بررسی تأثیر چگونگی استفاده ژئوتکستایل بر به‌سازی باربری مخلوط رس- شن در لایه‌های روسازی

سمانه قاسم وش اخیر؛
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، گروه زمین‌شناسی مهندسی،
روزبه دبیری*؛
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۷/۳۰ پذیرش ۹۷/۰۵/۱۳

چکیده

هدف اصلی از این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل در میزان توانایی باربری خاک‌های مخلوط رسی و شنی منطقه‌ی باراندوز برای کاربرد در لایه‌های روسازی راه است. دراین پژوهش خاک رسی استفاده شده با خاک شنی با درصدهای (۲۵، ۵۰ و ۷۵) مخلوط شده است. تأثیر ژئوتکستایل در دو حالت بررسی شد، درحالت اول به‌صورت لایه‌ای (یک لایه، دولایه و سه لایه در نمونه جای‌گذاری شده است) و درحالت دوم، ژئوتکستایل به‌صورت قطعاتی با ابعاد ۱×۱ و ۵×۵ سانتی‌مترمربع به‌طور تصادفی با درصد های وزنی ۱، ۲ و ۳ درصد با مصالح مخلوط شده و رفتار مصالح ارزیابی شده است. برای انجام تحقیق از آزمون آزمایشگاهی نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) هر دو حالت خشک و اشباع براساس استاندارد ASTM D1883 بهره گرفته شده است. به‌گونه‌ای که طبق استاندارد سرعت بارگذاری ۱/۲۷ mm/min انتخاب شده و عدد CBR برای نفوذ پیستون به میزان ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر برآورد شده است. درحالت اشباع میزان درصد تورم در نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که میزان بهینهٔ ژئوتکستایل مورد نیاز برای مسلح کردن مصالح بررسی شده به‌صورت قراردادن ۱ لایه در قسمت میانی و یا افزودن ۱٪ وزنی ژئوتکستایل به ابعاد۱×۱ سانتی‌مترمربع است که این میزان در شرایطی که خاک اشباع باشد به‌طور چشم‌گیری از میزان تورم می‌کاهد و از آن جلوگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ژئوتکستایل، مخلوط رس و شن، به‌سازی باربری، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، لایه‌های روسازی.

*نویسنده مسئول rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

مقدمه

روسازی راه‌ها به‌عنوان بخشی از سازه راه نقش بسیار مهمی در عملکرد و تأمین سطح هموار و ایمن دارد. بستر روسازی راه، سطح لایهٔ متراکم شده خاکریزها، برش‌ها و یا زمین طبیعی موجود و یا اصلاح شده است. این بستر طبق مشخصات آماده شده و اولین قشر روسازی راه روی آن قرار می‌گیرد. بستر روسازی، که نهایتاً پی روسازی راه محسوب می شود، همهٔ بارهای وارده ناشی از جسم روسازی و وسایل نقلیه روی آن را تحمل می‌کند. بنابراین ساخت روسازی‌های با قابلیت باربری و عمر زیاد و کیفیت مناسب و نیز نگه‌داری آنها در شرایط عملکردی مناسب اهمیت بسیاری دارد. در صورتی‌که مصالح مناسب برای ساخت لایه‌های بدنه روسازی را در دسترس نباشد. در آن صورت باید مصالح موجود در محدودهٔ اجرای راه را تثبیت کرد. روش‌های مختلفی برای این منظور موجود است که شامل روش‌های مکانیکی، شیمیایی هستند. اگرچه امروزه استفاده از مصالح ژئوسنتتیک به‌عنوان ابزاری برای تثبیت و بهبود میزان توانایی باربری لایه‌های روسازی راه و راه آهن و حتی بستر خاک زیر پی‌ها استفاده می‌شود که در بیش‌تر موارد از از لایه‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید بهره گرفته می‌شود. در ادامه ابتدا به بیان ضرورت تحقیق و سپس مرور ادبیات فنی در زمینه تحقیق می‌پردازیم و سپس مراحل بررسی‌های تحقیقی انجام یافته بیان می‌شود.

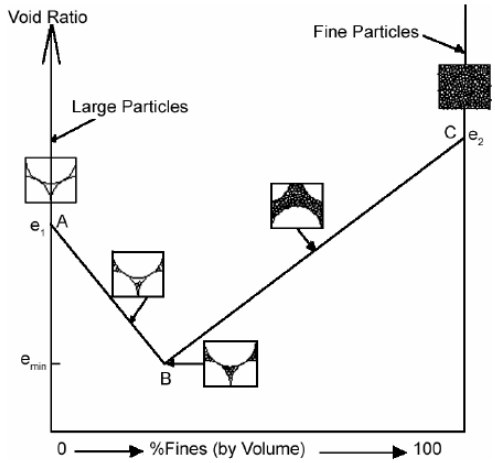
ضرورت تحقیق

اضافه شدن رس یا لای به ذرات دانه‌ای خاک مانند شن و ماسه در درصدهای مختلف می‌تواند به‌طور اساسی رفتار ماتریس ماسه یا شن و رس را تغییر دهد. مطابق شکل ۱ تغییرات درصد تخلخل برحسب درصد ریزدانه قابل مشاهده است. در قسمت A درصد ریزدانه صفر است و دانه‌های شن به‌خوبی با یک‌دیگر تماس دارند و می‌توانند نیرو را منتقل کنند. هنگامی‌که از نقطه A به نقطه B میزان درصد ریزدانه افزایش می‌یابد، در این حالت ریزدانه‌ها فضای خالی بین دانه‌های شن را پر می‌کنند و باعث کاهش تخلخل و دانسیته نسبی می‌شوند بدون آن‌که در باربری شرکت داشته باشند تا این‌که در نقطه B ریزدانه‌های اضافه شده کاملاً فضای خالی بین دانه‌های شنی را پر می‌کنند. به این مقدار ریزدانه، ریزدانه حدی می‌گویند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

با افزایش مقدار ریزدانه و رسیدن به نقطه C، مشاهده می‌شود که دانه‌های شن بیش‌تر از یک‌دیگر جدا می‌شوند و ذرات ریزدانه نقش مهم‌تری را ایفا می‌کنند تا این‌که در نقطه C ریزدانه‌ها نمونه را تشکیل می‌دهند. قابل ذکر است که مقدار حدی ریزدانه به دانه‌بندی خاک اصلی و خصوصیات ریزدانه بستگی دارد. به‌طور مثال خاک‌های خوب دانه‌بندی شده در مقایسه با خاک‌های بد دانه‌بندی شده نسبت تخلخل کم‌تری دارند و در نتیجه مقدار کم‌تری ریزدانه می‌تواند دانه‌های شن را کاملاً از هم جدا کند. هم‌چنین ذرات رس نسبت به ذرات لای دارای نسبت تخلخل بیش‌تری هستند و می‌توانند به‌صورت مؤثرتری در پر کردن فضای خالی بین دانه‌های شن شرکت کنند.



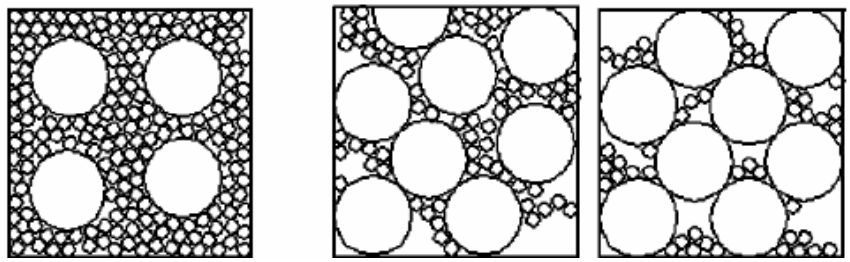
شکل ۱. تغییرات نسبت تخلخل مخلوط ماسه و رس برحسب تغییرات درصد رس [۱]

در حالتی‌که ریزدانه‌ها به‌طور فعال در باربری نقشی ندارند و کاملاً در فضاهای خالی بین دانه‌های شن قرار گرفته‌اند و تخلخل کلی نمونه را کاهش می‌دهند. با افزایش مقدار ریزدانه به‌تدریج ذرات رس تعدادی از دانه‌های ماسه را نیز از هم جدا می‌کنند. این موضوع در شکل ۲ الف دیده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن حجم دانه‌های ریز (fc) به‌عنوان فضای خالی می‌توان نسبت تخلخل دانه‌ای درشت را بدین‌صورت تعیین کرد:

$$e_s = \frac{e+fc}{1-fc} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، e_s نسبت تخلخل دانه‌ای نامیده می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



ب الف

شکل ۲. تأثیر ریزدانه در ساختار خاک الف) در حالتی‌که درصد ریزدانه کم‌تر از میزان حدی است، ب) حالتی‌که درصد ریزدانه بیش‌تر از میزان حدی است [۱].

هم‌چنین، دانه‌های ریز فضای خالی بین دانه‌های درشت را کاملاً پر کرده‌اند به‌طوری‌که دانه‌های درشت با یک‌دیگر تماس ندارند. به‌عبارت دیگر، دانه‌های درشت به‌صورت غوطه‌ور میان دانه‌های ریز قرار دارند و نمی‌توانند با یک‌دیگر در باربری ماتریس نقش داشته باشند، بلکه تنها به‌عنوان انتقال‌دهندهٔ نیرو بین دانه‌های ریز اطراف خودشان کار می‌کنند. این شرایط در شکل ۲ ب نشان داده شده است. برخلاف حالت الف که حجم دانه‌های ریز به‌عنوان فضاهای خالی در نظر گرفته شده است، در این شرایط حجم دانه‌های درشت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و نسبت تخلخل بین دانه‌های ریز بدین‌صورت تعیین می‌شود:

$$e_f = \frac{e}{fc} \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، e_f نسبت تخلخل بین دانه‌های ریزدانه نامیده می‌شود. در صورتی‌که ریزدانه‌های موجود در خاک از جنس رس باشند علاوه بر آن‌که به‌عنوان پر کننده در بافت خاک عمل می‌کند، می‌تواند با القاء چسبندگی به خاک بافت آن را یکپارچه‌تر سازند. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، برای بررسی امکان احداث لایه‌های زیراساس و اساس و خاک بستر در بدنه راه با استفاده از مصالح مذکور در در این پژوهش به تأثیر نحوهٔ کاربرد لایهٔ ژئوتکستایل (به‌صورت لایه‌ای و یا قطعه‌ای) در بهبود میزان توانایی باربری خاک مخلوط رس- شن و اثر آن بر تغییرات پارامترهای تخلخل حداقل، دانه‌ای و بین دانه‌ای می‌پردازیم.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

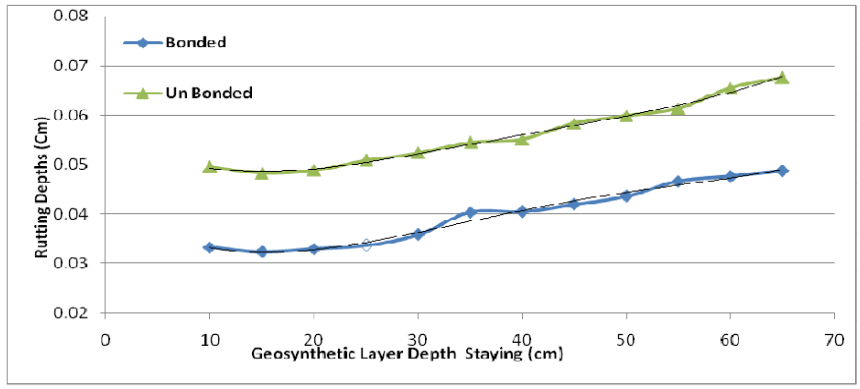
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

