می‌یابد. این رفتار نشان دهنده نفوذ تدریجی سنبه به داخل خاک است. منحنی‌های بار-نفوذ نشان می‌دهند که استفاده از Geopet با محدود کردن حرکت دانه‌های خاک از گسیختگی نمونه‌ها جلوگیری می‌کند. با نفوذ بار به سطح خاک، لایه‌های Geopet در ماسه به تدریج به کشش افتاده و به دلیل

باقیمانده خاک در عمق 3/4 H بر اساس MDD محاسبه شد و مقدار آب معادل OMC به خاک اضافه شد و این لایه خاک در دولایه و هرلایه ۵۵ ضربه شکل گرفت. روش ساخت لایه‌های دیگر و سپس قرار گیری Geopet در اعماق H/2 و H/4 از بالای نمونه به صورت مشابه انجام شد. برای تهیه نمونه، خاک با ۵٪، ۱۰٪ یا ۱۵٪ خاکستر بادی مخلوط شد. محلول فعال کننده اضافه شد و مخلوط به مدت ۵ دقیقه به هم زده شد تا یکنواختی کامل حاصل شود. در پایان، نمونه‌ها با جاگیری Geopet همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، آماده شدند. این نمونه‌ها در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) به مدت هفت روز تحت عمل آوری قرار گرفتند. دلیل انتخاب دمای ۲۵ درجه سانتیگراد این است که در محدوده متوسط تجربه شده در مناطق مختلف در طول فصول مختلف قرار دارد. علاوه بر این، انتخاب دماهای بالاتر چالش‌های عملیاتی را به همراه داشت و منجر به هزینه‌های قابل توجهی می‌شد. شکل ۳ نحوه قرار گیری Geopet را در قالب CBR نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که همه نمونه‌ها تحت آزمایش CBR طبق ASTM D1883 قرار گرفتند.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- اثر خاکستر بادی بر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها

جدول ۵ نشان می‌دهد که افزایش درصد خاکستر بادی، رطوبت بهینه را افزایش می‌دهد که با نتایج به دست آمده از [۴۷] و استانداردهای اداره بزرگراه فدرال ایالات متحده (FHWA) مطابقت دارد، با این حال، حداکثر وزن واحد خشک را کاهش داد زیرا خاکستر بادی می‌تواند آب را نگه دارد

جدول ۶. مقادیر CBR خاک مسلح و خاک غیر مسلح

Table 6. CBR Values of Reinforced and Unreinforced Soil

مقدار CBR									نمونه
۱۰/۵۴									خاک غیر مسلح
سه لایه Geopet			دو لایه Geopet			یک لایه Geopet			خاک مسلح
اندازه چشمه (cm ²)			اندازه چشمه (cm ²)			اندازه چشمه (cm ²)			
۳x۳	۲x۲	۱x۱	۳x۳	۲x۲	۱x۱	۳x۳	۲x۲	۱x۱	
۱۳/۹۶	۱۵/۲۹	۱۶/۲	۱۳/۵	۱۳/۹۸	۱۴/۹۹	۱۱/۸۹	۱۲/۶۳	۱۳/۶۹	

جدول ۷. خصوصیات مکانیکی Geopet ها

Table 7. Mechanical Properties of Geopet

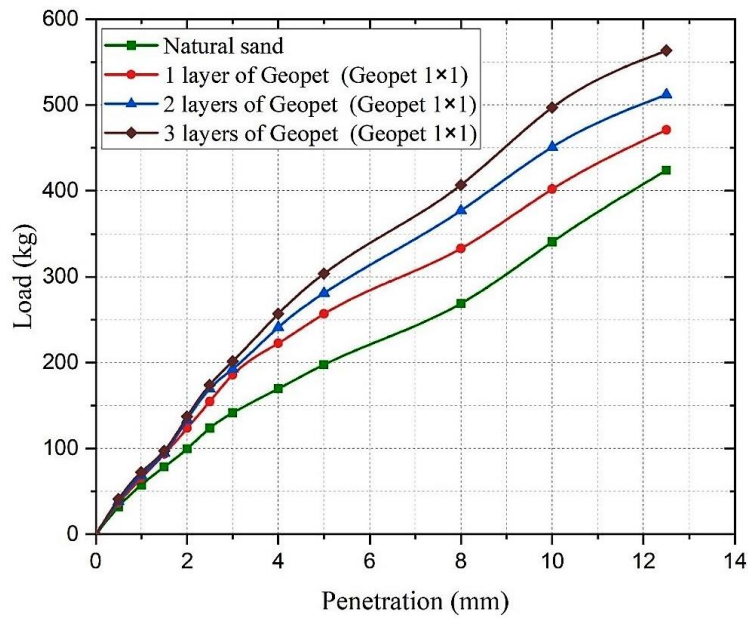
مقاومت کششی نهایی (MPa)	ضخامت (میلیمتر)	وزن واحد سطح	اندازه چشمه (سانتیمتر مربع)
۸/۶	۰/۸	۲/۷۱	۱x۱
۹/۰	۰/۸	۱/۹۴	۲x۲
۸/۸	۰/۸	۱/۶۵	۳x۳

در محدوده‌های مختلف و تأیید عملکرد تجهیزات آزمایشی توسط ASTM D4595 انجام شد. ویژگی‌های سه ژئوپت مختلف در جدول ۷ آمده است. به دلیل تقارن خواص فیزیکی و مکانیکی ژئوپت، خط مرکزی به عنوان محور تقارن در انتها ثابت Geopet است و از انتهای دیگر کشیده می‌شود.

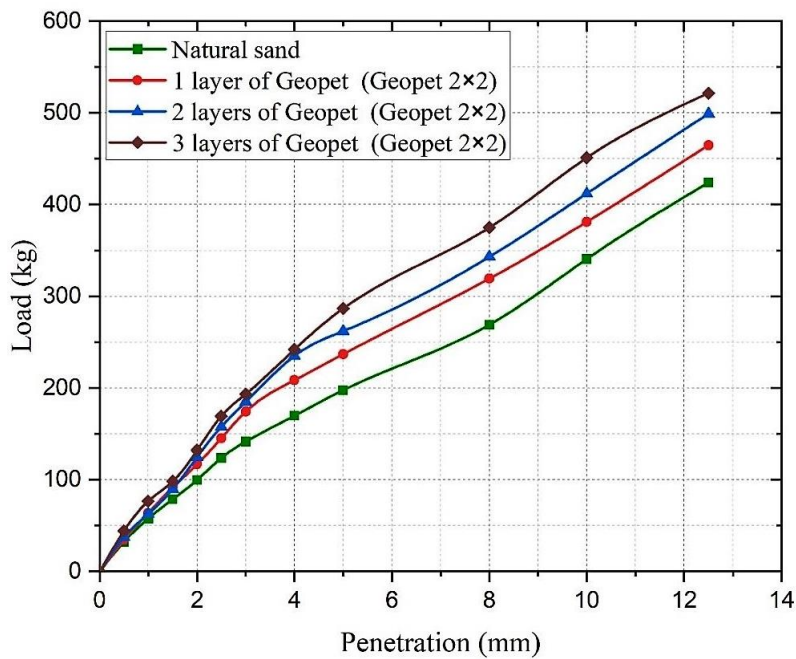
۳-۳- بررسی تاثیر Geopet و خاکستر بادی بر مقادیر CBR

تمام نمونه‌های ماسه با Geopet تقویت و با خاکستر بادی و یک فعال کننده (هیدروکسید سدیم) در این آزمایش‌ها تثبیت شدند. نمونه‌ها در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) به مدت هفت روز عمل‌آوری شدند. در این قسمت همانطور که در شکل نشان داده شده است، لایه‌های تقویت کننده در اعماق H/4، H/2 و 3/4 H سطح نمونه قرار گرفتند. محتوای خاکستر بادی (بر حسب وزن) ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بود و برای تثبیت خاک با هیدروکسید سدیم مخلوط شد. نتایج آزمون در شکل ۶ ارائه شده است.

