



[www.ElitesJournal.ir](http://www.ElitesJournal.ir)

مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

ISSN 2538-581X

جلد ۲- شماره ۱- سال ۱۳۹۶



## مطالعه اثر ژئوتکستایل بر افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس مسلح شده با ژئوگرید و بررسی همبستگی آن‌ها

محمد مهدی عابدی<sup>۱\*</sup>، محمد علی ارجمند<sup>۲</sup>، البرز حاجیان نیا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار دانشکده عمران، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

\* [mohammadmehdi.abedi@gmail.com](mailto:mohammadmehdi.abedi@gmail.com)

ارسال: فروردین ۹۶ پذیرش: اردیبهشت ۹۶

### خلاصه

افزایش مقاومت برشی و همچنین ظرفیت باربری خاک مسلح شده با ژئوگرید از دو عامل افزایش مدول خاک و مقاومت بالای مسلح کننده در کشش ناشی می‌شود. مقاومت کششی مسلح کننده در درون خاک حاصل از مقاومت اصطکاکی سطح تماس و ایجاد مقاومت پاسیو ایجاد شده در جلو المان‌های متقاطع عرضی ژئوگرید می‌باشد. در خاک رس مسلح شده با ژئوگرید، مقاومت سطح تماس پایین بوده و در نتیجه گسیختگی سطح تماس قبل از رسیدن مقاومت کششی مسلح کننده به حد نهائی رخ می‌دهد. همچنین بدلیل تفاوت فاحش بین اندازه چشمه‌های ژئوگرید در مقایسه با دانه‌های خاک رس، ژئوگرید در محدود نمودن حرکت ذرات و ایجاد مقاومت پاسیو در خاک رس تقریباً بی‌تاثیر است. در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری (UU) در مقیاس بزرگ و CBR، اثر وجود لایه‌های ژئوتکستایل در اطراف ژئوگرید بر بهبود اندرکنش خاک-ژئوگرید و در نتیجه افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری بررسی شده و همچنین ارتباط میان نتایج آنها مورد مطالعه قرار گیرد. این آزمایش‌ها بروی نمونه‌های فاقد مسلح کننده، مسلح شده با لایه‌های ژئوگرید و مسلح شده با لایه‌های ژئوکامپوزیت انجام گرفت. نتایج مطالعات و آزمایش‌ها نشان داد که وجود لایه‌های ژئوتکستایل در اطراف ژئوگرید در تسلیح خاک رس بنحو موثری سبب بهبود اندرکنش سطح تماس و بسیج شدن تنش‌ها بروی ژئوگرید شده و نه تنها باعث ارتقاء پارامترهای مقاومت برشی می‌گردد، بلکه سبب افزایش ظرفیت باربری نیز می‌شود. نتایج پرتونگاری بعمل آمده از نمونه‌های گسیخته شده در آزمون سه‌محوری نیز بوضوح انعکاس صفحه گسیختگی در اثر وجود ژئوکامپوزیت را نشان داد. همچنین بوسیله رابطه‌ای ارتباط میان مقاومت برشی و اعداد CBR بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: رس، ژئوکامپوزیت، سه محوری، اندرکنش سطح تماس، CBR، همبستگی.

### ۱. مقدمه

در دهه‌های گذشته روش خاک مسلح اکثراً با استفاده از مصالح خاک درشت دانه بعنوان خاکریز<sup>۱</sup> بکار گرفته شده است. اخیراً<sup>۱</sup> بدلیل ملاحظات اقتصادی، لزوم استفاده از مصالح ریزدانه و خاکریزهای با کیفیت پائین و قابل دسترس محلی، امری

<sup>1</sup> -Backfill materials

اجتناب ناپذیر است [۱]. بطور کلی برای خاک در سطح تماس با مسلح کننده ژئوگرید، امکان وقوع یکی از دو مکانیزم زیر وجود خواهد داشت [۲]:

۱- بسیج شدن کلیه تنش‌ها به صورت تنش کششی در المان مسلح کننده، که تقریباً فقط در خاک‌های درشت دانه که اندرکنش مناسبی با عامل تسلیح دارند، ایجاد میگردد و در صورت وقوع این حالت، مقاومت خاک مسلح به مقاومت کششی مسلح کننده محدود خواهد شد.

