

Study on the Effect of Thickness and Gradation of Geosynthetic-Reinforced Base Layer on CBR Values of a Three-Layer Pavement System

Research Article

Arash Mahmoudi¹, Sajjad Gholipour², Masoud Makarchian³

DOI: [10.22067/jfcei.2025.92220.1345](https://doi.org/10.22067/jfcei.2025.92220.1345)

1- Introduction

In recent decades, the rapid growth of road transportation and the consequent increase in heavy traffic have made the bearing capacity and structural stability of pavements one of the most critical concerns in geotechnical and highway engineering. Traditional soil stabilization techniques such as the addition of lime, cement, or chemical additives, can enhance soil strength, yet they often lead to environmental issues, high costs, and limited durability under variations in moisture and temperature. In contrast, the application of geosynthetics as polymeric materials with multifunctional properties (particularly reinforcement, separation, drainage, and filtration) has emerged as a sustainable and cost-effective alternative for improving pavement performance. Numerous studies have investigated the reinforcing effects of geotextiles, geogrids, and geocomposites on soil strength. However, most previous research focused mainly on identifying the optimum depth of a single reinforcement layer, while the combined effects of base thickness, grain size distribution, and the number of reinforcing layers has rarely been studied. In the present research, a modified CBR mold with larger dimensions (diameter = 250 mm, height = 230 mm) was employed to minimize boundary effects and simulate more realistically the behavior of a three-layer pavement system consisting of surface, base, and subgrade layers. The main innovations of this study can be summarized as follows:

1. A comprehensive evaluation of the influence of base layer thickness and gradation on the performance of geosynthetics;
2. An analysis of the effects of reinforcement placement and the number of layers (single-layer and double-layer configurations) using the improvement ratio (IR) as the primary indicator;
3. The use of a modified CBR test to establish realistic correlations between the physical properties of soils and the mechanical behavior of the pavement system.

2- Materials and Methods

2-1- Materials

The laboratory model consisted of three distinct layers Fig.1:

1. Surface layer: a siliceous crushed sand-gravel mixture (SW) compacted to 88 % relative density;
2. Base layer: two sands with different gradations (SP and SP-SM) compacted to 90 % relative density, with thicknesses of 3, 6, and 9 cm;
3. Subgrade layer: kaolinite clay (CL) compacted to 100 %.

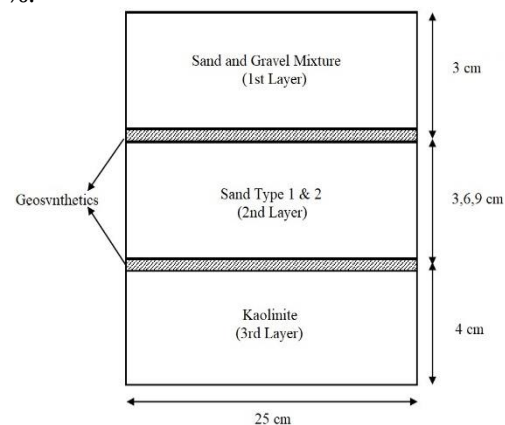


Figure 1. Schematic layout of sample preparation and geosynthetic placement

The grain-size distribution curves are illustrated in Fig (2) and the physical and mechanical properties of all materials are summarized in Table. 1. Three types of geosynthetics supplied by GeoParsian Company were used: polypropylene geotextile (PP), polyester geotextile (PE), and Geocomposite (GPC).

* Manuscript received February 19, 2025, Revised July 14, 2025, Accepted September 18, 2025.

¹ M.Sc. in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Corresponding Author: Assistant Professor, Engineering Faculty of Khoy, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.
Email: sgholipour@uut.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

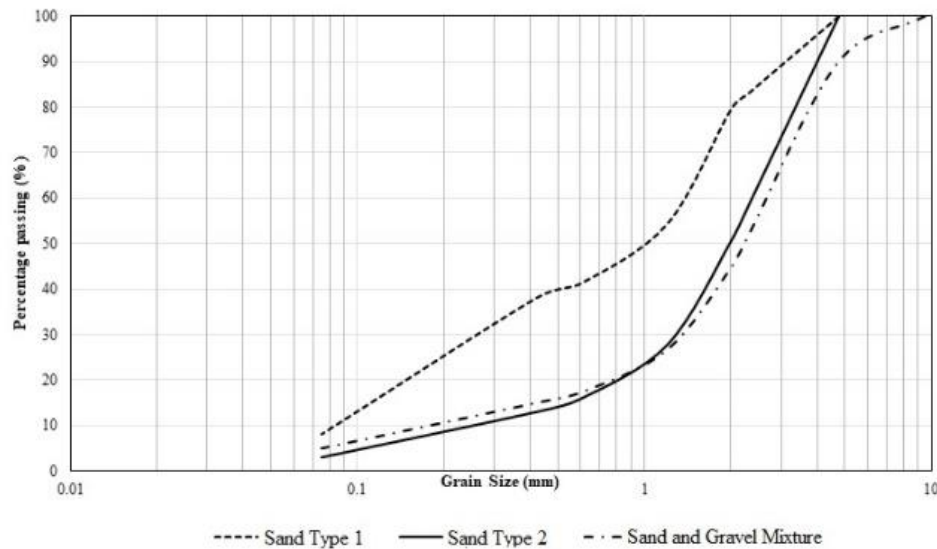


Figure 2. Grain size distribution curves

Table 1- Geotechnical properties of soils

Layers	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	G_s	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	LL	PI	AASHTO	ASTM
Mixture Sand-Gravel	0.28	1.30	2.4	2.68	10.6	19.02	-	-	A-1-a (0)	SW
Sand Type 1	0.081	0.27	1.5	2.65	11.64	18.33	-	-	A-1-b (0)	SP-SM
Sand Type 2	0.20	1.30	2.7	2.66	11.85	18.73	-	-	A-1-b (0)	SP
Kaolinite	-	-	-	2.64	19.2	15.5	41	16	A-7-6 (18)	CL

2-2- Experimental Procedure

Each layer was compacted separately at its optimum moisture content and maximum dry density according to ASTM D698. The geosynthetics were placed in three different configurations:

1. At the upper interface (between surface and base);
2. At the lower interface (between base and subgrade);
3. At both interfaces simultaneously (double-layer reinforcement).

The CBR tests were conducted using a CBR-Marshall testing machine equipped with a 50 mm-diameter loading plunger. The penetration rate was 1.27 mm/min, and loading continued up to 40 mm penetration. The applied load and penetration were recorded continuously, and both CBR values and improvement ratios (IR) were determined for a reference penetration of 30 mm.

To ensure accuracy and repeatability, each test was performed three times, and the average results were reported. The coefficient of variation was below 5%, confirming excellent reproducibility.

3- Results and Discussion

3-1- Effect of Geosynthetics on Load-Penetration Behavior

The load-displacement curves Fig 3. revealed that the inclusion of geosynthetics at the layer interfaces consistently enhanced the penetration resistance. During the initial stage of penetration (less than 5 mm), the difference between reinforced and unreinforced samples

was small; however, with increasing penetration, the membrane action of the geosynthetic became active, significantly increasing the load resistance.

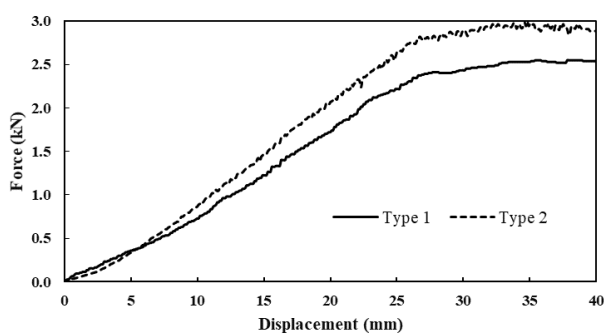
The highest improvement ratio (IR = 4.5) was obtained in specimens with geocomposite reinforcement placed at both interfaces and a base thickness of 6 cm, whereas the lowest IR (1.2) was observed for the single-layer PP geotextile at the lower interface (Table 2 and Table 3).

Table 2- Improvement ratio values for soil type 1

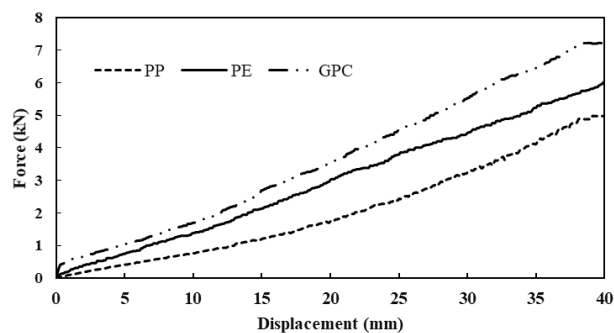
Base Layer Thickness	Placement of the geosynthetic layer	Type of Geosynthetics		
		PP	PE	GPC
3 cm	Upper interface	1.40	1.60	1.98
	Lower interface	1.42	1.77	1.93
	Both interfaces	2.34	2.61	2.97
6 cm	Upper interface	1.67	2.00	2.48
	Lower interface	1.36	1.90	2.07
	Both interfaces	2.81	2.88	3.60
9 cm	Upper interface	1.76	2.05	2.51
	Lower interface	1.38	1.79	2.15
	Both interfaces	3.00	3.10	4.40

Table 3- Improvement ratio values for soil type 2

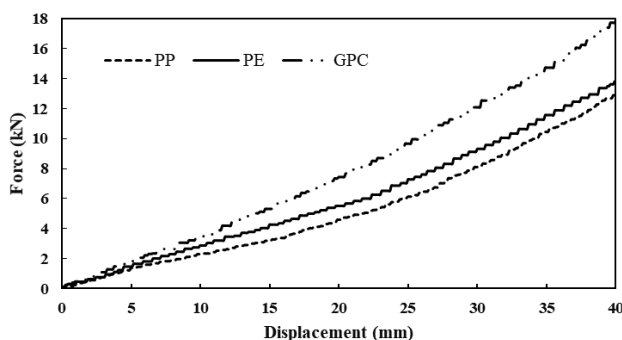
Base Layer Thickness	Placement of the geosynthetic layer	Type of Geosynthetics		
		PP	PE	GPC
3 cm	Upper interface	1.20	1.54	1.94
	Lower interface	1.46	1.53	1.58
	Both interfaces	2.14	2.40	2.64
6 cm	Upper interface	1.65	1.84	2.16
	Lower interface	1.63	1.90	2.20
	Both interfaces	2.75	3.12	4.02
9 cm	Upper interface	1.58	1.80	2.31
	Lower interface	1.50	1.86	2.19
	Both interfaces	2.67	3.15	3.92



(a) Unreinforced model with a base layer thickness of 3 cm



(b) Reinforced model with a base layer thickness of 3 cm for type 2 sand and geotextile placement at the upper boundary



(c) Reinforced model with a base layer thickness of 6 cm for type 2 sand and geotextile placement at the upper boundary

Figure 2. CBR test results

3-2- Influence of Base Thickness and Gradation

Increasing the base layer thickness from 3 to 6 cm resulted in a 25–40% increase in IR, but a further increase to 9 cm had negligible effect, as the lower geosynthetic layer was located beyond the effective stress bulb zone. Moreover, while coarser-grained sand (Type 2) exhibited higher inherent bearing strength, the relative reinforcement effect was more pronounced in finer-grained sand (Type 1), where particle fabric interlock and friction were more effective. On average, the improvement in Type 1 sand was about 10% greater than in Type 2.