سختی ژئوپت، لایه‌ها تغییر شکل داده و نیرویی رو به بالا برای تحمل بار اعمال می‌کنند. این بارگذاری متقابل (توسط سنبه فولادی و ژئوپت) به دانه‌های خاک باعث درگیری بیشتر دانه‌های خاک با چشمه‌های ژئوپت شد. علاوه بر این، کشش لایه‌های Geopet نشان می‌دهد که مقاومت آنها در برابر اعمال بار بسیج شده است. شکل ۴ تغییرات فشار را در برابر نفوذ سنبه در ماسه تقویت شده با Geopet را نشان می‌دهد. جدول ۶ CBRs نمونه‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد. همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد، ذرات بزرگتر بهتر با روزه‌های Geopet درگیر می‌شوند و ظرفیت باربری خاک را افزایش می‌دهند و از آنجایی که خاک مورد استفاده در این مطالعه دارای درجه بندی SP بود، Geopet با اندازه دهانه کوچکتر عملکرد بهتری داشتند و همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است نرخ رشد ظرفیت باربری در Geopet با ابعاد دهانه کوچکتر نیز افزایش محسوسی را نشان داده است. آزمایش‌های Geopet برای مطالعه خواص کششی سه نوع Geopet



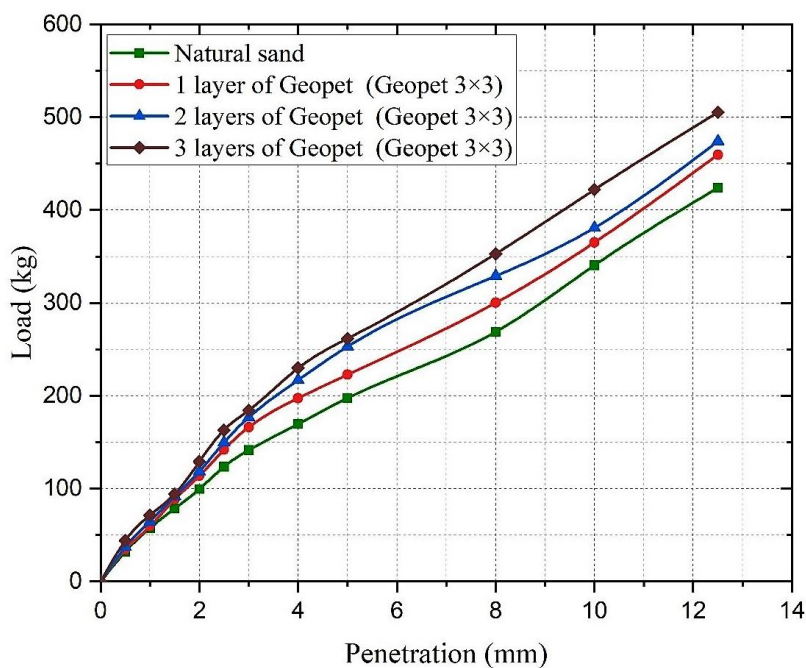
الف



ب

شکل ۴. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع (ادامه دارد)

Fig. 4. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm²(Continued)



ج

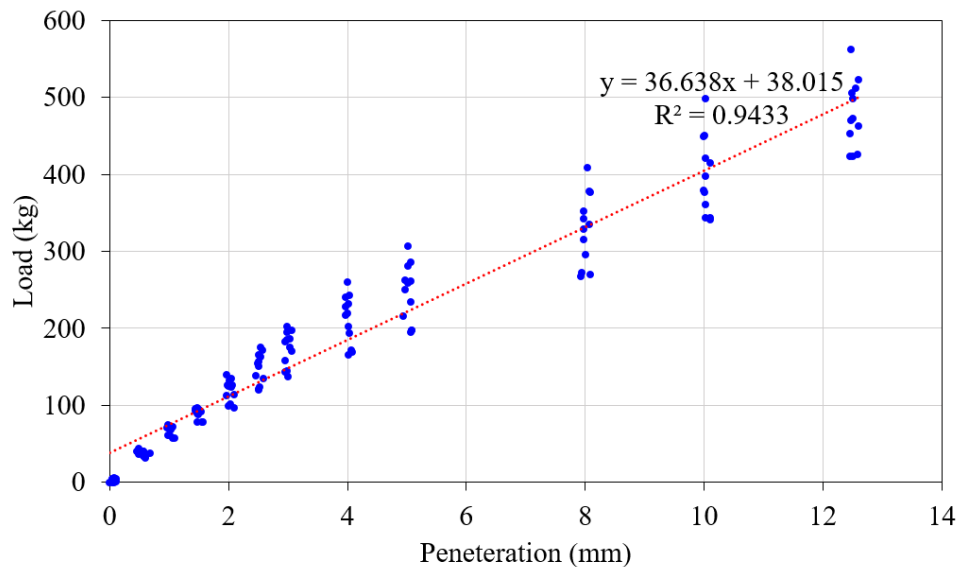
شکل ۴. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

Fig. 4. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm²

جدول ۸. خلاصه نتایج تست‌ها با Geopet

Table 8. Summary of Test Results with Geopet

ردیف	اندازه چشمه‌های Geopet (cm)	تعداد لایه‌های Geopet	مقدار CBR (%)
۱	-	-	۱۰/۵۴
۲	۱×۱	۱	۱۳/۶۹
۳	۱×۱	۲	۱۴/۹۹
۴	۱×۱	۳	۱۶/۲۰
۵	۲×۲	۱	۱۲/۶۳
۶	۲×۲	۲	۱۳/۹۸
۷	۲×۲	۳	۱۵/۲۹
۸	۳×۳	۱	۱۱/۸۹
۹	۳×۳	۲	۱۳/۵۰
۱۰	۳×۳	۳	۱۳/۹۶



شکل ۵. رابطه میزان نفوذ با ظرفیت باربری ($R^2 = 0.94$)

Fig. 5. Relationship between penetration and bearing capacity ($R^2 = 0.94$)

خشک می شود.

در نمونه های تقویت شده با Geopet، افزایش درصد خاکستر بادی باعث افزایش CBR شد. افزودن ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ خاکستر بادی به خاک مرجع همانطور که در شکل های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است؛ به ترتیب ۷۱/۹٪، ۱۴۱/۷٪ و ۱۷۴/۹٪ CBR را افزایش داد. طبق استانداردهای FHWA، هنگام استفاده از خاکستر بادی کلاس F باید از یک فعال کننده استفاده شود. در مطالعه حاضر از هیدروکسید سدیم با غلظت ۸ مولار استفاده شد. بهترین نتایج با ۱۵ درصد خاکستر بادی و سه لایه ژئوپت با اندازه دهانه ۱×۱ سانتی متر مربع به دست آمد. تحقیقات مشابه نشان داده است که افزودن ۶٪، ۱۲٪ و ۱۸٪ خاکستر بادی به خاک شنی باعث افزایش CBR ها به میزان ۵۰٪، ۱۴۰٪ و ۲۰۷٪ شد [۵۰]. مطالعه دیگری نشان داد که افزودن ۵٪ و ۲۵٪ خاکستر بادی به خاک شنی باعث افزایش CBRs به ترتیب ۱۲٪ و ۲۵٪ شد [۴۷].

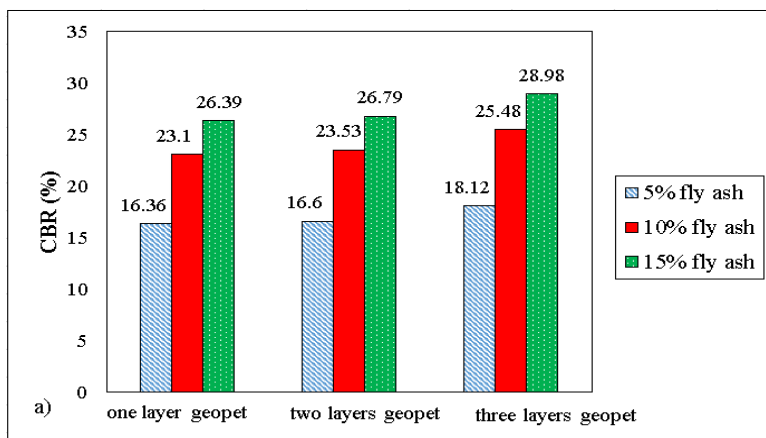
۳-۴- اثر زمان عمل آوری

عمل آوری نیاز به زمان کافی در دمای مناسب دارد و به طور قابل توجهی بر ظرفیت باربری خاک تأثیر می گذارد [۵۱]. مقادیر CBR در نمونه ها پس از هفت روز عمل آوری و در نمونه های عمل آوری نشده در جدول ۱۰

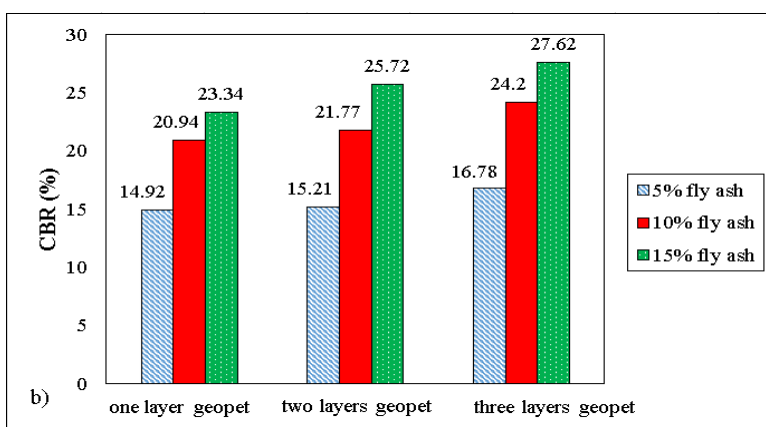
افزودن خاکستر بادی و هیدروکسید سدیم به عنوان یک فعال کننده به نمونه ها باعث افزایش فشار نفوذ سنبه بر روی نمونه های بدون این افزودنی ها شد. این افزایش فشار ناشی از واکنش شیمیایی خاکستر بادی با آب در دمای معمولی اتاق و هیدروکسید سدیم بود که باعث افزایش مقاومت نمونه ها در برابر نفوذ و در نتیجه افزایش مقادیر CBR شد.

