

# بررسی اثر تسلیح و تراکم خاک ماسه‌یی با استفاده از آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)

آیدا مهرپژوه (کارشناس ارشد)

سید ناصر مقدس نقرشی\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۶)  
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۱/۳، ص. ۱۰۳-۹۵، (پادداشت فنی)

در نوشتار حاضر، اثر تسلیح با ژئوتکستایل، عمق قرارگیری آن، تعداد لایه‌های تسلیح و همچنین اثر تراکم لایه‌های فوقانی جایگزین در بهبود ظرفیت باربری بستر ماسه‌یی سست با آزمایش CBR بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با قرارگیری لایه‌ی ژئوتکستایل در عمق ۱/۵ سانتی‌متری از سطح نمونه (نسبت عمق قرارگیری لایه‌ی تسلیح به قطر سنبه‌ی بارگذاری برابر ۰/۳)، میزان بهبود در باربری به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با افزایش عمق قرارگیری لایه‌ی تسلیح و دور شدن از حوزه‌ی تأثیر تنش، از میزان تأثیر آن در بهبود باربری بستر کاسته می‌شود. همچنین برای دستیابی به یک مقدار CBR مشخص، می‌توان در حالت بستر مسلح از ضخامت کمتری از لایه‌ی خاک جایگزین با تراکم بالا در مقایسه با حالت بستر غیرمسلح استفاده کرد. به عبارت دیگر، در صورت عدم دسترسی به مصالح مناسب، عمل تسلیح می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های تهیه‌ی خاک مناسب شود. در شرایط تراکم و ضخامت یکسان از لایه‌ی جایگزین، وجود ۲ لایه‌ی تسلیح باعث افزایش ظرفیت باربری در مقایسه با حالت تسلیح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل می‌شود.

واژگان کلیدی: خاک مسلح، ژئوتکستایل، لایه‌ی متراکم فوقانی، آزمایش CBR، ظرفیت باربری.

## ۱. مقدمه

در تاریخچه‌ی تکنولوژی مصالح ساختمانی، خاک‌ها همواره به‌عنوان توده‌های با مقاومت فشاری و برشی نسبتاً مناسب و مقاومت کششی ناچیز مطرح هستند. از سوی دیگر محدودیت زمین، سرمایه و منابع ضرورت احداث سازه‌ها روی خاک موجود در محل، حفاظت از گودبرداری‌ها و ساختمان‌های مجاور و بهینه‌سازی هزینه‌ی

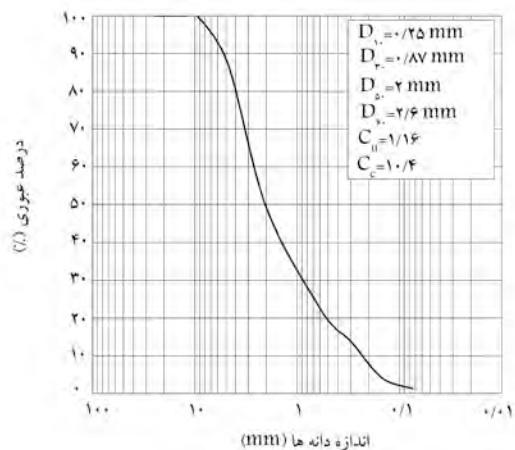
ساخت‌وساز، مهندسان ژئوتکنیک را به استفاده از روش‌های نوین افزایش باربری خاک سوق می‌دهند. در میان روش‌های مذکور، استفاده از ژئوتکنیک‌ها در چند دهه‌ی اخیر به‌طور قابل ملاحظه‌یی جهت بهبود کیفیت خاک در پروژه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است.

فاسادناپذیری، نصب سریع، صرفه‌جویی در زمان و دسترسی آسان از جمله ویژگی‌های ژئوتکنیک‌ها جهت تسلیح خاک و کاربرد آن‌ها در پروژه‌های خاکی به خصوص راه‌سازی هستند.<sup>[۱-۵]</sup> چهار عملکرد اصلی ژئوتکنیک‌ها در راه‌ها عبارت از: جداکنندگی، تثبیت بستر، تسلیح اساس، جذب تنش در داخل روبه‌ی راه و تسلیح آن هستند. تثبیت بستر و تسلیح اساس شامل بهسازی ساختار راه در حین احداث

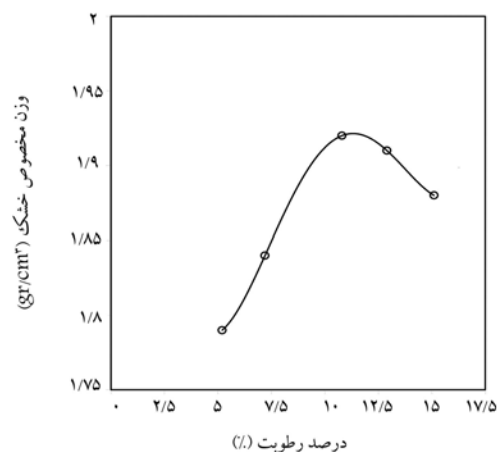
\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۳، اصلاحیه ۱/۰۸/۱۳۹۴، پذیرش ۱۰/۲۱/۱۳۹۴.

a.mehrpajouh@yahoo.com  
nas\_moghaddas@kntu.ac.ir



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد آزمایش.



شکل ۲. تغییرات وزن مخصوص خشک خاک در مقابل درصد رطوبت آن.

جدول ۱. خصوصیات ژئوتکنستایل مصرفی.

مقدار	خصوصیات ژئوتکنستایل
۱۶ (kN/m)	مقاومت کششی در جهت ماشین (MD)
۱۶ (kN/m)	مقاومت کششی در جهت مقابل ماشین (CD)
۱۰/۲ (kN)	مقاومت در برابر سوراخ شدگی استاتیکی (CBR)
۱۴/۵ (mm)	حد نفوذ در برابر سوراخ شدگی
۵۰٪	ازدیاد طول
۳/۵ (mm)	ضخامت
$6 \times 10^{-2}$ (m/s)	نفوذپذیری

### ۲.۲. ژئوتکنستایل (مسلح کننده)

ژئوتکنستایل مورد استفاده به صورت بافته نشده از جنس پلی پروپیلن ساخت شرکت HYTEX انگلستان با مشخصات مورد نظر در جدول ۱ است.

### ۳. طرح کلی آزمایش‌ها

از آنجا که آزمایش‌ها روی نمونه‌های غیرمسلح و مسلح (۱ یا ۲ لایه تسلیح با ژئوتکنستایل) با تراکم و ضخامت مختلف از لایه‌های خاک انجام شده‌اند، لذا در

میزان افزایش برای نفوذ سنجه برابر ۲۰ میلی‌متر در خاک مسلح با ژئوتکنستایل بافته شده و بافته نشده به ترتیب برابر ۲/۱ و ۱/۷ گزارش شده است. در مطالعه‌ی مذکور اثر لایه‌های بیشتر ژئوتکنستایل (در میان لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی بالایی) بررسی نشده است.