4- Comparison with Previous Studies

The results of this study were compared with findings from previous research (Table 4). The improvement ratios in earlier studies ranged from 1.1 to 4.0, which are consistent with the present results of 1.2 to 4.5.

The use of a modified, large-scale CBR mold also provided more realistic representations of lateral stress effects and edge conditions. Furthermore, the observed performance trends correspond well with the findings of Singh et al. (2019) and Nazeri et al. (2020), indicating that maximum improvement occurs when the reinforcement layer is positioned within the active stress zone, approximately 0.3-0.6 of the specimen height.

Table 4- Comparison of the results of the present study with those of other researchers

Researches	Number of reinforcing layers	Range of load improvement ratio and explanation
Abdi-Goudarzi et al. (2022) [19]	1	1.1-1.3
Carlos et al. (2024) [20]	1	1.5
	2	2
Singh et al. (2019) [12]	1	1.1-1.7
	2	2-4
Current research	1-2	1.3-3

5- Conclusions

1. Geosynthetics significantly enhance the bearing capacity of the base layer, increasing the penetration resistance up to 4.5 times that of the unreinforced condition, depending on type and placement.
2. Geocomposite (GPC) exhibited the best reinforcement performance, on average 40% higher than PP and PE geotextiles.
3. The optimum base layer thickness was found to be around 6 cm; further increases lead to saturation of the stress bulb zone and reduced reinforcement efficiency.

4. Finer gradation (sand type 1) produced better interlocking and frictional interaction with the geosynthetics, resulting in an additional 10% improvement in IR.
5. Double-layer reinforcement (geosynthetics placed at both interfaces) provided the highest mechanical efficiency, especially when using geocomposites.
6. The modified CBR test proved to be a reliable tool for minimizing boundary effects, improving experimental accuracy, and better simulating real pavement conditions.

Overall, the results clearly demonstrate that the incorporation of geosynthetics in multilayer pavement systems is not only technically effective but also economically and environmentally sustainable. Enhancing the bearing capacity, reducing base layer thickness, and improving long-term stability are among the main benefits of this approach. Consequently, geosynthetics can play a key role in developing sustainable infrastructure and reducing natural resource consumption in road construction.



مطالعه تأثیر ضخامت و دانه‌بندی لایه اساس مسلح شده با ژئوسنتتیک‌ها بر مقادیر CBR سیستم روسازی سه لایه*

مقاله پژوهشی

آرش محمودی^(۱) سجاد غلی‌پور^(۲) مسعود مکارچیان^(۳)

DOI: 10.22067/jfeci.2025.92220.1345

چکیده استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در تسلیح خاک برای افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و جلوگیری از ترک‌های روسازی، جایگزین مؤثر روش‌های سنتی مانند استفاده از سیمان و آهک است. در این پژوهش، با انجام آزمایش‌های CBR اصلاح شده روی نمونه‌های خاک مسلح شده با سه نوع ژئوسنتتیک، تأثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. لایه‌های روسازی شامل رویه (مخلوط شن و ماسه)، اساس (دو نوع ماسه با ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر و دو نوع دانه‌بندی) و زیر اساس (رس با ضخامت ثابت) بود. نتایج نشان داد که قرار دادن ژئوسنتتیک‌ها در مرز لایه‌ها، به ویژه ژئوکامپوزیت، ظرفیت باربری را بین ۱/۲ تا ۴/۵ برابر حالت غیر مسلح افزایش می‌دهد. همچنین، با افزایش ضخامت لایه اساس و اندازه دانه‌ها، ظرفیت باربری بالاتر می‌رود، اما تأثیر ژئوسنتتیک‌ها در مرز بین لایه‌ها کاهش می‌یابد. این یافته‌ها نقش مهم ژئوسنتتیک‌ها را در بهینه‌سازی طراحی روسازی تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی ژئوسنتتیک، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، ظرفیت باربری، تسلیح لایه اساس.

Study on the Effect of Thickness and Gradation of Geosynthetic-Reinforced Base Layer on CBR Values of a Three-Layer Pavement System

Arash Mahmoudi

Sajjad Gholipour

Masoud Makarchian

Abstract The use of geosynthetics in soil reinforcement for increasing load-bearing capacity, reducing settlement, and preventing pavement cracking is an effective alternative to conventional methods such as the use of cement and lime. In this study, modified CBR tests were conducted on soil samples reinforced with three types of geosynthetics to investigate the effects of various parameters. The pavement layers included: the surface (a sand and gravel mixture), the base layer (two types of sand with thicknesses of 3, 6, and 9 cm and two different gradations), and the subgrade layer (clay with a fixed thickness). The results showed that placing geosynthetics at the interfaces between layers, especially geocomposites, increased the load-bearing capacity by a factor of 1.2 to 4.5 times compared to the unreinforced condition. Additionally, as the base course thickness and particle size increased, the load-bearing capacity improved; however, the effectiveness of the geosynthetics at the layer interfaces decreased. These findings confirm the important role of geosynthetics in optimizing pavement design.

Key words Geosynthetic, CBR, Bearing capacity, Reinforcement of base layer.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۲/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۷/۲۷ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه.

(۳) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

مقدمه

انسان از دیرباز از روش‌های مختلفی مانند افزودن مواد و مصالح طبیعی در دسترس همانند سیمان، آهک، سرباره (رضوانی و همکاران، ۲۰۲۰)، افزودنی‌های فلزی و غیر فلزی درون خاک (قلی‌پور و مکارچیان، ۲۰۲۰)، روش‌های بیولوژیکی (نظامی و همکاران، ۲۰۱۷) و استفاده از مصالح شیمیایی و زیستی مختلف درون خاک (شفقتیان و مرادی، ۲۰۲۵) همیشه درصدد تثبیت، تقویت و بهسازی خاک بوده است و همچنان نیز ادامه دارد. لیکن در امتداد روش‌های مذکور، در دهه‌های اخیر با تولید و توسعه انواع مصنوعات ژئوستتیک و پیشرفت دانش ژئوتکنیک، جامعه مهندسی جهت برون‌رفت از محدودیت‌های ظرفیت باربری و نشست خاک‌ها به سمت استفاده از مصالح نوین برای تثبیت، تسلیح، افزایش پایداری و بهبود رفتار خاک به ویژه در ساخت راه‌ها و جاده‌ها سوق یافته است (شکیبی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۴). با توجه به حجم زیاد مصالح شن و ماسه مورد استفاده در احداث جاده‌ها و وجود محدودیت‌هایی نظیر کمبود مصالح مناسب، گران بودن هزینه‌های حمل مصالح و مباحث مرتبط با موضوعات زیست‌محیطی، تمایل مهندسان در استفاده از مصالح ژئوستتیک برای جایگزینی و رفع محدودیت‌های اشاره شده و مقرون به صرفه شدن احداث جاده‌ها بیشتر شده است. افزایش میزان باربری و حجم ترافیک راه‌ها، نیاز به کاهش ضخامت لایه‌ها با انتقال بخشی از بار وارد شده به ژئوستتیک‌ها و استفاده از مصالح با کیفیت پایین‌تر و مقرون به صرفه بودن از مزایای مهم به‌کارگیری مصالح ژئوستتیک در صنعت ساخت و توسعه راه‌ها به شمار می‌رود.

با توجه به پژوهش‌های مشتمل بر استفاده از ژئوستتیک‌ها در حوزه ساخت جاده‌ها از طریق انجام آزمایش‌های CBR، در این بخش خلاصه‌ای از نتایج پژوهش‌های پژوهشگران مختلف ارائه می‌شود:

Góngora و Palmeira (۲۰۱۲) با بررسی نتایج آزمایش‌های بارگذاری سیکلی روی لایه‌های شنی مسلح شده با ژئوگرید گزارش کردند که عملکرد بستر راه، تابعی از چندین عامل همانند مدول پایداری، سختی کششی شبکه ژئوگرید و اندرکنش خاک با مصالح ژئوگرید است.

Wulandari و Tjandra (۲۰۱۵) با تحلیل عددی پایداری خاکریزهای جاده مسلح شده توسط ژئوستتیک‌ها به این نتیجه

رسیدند که مقاومت کششی بهینه ژئوتکستایل مورد استفاده در تسلیح خاکریزها، به طور قابل توجهی وابسته به میزان ضریب اطمینان تحلیل است.

در مطالعه Sadeghi-Azar و Dabiri (۲۰۱۵)، کاربرد ژئوتکستایل در خاک دانه‌ای مخلوط با سیلت از طریق انجام آزمایش CBR بررسی و مشاهده شد که ظرفیت باربری متناسب با میزان نسبت مخلوط شن و سیلت تغییر می‌کند، به طوری که با افزایش میزان درصد سیلت، مقادیر CBR کاهش یافت. نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه بر بستر تسلیح شده با ژئوستتیک‌ها توسط Abu-Farsakh و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که استفاده از دو لایه ژئوستتیک نسبت به سایر حالت‌ها، دارای بهره‌وری بیشتری است و برای حالت تسلیح تک‌لایه‌ای لایه اساس، مدول برجهنگی تا ۲۵٪ افزایش و ضخامت لایه تا ۳۰٪ کاهش یافت.

مطالعه مدول برجهنگی لایه‌های دانه‌ای تثبیت شده با ژئوگرید از طریق آزمایش‌های بارگذاری صفحه توسط White و Vennapusa (۲۰۱۷) انجام شد و بر اساس نتایج به دست آمده گزارش کردند که مدول برجهنگی لایه مسلح نسبت به لایه غیر مسلح، می‌تواند تا حدود ۱۰ برابر بیشتر به دست آید.

James و Rakendu (۲۰۱۸) با بررسی تأثیر وجود ژئوتکستایل در میان فصل مشترک دو لایه رسی از طریق انجام آزمایش‌های CBR و نفوذ مخروط نشان دادند که بسته به ضخامت و آرایش لایه‌ها و نوع ژئوتکستایل، ضخامت لایه روسازی می‌تواند تا ۱۸٪ کاهش داشته باشد.