بهترین عملکرد ژئوپت در نمونه های خاک شنی تحت آزمایش CBR برای سه لایه ژئوپت با اندازه دهانه ۱×۱ سانتی متر مربع بود. منحنی های بار نفوذ، بهبود پارامترهای مقاومت خاک را با افزودن خاکستر بادی نشان دادند. مقادیر CBR افزایش یافت زیرا فضای بین دانه های خاک با خاکستر بادی پر شده بود. افزودن ۵ درصد خاکستر بادی به خاک تقویت شده با سه لایه Geopet با اندازه دهانه ۱×۱ سانتی متر مربع، CBR را از ۱۰/۵۴ درصد به ۱۸/۱۲ درصد افزایش داد.

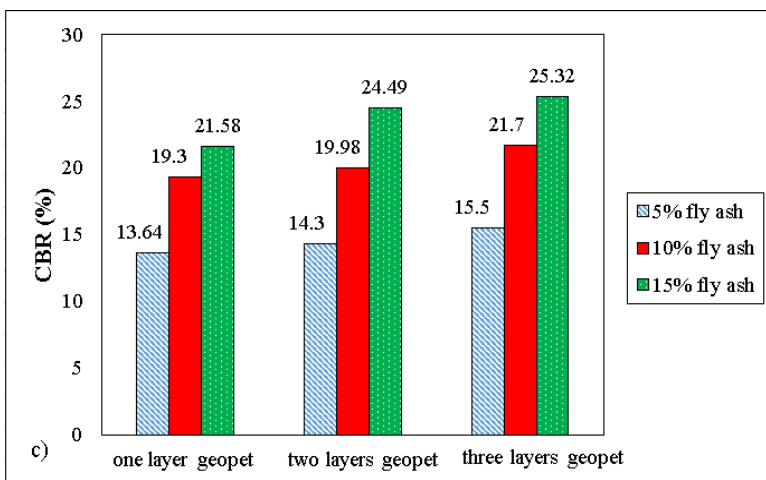
افزودن ۱۰٪ و ۱۵٪ خاکستر بادی به نمونه ها نیز به طور قابل توجهی CBRs را به ترتیب ۲/۴۱ و ۲/۷۴ برابر نسبت به نمونه مرجع افزایش داد. همانطور که مشخص بود افزودن خاکستر بادی رابطه مستقیمی با افزایش CBR دارد، انتظار می رود که افزودن بیش از ۱۵ درصد خاکستر بادی باعث افزایش بیشتر CBR شود. با این حال، این مورد آزمایش قرار نگرفت زیرا افزایش حاصل در حجم نمونه مانع از رسیدن تراکم آن به حداکثر چگالی



الف



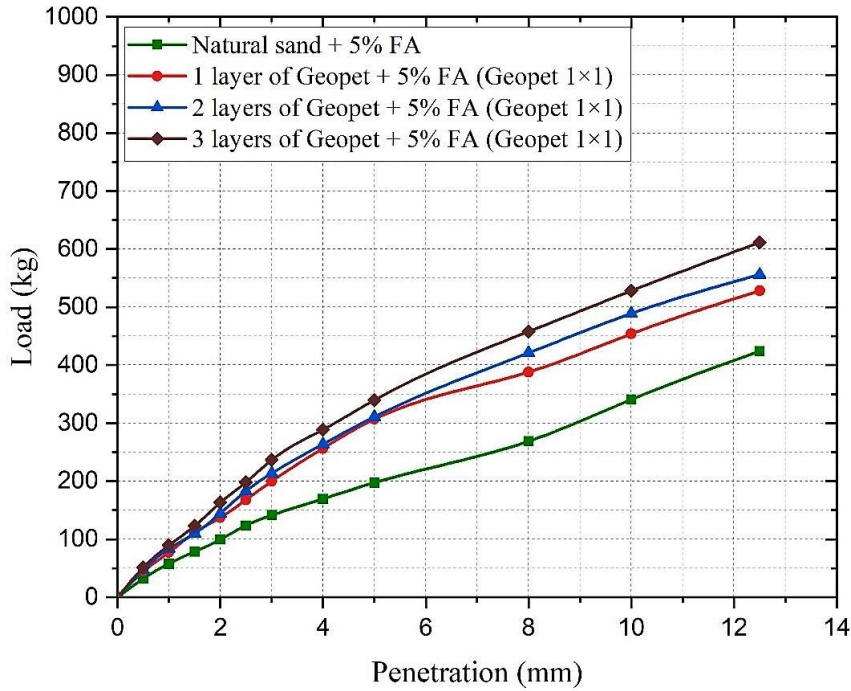
ب



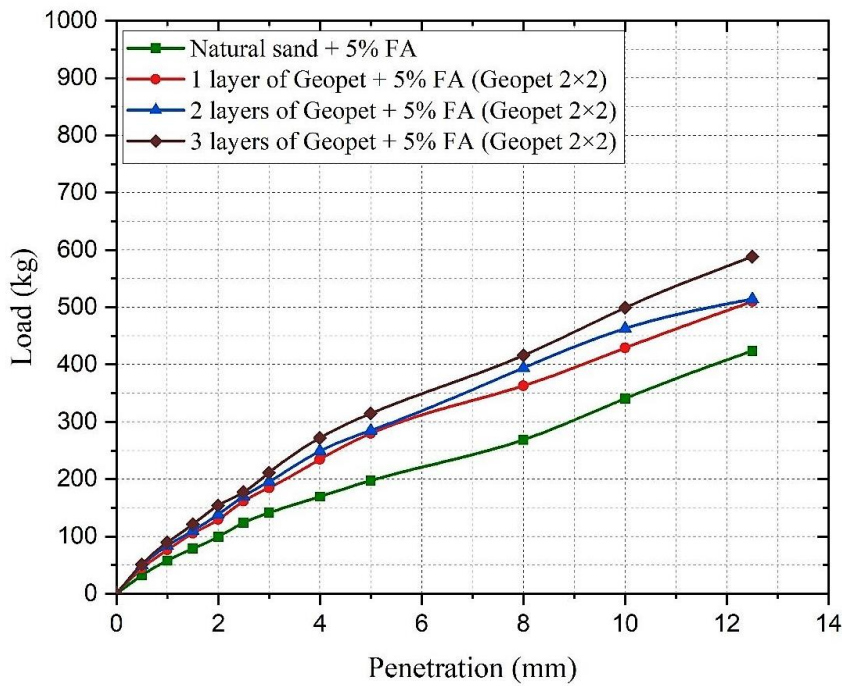
ج

شکل ۶. نتایج آزمایش CBR برای نمونه‌های با خاکستر بادی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ در ۷ روز عمل‌آوری با اندازه‌های چشمه: الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

Fig. 6. CBR test results for samples with 5%, 10%, and 15% fly ash after 7 days of curing with grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm²



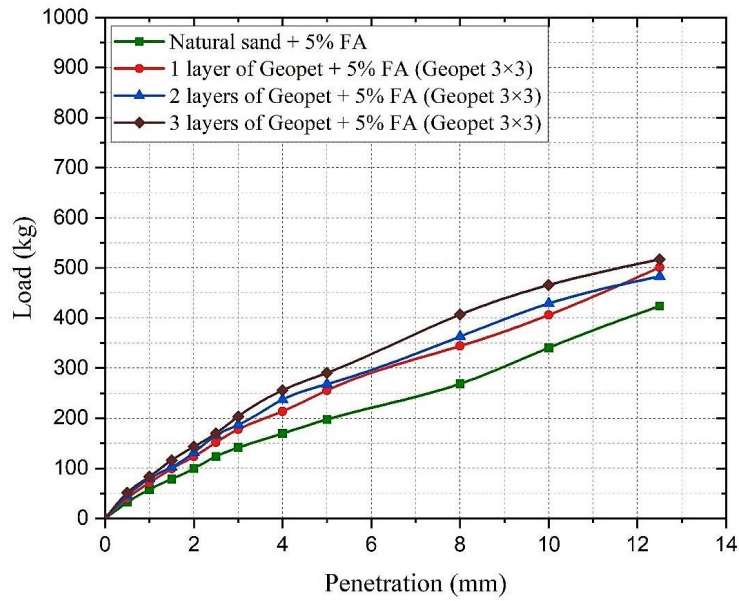
الف



ب

شکل ۷. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۵ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع (ادامه دارد)