۲- وقوع لغزش خاک بروی ژئوگرید به دلیل کم بودن مقاومت سطح تماس خاک - مسلح کننده، که در خاک‌های رسی و علی‌الخصوص اشباع بدلیل اندرکنش نامناسب خاک-ژئوگرید و ضعف مقاومتی خاک مجاور آن روی می‌دهد. در این حالت مسلح کننده همانند یک صفحه بدون استفاده در توده خاک عمل خواهد کرد، که به این مکانیزم گسیختگی، گسیختگی برشی<sup>۱</sup> در سطح تماس گفته می‌شود که قبل از بسیج شدن تمامی مقاومت کششی مسلح کننده بوقوع می‌پیوندد [۳]. به همین دلیل عمدتاً طرح تسلیح با بازدهی مناسبی برای خاک‌های رسی و ریزدانه وجود ندارد.

بنابراین هدف از انجام این پژوهش آنست تا با قراردادن لایه‌های ژئوتکستایل در دو طرف ژئوگرید، امکان بهبود شرایط اندرکنش در سطح تماس خاک-ژئوگرید بوسیله ژئوتکستایل، و در نهایت افزایش مقاومت خاک را ارزیابی نمود. احتمال این بهبود زمانی قوت بیشتر خواهد گرفت که بدانیم بیشترین تنش‌های برشی در اطراف مسلح کننده بوده و با دور شدن از آن به سرعت کاهش می‌یابد [۴]، بعلاوه اینکه بدلیل نفوذ ذرات رس در منافذ ژئوتکستایل، با وجود مقاومت کششی پایین، غالباً از آن جهت تسلیح خاک‌های رسی استفاده شده است [۵].

لذا به نظر می‌رسد در صورت بکارگیری لایه‌های ژئوتکستایل در اطراف عوامل تسلیح در خاکریزهای با کیفیت پائین، بدلیل مقابله با تنش‌های برشی بالا در نزدیکی سطح تماس، شرایط اندرکنش نیز بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته و سبب بسیج شدن تنش‌ها در سطح ژئوگرید گردد.

تا به حال اکثر تحقیقات انجام شده به منظور ارزیابی اندرکنش سطح تماس خاک - ژئوسینتتیک بر روی توده‌های غیرچسبنده شنی و ماسه‌ای متمرکز شده و تحقیقات کمتری بر روی خاکهای چسبنده انجام شده است. فابین و فوریه در سال (۱۹۸۶) با بهره گیری از مسلح کننده‌هایی با نفوذ پذیری مختلف و با استفاده از آزمون سه محوری به ارزیابی اثر نفوذپذیری بر مقاومت خاک زهکشی نشده خاک رس مسلح پرداختند [۶].

لافلور و همکارانش در سال (۱۹۸۷) نیز با انجام یک سری آزمونهای برش مستقیم به مطالعه و مقایسه اثر ژئوتکستایل بافته شده و بافته نشده در مقاومت برشی خاک رس مسلح پرداختند [۷]. کریشناوامی و ردی در سال (۱۹۸۸) با انجام آزمایشات سه محوری زهکشی نشده بروی رس سیلتی مسلح شده با ژئوتکستایل بیان نمودند که فاصله بین لایه های مسلح کننده همچون رطوبت از عوامل تاثیر گذار در میزان مقاومت خاک رس تسلیح شده می باشد [۸]. سیرواستاوا و همکارانش در سال (۱۹۸۸) با انجام آزمایشات سه محوری به بررسی و ارزیابی اثر فشار جانبی، تعداد لایه های مسلح کننده و همچنین نسبت ارتفاع به قطر نمونه در میزان افزایش مقاومت خاک سیلتی مسلح شده با ژئوتکستایل پرداختند [۹].