Singh و همکاران (۲۰۱۹) از طریق مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد خاک بستر مسلح با لایه‌های ژئوستتیک را در اعماق مختلف، با انجام آزمایش‌های CBR برای تعیین عمق بهینه قرارگیری ژئوستتیک‌ها مطالعه کردند. نتایج نشان می‌دهد که مصالح تسلیح کننده، سهم قابل توجهی در افزایش مقادیر CBR و کاهش ضخامت لایه اساس دارد، به طوری که بسته به نوع ژئوستتیک، بیشترین بهره‌وری زمانی حاصل شد که ژئوستتیک در فاصله ۰/۳ تا ۰/۶۲ ارتفاع نمونه قرار می‌گیرد. Singh و همکاران (۲۰۲۰) با انجام آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی، عملکرد بهسازی ژئوستتیک‌ها در راه‌ها و تأثیر لایه تسلیح کننده واقع در فصل مشترک لایه‌های اساس و زیراساس را بررسی کردند. نتایج نفوذ مخروط، کاهش میزان نفوذ به ازای ضربات

شده است، ملاحظه می‌شود که تمرکز اصلی پژوهش‌ها بر استفاده از یک لایه و یافتن عمق بهینه محل استقرار ژئوستتیک‌ها بوده است؛ بنابراین در این پژوهش سعی شد که با قرار دادن انواع ژئوستتیک‌ها در فصل مشترک لایه‌های مختلف رویه، اساس و زیراساس، میزان بهره‌وری ژئوستتیک‌ها از طریق انجام آزمایش‌های CBR که از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در راه‌سازی است، با مطالعه نوع دانه‌بندی و ضخامت لایه اساس مورد بررسی قرار گیرد. همچنین بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که در بیشتر تحقیقات از آزمایش CBR استاندارد استفاده شده، در صورتی که نتایج گزارش شده توسط برخی محققان (Abdi-Goudarzi و همکاران (۲۰۲۲)، Carlos و همکاران (۲۰۲۴)) شرایط مرزی قالب‌هایی با ابعاد استاندارد، اثرات قابل توجهی بر نتایج آزمایش CBR دارد؛ بنابراین در این پژوهش از قالب‌های اصلاح شده با ابعاد بزرگ‌تر برای کاهش اثرات مرزی استفاده شد که نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبلی محسوب می‌شود.

اهداف ویژه پژوهش کنونی از طریق آزمایش CBR اصلاح شده بر موارد ذیل متمرکز است:

۱. اندازه‌گیری پاسخ نفوذ سه نوع خاک ریزدانه و درشت‌دانه تسلیح شده توسط ژئوستتیک‌های مختلف.
۲. ارزیابی تأثیر تسلیح کننده شامل نوع و تعداد لایه‌های تسلیح کننده بر مقاومت نفوذ.

مواد و روش‌ها

مشخصات مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت لایه‌های روسازی شامل شن و ماسه شکسته سیلیسی است که از کارخانه آسفالت صنایع شنی آکام واقع در شهرستان شهریار استان تهران تهیه شد که با سه نوع دانه‌بندی مختلف برابر استاندارد ASTM D422 و منحنی دانه‌بندی مطابق شکل (۱) برای ایجاد لایه‌های اول (رویه) و دوم (اساس) خاکریزی به کار گرفته شده است. مشخصات کلی مصالح در جداول (۱) و (۲) مشاهده می‌شود. برای ایجاد لایه خاک ریزدانه مورد استفاده در لایه سوم (زیراساس) از خاک رس کائولینیت منطقه زنوز آذربایجان شرقی با نام تجاری SZWNK1 استفاده شد که نمودار دانه‌بندی آن در شکل (۲) و مشخصات فیزیکی و حدود اتربرگ آن نیز در جدول (۱) نمایش داده شده است.

یکسان برای لایه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل نسبت به لایه‌های غیر مسلح را نشان داد. با مقایسه رفتار تسلیح کننده ژئوتکستایل نسبت به ژئوگرید، عملکرد بهتر ژئوتکستایل نسبت به ژئوگرید مشاهده شد. Nazeri و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تأثیر لایه‌های ترکیبی ژئوگرید و ژئوتکستایل در کاهش ضخامت مورد نیاز لایه‌های اساس واقع بر بستر نرم از طریق انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه، نشان دادند که ضخامت لایه اساس بسته به مقاومت لایه بستر زیرین، قابلیت کاهش ۱۷ تا ۲۳ درصدی را دارد. نتایج همچنین نشان داد که کارآمدی ژئوکامپوزیت‌ها، مشروط به ضخامت لایه اساس است؛ به طوری که با افزایش ضخامت، تأثیرگذاری تسلیح کننده کاهش می‌یابد.

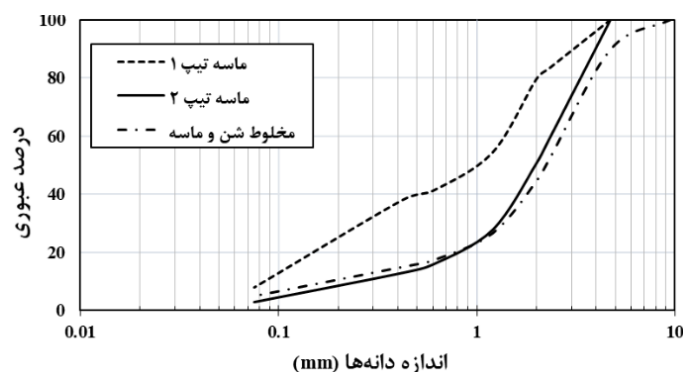
بررسی اندرکنش خاک و تسلیح کننده‌ها با تمرکز بر نحوه توزیع تنش در سطح تماس خاک و ژئوستتیک‌ها توسط Morsy و Zornberg (۲۰۲۱) انجام شد که نتایج بیانگر تأثیر محصورکنندگی جانبی ژئوستتیک‌ها بر خاک است، به طوری که با افزایش کرنش و فاصله قائم تسلیح کننده‌ها، تغییرات فشار جانبی خاک افزایش می‌یابد.

یک سری آزمون آزمایشگاهی در مقیاس واقعی برای بررسی و ارزیابی مشارکت ژئوگریدها در تسلیح بستر راه و بهبود عملکرد لایه‌های نرم بستر، توسط Khoueiry و همکاران (۲۰۲۱) انجام گرفت که نتایج حاکی از تأثیرگذاری ژئوگریدها بر ضخامت لایه اساس و نقش نوع بارگذاری در آن است.

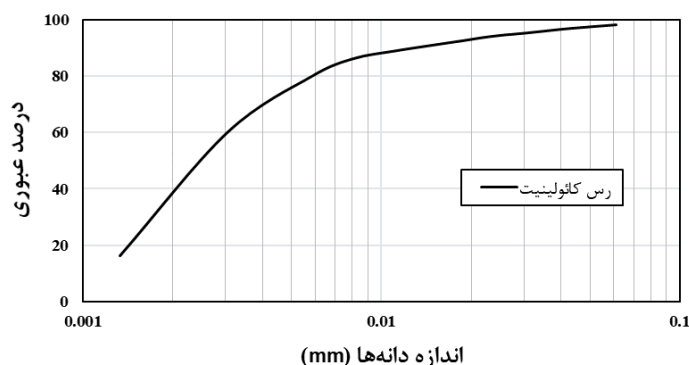
Ramjiram و همکاران (۲۰۲۱) تعدادی آزمایش CBR روی نمونه‌های خاک رسی مسلح شده با انواع مختلف ژئوتکستایل انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از ژئوتکستایل‌ها، مقادیر مقاومت و CBR را بهبود می‌بخشد و بر این اساس به کمک روابط تجربی، میزان ظرفیت باربری نهایی خاک را به ازای مقادیر CBR گزارش کردند.

Abou Chaz و همکاران (۲۰۲۳) آزمایش‌های تمام مقیاس بارگذاری سیکلی را بر مخلوط ماسه و رس به منظور بررسی مزیت استفاده از لایه ژئوستتیک در فصل مشترک لایه‌های اساس و بستر نرم انجام دادند که نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از ژئوتکستایل در زیر لایه اساس واقع بر بستر نرم، باعث کاهش عملکرد نشست لایه می‌شود.

با توجه به نتایج پژوهش‌های محققان مختلف که عمدتاً از طریق آزمایش‌های بارگذاری صفحه، نفوذ مخروط و CBR انجام



شکل ۱ نمودار دانه‌بندی مصالح شن و ماسه



شکل ۲ نمودار دانه‌بندی مصالح رس کائولینیت

جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در لایه‌ها

ASTM	AASHTO	PI	LL	γ_{dmax} (kN/m^3)	ω_{opt} (%)	G_s	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	نوع مصالح
SW	A-1-a (0)	-		۱۹/۰۲	۱۰/۶۰	۲/۶۸	۲/۴۰	۱/۳۰	۰/۲۸	مخلوط شن و ماسه
SP-SM	A-1-b (0)	-		۱۸/۳۳	۱۱/۶۴	۲/۶۵	۱/۵۰	۰/۲۷	۰/۰۸۱	ماسه تیپ ۱
SP	A-1-b (0)	-		۱۸/۷۳	۱۱/۸۵	۲/۶۶	۲/۷۰	۱/۳۰	۰/۲۰	ماسه تیپ ۲
CL	A-7-6 (18)	۱۶	۴۱	۱۵/۵۰	۱۹/۲	۲/۶۴	-			کائولینیت

جدول ۲ مشخصات زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و CBR خاک‌ها

نوع مصالح	ϕ (°)	c (kPa)	CBR متناظر با γ_{dmax}	تراکم نسبی	γ_d متناظر با تراکم نسبی	نسبی $(\frac{kN}{m^3})$	CBR متناظر با تراکم نسبی
مخلوط شن و ماسه	۴۰/۸	۰	۳۹/۹	٪۸۸	۱۶/۷۴	۱۹/۶	۱۹/۶
ماسه تیپ ۱	۳۳/۲	۰	۲۰/۱	٪۹۰	۱۶/۵۰	۹/۲	۹/۲
ماسه تیپ ۲	۳۶/۲	۰	۲۲/۲	٪۹۰	۱۶/۸۶	۱۴/۸	۱۴/۸
کائولینیت	۲۴/۰	۲۴/۲	۱۰/۳	٪۱۰۰	۱۵/۵۰	۱۰/۳	۱۰/۳

استفاده قرار گرفت که مشخصات کلی آن‌ها در جدول (۳) مشاهده می‌شود. از آنجایی که نسبت بارگذاری ناشی از بار ترافیکی، کمتر از دو است، بارگذاری و رفتار سیستم شباهت

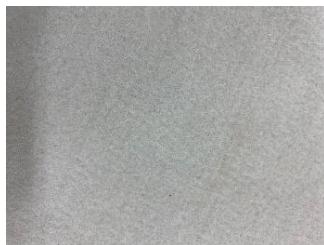
مطابق شکل (۳) در این پژوهش سه نوع ژئوستتیک تهیه شده از شرکت ژئوپارسیان شامل دو نوع ژئوتکستایل پلی پروپیلن و پلی استر بافته نشده و یک نوع ژئوکامپوزیت خاکی مورد

با استفاده از نتایج پژوهش Bergado و همکاران (۲۰۰۱) و اندازه‌گیری مقدار تغییر شکل ژئوستتیک‌ها بعد از آزمایش سوراخ‌شدگی، نمودار نیروی واحد عرض در برابر کرنش ژئوتکستایل‌ها در شکل (۴) ارائه شده است. برای ارزیابی مدول الاستیسیته ژئوتکستایل‌ها، نتایج حاصل از نمودار شکل (۴)، بر ضخامت ژئوتکستایل‌ها تقسیم شد که نتایج به دست آمده در شکل (۵) نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می‌شود، ژئوتکستایل‌ها تا کرنش حدوداً ۵٪ دارای سختی نسبتاً مشابه هستند.