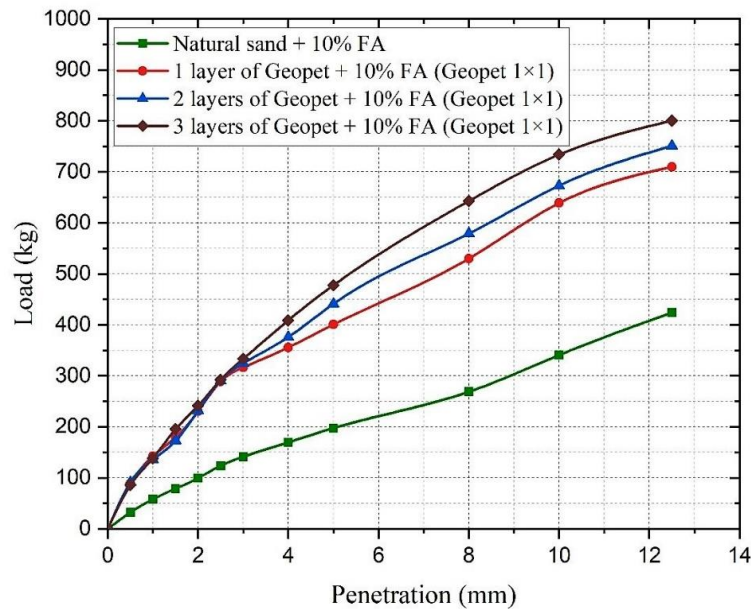
Fig. 7. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 5% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm² (Continued)



ج

شکل ۷. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۵ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) 1×1 سانتی‌متر مربع. ب) 2×2 سانتی‌متر مربع؛ ج) 3×3 سانتی‌متر مربع

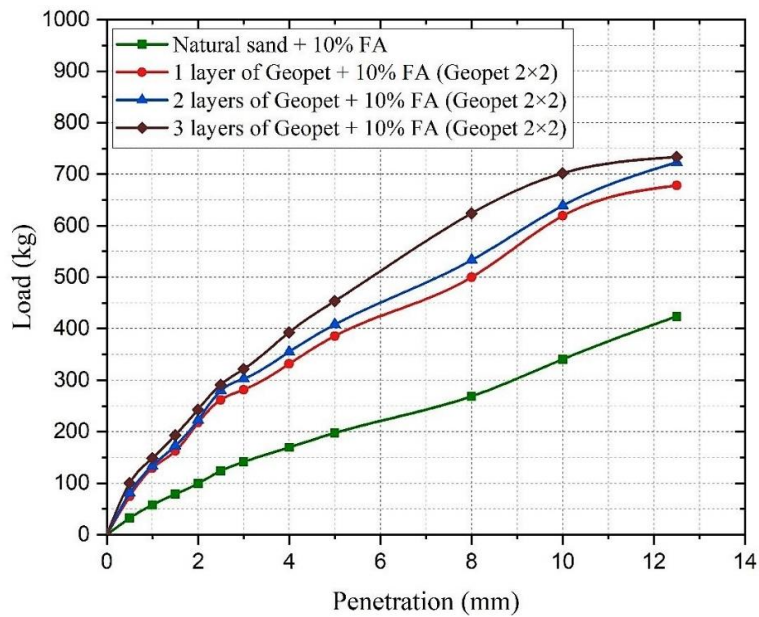
Fig. 7. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 5% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm²



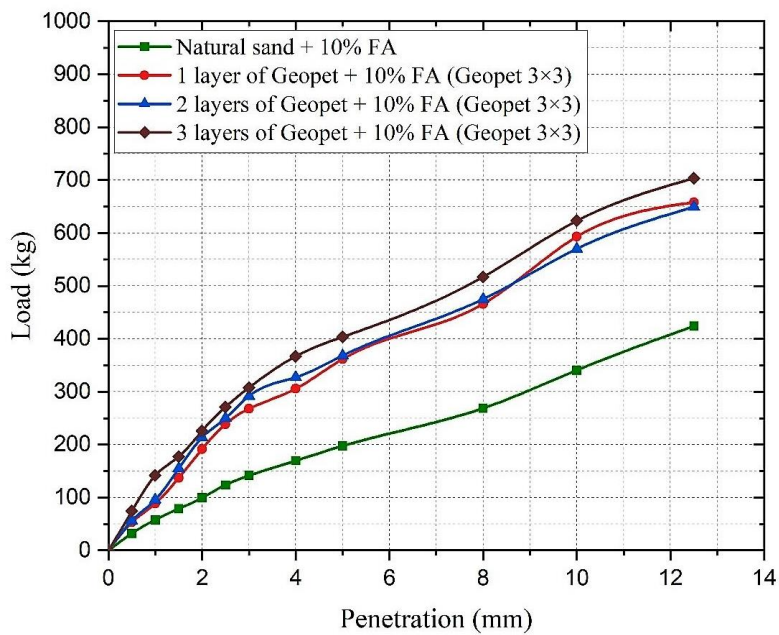
الف

شکل ۸. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۱۰ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) 1×1 سانتی‌متر مربع. ب) 2×2 سانتی‌متر مربع؛ ج) 3×3 سانتی‌متر مربع (ادامه دارد)

Fig. 8. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 10% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm² (Continued)



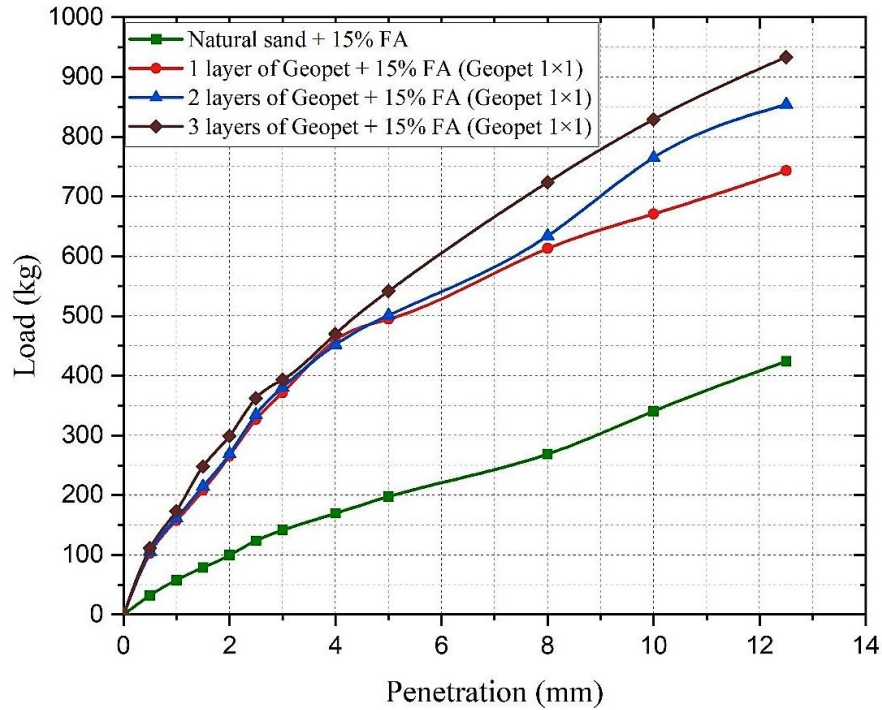
ب



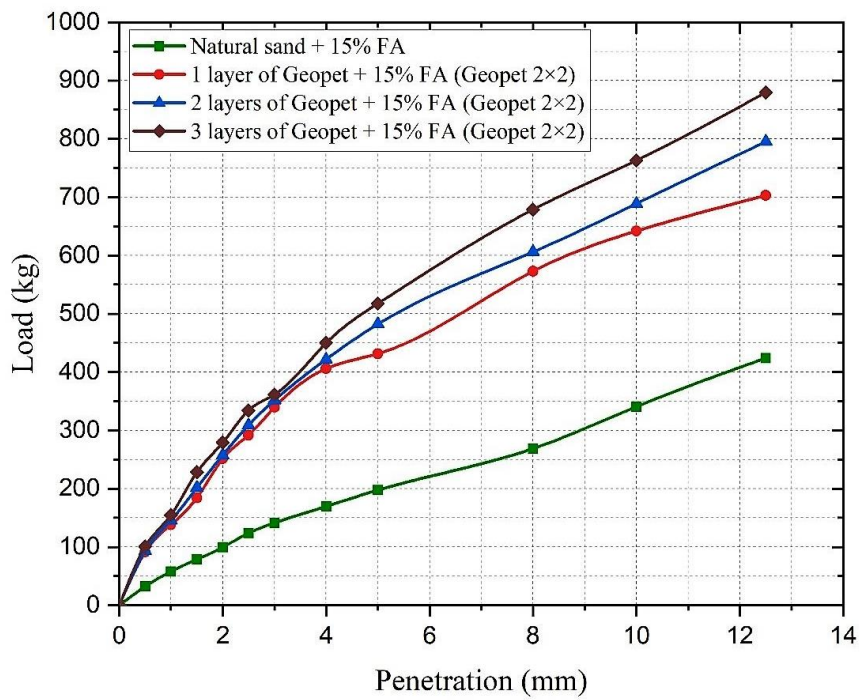
ج

شکل ۸. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۱۰ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