همچنین در سال ۲۰۱۳<sup>[۱۳]</sup> اثر تسلیح با ژئوتکنستایل در میزان CBR سه نوع خاک دانه‌ی با مقادیر CBR برابر ۶۷/۷٪، ۹۷/۵٪ و ۴۳/۸٪ بررسی و گزارش شده است که استفاده از ۱ لایه‌ی ژئوتکنستایل در نیمه‌ی ارتفاع نمونه، بیشترین تأثیر را در افزایش مقدار CBR دارد. همچنین میزان بهبود CBR در حالت مسلح به نوع خاک و میزان CBR آن در حالت غیرمسلح بستگی دارد، به طوری که تسلیح خاکی با CBR غیرمسلح برابر ۹۷/۵٪، تأثیر منفی در مقدار CBR آن داشته است. لذا کاهش قفل و بست بین دانه‌های خاک در محل قرارگیری لایه‌ی ژئوتکنستایل، عامل کاهش مقدار CBR بیان شده و این امر سبب تأیید اثر بیشتر تسلیح در افزایش CBR خاک‌های با ظرفیت باربری کم شده است.<sup>[۱۳]</sup> لازم به ذکر است که اثر افزایش تراکم لایه‌های بالا و پایین لایه‌ی تسلیح و اثر تعداد لایه‌های تسلیح در میزان بهبود CBR بستر مطالعه نشده است.<sup>[۱۳]</sup>

اگرچه مطالعات پیشین، نتایج ارزشمندی را در خصوص اثر تسلیح در باربری خاک‌ها ارائه می‌دهند، اما فقط طیف محدودی از پارامترهای مؤثر در عملکرد بستر مسلح را در بر می‌گیرند. لذا مرور نتایج پژوهش‌های پیشین، مبین فقدان بررسی اثر عواملی نظیر: تراکم و ضخامت لایه‌ی خاک جایگزین، تسلیح بستر یا ۲ لایه‌ی ژئوتکنستایل در ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) بستر ماسه‌ی سست است. از این رو در نوشتار حاضر با استفاده از آزمایش CBR، بررسی اثر این عوامل در ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) بستر ماسه‌ی سست با مقادیر CBR پایین مدنظر است:

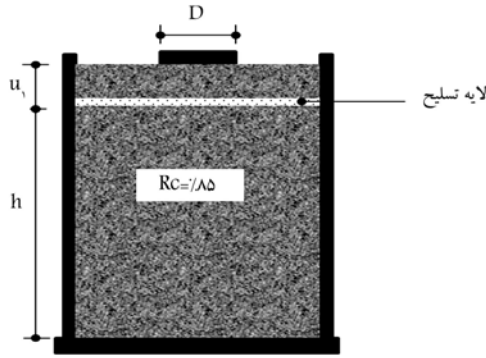
- بررسی اثر تراکم و ضخامت لایه‌ی جایگزین فوقانی در ۲ حالت غیرمسلح و مسلح؛
- بررسی اثر محل قرارگیری لایه‌های تسلیح (بیشینه‌ی ۲ لایه تسلیح) و تعیین عمق بهینه‌ی قرارگیری آن‌ها؛
- بررسی اثر تراکم لایه‌های خاک بالا و پایین لایه‌ی تسلیح.

## ۲. مصالح مصرفی

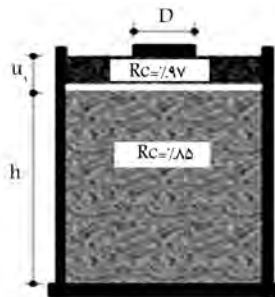
### ۲.۱. خاک

خاک مورد استفاده کلیه‌ی آزمایش‌ها طبق استاندارد ASTM-D ۲۴۸۷-۰۶<sup>[۱۴]</sup> از نوع ماسه با دانه‌بندی خوب با توزیع اندازه‌ی ذرات مطابق شکل ۱ است. با توجه به آزمایش تراکم اصلاح شده براساس استاندارد ASTM-D ۱۵۵۷-۱۲<sup>[۱۵]</sup> بر روی نمونه‌ی ماسه‌ی مورد نظر (شکل ۲)، مقدار بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک برابر ۱۶۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان رطوبت بهینه‌ی آن حدود ۱۱/۵٪ هستند. همچنین کمینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک ۱۷۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و توده‌ی ویژه‌ی آن نیز برابر  $G_s = ۲/۶۸$  اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است برای اطمینان از مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و میزان رطوبت بهینه‌ی آن، آزمایش تراکم روی خاک ذکر شده، ۳ بار انجام شده است که اختلاف نتایج آن‌ها قابل اغماض است.

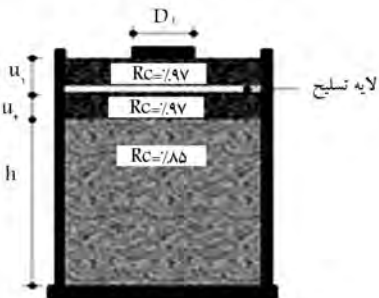
بخش حاضر طرح کلی آزمایش‌ها و پارامترهای موردنظر معرفی شده است.



شکل ۴. نمونه‌ی مسلح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل و تراکم ۸۵٪ برای خاک.

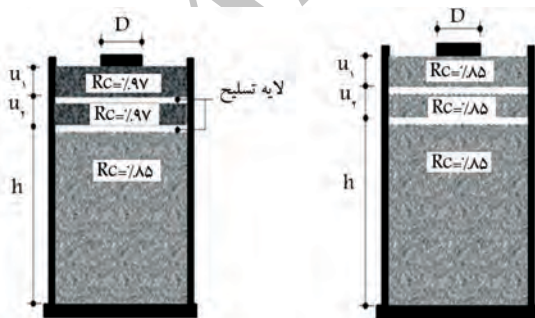


الف) لایه خاک با ضخامت  $u_1$  دارای درصد تراکم ۹۷ و مابقی دارای درصد تراکم ۸۵



ب) لایه خاک با ضخامت های  $u_1$  و  $u_2$  دارای درصد تراکم ۹۷ و مابقی دارای درصد تراکم ۸۵

شکل ۵. نمونه مسلح با یک لایه ژئوتکستایل با تراکم‌های مختلف از لایه‌های خاک.



الف) کلیه لایه‌های خاک دارای درصد تراکم ۸۵ (ب) دو لایه فوقانی خاک دارای درصد تراکم ۹۷ و لایه تحتانی دارای درصد تراکم ۸۵

شکل ۶. نمونه‌ی مسلح با ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل.

### ۱.۳. طرح آزمایش‌ها روی نمونه‌های غیرمسلح

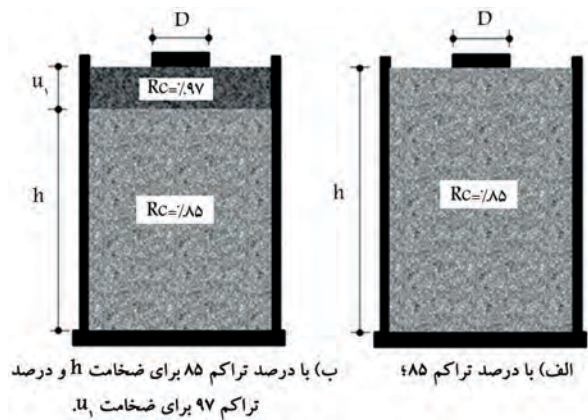
شکل ۳، طرح کلی آزمایش‌ها روی نمونه‌های خاک غیرمسلح را نشان می‌دهد که در آن،  $R_c$  درصد تراکم (نسبت چگالی خشک نمونه به بیشینه‌ی چگالی خشک آزمایشگاهی بر حسب درصد) و پارامترهای  $u_1$  و  $h$  به ترتیب ضخامت ۲ لایه‌ی خاک با تراکم ۹۷٪ و ۸۵٪ هستند. لازم به ذکر است که با توجه به مقادیر بیشینه و کمینه‌ی وزن مخصوص خاک و توده‌ی ویژه‌ی آن ۲ تراکم ۹۷٪ و ۸۵٪ به ترتیب متناظر با ۲ چگالی نسبی حدود ۸۵٪ و ۲۰٪ هستند. مقدار  $u_1$  در آزمایش‌های مختلف ۱، ۱٫۵، ۲، ۳، ۴ و ۶ سانتی‌متر انتخاب شده است. هدف از قرارگیری لایه‌ی خاک به ضخامت  $u_1$  و تراکم ۹۷٪ روی لایه‌ی خاک به ضخامت  $h$  و تراکم ۸۵٪، بررسی اثر تراکم لایه‌ی جایگزین در باربری و نشست بستر یا به عبارتی مقدار CBR آن است.

