

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

آرش محمودی^۱، سجاد قلی‌پور^{۲*} و مسعود مکارچیان^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

^{۲*} استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

^۳ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

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: روبه (مخلوط شن و ماسه)، زیراساس (رس با ضخامت ثابت) و اساس (دو نوع ماسه با ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر و دو نوع دانه‌بندی) بود. نتایج نشان داد که قرار دادن ژئوسنتتیک‌ها در مرز لایه‌ها، به‌ویژه ژئو کامپوزیت، ظرفیت باربری را بین ۱٫۲ تا ۴٫۵ برابر حالت غیرمسلح 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 در بهینه‌سازی طراحی روسازی را تایید 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^a, Sajjad Gholipour^{b*}, Masoud Makarchian^a

^a Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

^b Department of Civil Engineering, Engineering Faculty of Khoy, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

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 subgrade layer (clay with a fixed thickness), and the base layer (two types of sand with thicknesses of 3, 6, and 9 cm and two different gradations). 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.

KeyWords: Geosynthetic, CBR, Bearing Capacity, Reinforcement of Base Layer.

۱- 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 غیرفلزی 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 ژئوسنتتیکی و پیشرفت دانش ژئوتکنیک، جامعه مهندسی جهت برون‌رفت از محدودیت‌های ظرفیت باربری و نشست خاک‌ها به سمت استفاده از مصالح نوین جهت تثبیت، تسلیح، افزایش پایداری و بهبود رفتار خاک به‌ویژه 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 ژئوسنتتیکی جهت جایگزینی و رفع محدودیت‌های اشاره شده و مقرون به‌صرفه 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 ژئوسنتتیک‌ها و استفاده از مصالح با کیفیت پایین‌تر و مقرون به‌صرفه بودن از مزایای مهم به‌کارگیری مصالح ژئوسنتتیکی در صنعت ساخت و توسعه راه‌ها به شمار می‌رود.

با توجه به پژوهش‌های حوزه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها 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 ژئوسنتتیک‌ها به این نتیجه رسیدند که مقاومت کششی بهینه ژئوتکستایل مورد

استفاده در تسلیح خاکریزها، به‌طور قابل‌توجهی 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، به‌طوری که با افزایش میزان درصد سیلت، مقادیر CBR کاهش یافت.

نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه بر بستر تسلیح شده با ژئوسنتتیک‌ها توسط Abu-Farsakh و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که استفاده از دو لایه ژئوسنتتیک نسبت به سایر حالت‌ها، دارای بهره‌وری بیشتری است و برای حالت تسلیح تک‌لایه‌ای لایه اساس، مدول برجهندگی تا ۲۵٪ افزایش و ضخامت لایه تا ۳۰٪ کاهش یافت.

مطالعه مدول برجهندگی لایه‌های دانه‌ای تثبیت شده با ژئوگرید از طریق آزمایش‌های بارگذاری صفحه توسط White و Vennapusa (۲۰۱۷) انجام شد و بر اساس نتایج به‌دست آمده گزارش کردند که مدول برجهندگی لایه مسلح نسبت به لایه غیرمسلح، می‌تواند تا حدود ۱۰ برابر بیشتر به‌دست 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 ژئوسنتتیک را در اعماق مختلف، با انجام آزمایش‌های CBR جهت تعیین عمق بهینه قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها مطالعه کردند. نتایج نشان می‌دهد که مصالح تسلیح کننده، سهم قابل‌توجهی در افزایش مقادیر CBR و کاهش ضخامت لایه اساس دارد، به‌طوری که بسته به نوع ژئوسنتتیک، بیشترین بهره‌وری زمانی حاصل شد که ژئوسنتتیک در فاصله ۰/۳ تا ۰/۶۲ ارتفاع نمونه قرار می‌گیرد. Singh و همکاران (۲۰۲۰) با انجام آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی، عملکرد بهسازی ژئوسنتتیک‌ها در راه‌ها و تأثیر لایه تسلیح کننده واقع در فصل مشترک لایه‌های اساس و زیراساس را بررسی کردند. نتایج نفوذ مخروط، کاهش میزان نفوذ به‌ازای ضربات یکسان برای لایه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل نسبت به لایه‌های غیرمسلح را نشان داد. با

ژئوسنتتیک‌ها بوده است؛ بنابراین در این پژوهش سعی شد که با قرار دادن انواع ژئوسنتتیک‌ها در فصل مشترک لایه‌های مختلف رویه، اساس و زیراساس، میزان بهره‌وری ژئوسنتتیک‌ها 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 جهت کاهش اثرات مرزی استفاده شد که به‌عنوان نوآوری پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبلی محسوب می‌شود. اهداف ویژه پژوهش کنونی از طریق آزمایش CBR اصلاح شده بر موارد ذیل متمرکز است:

- اندازه‌گیری پاسخ نفوذ سه نوع خاک ریزدانه و درشت‌دانه تسلیح شده توسط ژئوسنتتیک‌های مختلف؛
- ارزیابی تأثیر تسلیح کننده شامل نوع و تعداد لایه‌های تسلیح کننده بر مقاومت نفوذ.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- 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) جهت ایجاد لایه‌های اول (رویه) و دوم (اساس) خاکریزی به‌کار گرفته شده است؛ به‌طوری که 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 ات‌برگ آن نیز در جدول (۱) نمایش داده شده است.

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؛ به‌طوری که با افزایش ضخامت، تأثیرگذاری تسلیح کننده کاهش می‌یابد.

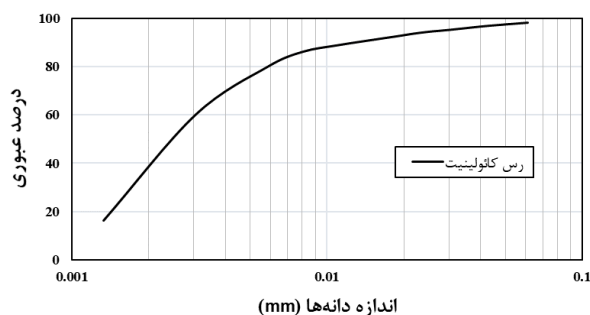
بررسی اندرکنش خاک و تسلیح کننده‌ها با تمرکز بر نحوه توزیع تنش در سطح تماس خاک و ژئوسنتتیک‌ها توسط Morsy و Zornberg (۲۰۲۱) انجام شد که نتایج بیانگر تأثیر محصورکنندگی جانبی ژئوسنتتیک‌ها بر خاک است، به‌طوری که با افزایش کرنش و فاصله قائم تسلیح کننده‌ها، تغییرات فشار جانبی خاک افزایش می‌یابد.