Fig. 8. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 10% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm²



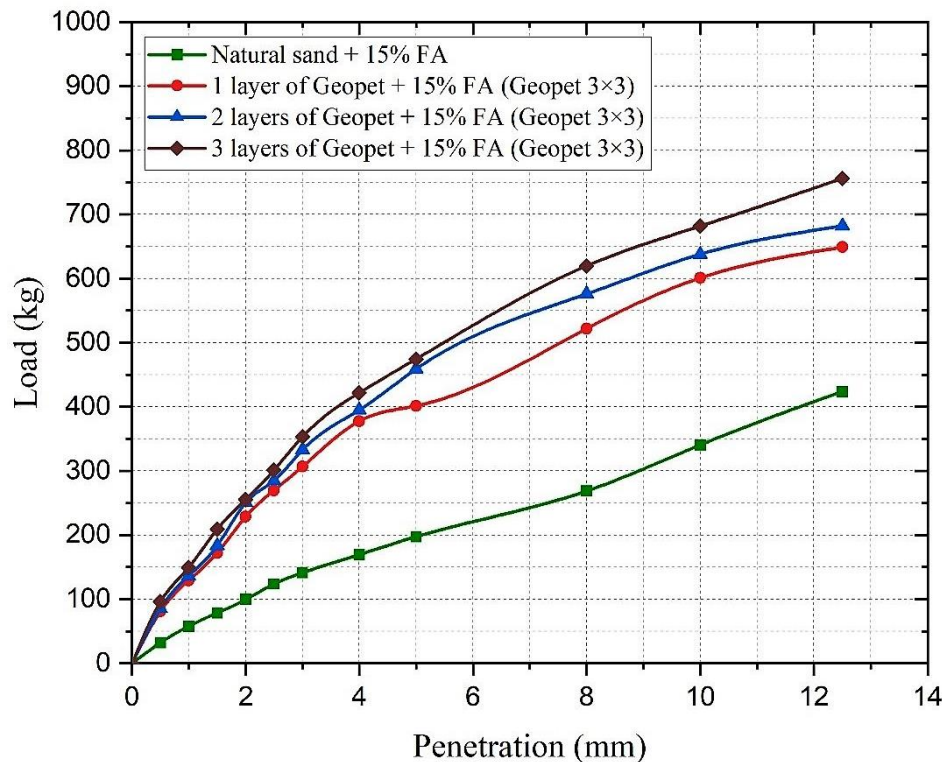
الف



ب

شکل ۹. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۱۵ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع (ادامه دارد)

Fig. 9. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 15% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm² (Continued)



ج

شکل ۹. نمودار نیرو - نفوذ ماسه مسلح نشده و مسلح شده با Geopet به اضافه ۱۵ درصد خاکستر بادی در تعداد لایه‌های مختلف با اندازه چشمه‌های الف) ۱×۱ سانتی‌متر مربع. ب) ۲×۲ سانتی‌متر مربع؛ ج) ۳×۳ سانتی‌متر مربع

Fig. 9. Force-penetration diagram for unreinforced and Geopet-reinforced sand with the addition of 15% fly ash, with varying numbers of layers and grid sizes of (a) 1×1 cm², (b) 2×2 cm², and (c) 3×3 cm²

۳-۵- آنالیز واریانس (ANOVA)

نشان داده شده است.

برای محاسبه مقدار CBR از RSM استفاده شده است. کاربرد مدل ریاضی فوق با استفاده از ارزیابی آماری نرم افزار Design-Expert DX12 مورد ارزیابی قرار گرفته است. به طور کلی، Design-Expert ابزاری جامع برای محققان و دست‌اندرکارانی است که به دنبال بهینه‌سازی فرآیندهای آزمایشی خود و اتخاذ تصمیمات مبتنی بر داده بر اساس تجزیه و تحلیل آماری دقیق هستند. این نرم‌افزار برای تسهیل برنامه‌ریزی، اجرا و تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها به ویژه در زمینه‌هایی مانند تولید، توسعه محصول و کنترل کیفیت طراحی شده است. در میان سایر نسخه‌های پیشنهادی، طراحی کوادراتیک (درجه دوم) برای CBR بهترین نتایج را به همراه داشته است. در نتیجه، در تحلیل، از مدل کوادراتیک برای پیش‌بینی CBR استفاده

نتایج نشان می‌دهد که فشار ایجاد شده توسط نفوذ سنبه در نمونه‌های بدون عمل‌آوری کمتر از نمونه‌هایی بود که به مدت هفت روز عمل‌آوری شدند. زیرا افزایش زمان عمل‌آوری می‌تواند به کامل‌تر شدن واکنش‌ها کمک کند. علاوه بر این، با گذشت زمان، آب موجود در ژئوپلیمر به تدریج حذف می‌شود که باعث می‌شود منافذ مویرگی با ساختار متراکم‌تر با مقاومت فشاری بیشتر فرو بریزند در نتیجه CBR در نمونه‌های تقویت‌شده با سه لایه Geopet با اندازه چشمه ۱×۱ سانتی‌متر مربع و ۱۵ درصد خاکستر بادی در مقایسه با نمونه مشابه پس از هفت روز عمل‌آوری، ۱۵/۳ درصد کاهش یافت.

جدول ۹. خلاصه نتایج تست‌ها با Geopet و خاکستر بادی

Table 9. Summary of Test Results with Geopet and Fly Ash

ردیف	اندازه چشمه‌های Geopet (cm)	تعداد لایه‌های Geopet	خاکستر بادی (%)	مقدار CBR (%)
۱	۱×۱	۱	۵	۱۶/۳۶
۲	۱×۱	۲	۵	۱۶/۶۰
۳	۱×۱	۳	۵	۱۸/۱۲
۴	۱×۱	۱	۱۰	۲۳/۱۰
۵	۱×۱	۲	۱۰	۲۳/۵۳
۶	۱×۱	۳	۱۰	۲۵/۴۸
۷	۱×۱	۱	۱۵	۲۶/۳۹
۸	۱×۱	۲	۱۵	۲۶/۷۹
۹	۱×۱	۳	۱۵	۲۸/۹۸
۱۰	۲×۲	۱	۵	۱۴/۹۲
۱۱	۲×۲	۲	۵	۱۵/۲۱
۱۲	۲×۲	۳	۵	۱۶/۷۸
۱۳	۲×۲	۱	۱۰	۲۰/۹۴
۱۴	۲×۲	۲	۱۰	۲۱/۷۷
۱۵	۲×۲	۳	۱۰	۲۴/۲۰
۱۶	۲×۲	۱	۱۵	۲۳/۳۴
۱۷	۲×۲	۲	۱۵	۲۵/۷۲
۱۸	۲×۲	۳	۱۵	۲۷/۶۲
۱۹	۳×۳	۱	۵	۱۳/۶۴
۲۰	۳×۳	۲	۵	۱۴/۳۰
۲۱	۳×۳	۳	۵	۱۵/۵۰
۲۲	۳×۳	۱	۱۰	۱۹/۳۰
۲۳	۳×۳	۲	۱۰	۱۹/۹۸
۲۴	۳×۳	۳	۱۰	۲۱/۷۰
۲۵	۳×۳	۱	۱۵	۲۱/۵۸
۲۶	۳×۳	۲	۱۵	۲۴/۴۹
۲۷	۳×۳	۳	۱۵	۲۵/۳۲

جدول ۱۰. اثر تعداد لایه‌های Geopet بر مقادیر CBR

Table 10. Effect of the Number of Geopet Layers on CBR Values

مقدار CBR			نمونه
سه لایه Geopet	دو لایه Geopet	یک لایه Geopet	بدون عمل آوری
۲۴/۵۲	۲۲/۹۴	۲۲/۶	
سه لایه Geopet	دو لایه Geopet	یک لایه Geopet	با عمل آوری ۷ روزه
۲۸/۹۸	۲۶/۷۹	۲۶/۳۹	

۳-۶- مطالعه تشخیصی و نمودارهای مدل

تجزیه و تحلیل تشخیصی در درجه اول از باقیمانده‌های مدل برای شناسایی نقاط پرت در نتایج پاسخ استفاده می‌کند. برای هر پاسخ در نمونه فعلی، سه نمودار تشخیصی ایجاد شده است: نمودار احتمالات عادی، نمودار مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر پاسخ واقعی، و نمودار باقی‌مانده در برابر مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده صعودی.