بسیاری به حالت متقارن دارد. در این قسمت رفتار تنش - کرنش ژئوتکستایل‌های مورد استفاده، در شرایط بارگذاری تقارن محوری ارزیابی خواهد شد. به این منظور، آزمایش سوراخ‌شدگی ژئوستتیک مطابق با استاندارد شماره ASTM-D6241 با گیردار کردن ژئوستتیک‌ها به لبه فوقانی قالب استوانه‌ای آهنی به قطر ۱۵ سانتی‌متر، تحت پیستون دایروی تخت به قطر ۵ سانتی‌متر و با سرعت ثابت ۵۰ mm/min توسط دستگاه CBR-مارشال انجام شد. آزمایش بایستی تا مرز پاره‌شدگی، ادامه یابد، ولی در این پژوهش به دلیل محدودیت در تغییر مکان دستگاه و با توجه به بازه انجام آزمایش‌های اصلی، آزمایش تا ۴۰ میلی‌متر ادامه داده شد.

جدول ۳ مشخصات مصالح ژئوستتیک‌های مورد استفاده

نوع ویژگی	ژئوتکستایل پلی پروپیلن	ژئوتکستایل پلی استر	ژئوکامپوزیت
جرم در واحد سطح gr/m ²	۵۰۰	۶۰۰	-
ضخامت mm	۵	۵.۶	۶
کشش طولی حداکثر kN/m	۳۰	۳۰	۳۰
کشش عرضی حداکثر kN/m	۳۰	۳۰	۳۰



(ب)

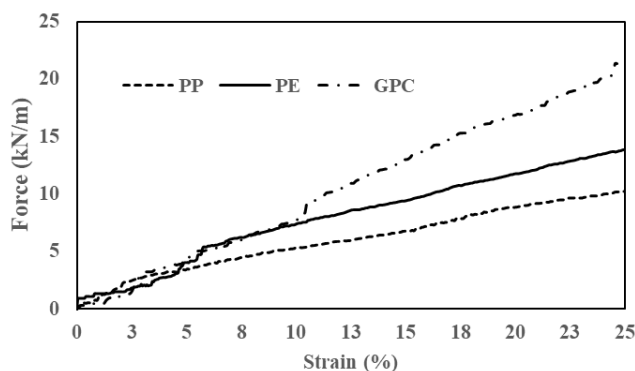


(الف)

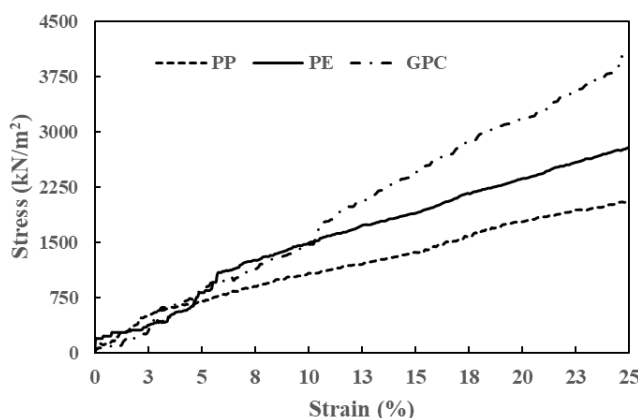


(ج)

شکل ۳ تصاویری از انواع ژئوستتیک مورد استفاده در تحقیق: (الف) ژئوتکستایل پلی پروپیلن، (ب) ژئوتکستایل پلی استر بافته نشده، (ج) ژئوکامپوزیت خاکی



شکل ۴. نمودار نیروی واحد عرض در برابر کرنش ژئوتکستایل‌ها



شکل ۵. نمودار تنش کششی - کرنش کششی ژئوتکستایل‌ها

به منظور تعیین مشخصات تراکم آزمایشگاهی خاک شامل وزن مخصوص خشک حداکثر استاندارد (γ_{dmax}) و مقدار رطوبت بهینه استاندارد (ω_{opt}) از روش انرژی تراکمی استاندارد (روش B) و بر اساس استاندارد شماره ASTM-D698 استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، شبیه‌سازی جاده به صورت سیستم سه‌لایه شامل (۱) رویه خاکی راه، (۲) اساس و (۳) لایه زیراساس در نظر گرفته شد و مطابق شکل (۶) برای شرایط مسلح و محل استقرار ژئوستتیک‌ها، سه حالت شامل مرز لایه اول و دوم، مرز لایه دوم و سوم و هر دو مرز، مد نظر قرار گرفت.

به منظور کاهش اثر شرایط مرزی بر نتایج، قبل از شروع نمونه‌سازی، دیواره قالب آزمایش به‌طور کامل روغن‌کاری شد و سپس لایه‌های خاک با ضخامت‌های مورد نظر مطابق شکل (۶) و با درصد تراکم نسبی برای لایه‌های اول، دوم و سوم (مخلوط شن و ماسه، ماسه و رس) به ترتیب برابر با ۸۸، ۹۰ و ۱۰۰ درصد

تجهیزات مورد استفاده

معمولاً برای حالت خاک غیر مسلح، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر اساس استاندارد شماره ASTM-D1883 و استفاده از قالب‌هایی به ارتفاع ۱۱۶/۴۳ mm و قطر ۱۵۲/۴ mm انجام می‌شود. در این پژوهش به منظور انجام آزمایش‌های CBR روی نمونه‌های مسلح در جهت کاهش محدودیت‌های موجود در ارتباط با قالب استاندارد همانند شرایط مرزی، رعایت محدودیت اندازه دانه‌ها و نسبت اندازه ژئوستتیک‌ها به ابعاد قالب، برخی اصلاحات روی ابعاد قالب آزمایش CBR انجام گرفت؛ به‌طوری‌که از قالب استوانه‌ای اصلاح شده به ارتفاع ۲۳۰ mm و قطر ۲۵۰ mm استفاده شد. انجام آزمایش CBR با شرایط درصد رطوبت بهینه (حالت غیر غرقاب (Unsoaked)) انجام و جهت اعمال سربار بر روی سطح خاک متراکم درون قالب، از دیسک‌های فولادی استفاده شد. با توجه به اندازه قطر ۵۰ mm برای سنبه بارگذاری، انتخاب کردن ابعاد مناسب قالب آزمایش، باعث کاهش اثرات شرایط مرزی بر نتایج می‌شود.

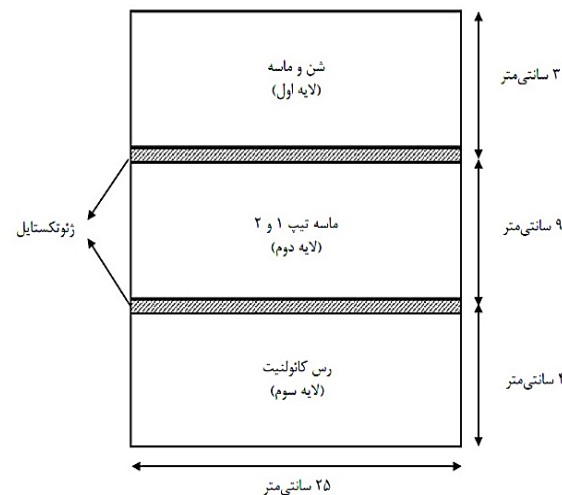
سانتی متر و حداکثر ارتفاع نمونه آزمایش ۱۶ سانتی متر) و ارتفاع لایه زیراساس (۴ سانتی متر)، انتخاب ضخامت های ۳، ۶ و ۹ سانتی متر برای بررسی رفتار مصالح در مقیاس آزمایشگاهی منطقی و متوازن می باشد.

۲. بررسی رفتار غیرخطی سیستم در برابر تغییر ضخامت: فاصله گذاری یکنواخت (افزایش سه سانتی متری) این امکان را ایجاد می کند که روند تغییر مقادیر CBR و نحوه عملکرد ژئوستتیک ها در ضخامت های مختلف به صورت پیوسته تحلیل شود.

۳. امکان بررسی تأثیر نسبی نسبت ضخامت لایه مسلح شده به کل ارتفاع سیستم: در نظر گیری سه نوع ضخامت مختلف، می تواند کمک کننده تحلیل و بررسی میزان بهبود عملکرد ناشی از افزایش ضخامت باشد و اینکه در چه نقطه ای، افزایش ضخامت به کاهش بهره وری باربری و اقتصادی منجر می شود. برای آماده سازی نمونه ها، ابتدا رس آسیاب شده با درصد رطوبت بهینه به مدت نیم ساعت ورز داده شد و پس از باقی ماندن در شرایط یکسان و الک مجدد، پس از ۲۴ ساعت ماندن درون کیسه محکم و دور از رطوبت و حرارت، با تعداد ضربات لازم برای رسیدن به تراکم نسبی مشخص، درون قالب متراکم شد. سایر لایه ها نیز پس از ساخت خاک به صورت مصنوعی دانه بندی شد، با درصد رطوبت بهینه و تراکم نسبی مورد نظر در قالب آزمایش متراکم شد و با قرارگیری ژئوستتیک ها در مرز لایه ها، نمونه ها آماده شد. پس از گذاشتن دیسک های فولادی به عنوان سربار روی سطح نمونه آماده شده، قالب نمونه زیر سنبه به قطر ۵ cm و لودسل با ظرفیت ۲ تن قرار گرفت و آزمایش با سرعت ۱/۲۷ میلی متر بر دقیقه توسط دستگاه CBR - مارشال (شکل ۷) انجام شد.

آزمون های آزمایشگاهی به منظور شبیه سازی شرایط واقعی و بررسی عملکرد مواد مختلف (مانند ژئوتکستایل) در محیط کنترل شده انجام می شوند. با توجه به محدودیت های فیزیکی و هزینه ای، انجام آزمایش های مقیاس واقعی در تمام مراحل پروژه غیر ممکن یا بسیار گران است. بنابراین، استفاده از مقیاس بندی آزمایشگاهی و مقایسه نتایج آن با شرایط واقعی، روشی متداول و علمی است، علی رغم اینکه شبیه سازی های کوچک مقیاس به دلیل مقیاس مصالح و نمونه ها، شرایط مرزی، نحوه آماده سازی و شرایط انجام آزمایش ها ممکن است منجر به بروز رفتارهایی شود که در مقیاس واقعی وجود ندارد؛ به عنوان مثال استفاده از قالب فلزی می تواند منجر به ایجاد مرزهای صلب در محیط نمونه شود

متراکم شدند که با توجه به رابطه انرژی تراکم در واحد حجم، تعداد ضربات مورد نیاز برای متراکم کردن لایه ها توسط چکش ۱۰ پوندی با درصد تراکم های یاد شده، در جدول شماره (۴) ارائه شده است.