ایندرانانتا و همکارانش نیز در سال (۱۹۹۱) با انجام آزمایشات سه محوری (UU) بروی نمونه های رس سیلتی فاقد مسلح کننده و مسلح شده با ژئوتکستایل بافته شده و بافته نشده رفتار آنها را با هم مقایسه نمودند [۱۰]. اثر ژئوتکستایل بافته نشده نیز در تسلیح خاک رس سیلتی اشباع توسط لینگ و تاتسوکا در سال (۱۹۹۳) بوسیله دستگاه کرنش صفحه ای مورد مطالعه قرار گرفت [۱۱]. رفتار خاک رس مسلح شده با ژئوتکستایل نیز با استفاده از آزمون سه محوری تحت بارگذاری یکنواخت و دوره ای<sup>۲</sup> توسط یونیکریشمان و همکارانش در سال (۲۰۰۲) مورد مطالعه قرار گرفت [۱۲].

<sup>1</sup> - Direct shear mode

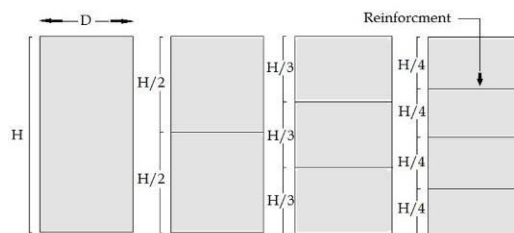
<sup>2</sup> - static and cyclic loading

وینود و همکارانش نیز در سال (۲۰۰۷) با انجام آزمایشات سه محوری زهکشی نشده بروی نمونه های رس مسلح شده با الیاف زبر شده بوسیله ماسه<sup>۱</sup> به بررسی اثر ضخامت لایه ماسه و میزان رطوبت آن در مقاومت خاک رس مسلح شده پرداختند [۱۳]. ارجمند و همکارانش در سال ۱۳۹۳ با اصلاح دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس و انجام آزمایشهای بیرون کشش به ارزیابی رفتار اندرکنش خاک - مسلح کننده پرداختند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که در برش مستقیم بخش کمی از مقاومت ژئوگرید بسیج شده و بخش اعظم مقاومت بلااستفاده باقی می ماند [۱۴]. طهماسبی و همکارانش در سال ۱۳۹۴ با استفاده از روش المان محدود و با بهره گیری از المان های دوبعدی به روش کرنش صفحه ای به کمک نرم افزار Plaxis نشان دادند که حضور یک لایه نازک مصالح اصطکاکی در اطراف المان تسلیح باعث بهبود مقاومت برشی سطحی المان تسلیح میگردد که در نهایت منجر به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست شالوده در ضخامت بهینه ماسه اطراف مسلح کننده ها میشود [۱۵]. در سال ۱۳۹۵ نیز صلاح اصفهانی و همکارانش با انجام آزمایش های سه محوری به بررسی اثر قرارگیری لایه های ماسه در اطراف مسلح کننده بر بهبود اندرکنش خاک - مسلح کننده پرداختند [۱۶]. از جمله سایر مطالعات انجام شده در این زمینه میتوان به تحقیقات هاستون و همکارانش در سال (۲۰۰۸)، سوایدا و همکارانش (۲۰۰۹)، نورزاد و میرمرادی (۲۰۱۰)، عبدی و ارجمند (۲۰۱۱) و مطالعات کارلوس و همکارانش در سال (۲۰۱۶) اشاره کرد [۱۷-۲۱]. درین پژوهش سعی شده تا با انجام آزمون های سه محوری بزرگ مقیاس و همچنین CBR، اثر قرارگیری لایه های ژئوتکستایل در اطراف ژئوگرید، بر بهبود اندرکنش و در نهایت مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس کائولینیت بررسی شده و با استفاده از رابطه ای همبستگی میان نتایج آنها ارزیابی شود.

## ۲. برنامه های آزمایشگاهی

### ۲.۱. آزمایشات سه محوری و CBR

به منظور بررسی اثر وجود لایه ژئوتکستایل در بهبود اندرکنش خاک-ژئوگرید و استفاده از آنها به عنوان ژئوکامپوزیت در مسلح نمودن خاک های رس جهت افزایش میزان مقاومت برشی و ظرفیت باربری، آزمون های CBR و آزمایش های بزرگ مقیاس سه محوری در حالت UU بروی نمونه هایی به قطر ۱۵/۲ ( قطر قالب CBR) در شرایط کاملاً یکسان به ترتیب در حالات: ۱- فاقد مسلح کننده، ۲- یک لایه ژئوگرید در وسط، ۳- دو لایه ژئوگرید به فاصله H/۳، ۴- سه لایه ژئوگرید به فاصله H/۴، ۵- یک لایه ژئوکامپوزیت در وسط، ۶- دو لایه ژئوکامپوزیت به فاصله H/۳ و ۷- سه لایه ژئوکامپوزیت به فاصله H/۴ مطابق شکل (۱) صورت گرفته است.