نمودار احتمالات طبیعی نشان می‌دهد که آیا باقی‌مانده‌ها دارای توزیع منظم هستند یا نه. تجزیه و تحلیل تغییر شکل پاسخ مناسب را می‌توان با الگوهای منحصر به فردی مانند منحنی "S" نشان داد. شکل ۱۰ نمودار توزیع نرمال باقیمانده برای پاسخ CBR را نشان می‌دهد. تمام داده‌ها از یک فرمت ثابت پیروی می‌کنند و اساساً با یک خط مستقیم نشان داده می‌شوند.

نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای نشان دادن مقدار یا مجموعه‌ای از مقادیر که مدل به راحتی نمی‌تواند آن‌ها را پیش‌بینی کند استفاده می‌شود. نمودار مقادیر برآورد شده در مقابل مقادیر واقعی برای CBR در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که نمودار تقریباً یک خط مستقیم ۴۵ درجه است، که نشان دهنده همبستگی قوی بین نتایج واقعی و مورد انتظار است.

نمودار پراکندگی با باقیمانده‌های استیوننته خارجی در محور Y و مقادیر پیش‌بینی‌کننده (X) در محور X، نمودار باقی‌مانده در مقابل داده‌های پیش‌بینی‌شده را ایجاد می‌کند. یک نمودار خوب با یک پرش کاملاً تصادفی

شده است. جدول ۵ ANOVA را برای مدل توصیف شده نشان می‌دهد، از جمله مقادیر احتمال و سر رونالد فیشر (P-value و F-value) که از اهمیت متغیرها و روابط آنها و همچنین اهمیت ضرایب رگرسیون پشتیبانی می‌کند. آنالیز واریانس یک روش آماری قدرتمند است که برای مقایسه میانگین‌های سه یا چند گروه استفاده می‌شود تا مشخص شود که آیا حداقل یک گروه تفاوت معنی‌داری با سایرین دارد یا خیر. ANOVA واریانس کل مشاهده شده در داده‌ها را به مؤلفه‌های قابل انتساب به منابع مختلف تقسیم می‌کند و به محققان این امکان را می‌دهد که ارزیابی کنند که آیا تفاوت بین میانگین‌های گروه به دلیل شانس تصادفی است یا منعکس‌کننده تفاوت‌های واقعی در جمعیت‌های مورد مطالعه است. مقادیر P در این مطالعه به عنوان دارای تأثیر قوی (کمتر از ۰/۰۵) یا ناچیز (بیشتر از ۰/۱) درجه بندی می‌شوند. معادله CBR در معادله ۱ ارائه شده است.

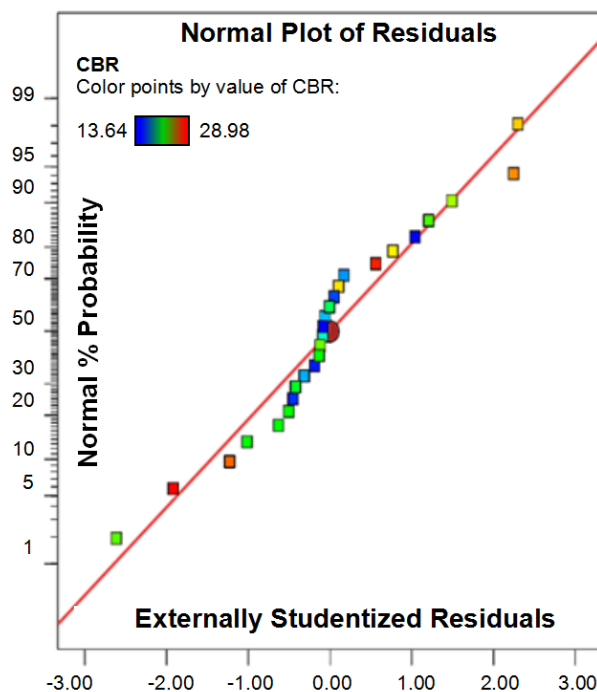
معادله ۱:

$$\begin{aligned} \text{CBR} = & +8.12063 + 2.22502 (\text{Fly Ash Percentage}) \\ & - 0.464012 (\text{GPET Mesh Area}) - 1.69264 (\text{GPET Layers}) \\ & - 0.020271 (\text{Fly Ash Percentage} * \text{GPET Mesh Area}) \\ & + 0.085500 (\text{Fly Ash Percentage} * \text{GPET Layers}) \\ & - 0.066658 (\text{Fly Ash Percentage}^2) + 0.023345 (\text{GPET Mesh Area}^2) \\ & + 0.544548 (\text{GPET Layers}^2) \end{aligned}$$

جدول ۱۱. تجزیه و تحلیل آمار واریانس مدل

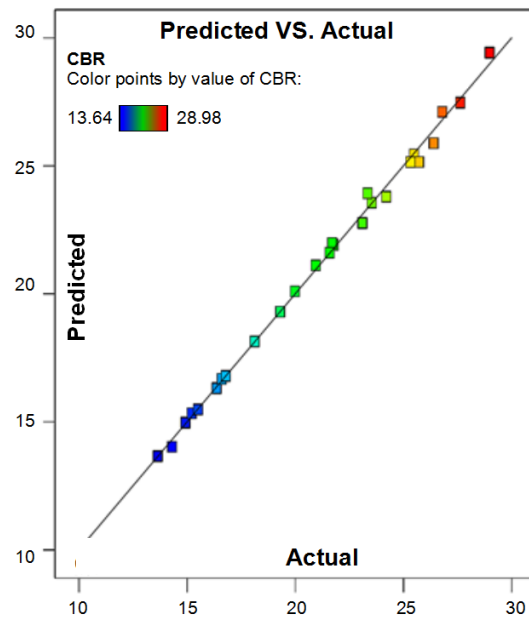
Table 11. Analysis of Variance (ANOVA) of the Model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	527.91	8	65.99	624.14	< 0.0001	significant
A-Fly Ash Percentage	371.21	1	371.21	3511.00	< 0.0001	
B-GPET Mesh Area	49.78	1	49.78	470.81	< 0.0001	
C-GPET Layers	32.35	1	32.35	305.95	< 0.0001	
AB	1.75	1	1.75	16.58	0.0008	
AC	2.19	1	2.19	20.74	0.0003	
A ²	16.20	1	16.20	153.19	< 0.0001	
B ²	0.7095	1	0.7095	6.71	0.0191	
C ²	1.60	1	1.60	15.09	0.0012	
Residual	1.80	17	0.1057			
Cor Total	529.71	25				



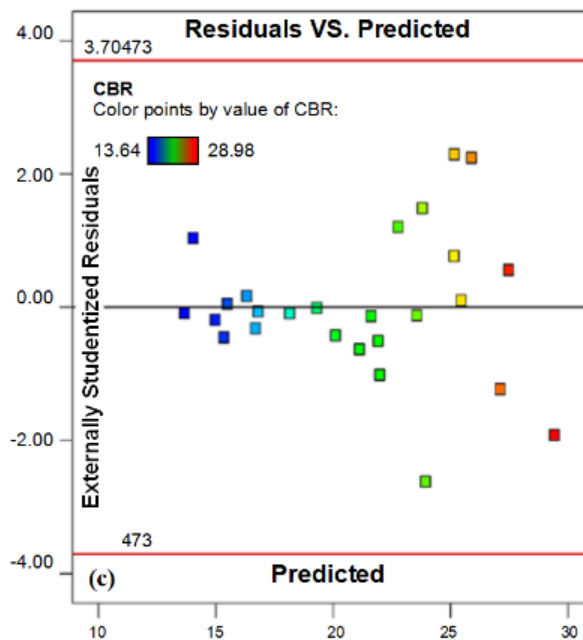
شکل ۱۰. نمودار احتمالات نرمال مدل توسعه یافته