### ۲.۳. طرح آزمایش‌ها روی نمونه‌های مسلح با ژئوتکستایل

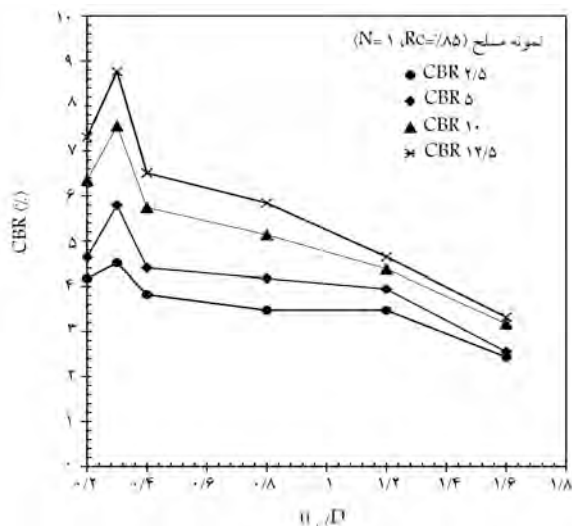
با توجه به مقدار کم وزن مخصوص خشک خاک ماسه‌یی برابر ۱٫۶۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب (در مقایسه با مقادیر بیشینه و کمینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و داشتن چگالی نسبی حدود ۲۰٪) و همچنین ضریب باربری کالیفرنیا زیر ۲٪ در جدول ۱، خاک ذکر شده در رده‌ی خاک سست و با باربری کم محسوب می‌شود. جهت افزایش باربری آن، تسلیح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل یا بیشتر مفید خواهد بود.

شکل‌های ۴ الی ۷، طرح کلی آزمایش‌های مسلح با ۱ یا ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل را نشان می‌دهند. در شکل ۴، دو لایه خاک زیر و روی ژئوتکستایل به ترتیب ضخامت‌های  $h$  و  $u_1$  با تراکم ۸۵٪ هستند. در آزمایش‌های مختلف مقادیر ۱، ۱٫۵، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر (مقادیر  $u_1/D$  بین ۰٫۲ الی ۱٫۶) را به خود اختصاص می‌دهد. علت انجام آزمایش برای مقادیر کم  $u_1/D$  (از ۰٫۲ الی ۰٫۴)، تعیین عمق مدفون بهینه‌ی لایه‌ی تسلیح (عمق مدفون متناظر با بیشینه‌ی کارایی لایه‌ی تسلیح) و برای مقادیر بزرگ  $u_1/D$  (بیش از ۰٫۴ الی ۱٫۶)، تعیین ناحیه‌ی مؤثر در باربری است.

شکل ۵ الف، نمونه‌ی مسلح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل را در حالت قرارگیری خاک بالای آن به ضخامت  $u_1$  با تراکم ۹۷٪ و لایه‌ی زیر آن به ضخامت  $h$  با تراکم ۸۵٪ را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۵ ب، مبین قرارگیری ۲ لایه خاک، بالا و پایین لایه‌ی تسلیح به ترتیب به ضخامت‌های  $u_1$  و  $u_2$  با تراکم ۹۷٪ و لایه‌ی خاک زیرین به



شکل ۳. نمونه‌ی غیرمسلح.



شکل ۷. میزان CBR متناظر با مقادیر نفوذ ۲٫۵، ۵، ۱۰ و ۱۲٫۵ میلی متر برای خاک مسلح با ۱ لایه تسلیح در  $u_1/D$  های مختلف.

ضخامت  $h$  با تراکم ۸۵٪ است. لازم به ذکر است که در این حالت، استفاده از لایه‌ی خاک با تراکم ۹۷٪ در زیر و روی لایه‌ی تسلیح، به منظور افزایش کارایی لایه‌ی تسلیح (افزایش اصطکاک و اندرکنش بین خاک و ژئوتکستایل) به کار رفته است و تسلیح لایه‌ی خاک با تراکم ۹۷٪ مدنظر نیست.

در شکل ۶ الف، ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل در فواصل ۱٫۵ و ۳ سانتی متری از سطح نمونه قرار داده شده‌اند ( $u_1 = u_2 = 1/5 \text{ cm}$ ) و لایه‌های مختلف با تراکم ۸۵٪ هستند. در شکل ۶ ب، ۲ لایه‌ی خاک فوقانی به ضخامت‌های ۱٫۵ سانتی متر ( $u_1 = u_2 = 1/5 \text{ cm}$ ) با تراکم ۹۷٪ و لایه‌ی خاک تحتانی به ضخامت  $h$  با تراکم ۸۵٪ هستند. لازم به ذکر است که درخصوص پی‌ها، تسلیح بستر با ۲ لایه‌ی تسلیح و بیشتر (تا ۴ و ۵ لایه) در حوزی تأثیر تنش (در عمقی حدود ۱ تا ۲ برابر بعد پی) کاملاً مرسوم است.<sup>[۱۷، ۱۸]</sup> اگرچه درخصوص بستر راه، عمده‌ی پروژه‌ها و مطالعات روی بستر مسلح با ۱ لایه‌ی تسلیح متمرکز هستند.<sup>[۱۶]</sup> اما با توجه به تأثیر قرارگیری لایه یا لایه‌های تسلیح در عمقی حدود ۱ تا ۲ برابر بعد سطح بارگذاری در بهبود باربری بستر، آزمایش‌ها با وجود ۲ لایه‌ی تسلیح در بستر (شکل ۶) انجام شده‌اند.

#### ۴. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های موردنظر روی نمونه‌های خاک غیرمسلح و مسلح (با توجه به طرح آزمایش‌ها در بخش ۳) جهت تعیین محل بهینه‌ی قرارگیری لایه‌ی تسلیح، بررسی اثر تراکم لایه‌های فوقانی خاک و تعداد لایه‌های تسلیح در بهبود رفتار بستر توسط دستگاه CBR و مطابق استاندارد ASTM D ۱۸۸۳-۰۷<sup>[۱۹]</sup> انجام شده‌اند. قطر داخلی قالب CBR ۱۵٫۲ سانتی متر، ارتفاع آن ۱۱٫۶ سانتی متر و قطر سنجه‌ی بارگذاری برابر ۵ سانتی متر بوده‌اند. پس از آماده‌سازی لایه‌های مختلف خاک با چگالی موردنظر (در حالت مسلح یا غیرمسلح) در داخل قالب و قراردادن ۲ عدد وزنه‌ی حلقوی ۲ کیلوگرمی جهت شبیه‌سازی وزن لایه‌ی سربار بر روی سطح نمونه (براساس استاندارد آزمایش CBR)، بار با نرخ ۱٫۲۷ میلی متر بر دقیقه بر سطح سنجه‌ی بارگذاری اعمال و تغییرات بار-نفوذ سنجه اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که برای ایجاد ۱ لایه‌ی خاک با تراکم بالاتر بر روی لایه‌ی بی

تراکم پایین‌تر (شکل‌های ۳، ۵ و ۶) و به منظور جلوگیری از عدم تأثیر انرژی تراکم ناشی از کوبش لایه‌ی فوقانی با تراکم بالاتر (تراکم ۹۷٪) در لایه‌ی زیرین با تراکم پایین‌تر (تراکم ۸۵٪)، مطابق استاندارد ASTM D ۱۸۸۳-۰۷<sup>[۱۹]</sup> قبل از انجام آزمایش، سر و ته قالب برعکس شده است. بنابراین ابتدا لایه‌ی خاک با تراکم بالاتر در ضخامت موردنظر، درون قالب ریخته و متراکم شده و سپس با قرار دادن لایه‌ی تسلیح روی آن، لایه‌های خاک با تراکم پایین‌تر تا رسیدن به سطح فوقانی قالب درون آن متراکم شده‌اند. سپس با برگرداندن قالب نمونه (جهت قرارگیری لایه با تراکم بالاتر در بالای نمونه) و قرار دادن آن زیر جک بارگذاری، آزمایش انجام شده است. ذکر این نکته ضروری است که برای ایجاد لایه با تراکم موردنظر در قالب (تراکم ۸۵٪ یا ۹۷٪)، وزن مورد نیاز خاک هر لایه‌ی درون قالب با توجه به وزن مخصوص، رطوبت موردنظر (در تمام لایه‌ها رطوبت حدود ۶٪) و حجم قالب به دست آمده است.