شکل ۱- چگونگی قرارگیری لایه های مسلح کننده

در آزمون های سه محوری جهت رسم دوائر موهر و دستیابی به مقادیر پارامترهای مقاومت برشی در هر یک از حالات تسلیح، آزمایش با استفاده از ۳ فشار جانبی ۱/۵، ۳ و ۴/۵ kg/cm<sup>۲</sup> و با نرخ ثابت بارگذاری ۰/۶۴ mm/min برای حالت (UU) انجام گرفته است. کلیه آزمایشات UU و CBR مانند آنچه که کارلوس و همکارانش در انجام آزمایشات و تحقیقات خود لحاظ کرده اند، در حالت رطوبت بهینه و تراکم ماکزیمم صورت گرفته است [۲۱].

<sup>1</sup> - sand-coir fiber cores

دلیل این امر آنست که جهت دستیابی به کارایی مثبت یک طرح مسلح سازی می‌بایست برای در نظر گرفتن بدترین شرایط، بیشترین مقاومت خاک در حالت عادی را با مقاومت همان نمونه در وضعیت تسلیح مقایسه نمود. فلذا از آنجایی که بیشترین مقاومت نمونه فاقد مسلح کننده در حالت رطوبت بهینه و تراکم حداکثر رخ می‌دهد، در آزمایشات نیز از همین شرایط استفاده شده است. آزمون سه‌محوری مطابق استاندارد ASTM:D2850 و آزمون CBR براساس استاندارد ASTM D1883-16 انجام شده است. شکل (۲) سلول ۶ اینچی مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سلول های ۶ اینچی مورد استفاده

تصاویری از تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات سه محوری و مراحل تهیه نمونه در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳- تجهیزات مورد استفاده و مراحل ساخت نمونه

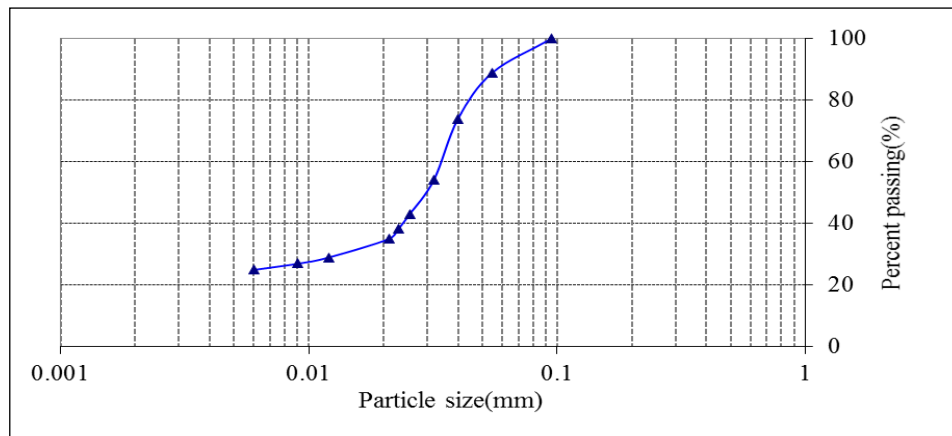
## ۲.۲ مصالح خاکی

خاک مورد استفاده درین پژوهش از نوع رس کائولینیت می‌باشد خصوصیات این خاک مطابق معیارهای استاندارد ASTM مربوطه تعیین گردیده که در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به توزیع دانه بندی خاک و نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ، این خاک بر اساس سیستم طبقه بندی یونیفاید خاک (USCS) در رده CL قرار دارد.