مرور پژوهش‌های گذشته

در صورتی‌که بتوان خاک‌های نامناسب محلی را قابل استفاده در لایه‌های روسازی کرد از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی اهمیت زیادی دارد. اگرچه در این زمینه پژوهش‌های بسیاری انجام شده است و روش‌های مختلف مکانیکی براساس تراکم مصالح و شیمیایی برمبنای واکنش شیمیایی بین مصالح و مواد افزودنی بنا نهاده شده است. امروزه به‌منظور اصلاح و بهسازی توانایی باربری خاک‌ها به‌عنوان نمونه در خاک رسی زیر بستر زیر پی‌ها [۲]، [۳] و مصالح لایه‌های روسازی راه از مصالح ژئوسنتتیک استفاده می‌شود. در این زمینه می‌توان به کاربرد لایه‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید در احداث بدنه راه و لایه‌های روسازی برای بهبود باربری مصالح اشاره کرد. در مورد کاربرد ژئوتکستایل در بهسازی مقاومت و باربری لایه‌های روسازی می‌توان به بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی انجام شدهبه‌وسیلهٔ لتها و مورسی (۲۰۰۷)، نایینی و میرزاخانلری (۲۰۰۸)، شاهی و همکاران (۲۰۱۰)، خبیری (۲۰۱۱)، کومار و راج کومار (۲۰۱۲)، صادقی و دبیری (۲۰۱۵)، نظری و دبیری (۲۰۱۶)، اشاره کرد [۵]، [٦]، [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]. نائینی و میرزا خانلری در سال ۲۰۰۸ و صادقی و دبیری در سال ۲۰۱۵، به‌ترتیب در بررسی‌های آزمایشگاهی برای بهبود باربری شن و شن همراه با ۱۵ و ۳۰ درصد لای با استفاده از ژئوتکستایل درحالت خشک انجام دادند. آنها در تحقیقات خود مشاهده کردند که تعداد لایه‌های ژئوتکستایل و محل قرارگیری آنها می‌تواند در میزان توانایی باربری مصالح تأثیرگذار باشد. کومار و راژکومار در سال ۲۰۱۲ در پژوهش خود برای به‌سازی مصالح نرم بستر راه از ژئوتکستایل استفاده کردند. ایشان دریافتند که ژئوتکستایل بافته نشده در مقایسه با حالت بافته شده در تأثیر کم‌تری در میزان توانایی باربری است. هم‌چنین، در مدل‌سازی عددی انجام شده به‌وسیلهٔ خبیری، تأثیر جانمایی و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده ژئوسنتتیک و عمق استقرار آنها در میزان توانایی باربری لایه‌های روسازی تحت بارگذاری دینامیکی ناشی از وسایل نقلیه بررسی شده است. ایشان در مشاهدات خود دریافتند که با قرار دادن یک لایه مسلح‌کننده در بدنه راه نزدیک به سطح را میزان نشست و تغییر شکل قائم را کاهش داده و هم‌چنین دریافتند که بهترین موقعیت استقرار لایه مسلح‌کننده در عمق ۱۰ سانتی‌متری نسبت به رویهٔ راه است.

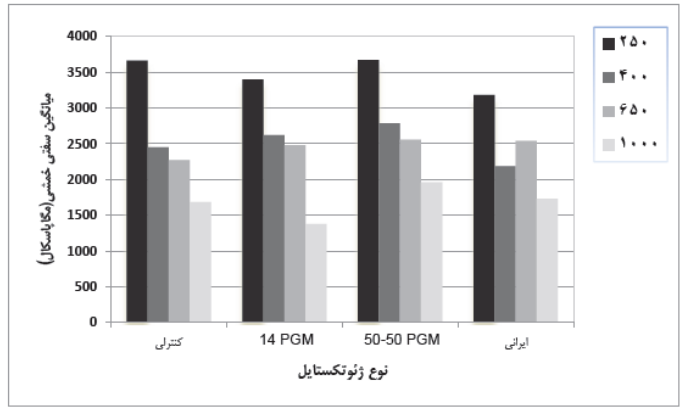
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ۳. تأثیر عمق استقرار لایه ژئوتکستایل و جانمایی آن در اصلاح میزان تغییر شکل قائم در بدنه راه [۸]

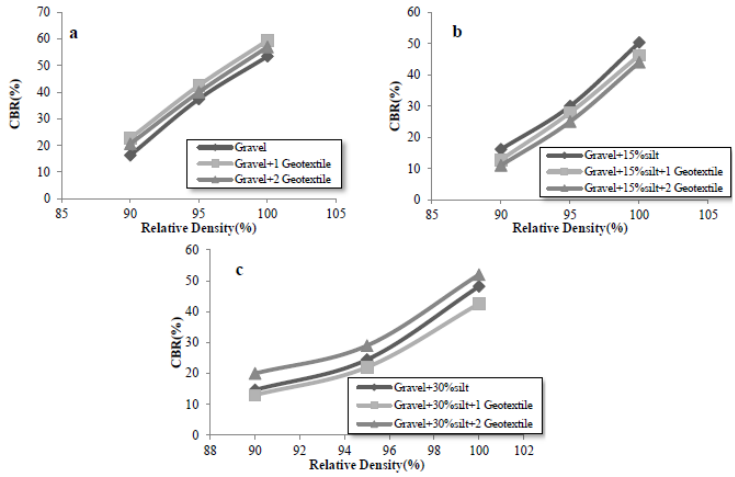
شاهی و همکاران (۲۰۱۰)، پژوهشی روی تأثیر لایهٔ ژئوتکستایل بر عمر خستگی رویه‌های آسفالتی انجام دادند [۷]. ایشان در تحقیقات خود به‌منظور افزایش عمر رویه آسفالتی از سه نوع لایه ژئوتکستایل متداول استفاده کردند و آزمایش خستگی را بر نمونه‌های بررسی شده انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داده است که که ژئوتکستایل می‌تواند سبب کاهش و یا افزایش میانگین سفتی خمشی نمونه‌های آزمایشگاهی شود ولی به‌طورکلی سبب افزایش کیفیت روسازی آسفالتی می‌شود (شکل ٤).



شکل ٤. میانگین سفتی خمشی در برابر نوع نمونه برای کرنش های ۲۵۰، ٤۰۰، ٦۵۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین [۷]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

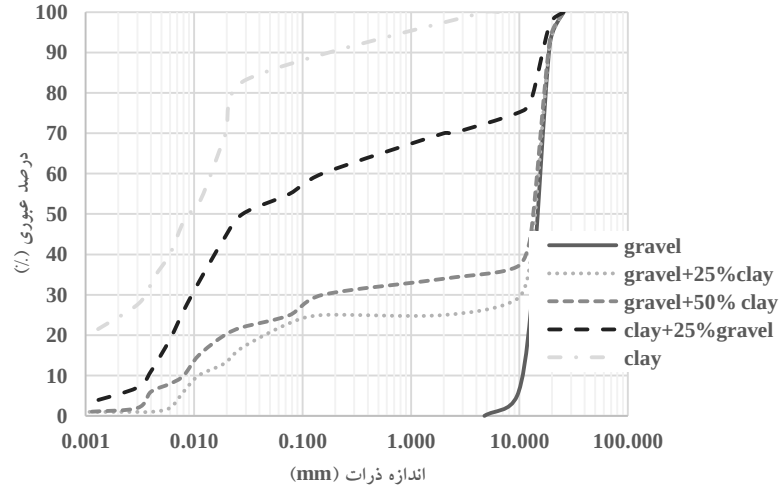


شکل(۵): تأثیر تعداد لایه های ژئوتکستایل بر روی میزان توانایی باربری خاک های مخلوط شن- لای) [۱۰]

مواد و مصالح

در تحقیق حاضر، مصالح شنی و رسی بررسی شده از معدنی نزدیک شهر باراندوز در استان آذربایجان غربی تهیه شده است. خاک‌های رسی و شنی با درصدهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ با یک‌دیگر مخلوط شده و منحنی دانه‌بندی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D421 و ASTM D422 تعیین و برآورد شده که در شکل ٦ مشاهده می‌شود. خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح بررسی شده مطابق جدول ۱ قابل مشاهده هست. میزان چگالی ویژه مصالح با توجه به درصد مخلوط آنها براساس استاندارد ASTM D854 اندازه‌گیری شده و مطابق جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این‌که هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل در مصالح بررسی شده است، ژئوتکستایل بافته نشده از جنس پلی پروپیلن استفاده شده در پژوهش با نام تجاری Fibertex-F-32 است که مشخصات فنی آن در جدول ۳ قابل مشاهده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ٦. منحنی دانه‌بندی مصالح مخلوط در محدودهٔ بررسی شده

جدول ۱. خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح بررسی شده

نوع خاک	استاندارد	توصیف	آزمایش	استاندارد	توصیف
شن	ASTM D421	GP (طبق طبقه‌بندی متحد)	شاخص خمیری	ASTM D4318-95a	١٤ درصد
رس	ASTM D422	CL (طبق طبقه‌بندی متحد)			

جدول ۲. میزان چگالی ویژه خاک‌های مخلوط بررسی شده

نوع خاک	GS
رس	۲/۷۵
رس +۲۵٪ شن	۲/۷
رس+۵۰٪ شن	۲/٦٥
رس +٪ ۷۵شن	۲/٦
شن	۲/٦۳

جدول ۳. مشخصات فنی ژئوتکستایل استفاده شده در تحقیق حاضر (Fibertex-F-32)

Properties	Values
Weight (g/m^2)	175
Thickness (mm)	0.9
Static puncture (CBR-test) N	2000
Dynamic cone drop (mm)	28
Tensile strength(kN/m)	13
Elongation at peak stress (%)	45-50