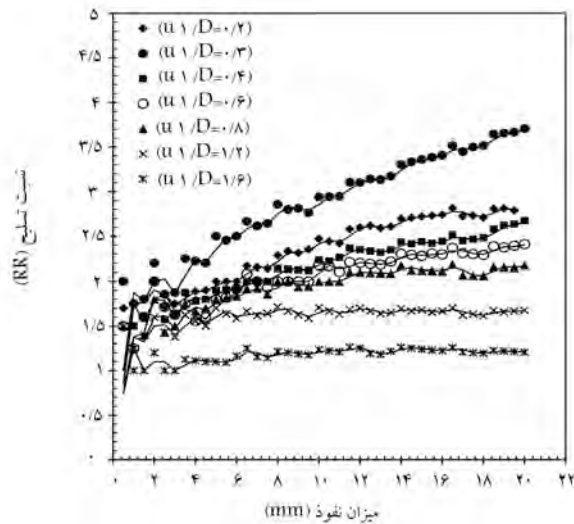
از آنجا که مکانیزم عملکرد ژئوتکستایل به عنوان مسلح کننده جهت ایجاد نیروی کششی و کاهش تنش به لایه‌ی زیر خود، مبتنی بر اثر غشایی آن است، لذا تغییر شکل آن نزدیک به شکل سهمی با شیار افتادگی در وسط لایه، بدون نیاز به فضای اضافی در اطراف خود جهت افزایش طول است. لذا شرایط مرزی قالب نمونه‌ی CBR عامل محدود کننده برای عملکرد ژئوتکستایل و مؤثر در نتایج آزمایش روی نمونه‌های مسلح با ژئوتکستایل محسوب نمی‌شود. در مجموع تعداد ۲۳ آزمایش در شرایط مختلف انجام شده است که از این تعداد، ۷ آزمایش به منظور بررسی صحت تکرارپذیری و نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها انجام شده‌اند. اختلاف نتایج حاصل از دو آزمایش تکراری در شرایط کاملاً یکسان، کمتر از ۶٪ است که این اختلاف در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی قابل قبول و قابل اغماض است.

#### ۵. نتایج آزمایش‌های CBR

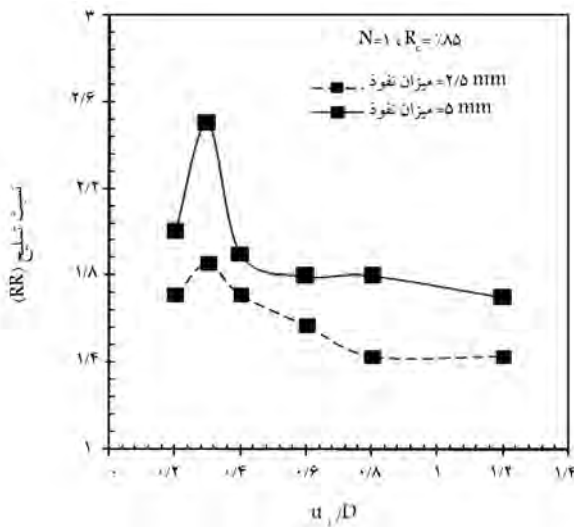
##### ۱.۵. تأثیر عمق قرارگیری ژئوتکستایل

جدول ۲، مقادیر CBR متناظر با نفوذ سنجه به میزان ۲٫۵، ۵، ۱۰ و ۱۲٫۵ میلی متر را برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل، با اعماق مدفون مختلف ( $u_1/D$ ) برابر ۰٫۲ تا ۱٫۶ را نشان می‌دهد. در این حالت، لایه‌ی خاک روی لایه‌ی تسلیح به ضخامت  $u_1$  و خاک بستر ماسه‌ی زیر لایه‌ی تسلیح با تراکم ۸۵٪ هستند (شکل ۴). لازم به ذکر است که معمولاً استفاده از ژئوتکستایل در خاک‌های با ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) کمتر از ۳ توصیه می‌شود، به طوری که در خاک‌های با CBR بیشتر از ۳، نقش جداسازی ژئوتکستایل بیشتر از نقش آن در افزایش باربری مدنظر است.<sup>[۴]</sup> از این رو در پژوهش حاضر از خاک با تراکم پایین با CBR کمتر از ۳٪ برای شبیه‌سازی بستر نرم (ردیف ۲ از جدول ۲) و برای نشان دادن عملکرد ژئوتکستایل در افزایش باربری آن استفاده شده است.

همچنین شکل ۷، تغییرات CBR متناظر با نفوذ سنجه به میزان ۲٫۵، ۵، ۱۰ و ۱۲٫۵ میلی متر را برای تسلیح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل، واقع در اعماق مختلف از سطح نمونه ( $u_1/D$ ) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، مقدار CBR (صرف نظر از میزان نفوذ سنجه) تا حدود  $u_1/D$  برابر ۰٫۳ افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. افزایش عملکرد لایه‌ی تسلیح در باربری بستر تا حدود  $u_1/D$  برابر ۰٫۳ را می‌توان به توزیع مناسب و یکنواخت تنش روی لایه‌ی تسلیح و جلوگیری از تماس مستقیم سنجه‌ی بارگذاری با لایه‌ی تسلیح، برای ضخامت مذکور از خاک نسبت داد. دلیل محتمل دیگر برای بهینه بودن مقدار ۰٫۳ از  $u_1/D$  این است که برای مقادیر کوچک‌تر از ۰٫۳، توده‌ی خاک روی لایه‌ی تسلیح، سربار کافی برای ایجاد مقاومت اصطکاکی



شکل ۸. تغییرات نسبت تسلیج (RR) در برابر نفوذ برای خاک مسلح با ۱ لایه ی ژئوتکستایل واقع در اعماق مختلف خاک با تراکم ۰.۸۵٪.



شکل ۹. تغییرات نسبت تسلیج (RR) با  $u_1/D$  برای ۲ میزان نفوذ سنبه برابر ۲٫۵ و ۵ میلی متر.

به افزایش تغییر شکل لایه ی تسلیج (عملکرد غشایی بهتر و ایجاد نیروی کششی بیشتر در آن) و افزایش قفل و بست دانه های خاک با یکدیگر و همچنین لایه ی تسلیج نسبت داد.

### ۲.۵. اثر هم زمان تراکم و تسلیج

تراکم لایه ی جایگزین در حالت بستر غیرمسلح (شکل ۳ ب) و بستر مسلح با ۱ لایه ی ژئوتکستایل (شکل ۵) به عنوان عاملی مهم در بهبود عملکرد بستر مطرح است. از این رو در شکل های ۱۰ الی ۱۴، اثر تراکم لایه ی خاک جایگزین (خاک با تراکم ۰.۸۵٪ یا ۰.۹۷٪ و ضخامت  $u_1$ ) بررسی شده است. شکل ۱۰، برای بستر غیرمسلح با  $u_1/D = 0.2$  نشان می دهد که تراکم لایه ی جایگزین تأثیر به سزایی در بهبود باربری بستر دارد. همچنین مطابق شکل مذکور برای بستر مسلح با  $u_1/D = 0.2$ ، اگرچه وجود لایه ی تسلیج موجب افزایش قابل ملاحظه در باربری می شود، اما اثر

جدول ۲. مقادیر CBR برای نمونه های غیرمسلح و مسلح با ۱ لایه ی ژئوتکستایل.