جدول ۱- خصوصیات خاک رس مورد استفاده

نوع خاک	شرح	استاندارد	مقدار
رس کائولینیت	حد روانی	ASTM D4318	۴۶٪
	حد خمیری	ASTM D4318	۲۶/۳٪
	نشانه خمیری	ASTM D4318	۱۹/۷٪
	رطوبت بهینه	ASTM D698	۲۲/۵٪
	دانسیته خشک حداکثر	ASTM D698	۶۲/۱ (g/cm <sup>3</sup> )

در شکل (۴) توزیع دانه بندی خاک رس مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار توزیع دانه بندی خاک رس مورد استفاده

## ۳.۲ ژئوسنتیک‌های مصرفی

ژئوگرید مورد استفاده از نوع SQ/6 و متعلق به شرکت مشیران بوده و ژئوتکستایل مصرفی نیز از نوع بافته نشده و محصول شرکت Husker آلمان می‌باشد که مشخصات آنها در جدول (۲) آمده است. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ژئوسنتیک‌ها آزمون‌های آزمایشگاهی بر اساس استانداردهای مربوطه انجام گردید. شکل (۵) نیز ژئوتکستایل مورد استفاده در فرآیند آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲- خصوصیات ژئوستتیک های مورد استفاده

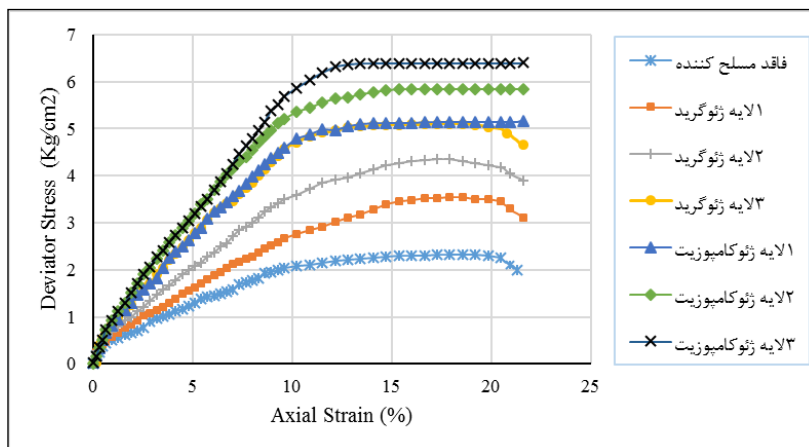
ژئوستتیک	شرح	استاندارد	مقدار/ نشانه
ژئوگرید SQ/6	مواد اولیه	-	PET
	پوشش	-	Polymer
	مقاومت کششی نهایی در جهت طولی (T <sub>ult</sub> )	EN ISO 103 19	(kN/m)۲۵/۸
	مقاومت کششی نهایی در جهت عرضی (T <sub>ult</sub> )	EN ISO 103 19	(kN/m)۲۵/۸
	کرنش در مقاومت کششی اسمی در جهت طولی و عرضی	EN ISO 103 19	(%)۱۰/۵
ژئوتکتایل Husker B40	مقاومت کششی نهایی در جهت طولی و عرضی	EN ISO 103 19	(kN/m) ۱۲/۵
	کرنش در مقاومت کششی اسمی در جهت طولی و عرضی	EN ISO 103 19	(%)۳۰

### ۳. تحلیل نتایج

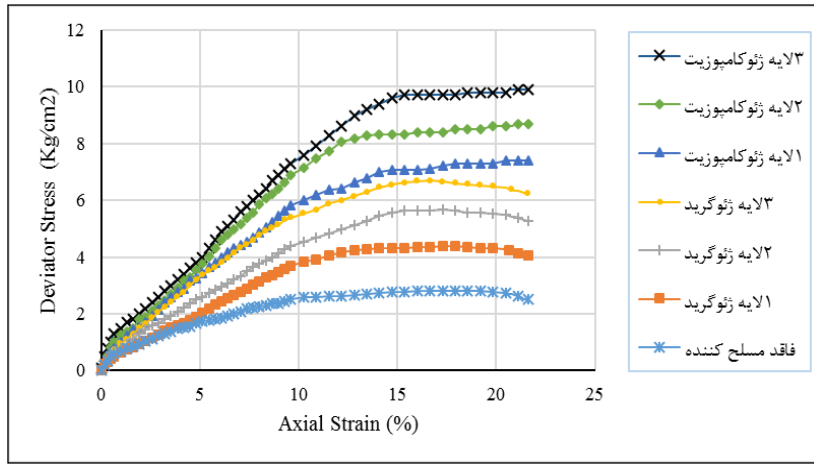
در این بخش نتایج آزمایشات سه محوری، CBR، ارتباط بین نتایج آنها و نتایج پرتونگاری انجام شده مورد بحث و بررسی قرار میگیرد.