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

کارهای آزمایشگاهی

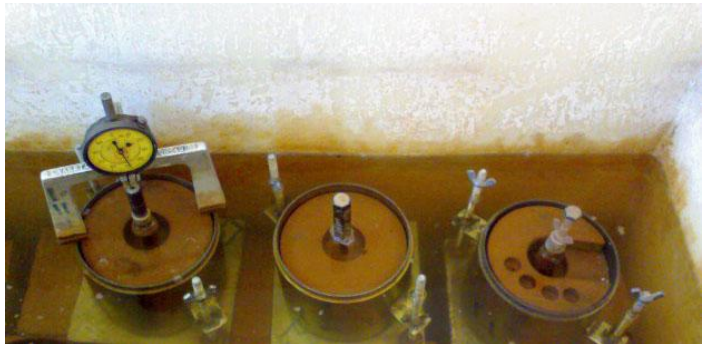
ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 روی نمونه‌های مسلح و غیرمسلح انجام شده است. سپس به‌منظور تعیین میزان توانایی باربری مصالح مخلوط در شرایط مسلح و غیرمسلح، آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مطابق با استاندارد ASTM D1883 در دو شرایط خشک و اشباع (شکل‌های ۷ و ۸) و در سه سطح انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه برای هر لایه) انجام شده است. مطابق استاندارد سرعت بارگذاری ۱/۲۷ mm/min انتخاب شده و عدد CBR برای نفوذ پیستون به‌میزان ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر برآورد شده است. در حالت اشباع، هم‌چنین میزان تورم احتمالی ایجاد شده در نمونه‌های خاکی بررسی شده حاصل از آزمایش CBR تعیین شده است. طبق استاندارد پس از انجام تراکم، حلقه گلوئی را برداشته و سطح خاک صاف می‌شود، سپس با قراردادن کاغذ صافی روی نمونه، صفحه مشبک نصب شده و در ادامه سرباری معادل فشار ناشی از وزن لایه‌های زیر اساس و اساس خاکریز وارد نمونه که حداقل آن ٤/٥٤ کیلوگرمی است روی قالب متصل کرده و اولین قرائت انجام می‌شود. سپس قالب را به‌مدت چهار روز در آب غوطه‌ور کرده به‌نحوی که حداقل ارتفاع آب روی نمونه ۲۵ میلی‌متر شود. سپس نمونه را از مخزن آب خارج کرده و برای این‌که نمونه زهکشی شود ۱۵ دقیقه نمونه را به‌حال خود رها می‌شود و وزنه‌های سربار و صفحه مشبک را برداشته و قالب را وزن می‌کنند. نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل در آزمون نسبت باربری کالیفرنیا در دو شرایط لایه‌ای و مخلوط راندوم انجام گرفته است. بدین‌ترتیب که در شرایط لایه‌ای، ابتدا، یک لایه ژئوتکستایل در وسط لایهٔ سوم در هنگام تراکم قرار داده شده و سپس، دو لایه ژئوتکستایل یکی در بالای لایهٔ دوم و دیگری در بالای لایهٔ چهارم در هنگام تراکم جای‌گذاری شد. در انتها، سه لایه ژئوتکستایل که یکی در بالای لایهٔ اول و دومی در وسط لایهٔ سوم و دیگری در وسط لایهٔ پنجم قرار داده شده است. در شرایط دوم، ژئوتکستایل به‌صورت تصادفی با خاک‌های بررسی شده به ابعاد ۱×۱ و۵×۵ سانتی‌متر مربع و با درصدهای وزنی ۱، ۲ و ۳ درصد مخلوط شده است (شکل‌های ۹ و ۱۰). لازم به‌ذکر است که آزمایش‌ها در ۹ حالت انجام شد. برنامه‌ریزی و تعداد آزمایش‌های انجام شده در جدول ٤ و ۵ قابل مشاهده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

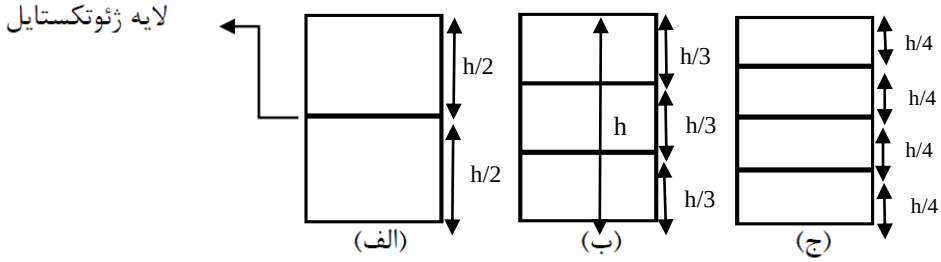
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ۷. انجام آزمون نسبت باربری کالیفرنیا در حالت خشک روی نمونه‌های بررسی شده



شکل ۸. انجام آزمون نسبت باربری کالیفرنیا در حالت اشباع روی نمونه‌های بررسی شده



شکل ۹. نحوهٔ قرارگیری لایه‌های ژئوتکستایل در نمونه‌های خاکی بررسی شده در قالب دستگاه نسبت باربری کالیفرنیا، الف) یک لایه، ب) دولایه، ج) سه لایه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]





شکل ۱۰. نمونه‌هایی از ژئوتکستایل استفاده شده

جدول ٤. روش تثبیت نمونه‌های بررسی شده

روش ها	روش ها
۱	جای‌گذاری یک لایه ژئوتکستایل
۲	جای‌گذاری دولایه ژئوتکستایل
۳	جای‌گذاری سه لایه ژئوتکستایل
٤	مخلوط قطعه ژئوتکستایل با مساحت ۱ سانتی‌مترمربع به میزان ۱ درصد
٥	مخلوط قطعه ژئوتکستایل با مساحت ۱ سانتی‌مترمربع به میزان ۲ درصد
٦	مخلوط قطعه ژئوتکستایل با مساحت ۱ سانتی‌مترمربع به میزان ۳ درصد
۷	مخلوط قطعه ژئوتکستایل با مساحت ۲۵ سانتی‌مترمربع به میزان ۱ درصد
۸	مخلوط قطعه ژئوتکستایل با مساحت ۲۵ سانتی‌مترمربع به میزان ۲ درصد
۹	مخلوط قطعه ژئوتکستایل با مساحت ۲۵ سانتی‌مترمربع به میزان ۳ درصد

جدول ۵. برنامه آزمون‌های انجام شده روی نمونه‌های بررسی شده

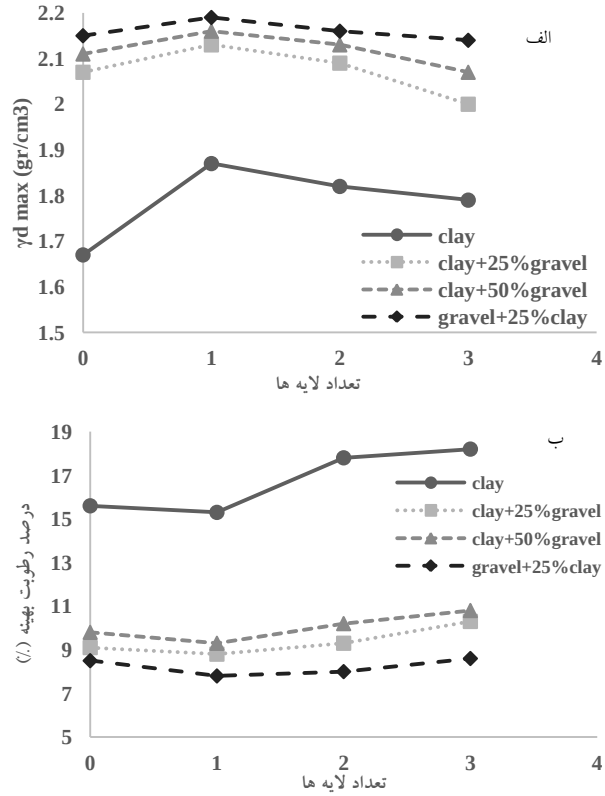
مصالح / آزمون‌ها	شن۷۵٪+ رس	شن۵۰٪+ رس	شن۲۵٪+ رس	رس	مجموع
تراکم	یک سری ۵ نقطه‌ای (در نه حالت)	یک سری ۵ نقطه‌ای (در نه حالت)	یک سری ۵ نقطه‌ای (در نه حالت)	یک سری ۵ نقطه‌ای (در نه حالت)	۱۸۰
CBR (اشباع) سه انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه برای هر لایه)	سه سری (در نه حالت)	سه سری (در نه حالت)	سه سری (در نه حالت)	سه سری (در نه حالت)	۱۰۸
CBR (خشک) سه انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه برای هر لایه)	سه سری (در نه حالت)	سه سری (در نه حالت)	سه سری (در نه حالت)	سه سری (در نه حالت)	۱۰۸

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

نتایج و بحث

۱. نتایج حاصل از آزمایش تراکم

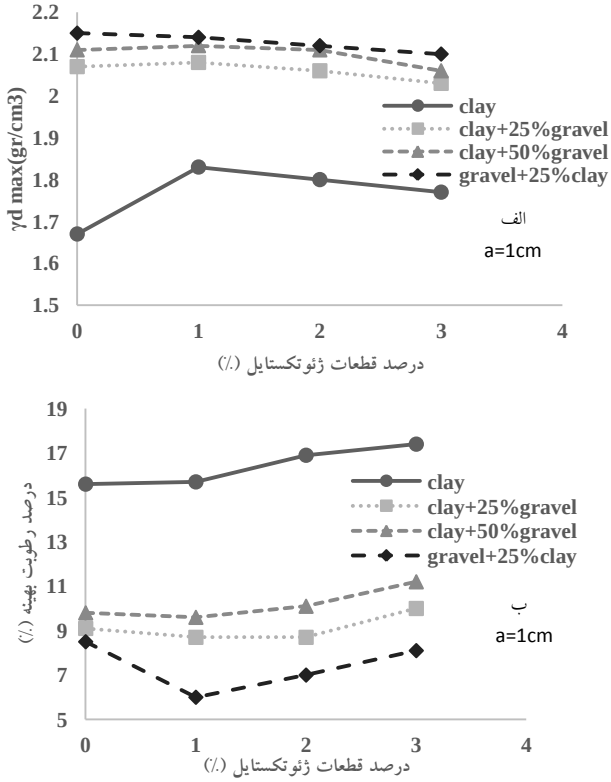
نتایج حاصل از آزمایش تراکم برای بررسی تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل بر مصالح بررسی شده به‌ترتیب در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ ارائه شده است. با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که درحالت غیرمسلح، با افزایش میزان درصد شن در خاک رسی مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر ($\gamma dmax$) افزایش یافته و میزان رطوبت بهینه کاهش یافته است. درحالت مسلح، اولا، زمانی‌که یک لایه ژئوتکستایل در خاک رسی قرار داده شد، میزان وزن مخصوص خشک حداکثر به بیش‌ترین حد خود رسیده و مقدار رطوبت بهینه به حداقل میزان خود رسید.



شکل ۱۱. تأثیر تعداد لایه‌های ژئوتکستایل بر نتایج حاصل از آزمایش تراکم، الف) تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر، ب) تغییرات رطوبت بهینه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

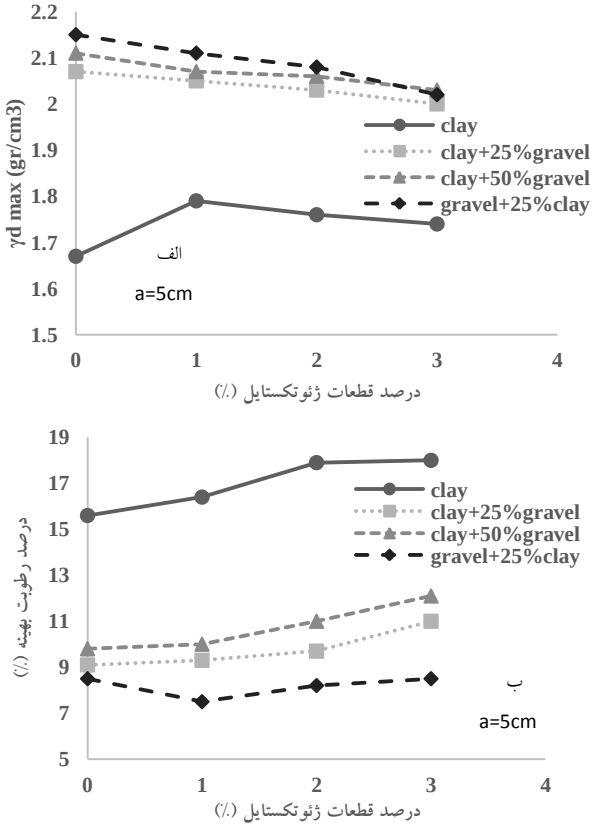
اگرچه با افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل میزان وزن مخصوص حداکثر کاهش و مقدار رطوبت بهینه روند افزایشی از خود نشان داد. در مصالح مخلوط، مشاهده شد، با قرار دادن یک لایه ژئوتکستایل میزان $\gamma dmax$ افزایش و مقدار رطوبت بهینه کاهش یافته است. ثانیاً، هنگامی‌که قطعات ژئوتکستایل به‌صورت راندم با ابعاد ۱×۱ و ۵×۵ سانتی‌متر مربع با نمونه-های بررسی شده مخلوط شد مشاهده شد، در خاک رسی با افزودن یک درصد وزنی ژئوتکستایل (در هر دو بعد) وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافته و مقدار رطوبت بهینه کاهش یافته است. ولی با افزودن مقدار درصد ذرات ژئوتکستایل مشاهده شد که مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافت. در مصالح مخلوط زمانی‌که یک درصد ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌مترمربع مخلوط می‌شود میزان وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲. تأثیر قطعات ۱×۱ سانتی‌مترمربع ژئوتکستایل بر نتایج حاصل از آزمایش تراکم، الف) تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر، ب) تغییرات رطوبت بهینه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