یک سری آزمون آزمایشگاهی در مقیاس واقعی جهت 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.

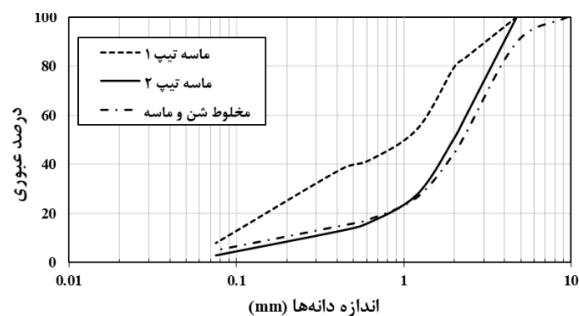
Ramjiram و همکاران (۲۰۲۱) تعدادی آزمایش CBR روی نمونه‌های خاک رسی مسلح شده با انواع مختلف ژئوتکستایل انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از ژئوتکستایل‌ها، مقادیر مقاومت و CBR را بهبود می‌بخشد و بر این اساس به‌کمک روابط تجربی، میزان ظرفیت باربری نهایی خاک را به‌ازای مقادیر CBR گزارش نمودند.

Abou Chaz و همکاران (۲۰۲۳) آزمایش‌های تمام مقیاس بارگذاری سیکلی را بر مخلوط ماسه و رس به‌منظور بررسی مزیت استفاده از لایه ژئوسنتتیک 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 شده است، ملاحظه می‌شود که تمرکز اصلی پژوهش‌ها بر استفاده از یک لایه و یافتن عمق بهینه محل استقرار



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی مصالح رس کائولینیت



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی مصالح شن و ماسه

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	η متناظر با تراکم نسبی	CBR متناظر با تراکم نسبی
مخلوط شن و ماسه	۴۰/۸	۰	۳۹/۹	٪۸۸	۱۶/۷۴	۱۹/۶
ماسه تیپ ۱	۳۳/۲	۰	۲۰/۱	٪۹۰	۱۶/۵۰	۹/۲
ماسه تیپ ۲	۳۶/۲	۰	۲۲/۲	٪۹۰	۱۶/۸۶	۱۴/۸
کائولینیت	۲۴/۰	۲۴/۲	۱۰/۳	٪۱۰۰	۱۵/۵۰	۱۰/۳

با استفاده از نتایج پژوهش Bergado و همکاران (۲۰۰۱) و اندازه‌گیری مقدار تغییرشکل ژئوسنتتیک‌ها 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 حاصل در شکل (۵) نشان داده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود، ژئوتکستایل‌ها تا کرنش حدودا ۵٪ دارای سختی نسبتا مشابه هستند.

جدول ۳- مشخصات مصالح ژئوسنتتیک‌های مورد استفاده

نوع ویژگی	ژئوتکستایل پلی‌پروپیلن	ژئوتکستایل پلی‌استر	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

مطابق شکل (۳) در این پژوهش سه نوع ژئوسنتتیک تهیه شده از شرکت ژئوپارسیان شامل دو نوع ژئوتکستایل پلی‌پروپیلن و پلی‌استر بافته نشده و یک نوع ژئوکامپوزیت خاکی مورد 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 بسیاری به حالت متقارن دارد. در این قسمت رفتار تنش-کرنش ژئوتکستایل‌های مورد استفاده، در شرایط بارگذاری تقارن محوری ارزیابی خواهد شد. بدین منظور، آزمایش سوراخ‌شدگی ژئوسنتتیک مطابق با استاندارد شماره ASTM-D6241 با گیردار کردن ژئوسنتتیک‌ها به لبه فوقانی قالب استوانه‌ای آهنی به قطر ۱۵ سانتی‌متر، تحت پیستون دایروی تخت به قطر ۵ سانتی‌متر و با سرعت ثابت ۱ mm/min ۵۰ توسط دستگاه CBR-مارشال انجام شد. آزمایش بایستی تا مرز پاره شدگی، 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.

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

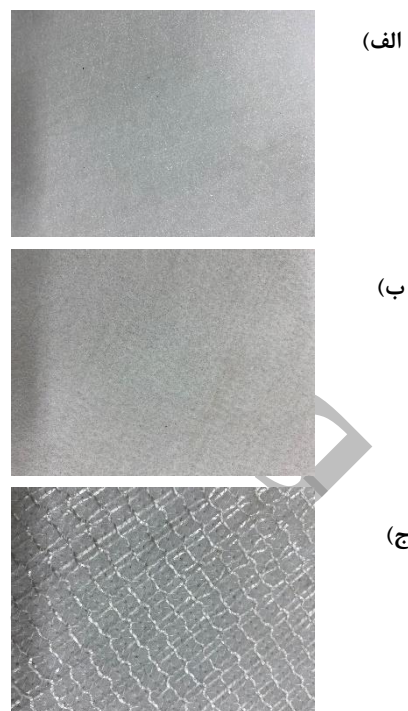
معمولا برای حالت خاک غیرمسلح، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر اساس استاندارد شماره ASTM-D1883 و استفاده از قالب‌هایی به ارتفاع ۱۱۶/۴۳ mm و قطر ۱۵۲/۴ mm انجام می‌شود. در این پژوهش به‌منظور انجام آزمایش‌های CBR روی نمونه‌های مسلح در جهت کاهش محدودیت‌های موجود در ارتباط با قالب استاندارد همانند شرایط مرزی، رعایت محدودیت اندازه دانه‌ها و نسبت اندازه ژئوسنتتیک‌ها به ابعاد قالب، برخی اصلاحات روی ابعاد قالب آزمایش CBR انجام گرفت؛ به‌طوری که از قالب استوانه‌ای اصلاح شده به ارتفاع ۲۳۰ mm و قطر ۲۵۰ mm استفاده شد. انجام آزمایش CBR با شرایط درصد رطوبت بهینه (حالت غیرغرقاب^۱) انجام گرفت و جهت اعمال سربار بر روی سطح خاک متراکم درون قالب، دیسک‌های فولادی به‌کار گرفته شد. با توجه به اندازه قطر ۵۰ mm برای سنبه بارگذاری، انتخاب ابعاد مناسب قالب آزمایش، باعث کاهش اثرات شرایط مرزی بر نتایج می‌شود.