شکل ۶ الگوی کلی نحوه ساخت نمونه و جای گذاری ژئوستتیک ها در نمونه آزمایشگاهی

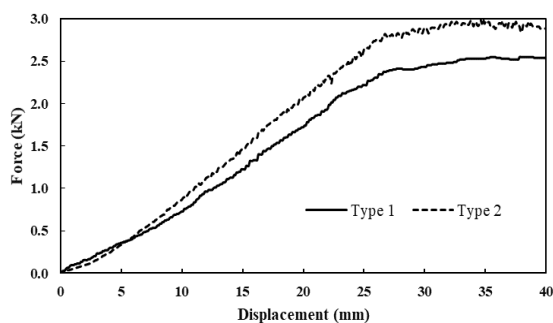
جدول ۴ تعداد ضربات لازم برای کوبیدن لایه ها با تراکم نسبی مشخص

نوع خاک	تراکم نسبی	ارتفاع خاک ریزی در قالب (cm)	تعداد ضربات لازم با چکش ۱۰ پوندی
مخلوط شن و ماسه	۸۸٪	۳	۳۸
ماسه تیپ ۱ و تیپ ۲	۹۰٪	۳	۳۹
		۶	۷۸
		۹	۱۱۷
رس	۱۰۰٪	۴	۵۸

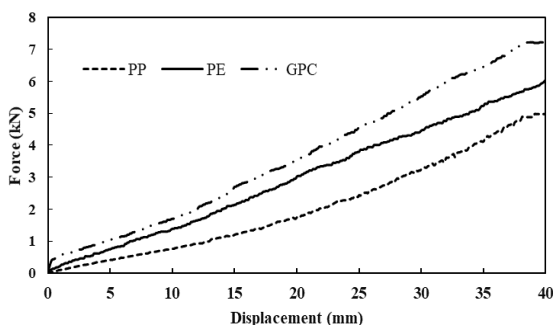
بر اساس شکل (۶) ضخامت لایه های اول و سوم در تمامی نمونه ها ثابت انتخاب شده و به منظور بررسی تأثیر ضخامت لایه اساس بر نتایج، سه نوع ضخامت مختلف (۳، ۶ و ۹ سانتی متری) برای لایه اساس انتخاب شد. انتخاب میزان ضخامت های مورد نظر در این تحقیق بر اساس سه معیار زیر انجام گرفت:

۱. تطابق با محدوده های متداول طراحی روسازی در مقیاس آزمایشگاهی: در مدل سازی فیزیکی، حفظ نسبت های هندسی با سیستم های واقعی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، با توجه به ارتفاع کل نمونه (ارتفاع قالب ۲۳

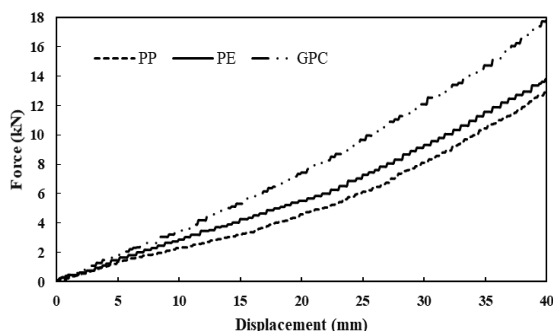
نیز، در خاک درشت‌دانه، تأثیر ژئوستتیک‌ها مشهودتر می‌شود. بررسی اثر نوع ژئوستتیک بر میزان باربری در شکل (۸ - ب) بیانگر این است که مقادیر نیروی نفوذ و مقاومت باربری در ژئوکامپوزیت نسبت به ژئوتکستایل‌ها به ازای نفوذ یکسان بیشتر است.



الف) مدل غیر مسلح با ضخامت لایه اساس ۳ cm



ب) مدل مسلح با ضخامت لایه اساس ۳ cm به ازای دانه‌بندی تیپ ۲ و استقرار ژئوتکستایل در مرز بالایی



ج) مدل مسلح با ضخامت لایه اساس ۶ cm به ازای دانه‌بندی تیپ ۲ و استقرار ژئوتکستایل در هر دو مرز لایه‌ها

شکل ۸ نتایج آزمایش CBR برحسب نیرو - تغییر مکان

روند کلی نمودارها نشان می‌دهد زمانی که تسلیح کننده در مرز بالایی بین لایه‌های رویه و اساس قرار می‌گیرد، تغییرات نیرو نسبت به حالت غیر مسلح از همان ابتدای نفوذ سمبه بارگذاری

و باعث تأثیرگذاری بر نحوه توزیع تنش‌ها و نتایج CBR شود که در این پژوهش سعی بر آن بوده است تا ابعاد قالب ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته برای یک سیستم سه لایه روسازی راه، در جهت ایجاد شرایطی نسبتاً مشابه با شرایط واقعی باشد. این ابعاد به گونه‌ای تعیین شده‌اند که با توجه به محدودیت‌های ابعادی و تغییر مکان دستگاه‌های مورد استفاده، توزیع بار و شرایط مکانیکی در لایه‌های خاکی تا حد امکان نسبتاً دقیق شبیه‌سازی شود.

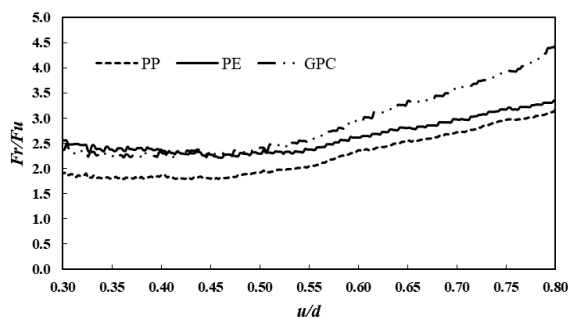


شکل ۷ دستگاه آزمایش CBR - مارشال

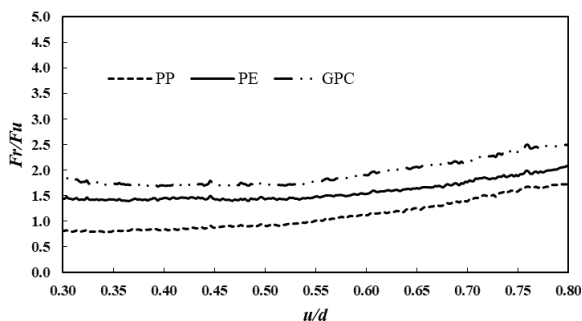
نتایج و بحث تفسیر نتایج آزمایش‌های CBR

در این پژوهش، عملکرد ژئوستتیک‌ها بر میزان بهبود رفتار ظرفیت باربری روسازی راه، با بررسی پارامترهای مختلف شامل نوع و محل قرارگیری ژئوستتیک‌ها، ضخامت و نوع مصالح لایه اساس از طریق انجام آزمایش‌های CBR مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها به صورت منحنی‌های نیرو - تغییر مکان ارائه شده که نمونه‌ای از این منحنی‌ها برای حالت مسلح و غیر مسلح در شکل (۸) مشاهده می‌شود. تغییرات مقادیر نیرو با افزوده شدن تسلیح کننده در مرز لایه‌ها، کاملاً مشخص و مشهود است. تأثیر اندازه دانه‌های ماسه در لایه دوم بر میزان باربری کل، در شکل (۸ - الف) برای حالت غیر مسلح، بیانگر این است که میزان باربری در ماسه درشت‌دانه (تیپ ۲)، تقریباً به میزان حدود ۱۵٪ بیشتر از ماسه ریزدانه (تیپ ۱) بوده است. در حالت مسلح

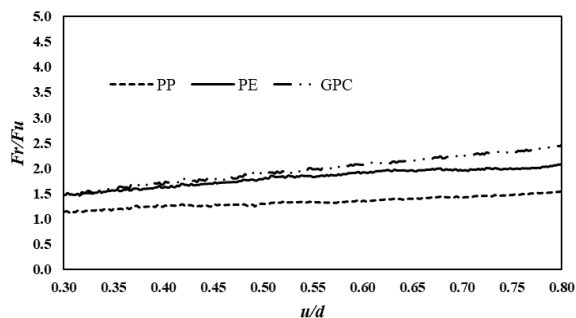
بزرگ‌تر مد نظر است؛ بنابراین نمودارها برای نسبت تغییر مکان بزرگ‌تر از ۰/۳ ارائه شده است.



(الف) مدل مسلح با ضخامت لایه اساس ۳ cm به ازای دانه‌بندی تیپ ۱ و استقرار ژئوتکستایل در هر دو مرز لایه‌ها



(ب) مدل مسلح با ضخامت لایه اساس ۳ cm به ازای دانه‌بندی تیپ ۲ و استقرار ژئوتکستایل در مرز بالایی (بین رویه و اساس)



(ج) مدل مسلح با ضخامت لایه اساس ۶ cm به ازای دانه‌بندی تیپ ۱ و استقرار ژئوتکستایل در مرز پایینی (بین اساس و زیر اساس)

شکل ۹ نتایج نسبت بار حالت مسلح به غیر مسلح به ازای میزان نسبت تغییر مکان به قطر سنبه

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که وجود لایه‌های مسلح کننده ژئوستتیک، تأثیر چشم‌گیر در افزایش مقاومت نفوذ سیستم سه‌لایه‌ای دارد؛ به طوری که صرف نظر از پارامترهای مختلف و میزان نفوذ، مقادیر نسبت بهبود در محدوده ۱/۲ تا ۴/۵ برابر حالت غیر مسلح به دست آمد. همچنین با افزایش میزان نشست و نفوذ

مشهود است؛ ولی در زمانی که موقعیت تسلیح کننده در مرز پایین (بین لایه‌های اساس و زیراساس) واقع می‌شود، به علت عدم تغییر شکل در زمان‌های اولیه نفوذ و عدم تأثیرپذیری ژئوستتیک‌ها به علت نرسیدن بار مؤثر، بسیج نیروها به تأخیر می‌افتد و تغییرات نیرو نسبت به حالت غیر مسلح از مقدار نفوذ بالاتر شروع می‌شود که با تئوری توزیع تنش و بسیج نیروها در ژئوستتیک‌ها سازگار است.

با توجه به اینکه معمولاً آزمایش CBR توسط شاخص CBR به عنوان نسبت نیروی اندازه‌گیری شده در طول آزمایش به ازای نفوذ مشخص به نیروی متناظر برای حالت مصالح استاندارد محاسبه می‌شود؛ بنابراین در این مقاله به منظور بررسی تأثیر تسلیح کننده‌ها بر پاسخ نفوذ به صورت مقادیر کمی و مقایسه مقادیر در حالت‌های مسلح و غیر مسلح، از پارامتر نسبت بهبود (Improvement Ratio) $(IR = F_{xr}/F_{xu})$ استفاده شد؛ به طوری که نسبت بهبود به عنوان نسبت مقادیر نیروی اندازه‌گیری شده برای یک میزان نفوذ مشخص (X) برای حالت نمونه مسلح (F_{xr}) ، به مقدار نیروی لازم برای همان مقدار نفوذ در حالت غیر مسلح (F_{xu}) تعریف می‌شود. نسبت بهبود به ازای حداکثر نیروی نفوذ تحت عنوان نسبت ظرفیت باربری می‌تواند مد نظر قرار گیرد. با توجه به اینکه در شکل (۸-الف) برای حالت خاک غیر مسلح میزان نیروی حداکثر در یک مقدار نفوذ حدود ۳۰ mm حاصل شده است، بنابراین در این پژوهش میزان نفوذ مبنا به منظور تعیین نسبت بهبود، مقدار نفوذ ۳۰ mm در نظر گرفته شده و مقادیر پارامتر IR بر اساس آن محاسبه شده است.