	CBR				$R_C$	$u_1/D$
	۱۲٫۵	۱۰	۵	۲٫۵		
غیرمسلح	۲٫۷۹	۲٫۵۷	۲٫۳۲	۲٫۴۳	٪۸۵	-
	۷٫۳	۶٫۳۴	۴٫۶۴	۴٫۱۷	٪۸۵	۰٫۲
مسلح	۸٫۷۶	۷٫۵۶	۵٫۷۹	۴٫۵۱	٪۸۵	۰٫۳
	۶٫۵۱	۵٫۷۴	۴٫۴۱	۳٫۸۲	٪۸۵	۰٫۴
	۵٫۸۴	۵٫۱۴	۴٫۱۷	۳٫۴۷	٪۸۵	۰٫۸
	۴٫۶۵	۴٫۳۸	۳٫۹۴	۳٫۴۷	٪۸۵	۱٫۲
	۳٫۳۲	۳٫۱۷	۲٫۵۵	۲٫۴۳	٪۸۵	۱٫۶

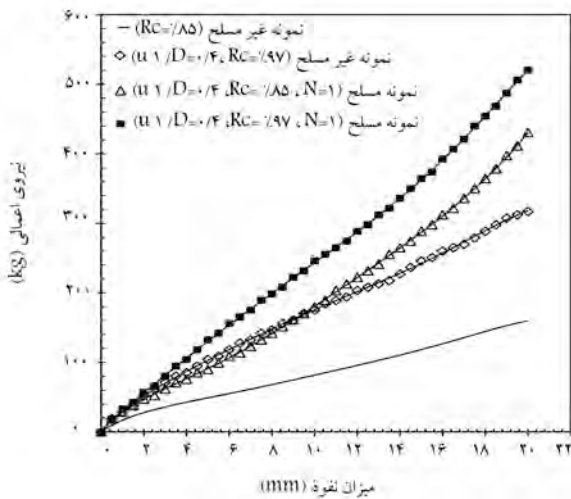
لازم در سطح تماس خاک و ژئوتکستایل فراهم نمی کند. با افزایش مقدار  $u_1/D$  از مقدار ۰٫۳، لایه ی تسلیج به خارج از محدوده ی مؤثر در کاهش تنش ها حرکت می کند، به طوری که با افزایش آن به بیش از حدود ۱٫۶، لایه ی تسلیج تقریباً خارج از ناحیه ی گسیختگی خاک زیر سطح بارگذاری قرار می گیرد و اثر آن کاملاً محو و رفتار بستر به سمت رفتار بستر غیرمسلح میل می کند.

به عبارت دیگر، با افزایش مقدار  $u_1/D$  (به خصوص برای مقادیر بزرگ تر از ۰٫۴)، به علت دور شدن لایه ی تسلیج از بالای نمونه و منطقه ی تحت تأثیر تنش، ضمن کاهش تغییر شکل و عملکرد غشایی آن، تأثیر آن در باربری بستر کاسته و مقادیر CBR در  $u_1/D$  های بزرگ (به خصوص در میزان نفوذ کم) هم گرا می شوند. همچنین مطابق شکل ۷ و جدول ۲ ملاحظه می شود که مقدار CBR در میزان نفوذ ۱۲٫۵ میلی متر به بیشینه ی خود می رسد، که این امر ضرورت بروز تغییر شکل در لایه ی تسلیج جهت اندرکنش بهتر آن با خاک را بیان می کند.

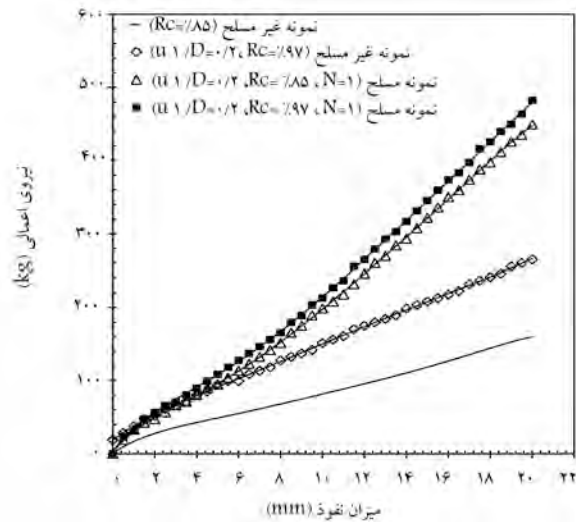
به منظور درک بهتر از نقش عمق مدفون لایه ی تسلیج، تغییرات ضریب تسلیج (RR) (نسبت باربری نمونه ی مسلح به نمونه ی غیرمسلح) در مقابل میزان نفوذ سنبه ی بارگذاری برای اعماق مختلف از قرارگیری لایه ی ژئوتکستایل در شکل ۸ ارائه شده است که مطابق شکل مذکور، بیشینه ی مقدار این ضریب در نسبت  $u_1/D$  برابر ۰٫۳ (عمق بهینه) حاصل می شود و با افزایش مقدار  $u_1/D$  و رسیدن آن به مقدار ۱٫۶، این ضریب به سمت ۱ میل می کند. این امر متناظر با کمینه ی کارایی سیستم تسلیج و به دلیل دور شدن لایه ی تسلیج از حوزه ی تحت تأثیر تنش وارد بر سطح بارگذاری است. همچنین مطابق شکل مذکور، شیب افزایش در مقدار RR با میزان عمق نفوذ برای حالت  $u_1/D = 0.3$  از سایر حالات بیشتر است. با افزایش عمق قرارگیری لایه ی تسلیج نسبت به سطح نمونه، شیب تغییرات کاهش می یابد به طوری که در  $u_1/D = 1.6$ ، شیب تغییرات ناچیز و نمودار تقریباً افقی (در حدود مقدار  $RR = 1$ ) می شود.

از آنجا که غالباً مقادیر CBR متناظر با نفوذ سنبه به میزان ۵، ۲٫۵ ملاک طراحی هاست، تغییرات نسبت تسلیج (RR) در مقابل نفوذ سنبه  $(u_1/D)$  برای دو میزان نفوذ ۲٫۵ و ۵ میلی متر در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق شکل مذکور، بیشینه ی عملکرد تسلیج در افزایش مقاومت بستر در  $u_1/D = 0.3$  رخ می دهد. بیشینه ی عملکرد در  $u_1/D = 0.3$  (مقدار بهینه) به ترتیب موجب افزایش باربری بستر معادل ( $RR = 1.85$ ) و ( $RR = 2.15$ )٪ در میزان نفوذ ۲٫۵ و ۵ میلی متر شده است. علت عملکرد بهتر لایه ی تسلیج در میزان نفوذ بیشتر را می توان

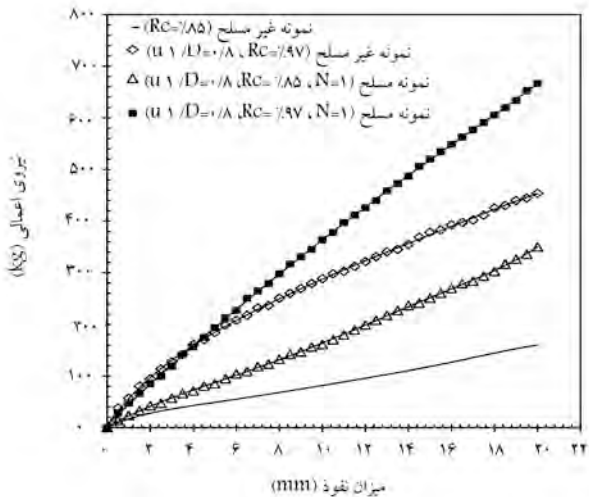




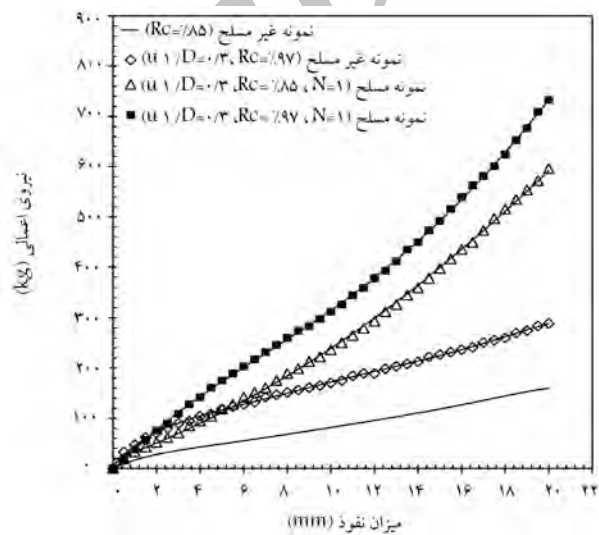
شکل ۱۲. تغییرات نیرو-نفوذ برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با  $u_1/D = 0.4$  و ۲ تراکم ۸۵٪ و ۹۷٪ برای لایه‌ی خاک فوقانی.