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

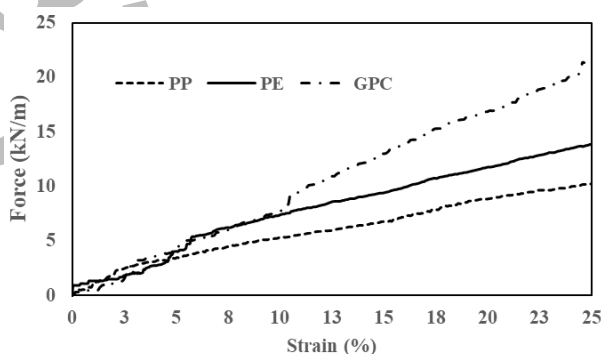
۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

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

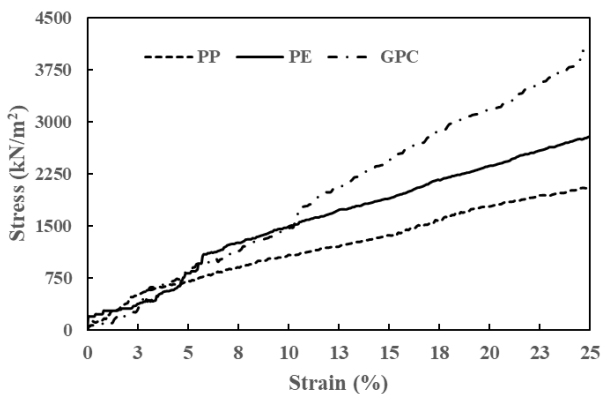
به‌منظور کاهش اثر شرایط مرزی بر نتایج، قبل از شروع نمونه‌سازی، دیواره قالب آزمایش به‌طور کامل روغن‌کاری شده و سپس لایه‌های خاک با ضخامت‌های مورد نظر مطابق شکل (۶) و با درصد تراکم نسبی برای لایه‌های اول، دوم و سوم (مخلوط شن و ماسه، ماسه و رس) به‌ترتیب برابر با ۸۸، ۹۰ و ۱۰۰ درصد متراکم شدند که با توجه به رابطه انرژی تراکم در واحد حجم، تعداد ضربات مورد نیاز برای متراکم



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

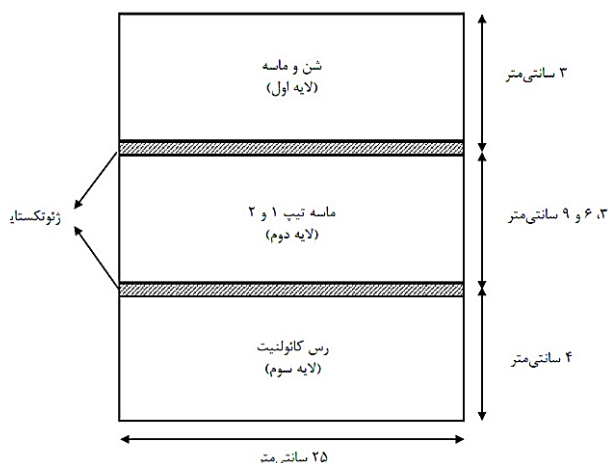


شکل ۴- نمودار نیروی واحد عرض در برابر کرنش ژئوتکستایل‌ها



شکل ۵- نمودار تنش کششی-کرنش کششی ژئوتکستایل‌ها

¹ Unsoaked



شکل ۶- الگوی کلی نحوه ساخت نمونه و جای گذاری ژئوسنتتیک‌ها در نمونه آزمایشگاهی

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا رس آسیاب شده با درصد رطوبت بهینه به مدت نیم ساعت ورز داده شد و پس از باقیماندن در شرایط یکسان و الک مجدد، پس از ۲۴ ساعت ماندن درون کیسه محکم و دور از رطوبت و حرارت، با تعداد ضربات لازم جهت رسیدن به تراکم نسبی مشخص، درون قالب متراکم شد. سایر لایه‌ها نیز پس از ساخت خاک به صورت مصنوعی دانه‌بندی شده، با درصد رطوبت بهینه و تراکم نسبی مورد نظر در قالب آزمایش متراکم شده و با قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها در مرز لایه‌ها، نمونه‌ها آماده شد. پس از گذاشتن دیسک‌های فولادی به عنوان سربار روی سطح نمونه آماده شده، قالب نمونه زیر سنبه به قطر ۵ cm و لودسل با ظرفیت ۲ تن قرار گرفته و آزمایش با سرعت ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه CBR-مارشال (شکل ۷) انجام شد.

آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی و بررسی عملکرد مواد مختلف (مانند ژئوتکستایل) در محیط کنترل شده انجام می‌شوند. با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و هزینه‌ای، انجام آزمایش‌های مقیاس واقعی در تمام مراحل پروژه غیرممکن یا بسیار گران است. بنابراین، استفاده از مقیاس‌بندی آزمایشگاهی و مقایسه نتایج آن با شرایط واقعی، روشی متداول و علمی است، علیرغم اینکه شبیه‌سازی‌های کوچک‌مقیاس به دلیل مقیاس مصالح و نمونه‌ها، شرایط مرزی، نحوه آماده‌سازی و شرایط انجام آزمایش‌ها ممکن است منجر به بروز رفتارهایی شود که در مقیاس واقعی وجود ندارد. به عنوان مثال استفاده از قالب فلزی می‌تواند منجر به

کردن لایه‌ها توسط چکش ۱۰ پوندی با درصد تراکم‌های یاد شده، در جدول شماره (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- تعداد ضربات لازم برای کوبیدن لایه‌ها با تراکم نسبی مشخص