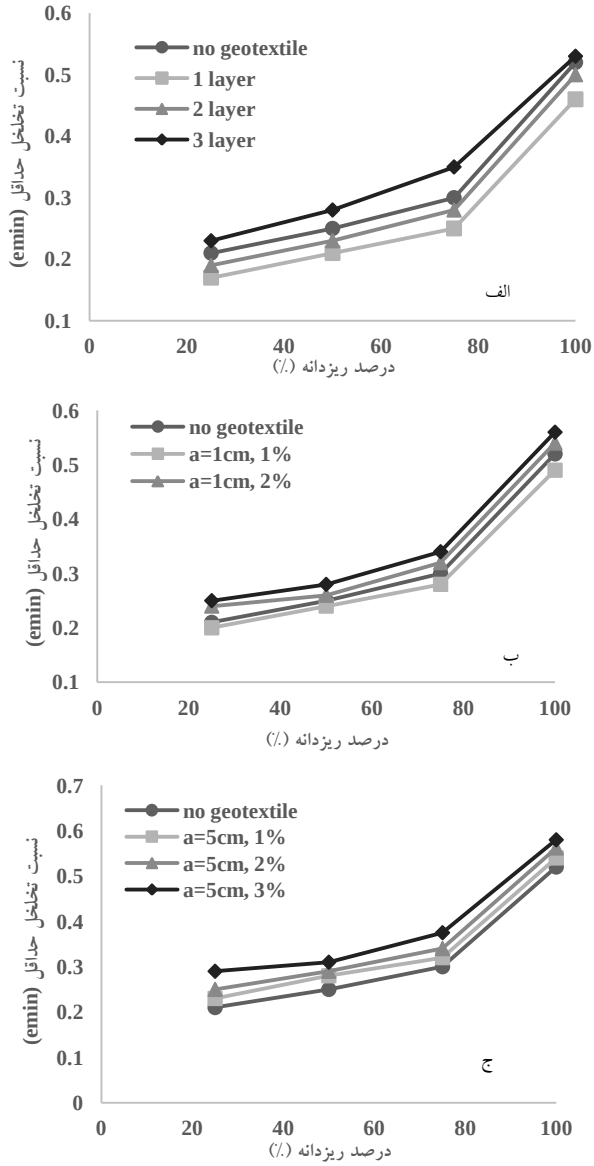
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ۱۳. تأثیر قطعات ۵×۵ سانتی‌مترمربع ژئوتکستایل بر نتایج حاصل از آزمایش تراکم، الف) تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر، ب) تغییرات رطوبت بهینه

این شرایط با توجه به تغییرات نسبت تخلخل حداقل در نمونه‌های بررسی شده مطابق شکل ١٤ قابل بیان هست. در حالت غیرمسلح، با افزایش میزان درصد ریزدانه میزان تخلخل روند صعودی یافته است که نتایج تراکم بیان‌کننده این شرایط است. هنگامی‌که یک لایه در مصالح قرار داده می‌شود و یا یک درصد قطعات ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌مترمربع افزوده می‌شود مقدار نسبت تخلخل حداقل در مقایسه با حالت غیرمسلح دارای کم‌ترین میزان می‌شود. ولی با افزایش تعداد لایه ها و ابعاد و درصد قطعات مقدار نسبت تخلخل حداقل افزایش می‌یابد که بیان‌کننده ایجاد ساختار سست و ناپیوستگی بیش‌تر در بین ساختار دانه‌بندی مصالح است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ١٤. تأثیر میزان درصد ریزدانه و نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل بر تغییرات نسبت تخلخل حداقل نمونه‌های بررسی شده، الف) تعداد لایه، ب) قطعات ۱×۱ سانتی‌مترمربع، ج) قطعات ۵×۵ سانتی‌مترمربع

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

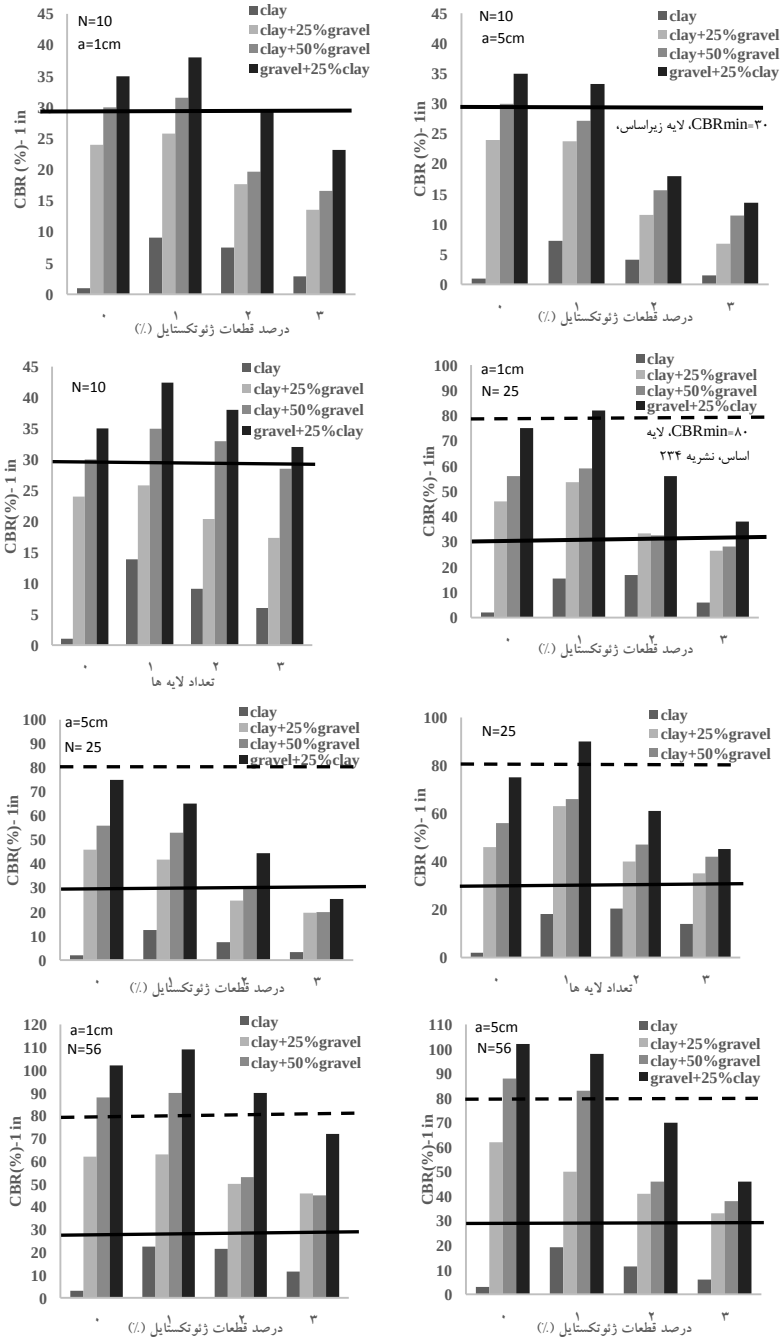
۲. نتایج حاصل از آزمایش نسبت برابری کالیفرنیا

نتایج حاصل از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) در دو حالت خشک و اشباع در سه انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه برای هر لایه) که روی نمونه‌های بررسی شده در حالت غیرمسلح و مسلح انجام شده، در شکل‌های ۱۵ و ۱٦ و ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است. با توجه به نمودارها می‌توان اشاره کرد، در شرایط خشک و در حالت غیرمسلح، با افزایش میزان درصد شن در نمونه‌های رسی میزان CBR افزایش یافته است. در شرایط مسلح، هنگامی‌که یک لایه ژئوتکستایل در نمونه‌ها جایگذاری می‌شود میزان عدد CBR برای همهٔ انرژی‌های تراکمی دارای بیش‌ترین مقدار است. با جای‌گذاری دو و سه‌لایه ژئوتکستایل، میزان نسبت باربری کالیفرنیا یک روند کاهشی را طی می‌کند. اگر به مقدار ۱٪ ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر در نمونه‌ها استفاده شود، میزان نسبت باربری کالیفرنیا کالیفرنیا نسبت به حالت غیرمسلح بهبود می‌یابد. در حالت کلی با توجه به نشریه ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه می‌توان دریافت که در انرژی تراکمی پایین (N=10) مصالح شنی با ۲۵٪ رس و رس به همراه ۵۰٪ شن با کاربرد یک و دو لایه ژئوتکستایل و یا با مخلوط یک درصد ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر برای احداث لایه زیراساس مناسب است. هم‌چنین در انرژی تراکمی متوسط و زیاد (N=25 و N=56) مصالح شنی به‌همراه ۲۵٪ رس، رس به‌همراه ۵۰٪ شن و رس به‌همراه ۲۵درصد شن با کاربرد یک لایه ژئوتکستایل یا با مخلوط یک درصد ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر به‌ترتیب نیز برای استفاده در ساخت لایه‌های اساس و زیراساس مناسب است. البته از دو و سه لایه ژئوتکستایل در انرژی‌های متوسط و زیاد و یا مخلوط تصادفی قطعات ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر و ۵×۵ سانتی‌متر به‌میزان ۲ الی ۳ درصد در مصالح مذکور را می‌توان در احداث لایه زیراساس استفاده کرد.