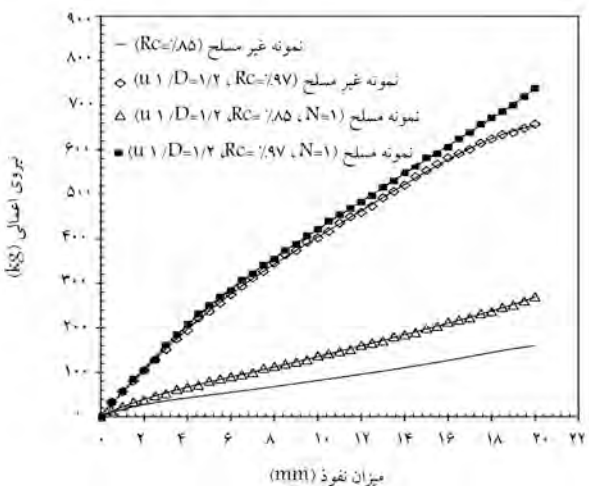
شکل ۱۰. تغییرات نیرو-نفوذ برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با  $u_1/D = 0.2$  و ۲ تراکم ۸۵٪ و ۹۷٪ برای لایه‌ی خاک فوقانی.



شکل ۱۳. تغییرات نیرو-نفوذ برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با  $u_1/D = 0.8$  و ۲ تراکم ۸۵٪ و ۹۷٪ برای لایه‌ی خاک فوقانی.



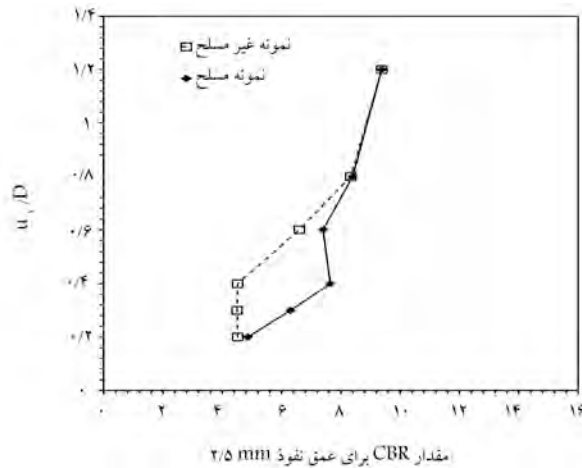
شکل ۱۱. تغییرات نیرو-نفوذ برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با  $u_1/D = 0.3$  و ۲ تراکم ۸۵٪ و ۹۷٪ برای لایه‌ی خاک فوقانی.



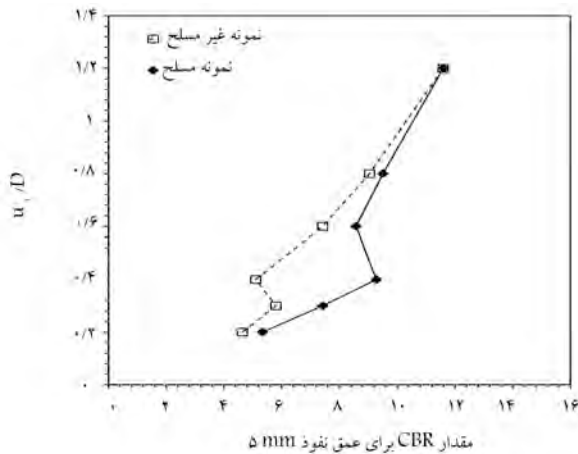
شکل ۱۴. تغییرات نیرو-نفوذ برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با  $u_1/D = 1.2$  و ۲ تراکم ۸۵٪ و ۹۷٪ برای لایه‌ی خاک فوقانی.

تراکم لایه‌ی فوقانی چندان قابل توجه نیست. به عبارتی در صورت تسلیج بستر برای  $u_1/D = 0.2$ ، عامل اصلی افزایش باربری، وجود لایه‌ی تسلیج است و تراکم لایه‌ی فوقانی چندان مؤثر نیست. با افزایش عمق قرارگیری لایه‌ی تسلیج از سطح نمونه در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴، اثر تسلیج کاهش و اثر تراکم لایه‌ی فوقانی افزایش یافته است. به طوری که با افزایش مقدار  $u_1/D$  به ۱/۲، عملاً تسلیج اثر قابل توجهی در بهبود رفتار بستر ندارد (شکل ۱۴) و رفتار نمونه‌ی مسلح و غیرمسلح در شرایط یکسان از تراکم لایه‌های خاک به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

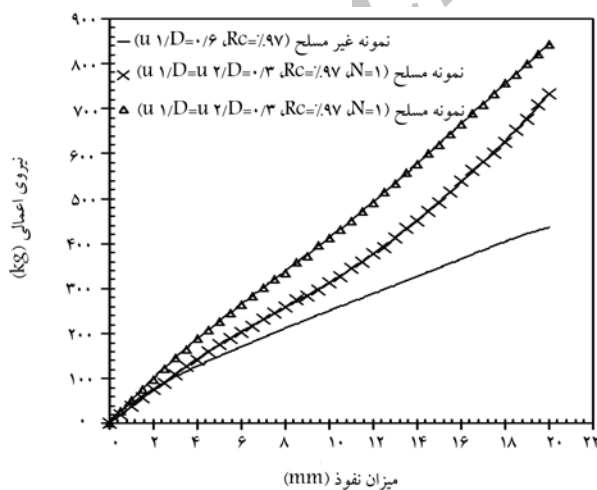
همچنین ملاحظه می‌شود که شیب نمودار نیرو-میزان نفوذ یا به عبارتی باربری بستر در حالت مسلح تا میزان نفوذ ۲۰ میلی‌متر نیز در حال افزایش است که علت آن افزایش میزان تغییر شکل و عملکرد غشایی لایه‌ی تسلیج و در نتیجه افزایش نیروی کششی ایجاد شده در آن با افزایش میزان نفوذ سنبه‌ی بارگذاری (تحت اثر بار وارد بر سطح بستر) است. لازم به ذکر است که ادامه‌ی آزمایش‌ها برای مقادیر نفوذ بیش از ۵ یا ۶ میلی‌متر (در اینجا تا ۲۰ میلی‌متر) فقط برای شناخت رفتار خاک



شکل ۱۵. تغییرات ضخامت لایه‌ی خاک ( $u_1/D$ ) با تراکم ۹۷٪ در برابر CBR برای عمق نفوذ ۲/۵ میلی‌متر برای ۲ حالت نمونه‌ی غیرمسلح و مسلح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل.



شکل ۱۶. تغییرات ضخامت لایه‌ی خاک ( $u_1/D$ ) با تراکم ۹۷٪ در برابر CBR برای عمق نفوذ ۵ میلی‌متر برای ۲ حالت نمونه‌ی غیرمسلح و مسلح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل.