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

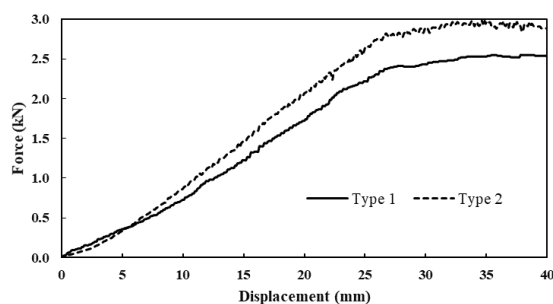
بر اساس شکل (۶) ضخامت لایه‌های اول و سوم در تمامی نمونه‌ها ثابت انتخاب شده و جهت بررسی تأثیر ضخامت لایه اساس بر نتایج، سه نوع ضخامت مختلف (۳، ۶ و ۹ سانتی‌متری) برای لایه اساس انتخاب شد. انتخاب میزان ضخامت‌های موردنظر در این تحقیق بر اساس سه معیار زیر انجام گرفت:

الف) تطابق با محدوده‌های متداول طراحی روسازی در مقیاس آزمایشگاهی؛ در مدل‌سازی فیزیکی، حفظ نسبت‌های هندسی با سیستم‌های واقعی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، با توجه به ارتفاع کل نمونه (ارتفاع قالب ۲۳ سانتی‌متر و حداکثر ارتفاع نمونه آزمایش ۱۶ سانتی‌متر) و ارتفاع لایه زیراساس (۴ سانتی‌متر)، انتخاب ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر برای بررسی رفتار مصالح در مقیاس آزمایشگاهی منطقی و متوازن می‌باشد.

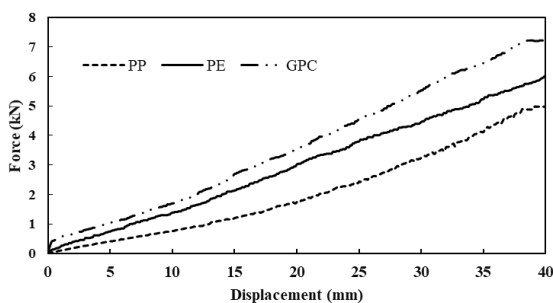
ب) بررسی رفتار غیرخطی سیستم در برابر تغییر ضخامت؛ فاصله‌گذاری یکنواخت (افزایش سه سانتی‌متری) این امکان را ایجاد می‌کند که روند تغییر مقادیر CBR و نحوه عملکرد ژئوسنتتیک‌ها در ضخامت‌های مختلف به صورت پیوسته تحلیل شود.

ج) امکان بررسی تأثیر نسبی نسبت ضخامت لایه مسلح شده به کل ارتفاع سیستم؛ در نظرگیری سه نوع ضخامت مختلف، می‌تواند کمک کننده تحلیل و بررسی میزان بهبود عملکرد ناشی از افزایش ضخامت باشد و اینکه در چه نقطه‌ای، افزایش ضخامت به کاهش بهره‌وری باربری و اقتصادی منجر می‌شود.

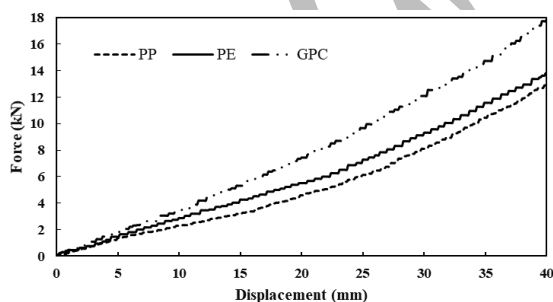
باربری در ماسه درشت‌دانه (تیپ ۲)، تقریباً به میزان حدود ۱۵٪ بیشتر از ماسه ریزدانه (تیپ ۱) بوده است. در حالت مسلح نیز، در خاک درشت‌دانه، تأثیر ژئوسنتتیک‌ها مشهودتر می‌شود. بررسی اثر نوع ژئوسنتتیک بر میزان باربری در شکل (ب-۸) بیانگر این است که مقادیر نیروی نفوذ و مقاومت باربری در ژئوکامپوزیت نسبت به ژئوتکستایل‌ها به ازای نفوذ یکسان بیشتر است.



الف) مدل غیرمسلح با ضخامت لایه اساس ۳ cm



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



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

شکل ۸- نتایج آزمایش CBR برحسب نیرو-تغییرمکان.

روند کلی نمودارها نشان می‌دهد زمانی که تسلیح کننده در مرز بالایی بین لایه‌های رویه و اساس قرار می‌گیرد، تغییرات نیرو نسبت به حالت غیرمسلح از همان ابتدای نفوذ سمبه بارگذاری مشهود است؛ ولی در زمانی که موقعیت تسلیح کننده در مرز پایین (بین لایه‌های اساس و زیراساس) واقع می‌شود، به‌علت عدم تغییر شکل در زمان‌های اولیه نفوذ و

ایجاد مرزهای صلب در محیط نمونه شده 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، به منظور ایجاد شرایطی نسبتاً مشابه با شرایط واقعی باشد. این ابعاد به گونه‌ای تعیین شده‌اند که با توجه به محدودیت‌های ابعادی و تغییرمکان دستگاه‌های مورد استفاده، توزیع بار و شرایط مکانیکی در لایه‌های خاکی تا حد امکان نسبتاً دقیق شبیه‌سازی شود.



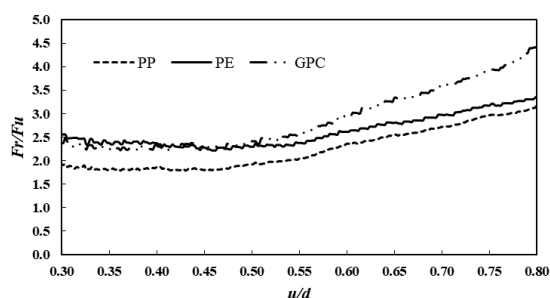
شکل ۷- دستگاه آزمایش CBR-مارشال

۳- نتایج و بحث

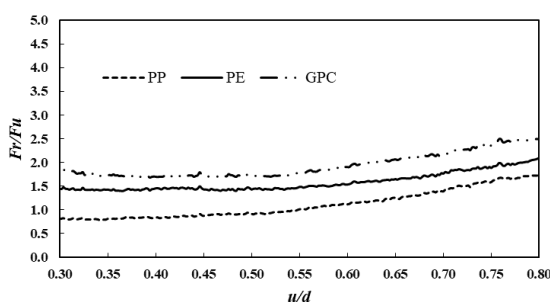
۳-۱- تفسیر نتایج آزمایش‌های CBR

در این پژوهش، عملکرد ژئوسنتتیک‌ها بر میزان بهبود رفتار ظرفیت باربری روسازی راه، با بررسی پارامترهای مختلف شامل نوع و محل قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها، ضخامت و نوع مصالح لایه اساس از طریق انجام آزمایش‌های CBR مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها به‌صورت منحنی‌های نیرو-تغییرمکان ارائه شده که نمونه‌ای از این منحنی‌ها برای حالت مسلح و غیرمسلح 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 (الف-۸) برای حالت غیرمسلح، بیانگر این است که میزان