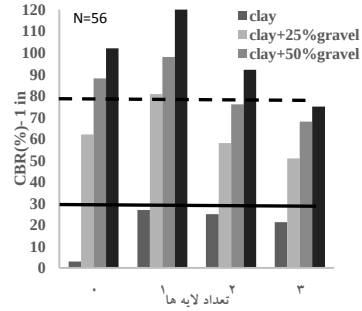
در شرایط اشباع و هنگامی‌که نمونه غیرمسلح است با افزایش میزان درصد شن در نمونه‌های رسی میزان CBR افزایش می‌یابد. در شرایط مسلح، اگر یک لایه ژئوتکستایل در نمونه‌ها جای‌گذاری شود مشاهده می‌شود عدد CBR در همهٔ انرژی‌های تراکمی دارای بیش‌ترین مقدار است. اگرچه زمانی‌که دو و سه لایه ژئوتکستایل در نمونه‌ها قرار داده می‌شود میزان عدد نسبت باربری کالیفرنیا در نمونه‌ها یک روند کاهشی را طی می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

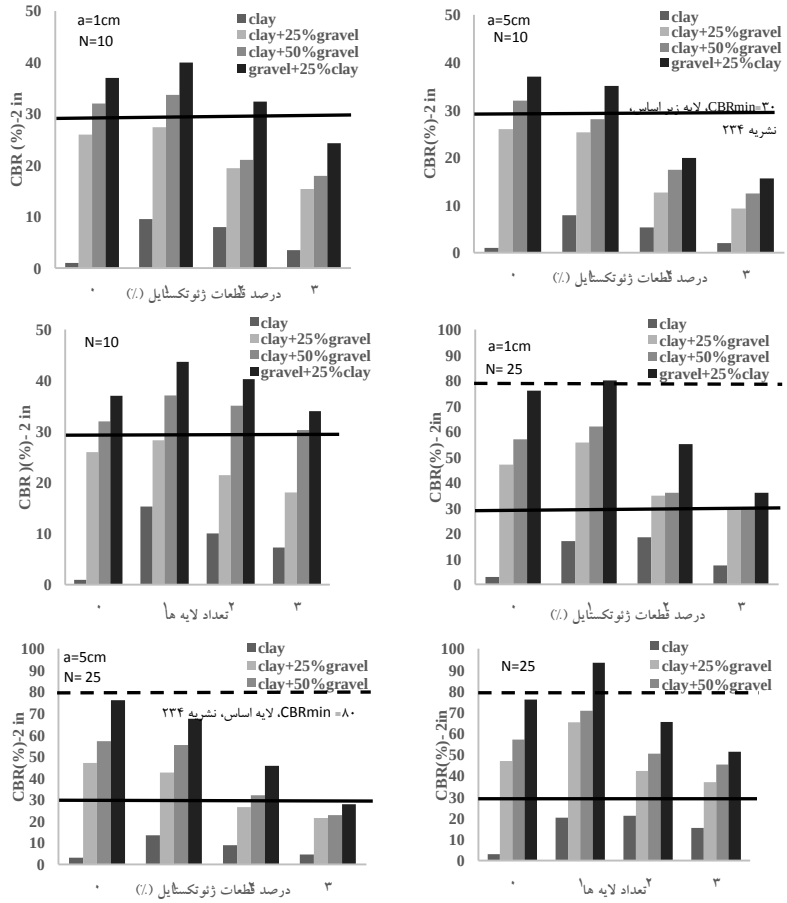
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

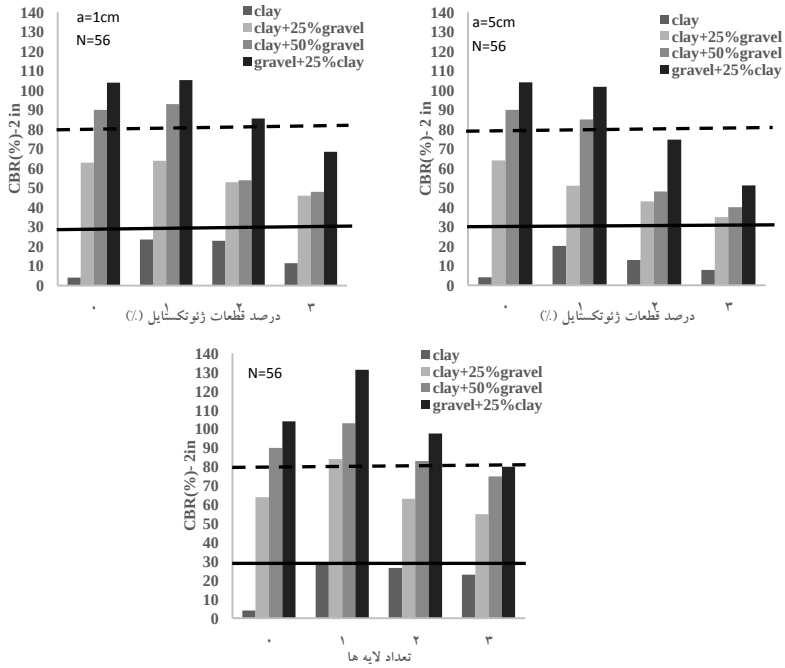


شکل ۱۵. تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل بر نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا برای تراکم‌های متفاوت(۱۰، ۲۵، ۵۶ ضربه برای هر لایه) در حالت خشک برای نفوذ ۱ اینچ (۲/۵ سانتی‌متر)



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

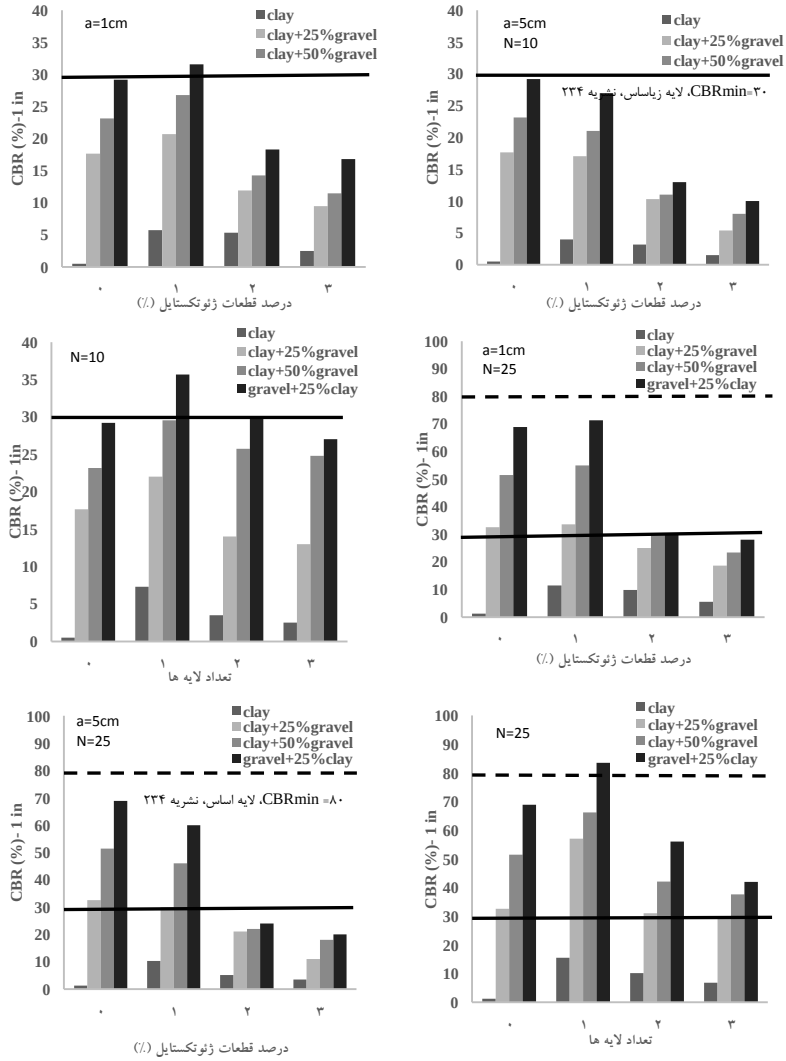


شکل ١٦. تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل بر نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا برای تراکم های متفاوت(١٠، ٢٥، ٥٦ ضربه برای هر لایه) در حالت خشک برای نفوذ ٢ اینچ (٥ سانتی‌متر)

در ادامه، زمانی‌که به مقدار ١٪ ژئوتکستایل با ابعاد ١×١ سانتی‌متر در نمونه‌ها استفاده می‌شود میزان نسبت باربری کالیفرنیا کالیفرنیا نسبت به حالت غیرمسلح بهبود می‌یابد. با توجه به نشریه ٢٣٤ سازمان برنامه و بودجه می‌توان دریافت که در انرژی تراکمی کم (N=10) مصالح شنی با ٢٥٪ رس و رس به‌همراه ٥٠٪ شن با کاربرد یک و دو لایه ژئوتکستایل و یا با مخلوط یک درصد ژئوتکستایل با ابعاد ١×١ سانتی‌متر برای احداث لایه زیراساس مناسب است. در انرژی تراکمی متوسط و زیاد (N=25 و N=56) مصالح شنی به‌همراه ٢٥٪ رس، رس به‌همراه ٥٠٪ شن و رس به‌همراه ٢٥درصد شن با کاربرد یک لایه ژئوتکستایل یا با مخلوط یک درصد ژئوتکستایل با ابعاد ١×١ سانتی‌متر به‌ترتیب برای استفاده در ساخت لایه‌های اساس و زیراساس مناسب است. اگرچه استفاده از دو و سه لایه ژئوتکستایل در انرژی های متوسط و زیاد و یا مخلوط تصادفی قطعات ژئوتکستایل با ابعاد ١×١ سانتی‌متر و

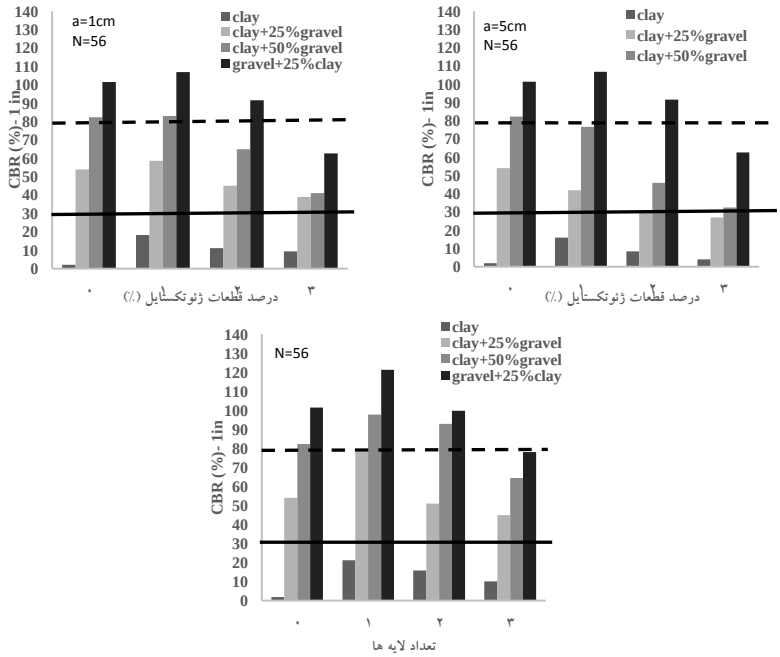
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

۵×۵ سانتی‌متر به‌میزان ۲ الی ۳ درصد در مصالح مذکور می‌توان در احداث لایه زیراساس بهره گرفت. البته لازم به‌ذکر است که نتایج به‌دست آمده از توانایی باربری نمونه‌ها در حالت اشباع در مقایسه با شرایط خشک به‌طور چشم‌گیر دارای میزان کم‌تری است. با این وجود مشاهده می‌شود که با تثبیت مصالح در این شرایط امکان استفاده از آنها در احداث لایه‌های بدنه راه موجود است.