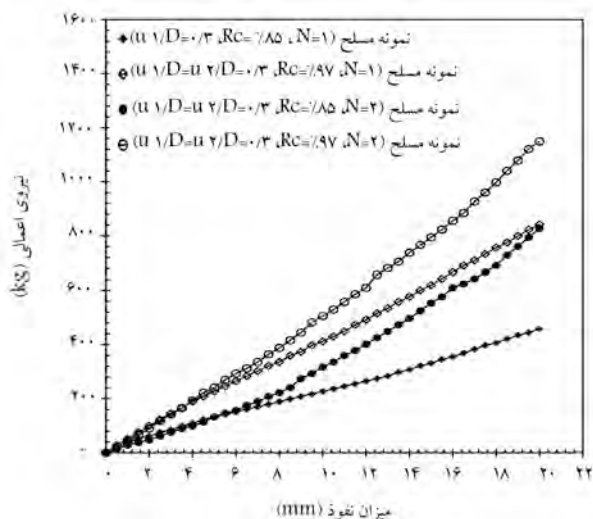


شکل ۱۷. تغییرات بار-نفوذ نمونه‌ی غیرمسلح و مسلح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل در دو حالت مختلف از شرایط تراکم لایه‌ی فوقانی.

مسلح و عملکرد لایه‌ی تسلیح است و در عمل اجازتی اعمال میزان تنش متناظر با این میزان نفوذ داده نمی‌شود. بدیهی است که برای بررسی تأثیر تسلیح در افزایش باربری بستر، براساس آیین‌نامه‌ی طراحی باید مقادیر CBR متناظر با نفوذ سنجه به میزان ۲/۵ و ۵ ملاک طرح قرار گیرد.

مقایسه‌ی کلی شکل‌های ۱۰ الی ۱۴ نشان می‌دهد که قرارگیری لایه‌ی تسلیح در عمق بهینه، یعنی  $u_1/D = 0.3$ ، همراه با تراکم خاک روی آن با تراکم ۹۷٪ بیشترین کارایی یا به عبارتی بالاترین مقدار CBR را نتیجه می‌دهد. بدیهی است در صورت عدم تسلیح خاک، جهت بهبود مقدار CBR بستر، نیاز به جایگزینی ضخامت بیشتری از خاک با تراکم ۹۷٪ خواهد بود. به منظور درک بهتر از اثر توأم تسلیح، ضخامت و تراکم لایه‌ی فوقانی خاک، شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارتباط بین مقادیر CBR با ضخامت لایه‌ی متراکم ( $u_1/D$ ) (لایه‌ی خاک با تراکم ۹۷٪) را به ترتیب برای میزان نفوذ ۲/۵ و ۵ میلی‌متر، در ۲ حالت غیرمسلح و مسلح نشان می‌دهند. مطابق شکل‌های مذکور، اولاً می‌توان افزایش قابل توجه CBR را در حالت مسلح نسبت به حالت غیرمسلح در صورت قرارگیری لایه‌ی تسلیح در محدوده‌ی مؤثر (حدود ۰/۳ تا ۰/۴ قطر سنجه) مشاهده کرد؛ ثانیاً برای دستیابی به یک مقدار CBR مشخص جهت طراحی می‌توان در حالت مسلح از ضخامت کمتری از خاک جایگزین با تراکم موردنظر (در این مطالعات تراکم ۹۷٪) استفاده کرد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم، مقدار CBR در ۲ حالت مسلح و غیرمسلح تقریباً یکسان است که این امر مبین عدم ضرورت تسلیح با افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم جایگزین است. به هر حال جهت دستیابی به CBR هدف، باید انتخاب بستر غیرمسلح با ضخامت بیشتر لایه‌ی خاک جایگزین با بستر مسلح با ضخامت کمتر لایه‌ی از نظر اقتصادی بررسی شود. مثلاً برای دستیابی به CBR برابر ۶ (با عمق نفوذ ۲/۵ میلی‌متر) به ترتیب باید ضخامت لایه‌ی خاک جایگزین با تراکم ۹۷٪ برای بستر غیرمسلح و مسلح ۱/۵ و ۳ سانتی‌متر (متناظر با  $u_1/D$  برابر ۰/۳ و ۰/۶) انتخاب شوند. به‌طور کلی برای افزایش باربری بستر، نیاز به بهبود مقاومت برشی بستر به خصوص لایه‌های واقع در ناحیه‌ی تحت تنش (تحت تنش ناشی از سطح بارگذاری) است. در این خصوص استفاده از لایه‌ی تسلیح در عمق مناسب و تراکم خاک روی آن و یا جایگزینی لایه‌ی خاک فوقانی با ۱ لایه به ضخامت و تراکم موردنیاز می‌تواند مطرح باشد.

به منظور بررسی اثر تراکم لایه‌ی خاک در بالا و پایین لایه‌ی تسلیح، نتایج آزمایش‌ها در حالت غیرمسلح با ۳ سانتی‌متر  $u_1/D = 0.6$  لایه‌ی خاک متراکم، حالت مسلح با ۱/۵ سانتی‌متر  $u_1/D = 0.3$  لایه‌ی خاک متراکم و حالت مسلح با قرارگیری لایه‌ی تسلیح در وسط ۲ لایه‌ی خاک جایگزین به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر ( $u_1 = u_2 = 1.5 \text{ cm}$ ) در بالا و پایین لایه‌ی تسلیح در شکل ۱۷ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با قرارگیری لایه‌ی تسلیح بین ۲ لایه‌ی خاک متراکم به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر، میزان باربری در یک میزان نفوذ مشخص سنجه نسبت به دو حالت دیگر به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. مثلاً، در میزان نفوذ سنجه معادل ۵ میلی‌متر، میزان باربری نسبت به حالت بستر غیرمسلح و حالت بستر مسلح با فقط ۱ لایه‌ی خاک جایگزین در بالای لایه‌ی تسلیح به ترتیب ۷۷٪ و ۳۵٪ افزایش نشان داده است. این امر را می‌توان از یک طرف به اثر افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم جایگزین از ۱/۵ سانتی‌متر به ۳ سانتی‌متر و از طرف دیگر به افزایش اصطکاک لایه‌ی تسلیح با لایه‌ی زیرین و در نتیجه عملکرد بهتر آن نسبت داد. در بررسی مقاومت بیرون کشیدگی لایه‌ی ژئوگرید در خاک رس (۲۰۱۴)، نتایج مشابهی درخصوص



شکل ۱۸. تغییرات بار-نفوذ برای حالت مسلح با ۱ و ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل در عمق ۱/۵ و ۳ سانتی متری با تراکم ۹۷٪ برای لایه‌ی خاک بالا و بین ژئوتکستایل‌ها.

اهمیت وجود ۲ لایه خاک دانه‌یی با تراکم مناسب در بالا و پایین لایه‌ی تسلیح ارائه شده است.

### ۳.۵. اثر تعداد لایه‌ی تسلیح

به منظور بررسی اثر تعداد لایه‌های تسلیح، نتایج آزمایش‌ها برای بستر مسلح با ۱ و ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل در شکل ۱۸ مقایسه شده‌اند. برای حالت تسلیح با ۲ لایه، لایه‌های ژئوتکستایل به ترتیب در اعماق ۱/۵ و ۳ سانتی متری از بالای نمونه (شکل ۶) قرار داده شده‌اند. لایه‌ی خاک بالایی و لایه‌ی خاک مابین ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل، ۱ بار با تراکم ۸۵٪ و بار دیگر با تراکم ۹۷٪ کوبیده شده‌اند.