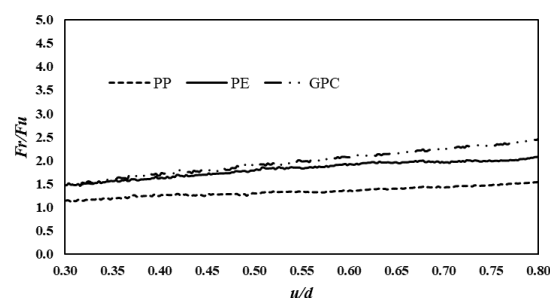
مدنظر است؛ بنابراین نمودارها برای نسبت تغییرمکان بزرگ‌تر از ۰/۳ ارائه شده است.



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



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



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

شکل ۹- نتایج نسبت بار حالت مسلح به غیرمسلح به‌ازای میزان نسبت تغییر مکان به قطر سنبه

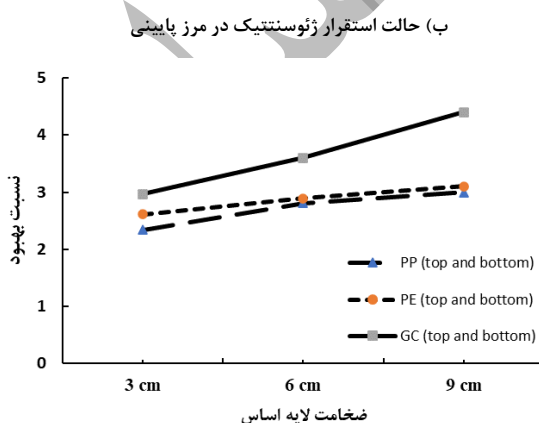
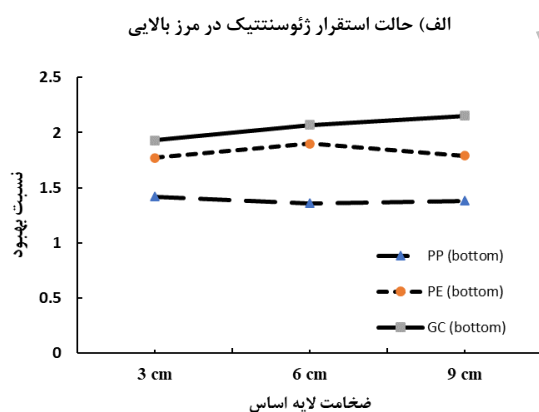
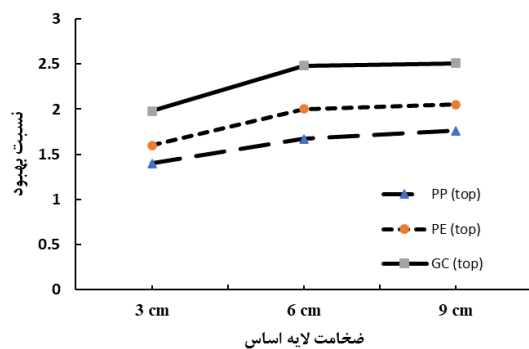
نتایج حاصله نشان می‌دهد که وجود لایه‌های مسلح کننده ژئوسنتتیک، تأثیر چشم‌گیر در افزایش مقاومت نفوذ سیستم سه‌لایه‌ای دارد؛ به‌طوری که صرف‌نظر از پارامترهای مختلف و میزان نفوذ، مقادیر نسبت بهبود در محدوده ۱/۲ تا ۴/۵ برابر حالت غیرمسلح به‌دست آمد. همچنین با افزایش میزان نشست و نفوذ سنبه در خاک، اثر ژئوتکستایل‌ها بیشتر شده و عامل سختی باعث تفاوت محسوس در نتایج گردیده است.

عدم تأثیرپذیری ژئوسنتتیک‌ها به‌علت نرسیدن بار مؤثر، بسیج نیروها به تأخیر افتاده و تغییرات نیرو نسبت به حالت غیرمسلح از مقدار نفوذ بالاتر شروع می‌شود که با تئوری توزیع تنش و بسیج نیروها در ژئوسنتتیک‌ها سازگار است. با توجه به اینکه معمولاً آزمایش CBR توسط شاخص CBR به‌عنوان نسبت نیروی اندازه‌گیری شده در طول آزمایش به‌ازای نفوذ مشخص به نیروی متناظر برای حالت مصالح استاندارد محاسبه می‌شود؛ بنابراین در این مقاله به‌منظور بررسی تأثیر تسلیح کننده‌ها بر پاسخ نفوذ به‌صورت مقادیر کمی و مقایسه مقادیر در حالت‌های مسلح و غیرمسلح، از پارامتر نسبت بهبود $IR = F_{xr}/F_{xu}$ استفاده شد؛ به‌طوری که نسبت بهبود به‌عنوان 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 غیرمسلح (F_{xu}) تعریف می‌شود. نسبت بهبود به‌ازای حداکثر نیروی نفوذ تحت عنوان نسبت ظرفیت باربری می‌تواند مدنظر قرار گیرد. با توجه به اینکه در شکل (الف-۸) برای حالت خاک غیرمسلح میزان نیروی حداکثر در یک مقدار نفوذ حدود ۳۰ mm حاصل شده است، بنابراین در این پژوهش میزان نفوذ مبنا جهت تعیین نسبت بهبود، مقدار نفوذ ۳۰ mm در نظر گرفته شده و مقادیر پارامتر IR بر اساس آن محاسبه شده است.