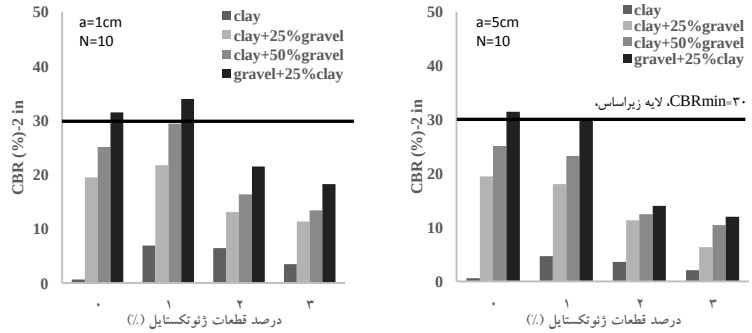


[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

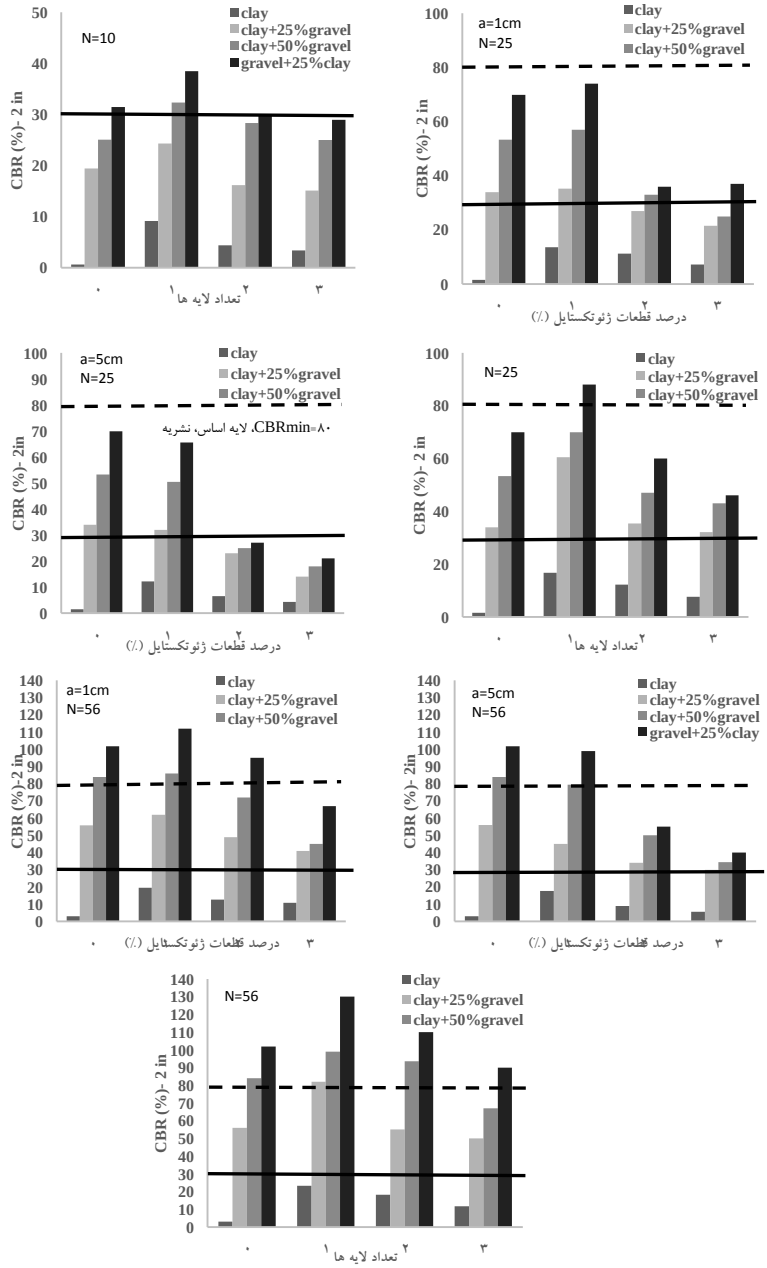
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ۱۷. نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا برای تراکم های متفاوت (۱۰، ۲۵، ۵۶ ضربه برای هر لایه) در حالت اشباع برای نفوذ ۱ اینچ (۲/۵ سانتی‌متر)



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

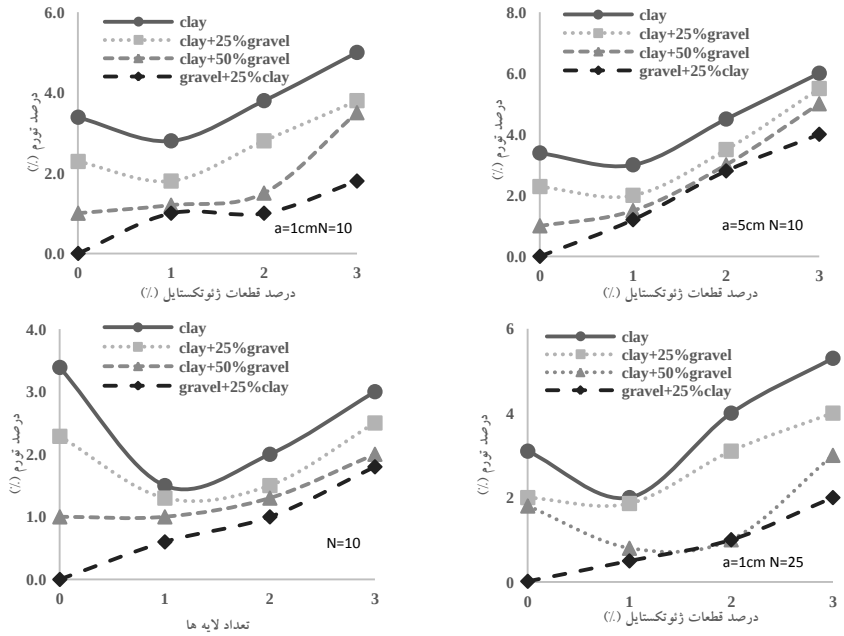


شکل ۱۸. نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا برای تراکم‌های متفاوت (۱۰، ۲۵، ۵۶ ضربه برای هر لایه) در حالت اشباع برای نفوذ ۲ اینچ (۵ سانتی‌متر)

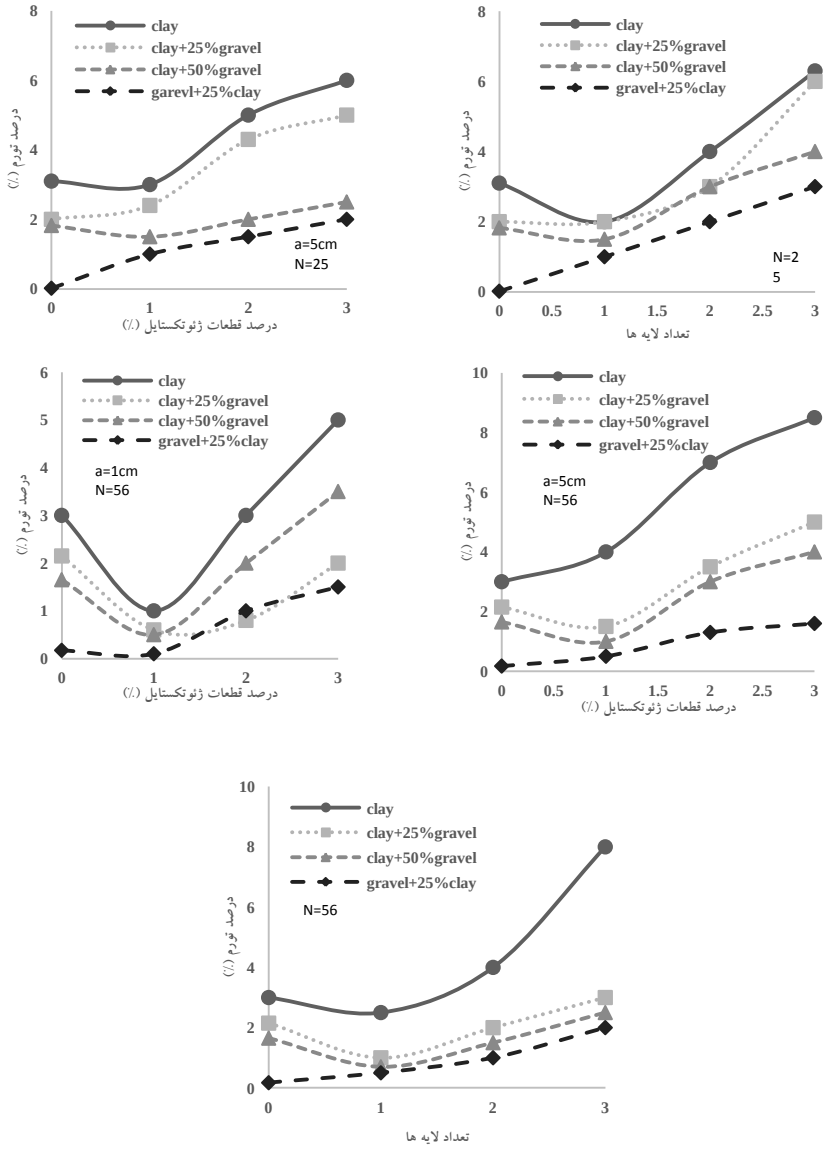
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

میزان تورم در نمونه‌های بررسی شده حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا در میزان نفوذ ۲ اینچ (۵ سانتی‌متر) در تمامی سه انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ۵۶ ضربه برای هر لایه) اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۱۹ ارائه شده است. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت در حالت غیرمسلح میزان تورم در تمامی انرژی‌های تراکمی با افزایش میزان درصد ریزدانه یک روند افزایشی را طی کرده است. اگر نمونه‌ها با یک لایه ژئوتکستایل مسلح گردند میزان تورم به‌طور چشم‌گیری به‌طور متوسط تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. در صورتی‌که قطعات ژئوتکستایل به‌صورت تصادفی با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر و ۵×۵ سانتی‌متر در درصدهای مختلف با مصالح مخلوط شود، هنگام افزودن یک درصد ژئوتکستایل به ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر به نمونه‌ها میزان تورم به مقدار متوسط ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزودن یک درصد ژئوتکستایل به ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر به نمونه ها میزان تورم کاهش می‌یابد ولی در مقایسه با ابعاد کوچک‌تر تأثیر کم‌تری دارد. البته افزایش درصد مخلوط ابعاد بزرگ‌تر ژئوتکستایل باعث افزایش میزان تورم در نمونه‌های مخلوط می‌شود.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ۱۹. تأثیر نحوه کاربرد ژئوتکستایل بر تغییرات میزان تورم در نمونه‌های خاکی برای تراکم‌های متفاوت (۱۰، ۲۵، ٥٦ ضربه برای هر لایه) در حالت اشباع برای نفوذ ۲ اینچ (۵ سانتی‌متر)

نتایج به‌دست آمده از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا با توجه به تغییرات نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) و نسبت تخلخل دانه‌ای (e_s) و نسبت تخلخل بین دانه‌ای (e_f) قابل تفسیر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