شکل ۱۸ نشان می‌دهد که در یک میزان مشخص از نفوذ، صرف نظر از تراکم لایه‌های فوقانی خاک، حضور ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل باعث افزایش نیروی قابل تحمل توسط نمونه در مقایسه با حضور ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل می‌شود. همچنین می‌توان گفت تا میزان نفوذ حدود ۴ میلی‌متر، تفاوتی بین بستر مسلح با ۱ و ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل (در شرایط تراکم یکسان لایه‌ها) مشاهده نمی‌شود، اما با افزایش میزان نفوذ، باربری بستر مسلح با ۲ لایه با شیبی قابل ملاحظه در مقایسه با باربری حالت تک‌لایه، رو به افزایش است. این امر مبین آن است که لایه‌ی دوم ژئوتکستایل فقط با افزایش نفوذ سنبه، در افزایش باربری نقش پیدا می‌کند. همچنین با مقایسه‌ی حالت ۱ لایه‌ی تسلیح با تراکم ۹۷٪ برای لایه‌های جایگزین و حالت ۲ لایه بدون افزایش تراکم لایه‌های جایگزین، اهمیت تراکم لایه‌های خاک جایگزین مشخص می‌شود. از این رو با توجه به ملاحظات طراحی و میزان نشست مجاز بستر می‌توان نسبت به استفاده یا عدم استفاده از لایه‌ی زیرین تسلیح تصمیم‌گیری کرد.

### ۶. نتیجه‌گیری

برای بررسی اثر تسلیح بستر و تراکم لایه‌ی خاک جایگزین، تعدادی آزمایش CBR روی خاک ماسه‌یی انجام شده است. که، نتایج زیر قابل بیان است:

- قرارگیری لایه‌ی ژئوتکستایل در فاصله‌ی  $0.3D$  (D قطر سنبه‌ی بارگذاری) نسبت به سطح نمونه، بیشترین تأثیر را در بهبود باربری بستر و مقدار CBR آن دارد. با افزایش فاصله‌ی قرارگیری ژئوتکستایل از سطح نمونه، از تأثیر تسلیح در افزایش مقاومت بستر کاسته می‌شود، به طوری که در فاصله‌ی ۸ سانتی متری از سطح نمونه ( $u_1/D = 1/6$ )، رفتار نمونه‌ی مسلح به حالت غیرمسلح نزدیک می‌شود.
- با افزایش میزان نفوذ سنبه به داخل بستر مسلح، میزان باربری آن افزایش می‌یابد. این امر مبین ضرورت ایجاد نشست در نمونه برای به کار افتادن مقاومت کششی لایه‌ی تسلیح است؛ همچنین حضور ژئوتکستایل، میزان نشست به ازاء یک بار مشخص را کاهش می‌دهد.
- عدد CBR برای خاک مسلح با قرارگیری لایه‌ی تسلیح در عمق بهینه، در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و با قرارگیری لایه‌ی تسلیح در عمق‌های بیشتر از آن، نرخ افزایش CBR کاهش می‌یابد.
- در بستر غیرمسلح، با افزایش ضخامت لایه‌ی خاک جایگزین متراکم (با تراکم ۹۷٪)، می‌توان میزان مقاومت نمونه را افزایش داد. اما به منظور اجتناب از افزایش قابل توجه ضخامت لایه‌ی جایگزین استفاده از لایه‌های تسلیح در فواصل نزدیک به سطح بستر مناسب خواهد بود.
- در صورت تسلیح بستر و افزایش تراکم لایه‌ی خاک جایگزین به طور توأم، با قرارگیری لایه‌ی تسلیح در فاصله‌ی  $0.2D$  الی  $0.4D$ ، تسلیح عامل اصلی افزایش باربری خاک است. با افزایش عمق قرارگیری لایه‌ی تسلیح از سطح نمونه، اثر تراکم خاک غالب خواهد بود به طوری که در  $0.2D$  عملاً تأثیر تسلیح قابل اغماض است.
- در شرایط تراکم و ضخامت یکسان از لایه‌ی جایگزین وجود ۲ لایه‌ی تسلیح، باعث افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت تسلیح با ۱ لایه‌ی ژئوتکستایل می‌شود. در صورت قرارگیری لایه‌ی خاک متراکم در بالای بستر و بین ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل، به علت اثر توأم افزایش تراکم لایه‌های جایگزین و افزایش مقاومت اصطکاکی در سطح تماس خاک و لایه‌ی تسلیح، میزان مقاومت نمونه به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد.
- اگرچه افزایش تراکم لایه‌ی جایگزین و تسلیح می‌تواند موجب افزایش باربری بستر شود، اما به هر حال باید برای رسیدن به یک باربری مشخص، انتخاب گزینه‌ی مناسب با لحاظ کردن مسائل اجرایی و اقتصادی صورت گیرد.

### فهرست علائم

- $D$ : قطر صفحه‌ی بارگذاری؛
- $u_1$ : ضخامت لایه‌ی فوقانی خاک جایگزین؛
- $u_2$ : ضخامت لایه‌ی زیرین خاک جایگزین؛
- $N$ : تعداد لایه‌های ژئوتکستایل؛
- $H$ : ضخامت بستر؛
- $R_c$ : درصد تراکم خاک؛
- $RR$ : نسبت تسلیح؛
- CBR: ظرفیت باربری کالیفرنیا.



## پانوشتها

1. California bearing ratio
2. reinforcement ratio

## منابع (References)

1. Kazi, M., Shukla, S.K. and Habibi, D. "Behaviour of an embedded footing on geotextile-reinforced sand", *Proceedings of the ICE -Ground Improvement*, **169**(2), pp. 120-133 (2015).
2. Saran, S., *Reinforced Soil and Its Engineering Applications (2nd ed.)*, New Delhi: I K, International Publishing House (2013).
3. Singh, P. and Gill, K. "CBR improvement of clayey soil with geogrid reinforcement", *International Journal of Emerging Technology and Advance Engineering*, **2**(6), pp. 315-318 (2012).
4. Shukla, S.K. and Yin, J.H., *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*, London, CRC Press (2006).
5. Holtz, R.D., *Geosynthetic Design & Construction Guidelines*, Participant Notebook, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway (1998).
6. Kamel, M.A., Satish, C. and Kumar, P. "Behaviour of subgrade soil reinforced with geogrid", *The International Journal of Pavement Engineering*, **5**(4), pp. 201-209 (2004).
7. Kourner, M., *Designing with Geosynthetics (5th ed.)*, Prentice-Hall, New Jersey (2005).
8. Dhule, B.S., Valunjkar, S.S., Sarkate, S.D. and Kurran, S.S. "Improvement of flexible pavement with use of geogrid", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **16**, pp. 269-279 (2011).
9. Chakravarti, V.K. and Jyotshna, B. "Effect of overlying coarse aggregate and geosynthetic separation on CBR value for soft subgrade of varying plasticity- a laboratory study", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **2**, pp. 749-755 (2013).
10. Rao, G.V., Gupta, K.K. and Singh, P.B. "Laboratory studies on geotextiles as reinforcement in road pavement", *Proc. of the International Workshop on Geotextile*, Bangalore, pp. 137-143 (1989).
11. Michael, M. and Vinod, P. "California bearing ratio of coir geotextile reinforced subgrade", *10th National Conference on Technological Trends (NCTT09)*, **6-7**, pp. 63-67 (2009).
12. Kumar, P. and Rajkumar, R. "Effect of geotextile on CBR strength of unpaved road with soft subgrade", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **17**, pp. 1355-1363 (2012).
13. Naeini, S.A. and Mirzakhaniari, M. "The effect of geotextile and grading on the bearing ratio of granular soils", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **13**, pp. 1-10 (2013).
14. ASTM D 2487-06., *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, American Society for Testing and Materials (2006).
15. American Society for Testing and Materials (ASTM)., *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D1557-12 (2012).
16. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., *Soil Mechanics*, Wiley Eastern Limited, New Delhi (1979).
17. Patra, C.R., Das, B.M. and Atalar, C. "Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid reinforced sand", *Geotextile and Geomembranes*, **23**(5), pp. 454-462 (2005).
18. Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K. and Madhavi Latha, G. "Model studies on geocell supported embankments constructed over soft clay foundation", *Geotechnical Testing Journal*, **23**(1), pp. 45-54 (2000).
19. ASTM D1883-07., *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*, American Society for Testing and Materials (2007).
20. Abdi, M.R. and Zandieh, A.R. "Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material", *Geotextile and Geomembranes*, **42**(5), pp. 494-504 (2014).