Fig. 10. Normal probability plot of the developed model



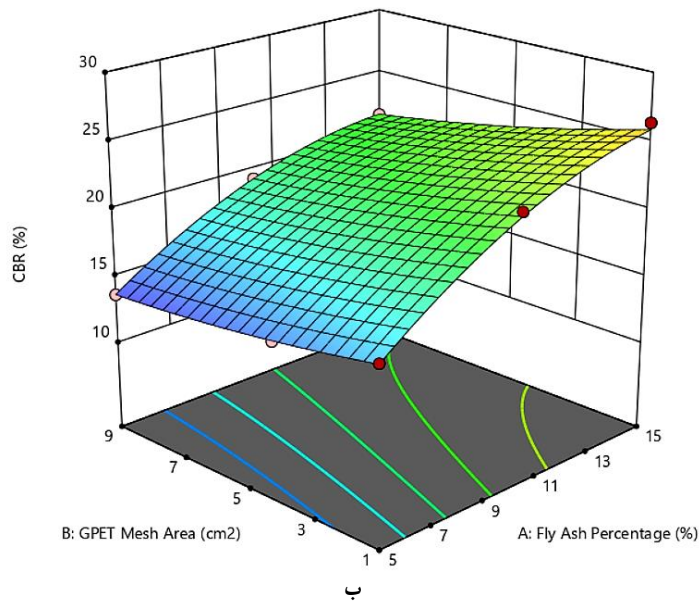
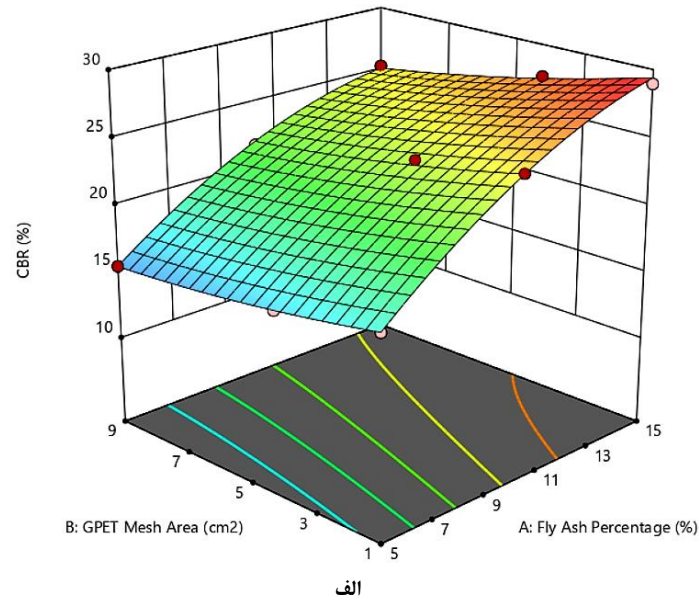
شکل ۱۱. نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی مدل توسعه یافته

Fig. 11. Plot of predicted values versus actual values for the developed model



شکل ۱۲. نمودار مقادیر باقیمانده در مقابل مقادیر پیش بینی شده مدل توسعه یافته

Fig. 12. Plot of residuals versus predicted values for the developed model



شکل ۱۳. نمودار سطح پاسخ سه بعدی CBR

Fig. 13. 3D response surface plot of CBR

بینی‌های جامع و قابل اعتمادی را انجام دهند. نمودار سطح سه بعدی CBR در شکل ۱۳ الف و ب نشان داده شده است که رنگ‌های قرمز و آبی به ترتیب مقادیر بالا و پایین نتیجه را نشان می‌دهند. توابع مدل چند جمله‌ای نمودارهای سطح سه بعدی را ترسیم می‌کنند که روش‌های مفیدی برای ارزیابی اندرکنش بین پاسخ‌ها و متغیرها هستند. لایه Geopet در شکل ۱۳ الف و ب به ترتیب در حد بالا و پایین آن دیده می‌شود.

اغلب یک نوار تقریباً افقی در امتداد محور باقیمانده استیودنته خارجی = صفر (۰) ایجاد می‌کند. علاوه بر این، هیچ تفاوتی بین نقطه داده و الگوی تصادفی کلی دیگر باقیمانده‌ها وجود ندارد. شکل ۱۲ توزیع نامنظم داده و نمودار باقیمانده توزیع و مقادیر مورد انتظار (باقی مانده در مقابل پیش بینی) CBR را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان می‌دهد که هر دو مدل دقیق هستند و می‌توانند اندرکنش بین پاسخ‌ها و متغیرها را توضیح دهند و همچنین پیش

۴- نتیجه گیری

استفاده مجدد از زباله های جامد برای تقویت و تثبیت خاک در پروژه های ساختمانی با کاهش میزان زباله در محل های دفن زباله به حفظ محیط زیست کمک می کند؛ زیرا باعث بهبود رفتار مکانیکی خاک می شود. در این مطالعه آزمایش CBR روی ماسه بندر انزلی تقویت شده و تثبیت شده با ژئوپت، خاکستر بادی و هیدروکسید سدیم انجام شد. نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

- تقویت شن و ماسه با لایه های ژئوپت به دلیل اثر غشایی، اصطکاک با خاک و محصور شدن دانه های خاک، ظرفیت باربری نمونه ها را ۷۱/۹ تا ۱۷۴/۹ درصد افزایش داد. استفاده از سه لایه Geopet چگالی را افزایش داد که با نفوذ سنبه بیش از مقادیر یک یا دو لایه Geopet و خاک بدون تقویت اندازه گیری شد. مقادیر CBR به دلیل اثر غشایی، اصطکاک با خاک، محصور شدن دانه های خاک و افزایش واکنش پوزولانی خاکستر بادی، که در آن با رطوبت واکنش می دهد تا ترکیبات سیمانی ایجاد کند، با کوتاه کردن مسیرهای شکست و زمان عمل آوری، اتصال بین دانه ها را افزایش می دهد. در نتیجه مقاومت فشاری خاک را افزایش می دهد. علاوه بر این، با توجه به مطالعات قبلی روزناک در سال ۱۹۶۸، یک همبستگی خطی قوی بین ظرفیت باربری و مقادیر CBR در OMC وجود دارد که در شکل - نشان داده شده است، در نتیجه، ژئوپت در خاک باعث افزایش مقادیر CBR و در نتیجه بهبود ظرفیت باربری خاک می شود.

- با افزایش درصد خاکستر بادی، میزان رطوبت بهینه کمی افزایش یافت، اما حداکثر چگالی خشک کاهش یافت. کاهش حداکثر وزن واحد خشک را می توان به خواص نگهداری و جذب آب خاکستر بادی نسبت داد. علاوه بر این، ذرات باردار درون خاکستر بادی برای جدا کردن دانه های خاک عمل کردند و بخشی از انرژی تراکم را جذب کردند و مانع از تراکم بهینه خاک شدند. علاوه بر این، با توجه به تراکم قابل توجهی بالاتر شن و ماسه در مقایسه با خاکستر بادی، از دست دادن وزن مخصوص خشک بیشتر بود. همچنین، مقادیر CBR به دلیل واکنش پوزولانی خاکستر بادی، که در آن با رطوبت واکنش می دهد و ترکیبات سیمانی ایجاد می کند، افزایش می یابد و در نتیجه مقاومت فشاری خاک را افزایش می دهد.

- عمل آوری به مدت هفت روز با افزایش مدت زمان عمل آوری، قدرت نفوذ را افزایش داد. واکنش های درون ماده می تواند بیشتر پیشرفت کند و مقاومت نمونه ها را افزایش دهد. علاوه بر این، با گذشت زمان، آب درون ژئوپلیمر به تدریج تبخیر می شود که منجر به فروپاشی منافذ مویرگی و ایجاد

ساختار متراکم تر با افزایش مقاومت فشاری می شود و در نتیجه CBRs را بهبود می بخشد. همانطور که نتایج نشان می دهد که CBR برای نمونه بدون پخت در شرایط مشابه ۱۵/۳٪ کمتر بود.

- مدل های ریاضی مبتنی بر RSM یک همبستگی قوی با یافته های تجربی نشان دادند. این نتایج شواهد روشنی را ارائه می دهند که رویکرد پیشنهادی برای تخمین CBR خاک تثبیت شده با خاکستر بادی و Geopet امیدوارکننده و بسیار ارزشمند است.

منابع

- [1] S. Siddiqua, P.N. Barreto, Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash, *Construction and Building Materials*, 169 (2018) 364-371.
- [2] P. Ghadir, N. Ranjbar, Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, 188 (2018) 361-371.
- [3] M. Moshtaghi, M. Keramati, O. Ghasemi-Fare, A. Pourdeilami, M. Ebrahimi, Experimental study on thermomechanical behavior of energy piles in sands with different relative densities, *Journal of Cleaner Production*, 403 (2023) 136867.
- [4] N. YARBAŞI, E. Kalkan, The mechanical performance of clayey soils reinforced with waste PET fibers, *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 2(1) (2020) 19-26.
- [5] S.R. Abdila, M.M.A.B. Abdullah, R. Ahmad, D.D. Burduhos Nergis, S.Z.A. Rahim, M.F. Omar, A.V. Sandu, P. Vizureanu, Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A Review, *Materials*, 15(1) (2022) 375.
- [6] H. Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental evaluation of the effects of structural parameters, installation methods and soil density on the micropile bearing capacity, *International Journal of Civil Engineering*, 19 (2019) 1313-1325.
- [7] M.I. Hoque, M. Hasan, S.D. Datta, Effect of waste plastic strip on the shear strength and permeability