است. با مشاهده جدول‌های ٦ و ۷ و ۸ می‌توان تأثیر میزان درصد ریزدانه و نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل را روی هر سه پارامتر را دریافت. در حالتی‌که دانه‌های ریز فضای خالی بین دانه‌های درشت را کاملاً پر کرده‌اند به‌طوری‌که دانه‌های درشت با یک‌دیگر تماس ندارند. به عبارت دیگر، دانه‌های درشت به‌صورت غوطه‌ور میان دانه‌های ریز قرار دارند و نمی‌توانند با یک‌دیگر در باربری ماتریس نقش داشته باشند، بلکه تنها به‌عنوان انتقال‌دهندهٔ نیرو بین دانه‌های ریز اطراف خودشان کار می‌کنند. حال در صورتی‌که ریزدانه‌های موجود در خاک از جنس رس باشند علاوه بر آن‌که به‌عنوان پرکننده در بافت خاک عمل می‌کند، با القاء چسبندگی به خاک می‌تواند بافت آن را یک‌پارچه‌تر سازند. بر این پایه با افزایش میزان درصد خاک رسی در خاک شن باعث افزایش نسبت تخلخل حداقل بدون آن‌که در باربری شرکت داشته باشند که این تغییرات هم‌چنین در شکل ١٤ ارائه شده است. به‌عبارت دیگر ریزدانه‌ها به‌طور فعال در باربری نقشی ندارند و کاملاً در فضاهای خالی بین دانه‌های شن قرار گرفته‌اند و تخلخل کلی نمونه را کاهش می‌دهند. با افزایش مقدار ریزدانه به‌تدریج ذرات رس تعدادی از دانه‌های شن را نیز از هم جدا می‌کنند. این شرایط بیان‌کنندهٔ کاهش میزان توانایی باربری مصالح با افزایش میزان درصد ریزدانه است. بنابراین با افزایش درصد شن در خاک رسی تا ۵۰ درصد مطابق جدول ٦ مشاهده می‌شود که نسبت تخلخل بین دانه‌ای ابتدا کاهش می‌یابد که در نتیجه آن در تمام نمونه‌های حاوی شن میزان مقاومت فشاری و توانایی باربری در حالت غیرمسلح یک روند افزایشی را نشان می‌دهد. اگر یک لایه ژئوتکستایل در نمونه‌ها جای‌گذاری شود، نسبت تخلخل حداقل در مقایسه با حالت غیرمسلح کاهش می‌یابد که تأثیرگذار در بهبود نسبی توانایی باربری است که علت آن افزایش تماس بین ژئوتکستایل و مصالح خاکی است. زمانی‌که دو لایه ژئوتکستایل در مصالح قرار گیرد، مقادیر نسبت تخلخل حداقل نمونه‌ها در مقایسه با حالت یک لایه ژئوگرید افزایش و غیرمسلح کاهش یافته است که بیان‌کنندهٔ ایجاد یک ناپیوستگی نسبی بین ذرات و کاهش تماس آنها با یک‌دیگر است که باعث می‌شود که در بهبود میزان توانایی باربری مصالح تأثیر کم‌تری داشته باشد. زمانی‌که سه لایه ژئوتکستایل در نمونه‌های بررسی شده قرار داده می‌شود مشاهده می‌شود که نسبت‌های تخلخل حداقل افزایش یافته‌اند که بیان‌کنندهٔ ایجاد ساختار بین دانه‌ای غیر یک‌پارچه در بین مصالح است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

جدول ٦. تأثیر درصد ریزدانه و نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل روی نسبت تخلخل دانه‌ای (e_s)

نمونه	بدون لایه ژئوتکستایل			یک لایه ژئوتکستایل			دو لایه ژئوتکستایل			سه لایه ژئوتکستایل		
نسبت تخلخل	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f
رس	۰/۵۲	–	۰/۵۲	۰/٤٦	–	۰/٤٦	۰/۵	–	۰/۵	۰/۵۳	–	۰/۵۳
رس+۲۵٪ شن	۰/۳	–	۰/۵	۰/۲۵	–	۰/٤۲	۰/۲۸	–	۰/٤٦	۰/۳۵	–	۰/۵٦
رس+۵۰٪ شن	۰/۲۵	۱/۵	۰/٤	۰/۲۱	۱/٤۲	۰/۳۳	۰/۲۳	۱/٤٦	۰/۳۷	۰/۲۸	۱/۵٦	۰/٤۷
رس+۷۵٪ شن	۰/۲۱	۰/٦۱	–	۰/۱۷	۰/۵٦	–	۰/۱۹	۰/۵۹	–	۰/۲۳	۰/٦٤	–

مطابق جدول ۷ ، زمانیکه قطعات ژئوتکستایل در ابعاد ۱×۱ سانتی‌مترمربع و به مقدار یک درصد به‌صورت تصادفی با مصالح مخلوط می‌شوند میزان نسبت تخلخل حداقل در مقایسه با حالت غیرمسلح به‌صورت مناسب کاهش یافته ولی اندکی نسبت به حالت تسلیح یک لایه دارای میزان بیش‌تری است. با افزایش درصد قطعات ۱×۱ سانتی‌مترمربع پارامتر نسبت تخلخل حداقل افزایش می‌یابد که بیان‌کنندهٔ کاهش میزان تراکم‌پذیری و شکل‌پذیری مصالح مخلوط مسلح شده است. هم‌چنین با کاربرد قطعات ژئوتکستایل با ابعاد ۵×۵ سانتی‌مترمربع مطابق جدول ۸ می‌توان دریافت که بزرگ بودن قطعات باعث شده است که یک ناپیوستگی بیش‌تر در بین ذرات خاک ایجاد شده و فضای خالی بین آنها را افزایش دهد که تأثیرگذار در میزان توانایی باربری مصالح مخلوط است که نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهندهٔ تأثیرگذاری این ابعاد در اصلاح خاک است.

به‌منظور آن‌که بتوان میزان تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل را روی میزان مقاومت و باربری مصالح بررسی شده را ارزیابی کرد مقدار نسبت تسلیح با استفاده از رابطهٔ (۳) ارزیابی شد. هم‌چنین برای تفسیر نتایج به‌دست آمده، میانگین نسبت‌های تسلیح نمونه‌های بررسی شده در تمامی انرژی‌های تراکمی محاسبه شده و دیاگرام تغییرات برای نمونه‌های خشک و اشباع به‌ترتیب در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ آورده شده است.

$$\text{نسبت تسلیح} = \frac{\text{عدد } CBR \text{ باژئوتکستایل}}{\text{عدد } CBR \text{ بدون بژئوتکستایل}} \quad (۳)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

جدول ۷. تأثیر درصد ریزدانه و نحوۀکاربرد ژئوتکستایل روی نسبت تخلخل دانه‌ای (e_s)- ابعاد ۱ سانتی‌مترمربع

نمونه	یک درصد			دو درصد			سه درصد		
نسبت تخلخل	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f
رس	۰/۴۹	–	۰/۴۹	۰/۵۴	–	۰/۵۴	۰/۵۶	–	۰/۵۷
رس+۲۵٪ شن	۰/۲۸	–	۰/۴۸	۰/۳۲	–	۰/۵۲	۰/۳۴	–	۰/۵۶
رس+۵۰٪ شن	۰/۲۴	۱/۴۸	۰/۳۷	۰/۲۶	۱/۵۲	۰/۴۳	۰/۲۸	۱/۵۶	۰/۴۵
رس+۷۵٪ شن	۰/۲	۰/۶	–	۰/۲۴	۰/۶۵	–	۰/۲۵	۰/۶۷	–

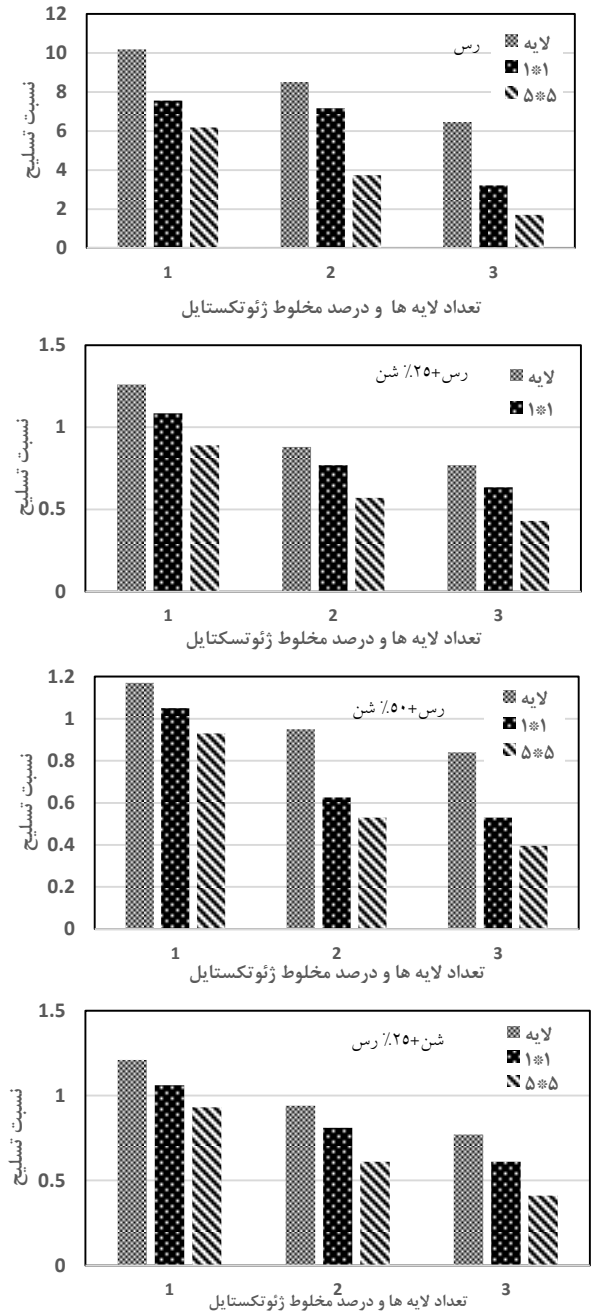
جدول ۸. تأثیر درصد ریزدانه و نحوۀ کاربرد ژئوتکستایل روی نسبت تخلخل دانه‌ای (es)- ابعاد ۵ سانتی‌مترمربع

نمونه	یک درصد			دو درصد			سه درصد		
نسبت تخلخل	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f
رس	۰/۵۴	–	۰/۵۴	۰/۵۶۲	–	۰/۵۶۲	۰/۵۸	–	۰/۵۸
رس+۲۵٪ شن	۰/۳۲	–	۰/۴۳	۰/۳۴	–	۰/۴۵	۰/۳۷۵	–	۰/۵
رس+۵۰٪ شن	۰/۲۸	۱/۵۶	۰/۵	۰/۲۹	۱/۵۸	۰/۵۸	۰/۳۱	۱/۶۲	۰/۶۲
رس+۷۵٪ شن	۰/۲۳	۰/۶۴	–	۰/۲۵	۰/۶۷	–	۰/۲۹	۰/۷۲	–

با توجه به نمودارهای شکل ۲۰ می‌توان دریافت که در حالت کلی و در شرایطی که نمونه بررسی شده خشک است کاربرد ژئوتکستایل باعث بهبود توانایی باربری در مصالح شده است. اگرچه این میزان در خاک رس تا حدود ۱۲ برابر نیز قابل مشاهده است. در تمامی مصالح (به‌غیر از رس خالص) مشاهده می‌شود هنگامی‌که یک لایه ژئوتکستایل استفاده می‌شود میزان نسبت تسلیح تقریباً برابر۱/۲ می‌شود که بیش‌ترین میزان است که بیان‌کنندۀ بیش‌ترین تأثیرگذاری در توانایی باربری است. در ادامه زمانی‌که ۱٪ ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌مترمربع به‌صورت تصادفی مخلوط می‌شود باعث بهبود توانایی باربری می‌شود به‌طوری‌که نسبت تسلیح تقریباً برابر ۱/۰۶ است. اگرچه با بزرگ‌تر شدن ابعاد قطعه ژئوتکستایل (۵×۵ سانتی‌متر) میزان نسبت تسلیح کاهش می‌یابد. هم‌چنین به‌طور واضح قابل مشاهده است که با افزایش تعداد لایه‌ها و درصد مخلوط قطعات ژئوتکستایل در نمونه‌های بررسی شده تأثیرگذاری آنها در بهبود باربری کاهش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