#### ۳.۱. نمودارهای تنش- کرنش

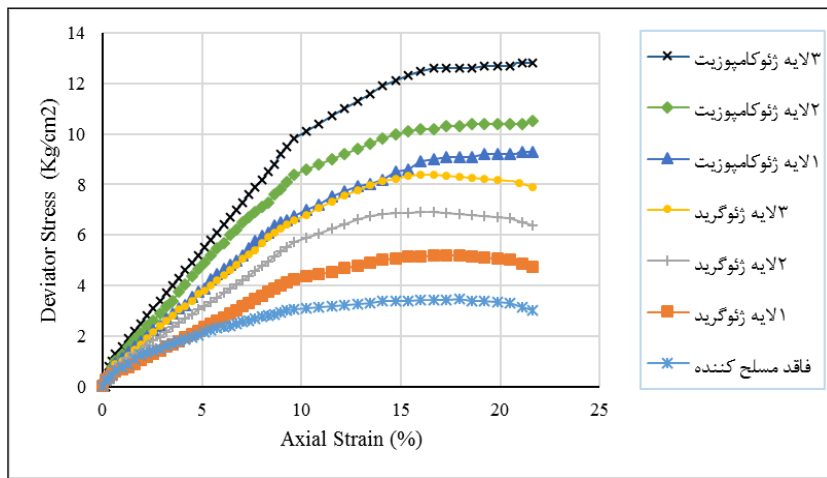
نمودار تنش- کرنش برای نمونه رس در حالات مختلف تسلیح در فشارهای جانبی  $1/5$ ،  $3$  و  $4/5$   $kg/cm^2$  به ترتیب در شکل های (۵)، (۶) و (۷) برای حالت UU نشان داده شده است. منحنی اول یا پایین ترین منحنی در این نمودارها مربوط به نمونه رس فاقد مسلح کننده و منحنی های بعدی مربوط به نمونه مسلح شده با ۱، ۲ و ۳ لایه ژئوگرید می باشد که همگی دارای نقطه پیک تنش برشی هستند که نشان دهنده گسیختگی سطح تماس خاک- ژئوگرید قبل از رسیدن مسلح کننده به مقاومت کششی نهایی خود است. Liu و همکاران در سال (۲۰۰۹) با انجام آزمایش های برش مستقیم روی نمونه های رس- ژئوگرید دقیقاً رفتار مشابه را گزارش نمودند [۲۲]. بالاترین منحنی ها نیز مربوط به نمونه مسلح شده با ۱، ۲ و ۳ لایه ژئوگرید در برگرفته شده با ژئو تکتایل (ژئوکامپوزیت) می باشد که فاقد نقطه تنش حداکثر بوده و تنش های برشی حتی در پایان آزمایش ها سیر صعودی با شیب خیلی کم را نشان می دهند. این رفتار بیانگر بسیج شدن تنش ها در سطح مسلح کننده و استفاده از ظرفیت کششی ژئوگرید بدلیل بهبود شرایط اندر کنش در اثر وجود ژئوتکتایل می باشد.