- soil stabilization for soft subgrades, *Transportation Geotechnics*, 29 (2021) 100585.
- [18] S. Arora, A.H. Aydilek, Class F fly-ash-amended soils as highway base materials, *Journal of materials in civil engineering*, 17(6) (2005) 640-649.
- [19] F. Santos, L. Li, Y. Li, F. Amini, Geotechnical properties of fly ash and soil mixtures for use in highway embankments, in: *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, May, 2011, 12.
- [20] H.Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Bahrami, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, H.F. Isleem, M. Navazani, S. Dessouky, Application of hybridized ensemble learning and equilibrium optimization in estimating damping ratios of municipal solid waste, *Scientific Reports*, 14(1) (2024) 17584.
- [21] H.Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Fahimifar, T. Ebadi, S. Siddiqua, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, S. Dessouky, Shear modulus prediction of landfill components using novel machine learners hybridized with forensic-based investigation optimization, *Construction and Building Materials*, 411 (2024) 134443.
- [22] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers, *Construction and Building Materials*, 66 (2014) 375-383.
- [23] M. Romagnoli, P. Sassatelli, M.L. Gualtieri, G. Tari, Rheological characterization of fly ash-based suspensions, *Construction and Building Materials*, 65 (2014) 526-534.
- [24] F. Sabbaqzade, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, P. Hamidian, Evaluation of the mechanical behaviour of cement-stabilised collapsible soils treated with natural fibres, *Geomechanics and Geoengeererin*, (2021) 1-16.
- [25] X. Long, L. Cai, W. Li, RSM-based assessment of pavement concrete mechanical properties under joint action of corrosion, fatigue, and fiber content, *Construction and Building Materials*, 197 (2019) 406-420.
- [26] H.M. Moghaddam, A. Fahimifar, T. Ebadi, M. Keramati, S. Siddiqua, Assessment of leachate-contaminated clays characteristics of black cotton soil, *J. Appl. Sci. Eng*, 27 (2023) 2019-2028.
- [8] A. Chandra, S. Siddiqua, Sustainable utilization of chemically depolymerized polyethylene terephthalate (PET) waste to enhance sand-bentonite clay liners, *Waste Management*, 166 (2023) 346-359.
- [9] T.G.L. Bikoko, J.C. Tchamba, N.K.F. Gildas, S. Amziane, Assessing the mechanical and durability properties of recycled polyethylene terephthalate (PET) plastic soil, in: *International Conference on Bio-Based Building Materials*, Springer, (2023) 3-13.
- [10] M. Maher, Y. Ho, Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8) (1994) 1381-1393.
- [11] O. Andersland, Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture, in: *Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement*, (1979).
- [12] I. Bozyigit, F. Bulbul, C. Alp, S. Altun, Effect of randomly distributed pet bottle strips on mechanical properties of cement stabilized kaolin clay, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(5) (2021) 1090-1101.
- [13] S. Peddaiah, A. Burman, S. Sreedeeep, Experimental study on effect of waste plastic bottle strips in soil improvement, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5) (2018) 2907-2920.
- [14] Z. Hajiannezhad, M. Keramati, R. Naderi, M. Alinezhad, Evaluation of Shear Strength Behaviour of Anzali Port Sand Reinforced with Polyethylene terephthalate (PET), *Journal of Science and Technology*, (2019).
- [15] S. Boobalan, P. Anandakumar, M. Sathasivam, Utilization of waste plastic sheets as soil stabilization materials, *Materials Today: Proceedings* (2023).
- [16] H.H. Abdullah, M.A. Shahin, M.L. Walske, Geomechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag, *Soils and Foundations*, 59(6) (2019) 1906-1920.
- [17] H. Karami, J. Pooni, D. Robert, S. Costa, J. Li, S. Setunge, Use of secondary additives in fly ash based

- of expansive soil using industrial wastes, *Geomechanics and engineering*, 12(1) (2017) 111-125.
- [37] N. Cristelo, S. Glendinning, A. Teixeira Pinto, Deep soft soil improvement by alkaline activation, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(2) (2011) 73-82.
- [38] B. Sahu, Improvement in California bearing ratio of various soils in Botswana by fly ash, in: *International Ash Utilization Symposium*, (2001.)
- [39] T. Harianto, Performance of subbase layer with geogrid reinforcement and zeolite-waterglass stabilization, *Civil Engineering Journal*, 8(20) (2022) 251-262.
- [40] S. Jahandari, S.F. Mojtahedi, F. Zivari, M. Jafari, M.R. Mahmoudi, A. Shokrgozar, S. Kharazmi, B. Vosough Hosseini, S. Rezvani, H. Jalalifar, The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils, *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1) (2022) 269-281.
- [41] L. Li, J. Zhang, H. Xiao, Z. Hu, Z. Wang, Experimental Investigation of Mechanical Behaviors of Fiber Reinforced Fly Ash Soil Mixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019(1) (2019) 1050536.
- [42] S. Gupta, A. GuhaRay, A. Kar, V. Komaravolu, Performance of alkali-activated binder-treated jute geotextile as reinforcement for subgrade stabilization, *International Journal of Geotechnical Engineering*, (2021).
- [43] R.K. Dutta, V. Sarda, CBR Behaviour of Waste Plastic Strip-Reinforced Stone Dust/Fly Ash Overlying Saturated Clay, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 31(3) (2007)
- [44] I. Aghayan, R. Khafajeh, Recycling of PET in asphalt concrete, in: *Use of recycled plastics in eco-efficient concrete*, Elsevier, (2019) 269-285.
- [45] B. Mishra, M.K. Gupta, Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 95-107.
- [46] A. Wardhono, Comparison study of class F and class using experimental and artificial methods, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2024).
- [27] R. Rezvani, I. Hosseinpour, M. Kavoshmelli, Effect of moisture content on unconfined compressive behavior of geotextile-reinforced clay specimen, *Arabian Journal of Geosciences*, 15(3) (2022) 230.
- [28] H. Alimohammadi, J. Zheng, V.R. Schaefer, J. Siekmeier, R. Velasquez, Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: A review of large-scale laboratory studies, *Transportation Geotechnics*, 27 (2021) 100471.
- [29] N.E. Rebello, R. Shivashankar, V.R. Sastry, Surface displacements due to tunneling in granular soils in presence and absence of geosynthetic layer under footings, *Geomechanics & engineering*, 15(2) (2018) 739-744.
- [30] A. Mittal, S. Shukla, Influence of geotextile and geogrid reinforcement on strength behaviour of soft silty soil, *Applied Mechanics and Materials*, 877 (2018) 264-269.
- [31] B. Leshchinsky, T.M. Evans, J. Vesper, Microgrid inclusions to increase the strength and stiffness of sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2) (2016) 170-177.
- [32] S. Tafreshi, A. Norouzi, Application of waste rubber to reduce the settlement of road embankment, *Geomechanics and Engineering*, 9(2) (2015) 219-241.
- [33] D. Prasad, G. Prasada Raju, V. Ramana Murthy, Use of waste plastic and tyre in pavement systems, *Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division*, 89(AOU) 31-35 (2008)
- [34] M. Corrêa-Silva, N. Araújo, N. Cristelo, T. Miranda, A.T. Gomes, J. Coelho, Improvement of a clayey soil with alkali activated low-calcium fly ash for transport infrastructures applications, *Road Materials and Pavement Design*, 20(8) (2019) 1912-1926.
- [35] S. Rios, N. Cristelo, A. Viana da Fonseca, C. Ferreira, Stiffness behavior of soil stabilized with alkali-activated fly ash from small to large strains, *International Journal of Geomechanics*, 17(3) (2017) 04016087.
- [36] S.K. Mohanty, P.K. Pradhan, C.R. Mohanty, Stabilization

- Cement-fly ash stabilisation/solidification of contaminated soil: Performance properties and initiation of operating envelopes, *Applied Geochemistry*, 33 (2013) 64-75.
- [50] F.N. Okonta, T. Manciya, Compaction and strength of lime-Fly ash stabilized collapsible residual sand, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(1976) (2010) e88.
- [51] M. Zribi, B. Samet, S. Baklouti, Effect of curing temperature on the synthesis, structure and mechanical properties of phosphate-based geopolymers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 511 (2019) 62-67.
- C fly ashes as cement replacement material on strength development of non-cement mortar, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, (2018) 012019.
- [47] R. Brooks, F.F. Udoeyo, K.V. Takkalapelli, Geotechnical properties of problem soils stabilized with fly ash and limestone dust in Philadelphia, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(5) (2011) 711-716.
- [48] L.G. Archuleta, P.J. Tikalsky, R. Carrasquillo, Production of concrete containing fly ash for structural applications, University of Texas at Austin, (1985).
- [49] R.B. Kogbara, A. Al-Tabbaa, Y. Yi, J.A. Stegemann,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Karami, M. Keramati, M. Ebrahimi, H. Moradi Moghaddam, R. Maadi, *Laboratory Evaluation of CBR Values in Geopet-Reinforced Sandy Soils: Modeling with the RSM Method*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(10) (2025) 1321-1350.

DOI: [10.22060/ceej.2024.21731.7815](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.21731.7815)