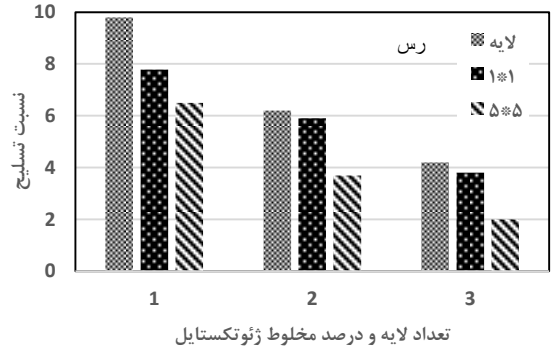


شکل ۲۰. تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل در نسبت تسلیح نمونه‌های بررسی شده (حالت خشک)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

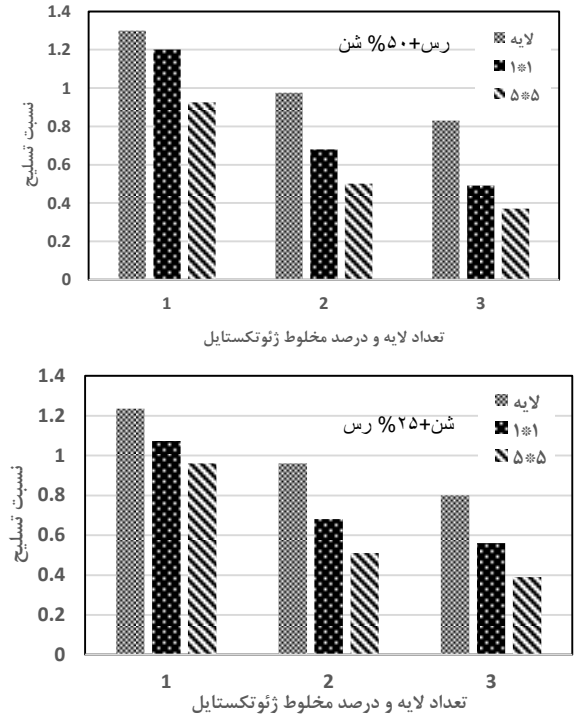
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

با توجه به دیاگرام های شکل ۲۱می‌توان دریافت که در حالت کلی نمونه‌های بررسی شده اشباع است کاربرد ژئوتکستایل باعث بهبود توانایی باربری در مصالح شده است. اگرچه این میزان در خاک رس تا حدود ۱۰ برابر نیز قابل مشاهده است. در تمامی مصالح (به‌غیر از رس خالص) مشاهده می‌شود هنگامی‌که یک لایه ژئوتکستایل استفاده می‌شود میزان نسبت تسلیح تقریباً به‌طور متوسط برابر۱/۲ می‌شود که بیش‌ترین میزان است که بیان‌کنندهٔ بیش‌ترین تأثیرگذاری در توانایی باربری است. در ادامه زمانی‌که ۱٪ ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر مربع به‌صورت تصادفی مخلوط می‌شود باعث بهبود توانایی باربری می‌شود به‌طوری‌که نسبت تسلیح تقریباً برابر ۱/۱ است. اگرچه با بزرگ‌تر شدن ابعاد قطعه ژئوتکستایل (۵×۵ سانتی‌متر) میزان نسبت تسلیح کاهش می‌یابد. هم‌چنین به‌طور واضح قابل مشاهده است که با افزایش تعداد لایه‌ها و درصد مخلوط قطعات ژئوتکستایل در نمونه‌های بررسی شده تأثیرگذاری آنها در بهبود باربری کاهش می‌یابد.





[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]



شکل ۲۱. تأثیر نحوهٔ کاربرد ژئوتکستایل در نسبت تسلیح نمونه‌های بررسی شده (حالت اشباع)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

چنان‌که اشاره شد هدف از تحقیق حاضر بررسی امکان به‌سازی و افزایش میزان توانایی باربری خاک‌های مخلوط رس- شن با استفاده از ژئوتکستایل و نحوهٔ کاربرد آن در احداث لایه‌های بستر راه، زیراساس و اساس در بدنه راه هست. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان به این‌موارد اشاره کرد:

۱. در حالت غیرمسلح، با افزایش میزان درصد مصالح شنی در خاک ریزدانه رسی به‌دلیل ایجاد ساختار سفت و با توجه به نسبت تخلخل دانه‌ای که روند کاهشی را نشان می‌دهد میزان توانایی باربری، مقاومت فشاری و مقاومت برشی در شرایط‌های خشک و اشباع افزایش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

۲. در شرایط بارگذاری خشک اگر یک لایه ژئوتکستایل استفاده شود، میزان عدد CBR در تمامی انرژی‌های تراکمی نسبت به حالت غیرمسلح دارای بیش‌ترین مقدار است. البته میزان نسبت تسلیح تقریباً برابر۱/۲ می‌شود بیان‌کنندهٔ بیش‌ترین تأثیرگذاری در توانایی باربری است. در صورتی‌که به‌میزان وزنی ۱٪ ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر مربع به‌صورت راندم مخلوط شود، نسبت تسلیح تقریباً برابر ۱/۰٦ است.

۳. در شرایط بارگذاری اشباع، اگر یک لایه ژئوتکستایل استفاده شود، عدد CBR در تمامی انرژی‌های تراکمی نسبت به حالت غیرمسلح دارای بیش‌ترین میزان است و میزان نسبت تسلیح تقریباً به‌طور متوسط برابر۱/۲ می شود. هم‌چنین، افزودن ۱٪ وزنی ژئوتکستایل با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر مربع به‌صورت راندم نسبت تسلیح تقریباً برابر ۱/۱ می‌شود.

٤. اگر نمونه‌های خاکی بررسی شده با یک لایه ژئوتکستایل مسلح شوند میزان تورم به‌طرز چشم‌گیری به‌طور متوسط تا ٤۰ درصد کاهش می‌یابد. در صورتی‌که قطعات ژئوتکستایل به‌صورت تصادفی با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر با درصد یک درصد به نمونه‌ها افزوده شود، میزان تورم به مقدار متوسط ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج بهدست آمده می‌توان اشاره کرد که کاربرد ژئوتکستایل به‌عنوان یک ابزار برای به‌سازی مصالح مربوط به بدنه راه مناسب است و با توجه به نشریه ۲۳٤، اعداد CBR به‌دست آمده حاصل از آزمایش‌ها بیان‌کنندهٔ آن است که استفاده از ژئوتکستایل به‌عنوان یک مصالح تثبیت‌کنندهٔ برای تمامی لایه‌های بدنه روسازی راه مناسب است. میزان بهینه ژئوتکستایل مورد نیاز برای مسلح کردن مصالح بررسی شده به‌صورت قراردادن یک لایه در قسمت میانی مصالح لایه‌های روسازی یا افزودن ۱٪ وزنی ژئوتکستایل به ابعاد۱×۱سانتی‌متر مربع برآورد شده است. این نتایج بیان‌کنندهٔ آن است که استفاده از ژئوتکستایل به‌صورت‌های ذکر شده باعث افزایش میزان تراکم‌پذیری محیط و کاهش میزان نشست و تغییر شکل (نشست) تحت اثر بارهای احتمالی وارده می‌شودد. در صورتی‌که برای به‌سازی مصالح مقادیر ژئوتکستایل از این میزان تجاوز کند و ابعاد قطعات ژئوتکستایل بزرگ انتخاب شود مشاهده می‌شود که که بین ذرات ناپیوستگی بیش‌تری به‌وجود می‌آید و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

تماس بین آنها کاهش می‌یابد که در نتیجه آن ایجاد یک ساختار دانه‌بندی نامناسب است و امکان انجام تراکم مناسب از بین می‌رود و در نتیجه میزان توانایی باربری کاهش می‌یابد و هم‌چنین افزایش میزان قطعات ژئوتکستایل و یا تعداد لایه های ژئوتکستایل باعث بیش‌تر شدن میزان نفوذپذیری می‌شود که نتیجه آن، افزایش تورم و حجم، در نمونه‌های خاکی حاوی ذرات رسی است. البته، قضاوت در مورد کاربردی بودن نتایج این مقاله برای به‌سازی مصالح راه‌سازی، مستلزم بررسی نکات دیگری نظیر بررسی اثر ژئوتکستایل بر تراکم‌پذیری و نشست خاک تحت اثر بارهای تکراری و یا اثر ژئوتکستایل بر نفوذپذیری و قابلیت زهکشی مصالح دارد. البته این نکات در چارچوب این مقاله قابل انجام نبوده و نیازمند انجام مطالعات تکمیلی است.

منابع

1. Thevanayagam S., "Liquefaction Potential and Undrained Fragility of Silty Soils", Proc. Of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, (2000) 8-20.
2. Biswas A., Kumar Dash S., Krishna A. M., "Behavior of Geogrid Reinforced Foundation Systems Supported on Clay Subgrades of Different Strength", International Journal of Geosynthetic and Ground Engineering, 1 (2015) 9-11.
3. Kazi M., Shukla S. K., Habibi D., "Effect of Submergence on Settlement and Bearing Capacity of Surface Strip Footing on Geotextile-Reinforced Sand Bed", International Journal of Geosynthetic and Ground Engineering, (2015a) doi:10. 1007/s40891-014-0006-y.
4. Kazi M., Shukla S. K., Habibi D. "An Improved Method to Increase the Load-Bearing Capacity of Strip Footing Resting on Geotextile-Reinforced Sand Bed", Indian Geotechnical Journal, 45 (2015b) 98-109.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

5. Latha G. M., Murthy V. S., "Effects of Reinforcement Form on the Behavior of Geosynthetic Reinforced Sand", Geotextiles and Geomembranes, 25 (2007) 23-32.

6. Naeinie S. A., Mirzakhanlari M., "The Effect of Geotextile and Grading on the Bearing Ratio of Granular Soils", Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE) 3 (2008) 1-10.

7. Shahie J., Ameri M., Khani Sanij H., "Evaluate the Effect of Geotextile on Life Fatigue of Pavement Asphalt in Iran", Journal of Transportation Engineering, 2 (2010) 41-51(In Persian).

8. Khabiri M. M., "Geosynthetic Material Suitable Depth Staying to Control Failure of Pavement Rutting", Advanced Materials Research, 260 (2011) 3454-3458.

9. Kumar Senthil P., Rajkumar R. "Effect of Geotextile on CBR Strength of Unpaved Road with Soft Subgrade", electronic journal of geotechnical engineering, (EJGE) 17 (2012) 1355-1363.

10. Sadeghi Azar K., Dabiri R., "The Effects of Geotextile Layers on Bearing Capacity of Gravel-Silt Mixture", Trakya University Journal of Engineering Science, 16 (2015) 61-69.

11. Nazari R., Dabiri R., "Comparison of Geotextile Layers Effects on Static and Dynamic behavior of Pavement", Journal of Structural Engineering and Geotechniques, 6 (2016) 15-22.

12. ASTM D421-85, "Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", Annual book of ASTM standards, (reapproved 1998) (1985).

13. ASTM D422-63, "Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils", Annual book of ASTM standards (reapproved 1998), (1963).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]

14. Fibertex-F-32, Fibertex Nonwovens A/S, Svendborgvej 16, 9220 Aalborg, Denmark, www.fibertex, com.

15. ASTM D 4318-95a, "Standard test method for liquid limit, plastic limit an plasticity index for soils", Annual book of ASTM standards (1995).

16. ASTM-D 698-00, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3))", Annual book of ASTM standards, (2000).

17. ASTM D1883-93, "Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory- compacted soils", Annual book of ASTM standards, (1993).

۱۸. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه های ایران)، معاونت امور فنی، وزارت راه و ترابری، نشریهٔ ۲۳٤ (۱۳۸۱).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.1.3]