تأثیر تسلیح کننده‌ها

اثر تسلیح کننده بر میزان پاسخ، بستگی به چندین پارامتر همچون نوع و تعداد ژئوستتیک، تعداد و ضخامت لایه‌ها و نوع دانه‌بندی خاک دارد که به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها برای بررسی اثر نوع و موقعیت قرارگیری ژئوستتیک‌ها در میزان افزایش ظرفیت باربری بر حسب پارامتر نسبت بهبود به ازای نسبت تغییر مکان قائم به قطر سنبه بارگذاری ارزیابی شد که نمونه‌ای از منحنی‌ها در شکل (۹) مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه در اکثر نمودارها تأثیر ژئوستتیک‌ها بر میزان پاسخ، به ازای تغییر مکان‌های $u/d < 0.3$ (نشست قائم و قطر سنبه بارگذاری است) کم بوده و بررسی در تغییر مکان‌های

سنبه در خاک، اثر ژئوتکستایل‌ها بیشتر شده و عامل سختی باعث تفاوت محسوس در نتایج گردیده است.

همان طور که از روند منحنی‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش میزان نفوذ، مقادیر بهبود باربری نیز با شیبی جزئی و تقریباً یکسان افزایش می‌یابد، بنابراین برای مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف، همان طوری که در بخش قبلی توضیح داده شد، میزان نفوذ mm ۳۰ به عنوان نفوذ مبنا در نظر گرفته شده و مقایسه نتایج و نسبت بهبود بر اساس میزان نسبت $u/d=0.6$ انجام شده است.

خلاصه مقادیر نسبت بهبود به ازای تمامی پارامترهای مورد مطالعه برای میزان نفوذ mm ۳۰ به ترتیب برای خاک تیپ ۱ و تیپ ۲ در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده؛ به طوری که مقادیر نسبت بهبود نیروی مقاومت نفوذ در محدوده ۱/۲ تا ۴/۵ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد صرف نظر از نوع پارامتر مورد نظر، در تمامی حالت‌های آزمایش با افزایش میزان سختی ژئوستتیک، میزان بهره‌وری و نسبت بهبود افزایش پیدا کرده است.

جدول ۵ مقادیر نسبت بهبود به ازای خاک تیپ ۱

نوع ژئوستتیک			موقعیت ژئوستتیک	ضخامت لایه اساس
ژئوکامپوزیت خاکی	ژئوتکستایل پلی استر	ژئوتکستایل پلی پروپیلن		
۱/۹۸	۱/۶	۱/۴	مرز بالایی	۳ cm
۱/۹۳	۱/۷۷	۱/۴۲	مرز پایینی	
۲/۹۷	۲/۶۱	۲/۳۴	هر دو مرز	
۲/۴۸	۲/۰	۱/۶۷	مرز بالایی	۶ cm
۲/۰۷	۱/۹	۱/۳۶	مرز پایینی	
۳/۶۰	۲/۸۸	۲/۸۱	هر دو مرز	
۲/۵۱	۲/۰۵	۱/۷۶	مرز بالایی	۹ cm
۲/۱۵	۱/۷۹	۱/۳۸	مرز پایینی	
۴/۴	۳/۱	۳/۰	هر دو مرز	

جدول ۶ مقادیر نسبت بهبود به ازای خاک تیپ ۲

نوع ژئوستتیک			موقعیت ژئوستتیک	ضخامت لایه اساس
ژئوکامپوزیت خاکی	ژئوتکستایل پلی استر	ژئوتکستایل پلی پروپیلن		
۱/۹۴	۱/۵۴	۱/۲	مرز بالایی	۳ cm
۱/۵۸	۱/۵۳	۱/۴۶	مرز پایینی	
۲/۶۴	۲/۴	۲/۱۴	هر دو مرز	
۲/۱۶	۱/۸۴	۱/۶۵	مرز بالایی	۶ cm
۲/۲	۱/۹	۱/۶۳	مرز پایینی	
۴/۰۲	۳/۱۲	۲/۷۵	هر دو مرز	
۲/۳۱	۱/۸	۱/۵۸	مرز بالایی	۹ cm
۲/۱۹	۱/۸۶	۱/۵	مرز پایینی	
۳/۹۲	۳/۱۵	۲/۶۷	هر دو مرز	

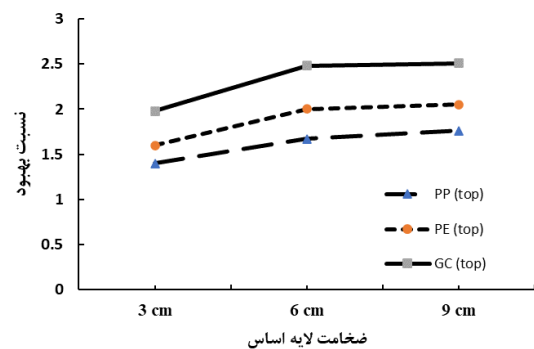
نتایج نشان می‌دهد برای تمامی حالت‌های محل استقرار، ژئوکامپوزیت خاکی بیشترین بهره‌وری را از لحاظ نسبت بهبود نشان داد؛ به طوری که متوسط مقادیر نسبت بهبود در حالت استفاده از ژئوکامپوزیت خاکی حدود ۴۱٪ بیشتر از حالت ژئوتکستایل پلی پروپیلن به دست آمده است. مطابق نتایج، در حالت به‌کارگیری یک لایه ژئوستتیک، با افزایش ضخامت لایه اساس از ۶ به ۹ سانتی‌متر، شیب منحنی باربری تقریباً ثابت و یا حتی در برخی حالت‌ها کاهش یافته است که نتایج دارای سازگاری با نتایج سایر محققان است؛ به طوری که Nazeri و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقات مشابه خود گزارش کردند که کارآمدی ژئوکامپوزیت با افزایش ضخامت لایه خاک کاهش پیدا می‌کند.

با توجه به مقایسه نتایج شکل (۱۱) بر حسب تعداد و موقعیت لایه تسلیح‌کننده، صرف نظر از نوع مصالح تسلیح‌کننده، بیشترین میزان باربری برای حالتی است که از دو لایه ژئوستتیک در مرز لایه‌های رویه، اساس و زیراساس استفاده شده و کمترین میزان باربری نیز برای حالت استقرار در مرز پایین بین لایه‌های اساس و زیر اساس به دست آمد.

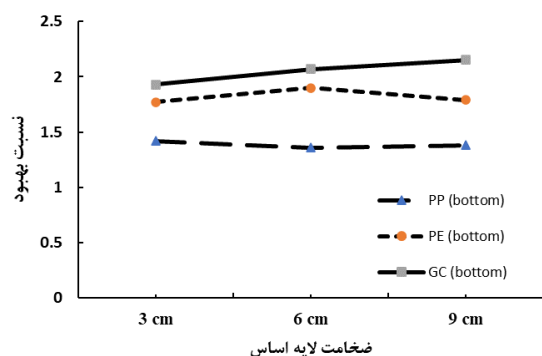
طبق نتایج پژوهش Holtz و Sivakugan (۱۹۸۷)، هر چه بار وارد شده و پیرو آن عمق شیاری کمتر باشد، به دلیل کرنش کم ژئوستتیک در میزان تغییر شکل‌های کوچک، اثر غشایی مسلح‌کننده محسوس نیست و بیشتر به عنوان مصالح جداکننده عمل می‌کند.

همچنین بر اساس نتایج تحقیق Espinoza و Bray (۱۹۹۵) هر چه میزان نفوذ سنبه در خاک بیشتر باشد، مقدار بار وارد شده بیشتر می‌شود و به دلیل انتقال تنش‌های برشی ایجاد شده در لایه درشت‌دانه به ژئوتکستایل، نیروهای کششی در مسلح‌کننده بیشتر می‌شود و در نتیجه ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد. بنابراین نتایج پژوهش کنونی برای لایه مستقر در مرز پایینی، به دلیل قرارگیری در خارج از محدوده حباب تنش و عدم اعمال تنش مؤثر بر ژئوستتیک، برعکس سایر حالت‌های استقرار، تأثیر قابل توجهی بر مقادیر نسبت باربری با افزایش ضخامت لایه اساس مشاهده نشده است و این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین منطبق است.

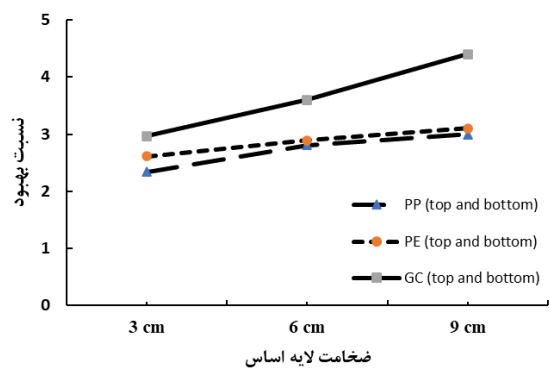
به منظور مقایسه روند نتایج با جزئیات بیشتر، مقادیر نسبت بهبود برای سه نوع تسلیح‌کننده با سختی‌های مختلف از نوع ژئوتکستایل پلی پروپیلن (PP)، ژئوتکستایل پلی استر (PE) و ژئوکامپوزیت خاکی (GC) با توجه به محل استقرار در مرز لایه‌ها در سه حالت مختلف واقع در مرز بالایی (top)، مرز پایینی (bottom) و هر دو مرز بالا و پایین (top and bottom) برای خاک نوع تیپ ۱ و بر اساس ضخامت‌های مختلف لایه اساس در شکل (۱۰) ارائه شده است.