۳-۲- تأثیر تسلیح کننده‌ها

اثر تسلیح کننده بر میزان پاسخ، بستگی به چندین پارامتر همچون نوع و تعداد ژئوسنتتیک، تعداد و ضخامت لایه‌ها و نوع دانه‌بندی خاک دارد که به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها جهت بررسی اثر نوع و موقعیت قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها در میزان افزایش ظرفیت باربری برحسب پارامتر نسبت بهبود به‌ازای نسبت تغییرمکان قائم به قطر سنبه بارگذاری ارزیابی شد که نمونه‌ای از منحنی‌ها در شکل (۹) مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه در اکثر نمودارها تأثیر ژئوسنتتیک‌ها بر میزان پاسخ، به‌ازای تغییرمکان‌های $\frac{u}{d} < 0.3$ نشست قائم و d قطر سنبه بارگذاری است) کم بوده و بررسی در تغییرمکان‌های بزرگ‌تر

جهت مقایسه روند نتایج با جزئیات بیشتر، مقادیر نسبت بهبود برای سه نوع تسلیح کننده با سختی‌های مختلف از نوع ژئوتکستایل پلی‌پروپیلن (PP)، ژئوتکستایل پلی‌استر (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.



ج) حالت استقرار ژئوسنتتیک در هر دو مرز بالایی و پایینی

شکل ۱۰- تغییرات نسبت بهبود بار به‌ازای انواع ژئوسنتتیک‌ها

همان‌طور که از روند منحنی‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش میزان نفوذ، مقادیر بهبود باربری نیز با شیب جزئی و تقریباً یکسانی افزایش می‌یابد، بنابراین جهت مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف، همان‌طوری که در بخش قبلی توضیح داده شد، میزان نفوذ ۳۰ mm به‌عنوان نفوذ مبنا در نظر گرفته شده و مقایسه نتایج و نسبت بهبود بر اساس میزان نسبت $u/d=0.6$ انجام شده است.

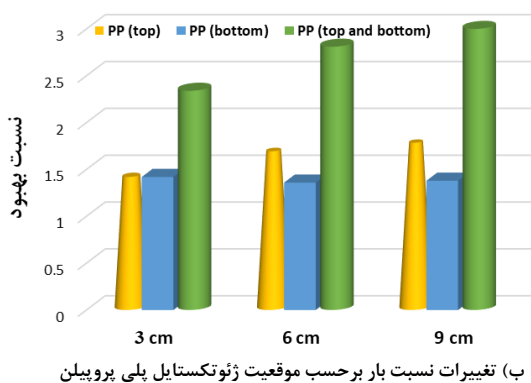
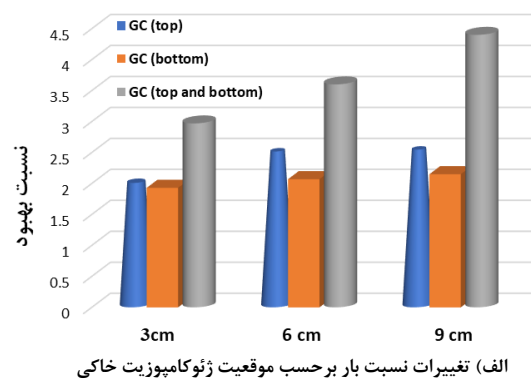
خلاصه مقادیر نسبت بهبود به‌ازای تمامی پارامترهای مورد مطالعه برای میزان نفوذ ۳۰ mm به‌ترتیب برای خاک تیپ ۱ و تیپ ۲ در جداول (۵) و (۶) ارائه شده؛ به‌طوری که مقادیر نسبت بهبود نیروی مقاومت نفوذ در محدوده ۱/۲ تا ۴/۵ به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد صرف‌نظر از نوع پارامتر مورد نظر، در تمامی حالت‌های آزمایش با افزایش میزان سختی ژئوسنتتیک، میزان بهره‌وری و نسبت بهبود افزایش پیدا کرده است.

جدول ۵- مقادیر نسبت بهبود به‌ازای خاک تیپ ۱

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

جدول ۶- مقادیر نسبت بهبود به‌ازای خاک تیپ ۲

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



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر نسبت بهبود بار به‌ازای موقعیت ژئوسنتتیک‌ها

۳-۳- تأثیر اندازه دانه‌ها و ضخامت لایه اساس

میزان نسبت نیروی اندازه‌گیری شده در آزمایش CBR به‌ازای 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، به‌طور متوسط برای لایه اساس با ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر، مقادیر نسبت نیرو به‌ترتیب حدود ۷٪، ۱۱٪ و ۱۵٪ افزایش پیدا می‌کند؛ در صورتی که مقادیر افزایش نسبت نیرو در حالت غیرمسلح، به‌ترتیب برای ضخامت‌های مختلف، حدود ۱۶٪، ۲۱٪ و ۲۳٪ به‌دست آمده است. بنابراین با وجود افزایش مقادیر نیرو با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها چه در حالت مسلح و چه غیرمسلح، همان‌گونه 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 عبارت دیگر، تأثیر ژئوسنتتیک‌ها به‌لحاظ افزایش باربری خاک غیرمسلح در خاک‌های با دانه‌بندی بزرگ‌تر، کاهش نشان می‌دهد که برای پژوهش کنونی، به‌طور متوسط حدود ۱۰٪ بوده است.

نتایج نشان می‌دهد برای تمامی حالت‌های محل استقرار، ژئوکامپوزیت خاکی بیشترین بهره‌وری را از لحاظ نسبت بهبود نشان داد؛ به‌طوری که متوسط مقادیر نسبت بهبود در حالت استفاده از ژئوکامپوزیت خاکی حدود ۴۱٪ بیشتر از حالت ژئوتکستایل پلی‌پروپیلن به‌دست آمده است. مطابق نتایج، در حالت به‌کارگیری یک لایه ژئوسنتتیک، با افزایش ضخامت لایه اساس از ۶ به ۹ سانتی‌متر، شیب منحنی باربری تقریباً ثابت و یا حتی برخی حالت‌ها کاهش یافته است که نتایج دارای سازگاری با نتایج سایر محققان است؛ به‌طوری 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، صرف‌نظر از نوع مصالح تسلیح‌کننده، بیشترین میزان باربری برای حالتی است که از دو لایه ژئوسنتتیک 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 به‌دست آمد. طبق نتایج پژوهش Holtz و Sivakugan (۱۹۸۷)، هرچه بار وارده و پیرو آن عمق شیار کم‌تر باشد، به‌دلیل کرنش کم ژئوسنتتیک در میزان تغییر شکل‌های کوچک، اثر غشایی مسلح‌کننده محسوس نبوده و بیشتر به‌عنوان مصالح جداکننده عمل می‌نماید.