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش در فشار جانبی  $\sigma_3 = 1/5$ ، حالت UU

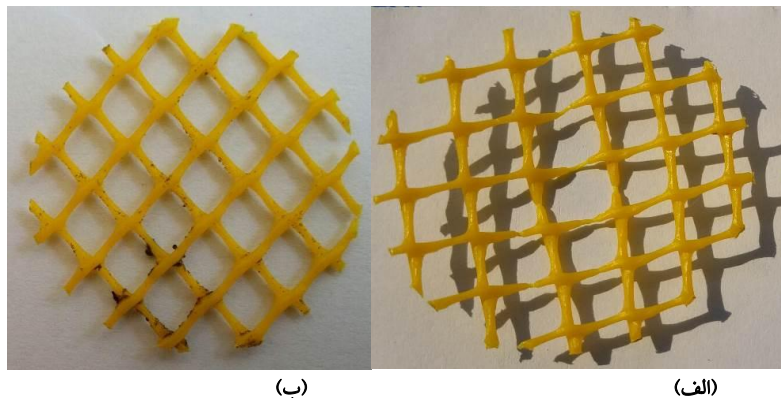


شکل ۶- نمودار تنش- کرنش در فشار جانبی  $\sigma_3 = 3$ ، حالت UU



شکل ۷- نمودار تنش- کرنش در فشار جانبی  $\sigma_3 = 4/5$ ، حالت UU

از مقایسه منحنی نمونه‌های مسلح شده بوسیله لایه‌های ژئوگرید با منحنی نمونه‌های مسلح شده بوسیله لایه‌های ژئوکامپوزیت دربرگرفته شده با ژئوتکستایل؛ بصورت نظیر به نظیر، مشاهده می‌شود همانگونه که انتظار میرفت وجود ژئوتکستایل در اطراف ژئوگرید سبب بهبود شرایط تماس و اندرکنش خاک-ژئوگرید گردیده و در نهایت باعث بهبود مقاومت برشی خاک شده است. وجود اثرات کشیدگی و کرنش در ژئوگرید در بر گرفته شده با ژئوتکستایل که در شکل (۸) نشان داده شده نیز مبین همین امر می باشد این در حالیکه ژئوگرید استخراج شده از نمونه مسلح شده با صرفاً ژئوگرید، کاملاً سالم و فاقد هرگونه اثرات کرنش است.



شکل ۸- (الف): ژئوگرید استخراج شده از نمونه مسلح شده با ژئوگرید. (ب): ژئوگرید استخراج شده از نمونه مسلح شده با ژئوکامپوزیت

نکته بارز دیگری که از نمودارها میتوان دریافت، اثر وجود لایه های ژئوتکستایل در اطراف ژئوگرید بر افزایش شیب ناحیه خطی و در نتیجه افزایش مدول الاستیسیته خاک است. این امر با نتایج کارلوس و همکارانش که در سال (۲۰۱۶) نمونه رس مسلح شده با ژئوتکستایل را از طریق آزمون سه محوری مورد ارزیابی قرارداد داده بودند مطابقت دارد [۲۱].

از مقایسه نمودارها در فشارهای جانبی متفاوت در می یابیم که بطور کلی مانند آنچه که نورزاد و میرمادی در سال (۲۰۱۶) در مورد خاک رس تسلیح شده با ژئوتکستایل گزارش نمودند [۲۰]، با افزایش فشار جانبی تنش های قابل تحمل توسط نمونه ها در شرایط تسلیح مختلف افزایش میابد. اما نکته جالب توجه آنست که این میزان افزایش در نمونه های مسلح شده با ژئوکامپوزیت بیشتر است بعبارت دیگر نمونه های مسلح شده با صرفاً ژئوگرید حساسیت چندانی نسبت به افزایش مقدار تنش جانبی از خود بروز نمیدهند، که دلیل این امر را میتوان عدم وجود اصطکاک و اندر کنش کافی میان خاک-ژئوگرید دانست. میزان افزایش تنش قابل تحمل توسط نمونه مسلح شده با ۱ لایه ژئوگرید در برگرفته شده با ژئوتکستایل (ژئوکامپوزیت) نسبت به نمونه مسلح شده با صرفاً ژئوگرید برای فشار جانبی  $1/5 \text{ kg/cm}^2$  در حدود  $44/5\%$  و برای فشار جانبی  $4/5 \text{ kg/cm}^2$  در حدود  $71\%$  می باشد.