(الف) حالت استقرار ژئوستتیک در مرز بالایی



(ب) حالت استقرار ژئوستتیک در مرز پایینی

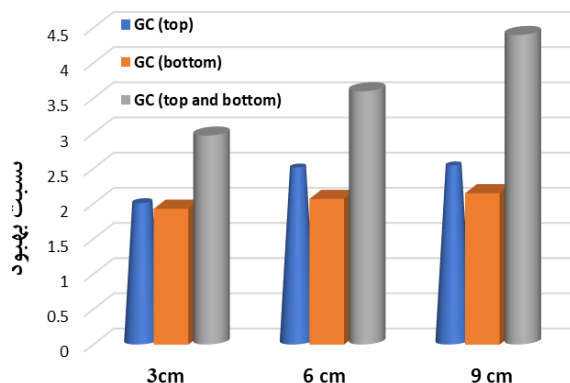


(ج) حالت استقرار ژئوستتیک در هر دو مرز بالایی و پایینی

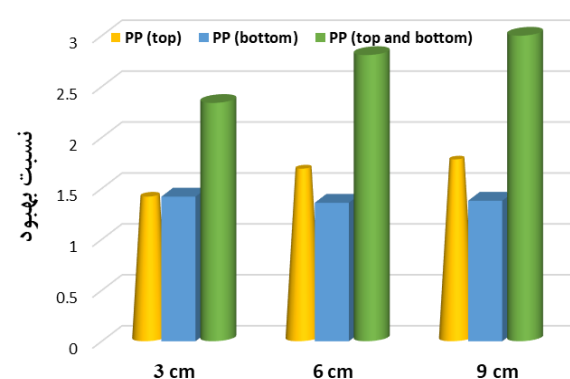
شکل ۱۰ تغییرات نسبت بهبود بار به ازای انواع ژئوستتیک‌ها

عبارت دیگر، تأثیر ژئوستتیک‌ها به لحاظ افزایش باربری خاک غیر مسلح در خاک‌های با دانه‌بندی بزرگ‌تر، کاهش نشان می‌دهد که برای پژوهش کنونی، به طور متوسط حدود ۱۰٪ بوده است. یکی از دلایل آن می‌تواند به این صورت تفسیر شود که دانه‌بندی ماسه تیپ ۱ از لحاظ یکنواختی و میزان تخلخل، بهتر از دانه‌بندی ماسه تیپ ۲ است؛ به طوری که در آزمایش CBR، مقداری از نیروی اعمالی صرف تراکم و کاهش فضای خالی بین دانه‌های خاک می‌شود. بر اساس نتایج Rashidian و همکاران (۲۰۱۸) روند مشابهی به دست آمده است؛ به طوری که نتایج مدل‌های آزمایشگاهی در ارتباط با ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای مسلح شده توسط ژئوتکستایل از طریق انجام آزمایش‌های CBR، نشان داده است که کارآمدی تسلیح‌کننده‌ها در افزایش ظرفیت باربری توده خاک با مقادیر ریزدانه بیشتر، از حالت خاک حاوی ریزدانه کمتر، بیشتر است.

نتایج بررسی تأثیر ضخامت لایه اساس، نوع و نحوه قرارگیری ژئوستتیک‌ها بیانگر این است که هر چه ضخامت لایه افزایش می‌یابد و به دنبال آن، میزان حباب تنش تشکیل شده زیر سنبه بارگذاری بیشتر می‌شود، اثر اندازه دانه‌های خاک بر ظرفیت باربری بیشتر می‌شود. همچنین در صورت قرارگیری تسلیح‌کننده در مرز بالایی (مرز بین لایه رویه و اساس)، تأثیر اندازه دانه‌های خاک بر ظرفیت باربری کمتر می‌شود و میزان تأثیرگذاری در درجه اول، تابع جنس و نیروی قابل تحمل تسلیح‌کننده می‌شود. در تفسیر نتایج پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه نحوه بارگذاری توسط سنبه در آزمایش CBR، شباهت بسیاری با پی منفرد دایره‌ای واقع بر بستر خاک دارد، پاسخ نفوذ سنبه در نمونه‌های مسلح و غیر مسلح، قابل مقایسه با رفتار تنش - نشست و توزیع تنش در خاک است. بر اساس نمودارها و روابط توزیع تنش ارائه شده برای پی‌های دایره‌ای، عمق مؤثر و نفوذ حباب تنش زیر پی به قطر B تا میزان ۱۰٪ اضافه تنش سربار، حدود $1/8B$ است که برای سنبه به قطر ۵ سانتی‌متر، میزان عمق مؤثر حدود $5 \times 1/8$ است که برابر با مقدار ۹ سانتی‌متر به دست می‌آید. بنابراین در حالتی که ضخامت هر یک از لایه‌های رویه، اساس و زیراساس معادل ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود، هر سه لایه در محدوده عمق تأثیر و درون حباب تنش قرار گرفته و محدوده حباب تنش تا انتهای لایه سوم نیز می‌رسد و در این



الف) تغییرات نسبت بار بر حسب موقعیت ژئوکامپوزیت خاکی



ب) تغییرات نسبت بار بر حسب موقعیت ژئوتکستایل پلی پروپیلن

شکل ۱۱ مقایسه مقادیر نسبت بهبود بار به ازای موقعیت ژئوستتیک‌ها

تأثیر اندازه دانه‌ها و ضخامت لایه اساس

میزان نسبت نیروی اندازه‌گیری شده در آزمایش CBR به ازای دانه‌بندی‌های مختلف تیپ ۱ و ۲ ماسه در لایه اساس در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهد که تقریباً در همه حالت‌های لایه مسلح، با افزایش اندازه دانه‌ها از محدوده تیپ ۱ به تیپ ۲، به طور متوسط برای لایه اساس با ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر، مقادیر نسبت نیرو به ترتیب حدود ۷٪، ۱۱٪ و ۱۵٪ افزایش پیدا می‌کند؛ در صورتی که مقادیر افزایش نسبت نیرو در حالت غیرمسلح، به ترتیب برای ضخامت‌های مختلف، حدود ۱۶٪، ۲۱٪ و ۲۳٪ به دست آمده است. بنابراین با وجود افزایش مقادیر نیرو با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها چه در حالت مسلح و چه غیر مسلح، همان گونه که مقایسه مقادیر جداول شماره (۵) و (۶) نشان می‌دهد، نسبت بهبود باربری لایه اساس در حالت مسلح، با بزرگ‌تر شدن دانه‌های ماسه کاهش پیدا می‌کند. به

جمله اینکه وجود فاصله میان لایه‌های مسلح کننده در آزمایش CBR و شرایط واقعی که می‌تواند باعث ایجاد اثرات مقیاس شود. همچنین روش آزمایش CBR معمولاً برای مصالح همگن توسعه یافته است و نه برای مصالح کامپوزیت همانند خاک مسلح. همان گونه که در بخش‌های قبلی مورد اشاره قرار گرفت، برای رفع برخی محدودیت‌های مذکور مانند ابعاد نمونه آزمایش، در این پژوهش با افزایش و اصلاح ابعاد قالب از آزمایش CBR اصلاح شده با ابعاد بزرگ‌تر نسبت به آزمایش CBR استاندارد استفاده شد و همچنین با رعایت شرایط مرزی تا حد ممکن سعی بر عدم تأثیرگذاری بیشتر موارد مذکور بر نتایج شده است.

جدول ۷ مقایسه نتایج پژوهش کنونی با نتایج سایر پژوهشگران

پژوهش مورد نظر	تعداد لایه‌های تسلیح کننده	محدوده نسبت بهبود باربری و توضیحات
Abdi-Goudarzi و همکاران (۲۰۲۲)	تک لایه	۱/۱-۱/۳
Carlos و همکاران (۲۰۲۴)	تک لایه	۱/۵
	دو لایه	۲
Singh و همکاران (۲۰۱۹)	تک لایه	۱/۱-۱/۷
	دو لایه	۲-۴
پژوهش کنونی	یک و دو لایه	۱/۳-۳/۰

نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر افزودن ژئوستتیک‌ها بر مقاومت نفوذ سیستم خاک‌های چند لایه‌ای از طریق انجام آزمایش‌های CBR اصلاح شده مطالعه شده و تحلیل پارامترهای مؤثر بر نتایج شامل تعداد و ضخامت لایه‌ها، نوع دانه‌بندی و اندازه خاک، موقعیت استقرار و نوع تسلیح کننده‌ها انجام گرفت که نتایج بدین شرح ارائه می‌شود:

۱. تأثیر پارامترهای مختلف همانند ضخامت لایه اساس و اندازه دانه‌ها بر روند نتایج نمونه‌های مسلح و غیر مسلح به صورت تقریباً مشابه به دست آمد. در تغییر مکان‌های کمتر، وجود ژئوستتیک‌ها، تأثیر زیادی بر بهبود ظرفیت باربری ندارد و تفاوت ناچیزی میان حالت مسلح و غیر مسلح مشاهده شد؛ ولی با افزایش میزان تغییر مکان، مقادیر باربری روند افزایشی نشان داد.

۲. استفاده از تسلیح کننده‌ها در مرز لایه‌ها بسته به تعداد لایه‌ها و نوع ژئوستتیک‌ها به ازای میزان کرنش‌های بزرگ‌تر، اثر قابل توجهی بر پاسخ‌های بار - نفوذ نشان دادند؛ به طوری که

حالت مقداری از بار وارد شده توسط خاک رسی نرم تحمل می‌شود و با توجه به نوع خاک، ظرفیت باربری آن نسبت به حالت‌های دیگر کمتر به دست می‌آید.

در حالتی که ضخامت لایه اساس افزایش می‌یابد و به ۶ سانتی‌متر می‌رسد، میزان اضافه تنش، حداکثر به مرز لایه‌های دوم و سوم می‌رسد و در حالت مسلح، به ژئوستتیک واقع در فصل مشترک لایه‌ها اعمال می‌شود که در این حالت، غالب حباب تنش در خاک ماسه‌ای تشکیل شده است؛ لذا مقدار باربری و نسبت بهبود باربری خاک، نسبت به حالت قبل (ضخامت لایه اساس برابر با ۳ سانتی‌متر مد نظر باشد)، افزایش می‌یابد.

نهایتاً در حالتی که ضخامت لایه اساس افزایش و برابر ۹ سانتی‌متر می‌شود، فاصله انتهای محدوده حباب تنش ایجاد شده تا مرز لایه دوم و سوم بیشتر می‌شود و عملاً تنش مؤثر محسوسی به محل استقرار ژئوستتیک واقع در مرز پایین نمی‌رسد و بنابراین تأثیر حضور ژئوستتیک در لایه پایین کمتر می‌شود و این موضوع کاملاً در منحنی‌های شکل (۱۰) مشهود است و نیز منطبق بر نتایج پژوهش‌های مشابه است.

مقایسه با نتایج سایر پژوهشگران

در این بخش به منظور بررسی کیفی نتایج پژوهش، مقادیر به دست آمده از پژوهش کنونی با برخی از نتایج متناظر گزارش شده توسط برخی پژوهشگران در شرایط تقریباً مشابه مقایسه شده است. با توجه به اینکه نتایج CBR ارائه شده در بیشتر پژوهش‌های پیشین به ازای میزان نفوذ ۵ mm بوده است؛ بنابراین در این پژوهش نیز نتایج با مقادیر نفوذ یکسان برابر با ۵ mm مطابق جدول (۷) مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت در نوع مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها، شامل نوع و تعداد لایه‌های خاک و مصالح تسلیح کننده و همچنین تفاوت نوع، اندازه قالب و شرایط انجام آزمایش، مقادیر نتایج گزارش شده تفاوت قابل توجهی با یکدیگر نشان نمی‌دهد. شایان ذکر است بررسی دقیق‌تر نتایج، مستلزم شرایط کاملاً مشابه و یکسان در پارامترهای مطالعه و آزمایش است.