همچنین بر اساس نتایج تحقیق Bray و Espinoza (۱۹۹۵) هرچه میزان نفوذ سنبه در خاک بیشتر باشد، مقدار بار وارده بیشتر شده و به‌دلیل 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، به‌دلیل قرارگیری در خارج از محدوده حباب تنش و عدم اعمال تنش مؤثر بر ژئوسنتتیک، برعکس سایر حالت‌های استقرار، تأثیر قابل‌توجهی بر مقادیر نسبت باربری با افزایش ضخامت لایه اساس مشاهده نشده است و این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین منطبق 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؛ به‌طوری 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 به‌دست آمده است؛ به‌طوری 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 ژئوسنتتیک‌ها 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 شده 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 غیرمسلح، 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 به‌دست 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 حالت مقداری از بار وارده توسط خاک رسی نرم تحمل می‌شود و با توجه به نوع خاک، ظرفیت باربری آن نسبت به حالت‌های دیگر کمتر به‌دست می‌آید.

در حالتی که ضخامت لایه اساس افزایش یافته و به ۶ سانتی‌متر می‌رسد، میزان اضافه تنش، حداکثر به مرز لایه‌های دوم و سوم رسیده و در حالت مسلح، به ژئوسنتتیک 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 شده و عملاً تنش مؤثر محسوسی به محل استقرار ژئوسنتتیک واقع در مرز پایین نمی‌رسد و بنابراین تأثیر حضور ژئوسنتتیک در لایه پایین کمتر شده و این موضوع کاملاً در منحنی‌های شکل (۱۰) مشهود بوده و نیز منطبق بر نتایج پژوهش‌های مشابه است.

۳-۴- مقایسه با نتایج سایر پژوهشگران

در این بخش به‌منظور بررسی کیفی نتایج پژوهش، مقادیر حاصله از مطالعه حاضر 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 تسلیح‌کننده و همچنین تفاوت نوع، اندازه قالب و شرایط انجام آزمایش، مقادیر نتایج گزارش شده تفاوت قابل‌توجهی با یکدیگر نشان نمی‌دهد. شایان ذکر است بررسی دقیق‌تر نتایج، مستلزم شرایط کاملاً مشابه و یکسان در پارامترهای مطالعه و آزمایش است.

جدول ۷- مقایسه نتایج پژوهش کنونی با نتایج سایر پژوهشگران

پژوهش مورد نظر	تعداد لایه‌های تسلیح‌کننده	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

میزان مقادیر نسبت بهبود باربری در محدوده ۱/۲ تا ۴/۵ به دست آمد؛

- 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 یافته و در برخی حالت‌ها به‌ویژه زمانی که ژئوسنتتیک در مرز پایینی قرار داشت، به‌علت خارج شدن تسلیح کننده از محدوده حباب تنش و کاهش اضافه تنش اعمالی، شیب منحنی ثابت شده و افزایش ضخامت تأثیر ناچیزی بر میزان باربری نشان می‌دهد؛

- 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 غیریکنواخت (تیپ ۱) به دلیل فضای خالی کمتر بین دانه‌ها، نیروی اعمالی از طرف سنبه، بیشتر صرف اعمال نیرو به سیستم خاک-ژئوسنتتیک شده و نیروی کمتری جهت جابجایی دانه‌ها به‌منظور تراکم خاک می‌شود؛ بنابراین در این حالت تسلیح کننده‌ها نیز عملکرد بهتری نشان می‌دهند؛

- وقتی بار قائمی به سیستم خاک چندلایه وارد می‌شود، تنش‌های قائم و برشی زیادی به‌مجموعه وارد می‌شود. همچنین خاک زیر پی که در مجاورت ناحیه بارگذاری نیز است، تمایل به حرکت جانبی دارد. در حالت غیرمسلح، قسمتی از حرکت جانبی توسط مقاومت خاک لایه‌های پایین‌تر تحمل شده و مابقی به‌فصل 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 شده و تأثیر چشم‌گیری بر ظرفیت باربری بگذارد. در این بخش پیشنهادهایی نیز برای پژوهش‌های آتی و در امتداد بهبود پژوهش کنونی ارائه می‌شود:

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

۳-۵- بررسی محدودیت‌های آزمایش CBR

عموماً نتایج آزمایش CBR انجام شده بر نمونه‌های خاک غیرمسلح 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 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. همان‌گونه که در بخش‌های قبلی مورد اشاره قرار گرفت، جهت 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.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر افزودن ژئوسنتتیک‌ها 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:

- تأثیر پارامترهای مختلف همانند ضخامت لایه اساس و اندازه دانه‌ها بر روند نتایج نمونه‌های مسلح و غیرمسلح به‌صورت تقریباً مشابه به‌دست آمد. در تغییر مکان‌های کمتر، وجود ژئوسنتتیک‌ها، تأثیر زیادی بر بهبود ظرفیت باربری ندارد و تفاوت ناچیزی میان حالت مسلح و غیرمسلح مشاهده شد؛ ولی با افزایش میزان تغییر مکان، مقادیر باربری روند افزایشی نشان داد؛
- استفاده از تسلیح کننده‌ها در مرز لایه‌ها بسته به تعداد لایه‌ها و نوع ژئوسنتتیک‌ها به‌ازای میزان کرنش‌های بزرگ‌تر، اثر قابل‌توجهی بر پاسخ‌های بار-نفوذ نشان دادند؛ به‌طوری که صرف‌نظر از پارامترهای مختلف،