بررسی محدودیت‌های آزمایش CBR

عموماً نتایج آزمایش CBR انجام شده بر نمونه‌های خاک غیر مسلح دارای محدودیت‌هایی در ارتباط با اندازه کوچک نمونه‌ها و شرایط مرزی نسبت به شرایط واقعی هستند. بنابراین نمونه‌های خاک مسلح نیز می‌تواند دارای محدودیت‌های بیشتری باشد؛ از

۴. انجام آزمایش‌ها با دستگاه مدل چرخ.

۵. مدل‌سازی عددی به منظور اعتبارسنجی و گسترش تحلیل‌ها در شرایط متنوع‌تر.

واژه‌نامه

California Bearing Ratio (CBR)	نسبت باربری کالفرنیا
ASTM	انجمن مواد و آزمون آمریکا
USCS	سیستم طبقه‌بندی متحد خاک
SZWNK1	رس کائولینت زنوز
D ₁₀	اندازه مؤثر
D ₃₀	قطر دانه متناظر با ۳۰٪ عبوری
D ₆₀	قطر دانه متناظر با ۶۰٪ عبوری
G _s	چگالی ویژه
γ _d	وزن مخصوص خشک
γ _{dmax}	وزن مخصوص خشک بیشینه
ω _{opt}	رطوبت بهینه
D _r	دانسیته نسبی
LL	حد روانی
PI	شاخص پلاستیسیته
AASHTO	سیستم آشتو
SW	ماسه خوب دانه‌بندی شده
SP	ماسه بد دانه‌بندی شده
SM	ماسه لای‌دار
SP-SM	ماسه بد دانه‌بندی شده لای‌دار
CL	رس با پلاستیسیته کم
c	چسبندگی
φ	زاویه اصطکاک داخلی خاک
mm/min	میلی‌متر بر دقیقه
Strain	کرنش
Force	نیرو
Loadcell	لودسل
Improvement Ratio (IR)	نسبت بهبود
F _{xr}	نیروی اندازه‌گیری شده در حالت مسلح
F _{xu}	نیروی اندازه‌گیری شده در حالت غیر مسلح
x	مقدار نفوذ مشخص سمبه
u	نشست قائم
d	قطر سنبه
B	قطر پی

صرف نظر از پارامترهای مختلف، میزان مقادیر نسبت بهبود باربری در محدوده ۱/۲ تا ۴/۵ به دست آمد.

۳. با افزایش ضخامت لایه اساس از ۳ به ۶ سانتی‌متر، میزان نسبت بهبود باربری افزایش یافت؛ ولی با تغییر ضخامت لایه از میزان ۶ به ۹ سانتی‌متر، شیب منحنی‌ها کاهش یافت و در برخی حالت‌ها به ویژه زمانی که ژئوسنتتیک در مرز پایینی قرار داشت، به علت خارج شدن تسلیح کننده از محدوده حباب تنش و کاهش اضافه تنش اعمالی، شیب منحنی ثابت می‌شود و افزایش ضخامت تأثیر ناچیزی بر میزان باربری نشان می‌دهد.

۴. برای ماسه تیپ ۲ که دارای دانه‌بندی درشت‌تر ولی یکنواخت است مقادیر نسبت بهبود نسبت به ماسه تیپ ۱ کاهش نشان داد؛ به این صورت که در خاک با دانه‌بندی غیر یکنواخت (تیپ ۱) به دلیل فضای خالی کمتر بین دانه‌ها، نیروی اعمالی از طرف سنبه، بیشتر صرف اعمال نیرو به سیستم خاک - ژئوسنتتیک می‌شود و نیروی کمتری صرف جابه‌جایی دانه‌ها برای تراکم خاک می‌شود؛ بنابراین در این حالت تسلیح کننده‌ها نیز عملکرد بهتری نشان می‌دهند.

۵. وقتی بار قائمی به سیستم خاک چندلایه وارد می‌شود، تنش‌های قائم و برشی زیادی به مجموعه وارد می‌شود. همچنین خاک زیر پی که در مجاورت ناحیه بارگذاری نیز هست، تمایل به حرکت جانبی دارد. در حالت غیر مسلح، قسمتی از حرکت جانبی توسط مقاومت خاک لایه‌های پایین‌تر تحمل می‌شود و مابقی به فصل مشترک لایه‌ها منتقل می‌شود که همین تنش‌ها موجب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. حضور ژئوتکستایل در مرز لایه‌ها، موجب می‌شود عمده این تنش‌ها به آن‌ها وارد شود و تأثیر چشم‌گیری بر ظرفیت باربری بگذارد.

در این بخش پیشنهادهایی نیز برای پژوهش‌های آتی و در امتداد بهبود پژوهش کنونی ارائه می‌شود:

۱. بررسی عملکرد ژئوسنتتیک‌ها تحت شرایط مختلف محیطی نظیر رطوبت، دما و سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب شدگی.

۲. توسعه آزمایش‌هایی در مقیاس بزرگ‌تر یا در محل (in-situ) برای تحلیل رفتار واقعی تحت بارهای تکراری ترافیکی؛

۳. بررسی تأثیر ژئوسنتتیک‌ها از نظر نوع و نحوه قرارگیری آن‌ها در سیستم‌های روسازی چندلایه، از جمله مقایسه ژئوتکستایل و ژئوگرید.

top	مرز بالا	Geotextile	ژئوتکستایل
bottom	مرز پایین	Geosynthetic	ژئوسنتتیک
top and bottom	مرز بالا و پایین	Geogrid	ژئوگرید
in-situ testing	آزمون برجا	Geocomposite	ژئوکامپوزیت
تقدیر و تشکر		Polypropylene (PP)	ژئوتکستایل پلی پروپیلن
		Polyester (PE)	ژئوتکستایل پلی استر
		Geocomposite (GC)	ژئوکامپوزیت خاکی
		Unsoaked	غیر غرقاب

مراجع

- [1] S. Abdi-Goudarzi, R. Ziaie-Moayed, and A. Nazeri, "An experimental evaluation of geocomposite-reinforced soil sections," *Construction and Building Materials*, vol. 314, p. 125566, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125566>
- [2] N. Abou Chaz, L. Briançon, P. Villard, C. Silvani, A. Nancey, and A. Abdelouhab, "Experimental and numerical studies of the geosynthetics reinforced platforms laid over soft subgrade soil," in *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 368, p. 02036. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336802036>
- [3] M. Y. Abu-Farsakh, I. Akond, and Q. Chen, "Evaluating the performance of geosynthetic-reinforced unpaved roads using plate load tests," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 17, no. 10, pp. 901–912, 2016. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1031131>
- [4] D. T. Bergado, S. Youwai, C. N. Hai, and P. Voottipruex, "Interaction of nonwoven needle-punched geotextiles under axisymmetric loading conditions," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 19, no. 5, pp. 299–328, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00010-3)
- [5] D. M. Carlos, M. Pinho-Lopes, and M. L. Lopes, "Evaluation of penetration resistance of soils reinforced with geosynthetics using CBR tests," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 10, no. 22, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40891-024-00524-8>
- [6] R. D. Espinoza and J. D. Bray, "An integrated approach to evaluating single-layer reinforced soils," *Geosynthetics International*, vol. 2, no. 4, pp. 723–739, 1995. <https://doi.org/10.1680/gein.2.0033>
- [7] S. Gholipour and M. Makarchian, "Experimental and numerical study of load-bearing and settlement behavior of circular skirted foundations compared to other types of foundations," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 85–104, 2020. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jfcej.2021.61489.0>
- [8] I.A. G. Góngora and E. M. Palmeira, "Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades," *Geosynthetics International*, vol. 19, no. 2, pp. 191–199, 2012. <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.191>
- [9] R. D. Holtz and N. Sivakugan, "Design charts for roads with geotextiles," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 5, no. 3, pp. 191–199, 1987. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(87\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0266-1144(87)90016-1)
- [10] S. James and R. Rakendu, "Geotextile reinforced two layer soil system with Kuttanad clay overlain by laterite soil," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, no. 4, 2018.

- [11] N. Khoueiry, L. Briançon, M. Riot, and A. Daouadji, "Full-scale laboratory tests of geosynthetic reinforced unpaved roads on a soft subgrade," *Geosynthetics International*, vol. 28, no. 4, pp. 435–449, 2021. <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00001>
- [12] A. M. Morsy and J. G. Zornberg, "Soil-reinforcement interaction: Stress regime evolution in geosynthetic-reinforced soils," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 49, no. 1, pp. 323–342, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.08.007>
- [13] V. Nezami, S. Kharaghan, and N. Mehrannia, "Numerical modeling of granular soil stabilized using biological approach in road substrate," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 109–118, 2017. [In Persian]. <http://dx.doi.org/10.22067/civil.v30i2.31051>
- [14] Nazeri, R. Ziaie-Moayed, and H. Ghiasinejad, "Evaluating the efficiency of a composite geosynthetic reinforcement in container yard pavements via laboratory plate load test," *International Journal of Pavement Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1817449>
- [15] T. S. Ramjiram, B. P. Naveen, and J. P. Tegar, "Improvement in CBR value of soil reinforced with nonwoven geotextile sheets," *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 0–9, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00138-9>
- [16] V. Rashidian, S. A. Naeini, and M. Mirzakhani, "Laboratory testing and numerical modelling on bearing capacity of geotextile-reinforced granular soils," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 241–251, 2018. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1269042>
- [17] R. Rezvani, M. Azizi, P. Nopars, and A. Nabizadeh, "Evaluating the effects of lime and nano-lime on compaction and strength properties of Chaloos coastal sand," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 55–70, 2020. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/civil.v33i2.85864>
- [18] K. Sadeghi Azar and R. Dabiri, "The effects of geotextile layers on bearing capacity of gravel-silt mixtures," *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, vol. 16, no. 2, pp. 61–69, 2015.
- [19] S. Shafaghatian and G. Moradi, "Experimental study of the correlation between resilient modulus and uniaxial compressive strength in chemical and biological stabilization of clay subgrade soil," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 83–100, 2025. [In Persian].
- [20] A. Shakibi-Nezhad, S. Gholipour, and M. Makarchian, "Investigation of shear behavior of stone columns in sandy bed," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 65–82, 2025. [In Persian]
- [21] M. Singh, A. Trivedi, and S. K. Shukla, "Unpaved test sections reinforced with geotextile and geogrid," *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, pp. 706–711, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.260>
- [22] M. Singh, A. Trivedi, and S. K. Shukla, "Strength enhancement of the subgrade soil of unpaved road with geosynthetic reinforcement layers," *Transportation Geotechnics*, vol. 19, pp. 56–60, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.260>
- [23] D. J. White and P. K. R. Vennapusa, "In situ resilient modulus for geogrid-stabilized aggregate layer: A case study using automated plate load testing," *Transportation Geotechnics*, vol. 11, pp. 120–132, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.06.001>
- [24] P. S. Wulandari and D. Tjandra, "Analysis of geotextile reinforced road embankment using PLAXIS 2D," *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 358–362, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.075>