ϕ	زاویه اصطکاک داخلی خاک	✓ توسعه آزمایش‌های در مقیاس بزرگ‌تر یا در محل
mm/min	میلی‌متر بر دقیقه	(in-situ) برای تحلیل رفتار واقعی تحت بارهای تکراری ترافیکی؛
Strain	کرنش	✓ بررسی تأثیر ژئوسنتتیک‌ها از نظر نوع و نحوه قرارگیری آن‌ها در سیستم‌های روسازی چندلایه، از جمله مقایسه ژئوتکستایل و ژئوگرید؛
Force	نیرو	✓ انجام آزمایش‌ها با دستگاه مدل چرخ؛
Loadcell	لودسل	✓ مدل‌سازی عددی جهت اعتبارسنجی و گسترش تحلیل‌ها در شرایط متنوع‌تر.
Improvement Ratio (IR)	نسبت بهبود	
F_{xr}	نیروی اندازه‌گیری شده در حالت مسلح	
F_{xu}	نیروی اندازه‌گیری شده در حالت غیرمسلح	
x	مقدار نفوذ مشخص سمبه	
u	نشست قائم	واژه‌نامه
d	قطر سنبه	نسبت باربری کالفرنیا (California Bearing Ratio (CBR)
B	قطر پی	انجمن آزمایش مصالح آمریکا ASTM
Geotextile	ژئوتکستایل	USCS سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک
Geosynthetic	ژئوسنتتیک	SZWNK1 رس کائولینت زنوز
Geogrid	ژئوگرید	D_{10} اندازه مؤثر
Geocomposite	ژئوکامپوزیت	D_{30} قطر دانه متناظر با ۳۰٪ عبوری
PolyPropylene (PP)	ژئوتکستایل پلی پروپیلن	D_{60} قطر دانه متناظر با ۶۰٪ عبوری
PolyEster (PE)	ژئوتکستایل پلی استر	G_s چگالی ویژه
Geocomposite (GC)	ژئوکامپوزیت خاکی	γ_d وزن مخصوص خشک
Unsoaked	غیرغرقاب	γ_{dmax} وزن مخصوص خشک بیشینه
top	مرز بالا	ω_{opt} رطوبت بهینه
bottom	مرز پایین	D_r دانسیته نسبی
top and bottom	مرز بالا و پایین	LL حد روانی
in-situ	در محل	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

۵- مراجع

- unpaved roads on a soft subgrade”, *Geosynthetics International*, 2021, 28 (4), 435-449.
- Morsy AM, Zornberg JG, “Soil-reinforcement interaction: Stress regime evolution in geosynthetic-reinforced soils”, *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(1), 323–342.
- Nezami V, Kharaghan, S, Mehrannia N, “Numerical Modeling of Granular Soil Stabilized Using Biological Approach in Road Substrate”, *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 2017, 30(2), 109-118. (In Persian). doi: 10.22067/civil.v30i2.31051
- Nazeri A, Ziaie-Moayed R, Ghiasinejad H, “Evaluating the efficiency of a composite geosynthetic reinforcement in container yard pavements via laboratory plate load test”, *International Journal of Pavement Engineering*, 2020.
- Ramjiram TS, Naveen BP, Tegar JP, “Improvement in CBR value of soil reinforced with nonwoven geotextile sheets”, *International Journal of Geo-Engineering*, 2021, 12(1), 0–9.
- Rashidian V, Naeini SA, Mirzakhani M, “Laboratory testing and numerical modelling on bearing capacity of geotextile-reinforced granular soils”, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 12(3), 241–251.
- Rezvani R, Azizi M, Nopars P, and Nabizadeh A, “Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand”, *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 2020, 33(2), 55-70. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/civil.v33i2.85864>
- Sadeghi Azar K, Dabiri R, “The effects of geotextile layers on bearing capacity of gravel-silt mixtures”, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 2015, 16(2): 61-69.
- Shafaghathian S, Moradi G, “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*, 2025, 38(1), 83-100. (In Persian). doi: 10.22067/jfcei.2024.83919.1248
- Shakibi-Nezhad A, Gholipour S, Makarchian M, “Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed”, *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 2025, 38(1), 65-82. (In Persian). doi: 10.22067/jfcei.2024.90055.1323
- Singh M, Trivedi A, Shukla SK, “Unpaved test sections reinforced with geotextile and geogrid”
- Abdi-Goudarzi S, Ziaie-Moayed R, Nazeri A, “An experimental evaluation of geocomposite-reinforced soil sections”, *Construction and Building Materials*, 2022, Volume 314(B).
- Abou-Chaz N, Briançon L, Villard P, Silvani C, Nancey A, Abdelouhab A, “Experimental and numerical studies of the geosynthetics reinforced platforms laid over soft subgrade soil”, In *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2023, 368, 20-36.
- Abu-Farsakh MY, Akond I, Chen Q, “Evaluating the performance of geosynthetic-reinforced unpaved roads using plate load tests”, *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, 17(10), 901-912.
- Bergado DT, Youwai S, Hai CN, and Voottipruex P, “Interaction of nonwoven needle-punch geotextiles under axisymmetric loading conditions”, *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19(5), 299-328.
- Carlos DM, Pinho - Lopes M, Lopes ML, “Evaluation of penetration resistance of soils reinforced with geosynthetics using CBR tests”, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2024, 10(22).
- Espinoza RD, Bray JD, “An integrated approach to evaluating single-layer reinforced soils”, *Geosynthetics International*, 1995, 2(4), 723–739.
- Gholipour S, and Makarchian M, “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*, 2020, 33(3), 85-104, (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jfcei.2021.61489.0>
- Góngora IAG, Palmeira EM, “Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades”, *Geosynthetics International*, 2012, 19(2), 191-199.
- Holtz RD, Sivakugan N, “Design Charts for Roads with Geotextiles”, *Geotextiles and Geomembranes*, 1987, 5(3), 191–199.
- James S, Rakendu R, “Geotextile reinforced two layer soil system with Kuttanad clay overlain by laterite soil”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2018, 5 (4).
- Khoueiry N, Briançon L, Riot M, Daouadji A, “Full-scale laboratory tests of geosynthetic reinforced

Materials Today: Proceedings, 2020, 32, 706–711.

Singh M, Trivedi A, Shukla SK, “Strength enhancement of the subgrade soil of unpaved road with geosynthetic reinforcement layers”, Transp. Geotech, 2019, 19, 56-60.

White DJ, Vennapusa PKR, “In situ resilient modulus for geogrid-stabilized aggregate layer: A case study using automated plate load testing”, Transportation Geotechnics, 2017, 11, 120-132.

Wulandari PS, Tjandra D, “Analysis of geotextile reinforced road embankment using PLAXIS 2D”, Procedia Engineering, 2015, 125, 358–362.