### ۲.۳. مقادیر پارامترهای مقاومت برشی

مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و چسبندگی (C) برای حالت (UU) در جدول (۳) آورده شده است. همانگونه که قیاسیان و همکارانش در سال (۲۰۰۴) و همچنین شین در سال (۱۹۹۳) گزارش نمودند مقاومت برشی مسلح کننده- خاک در سطح تماس بدلیل ایجاد مقاومت اصطکاکی بین مسلح کننده و خاک و همچنین مقاومت مقاوم (پاسیو) توسعه یافته در بین المانهای متقاطع عرضی ژئوگرید تامین می گردد که هر دو عامل بویژه مقاومت مقاوم موجب تاثیر بر زاویه اصطکاک داخلی خاک میشود [۲۳، ۲۴].

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مقاومت برشی در حالت (UU)

وضعیت تسلیح	تعداد لایه	مقادیر C (Kg/cm <sup>۲</sup> )	مقادیر $\Phi$ (درجه)
فاقد مسلح کننده	-	۰.۷۴	۹.۰۵
تسلیح شده با ژئوگرید	۱	۱.۰۸	۱۲.۹
	۲	۱.۱۴	۱۷.۷
	۳	۱.۱۸	۲۱.۰۴
تسلیح شده با ژئوکامپوزیت	۱	۱.۱۳	۲۲.۳
	۲	۱.۰۴	۲۷.۲
	۳	۰.۹۹	۳۰.۱

میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی در حالت (UU) برای نمونه مسلح شده با ۱، ۲ و ۳ لایه ژئوگرید در برگرفته شده با ژئوتکستایل (ژئوکامپوزیت) نسبت به نمونه مسلح شده با صرفاً ژئوگرید به ترتیب برابر  $72/8\%$ ،  $53/6\%$  و  $43\%$  می باشد. یکی از دلایل این اختلاف، تفاوت فاحش بین اندازه چشمه های ژئوگرید در مقایسه با اندازه دانه های خاک رس می باشد. ژئوگرید در حالت عادی می بایست حرکت دانه های خاک را محدود نموده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت اصطکاکی بسیج شده در نقاط تماس دانه ها و بنابراین بهبود مقاومت سیستم خاک مسلح گردد، اما بدلیل ریز بودن دانه های رس، ژئوگرید در محدود نمودن حرکت ذرات تقریباً بی تاثیر است. ولی قرارگیری لایه های ژئوتکستایل در فصل مشترک خاک-ژئوگرید منجر به بهبود اندرکنش آنها شده و تنش های وارده به صورت تنش های کششی در سطح مسلح کننده بسیج می شوند. این امر سبب میشود تا از بلا استفاده ماندن ظرفیت ژئوگرید در خاک جلوگیری بعمل آمده و موجب بهبود چشمگیر ویژگیهای مکانیکی و پارامترهای مقاومت برشی خاک رس شود.

روند تغییرات میزان چسبندگی نیز ابتدا افزایشی و سپس رو به کاهش است. چسبندگی بدست آمده در وضعیت تسلیح با

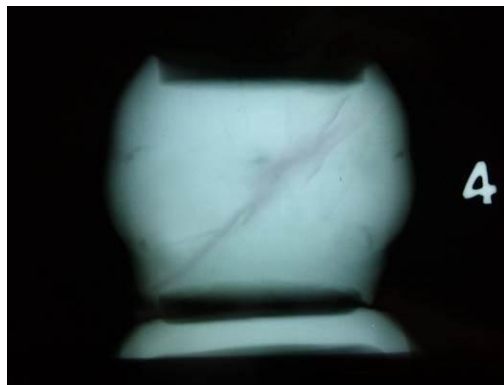


ژئوگرید احتمالا ناشی از تماس خاک با خاک در چشمه‌های باز ژئوگرید و همچنین وجود عامل مکش در نمونه مسلح شده با ژئوکامپوزیت است. مشاهدات عینی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌ها نشان داده که الیاف ژئوتکستایل و ذرات رس بخوبی در داخل یکدیگر نفوذ کرده و اتصال بسیار مناسبی را در سطح تماس ایجاد نموده است.

بطور کلی کاسته شدن از شیب روند افزایشی مقادیر پارامترهای مقاومت برشی در اثر افزایش تعداد لایه‌های ژئوکامپوزیت حاکی از وجود فاصله بهینه در بین لایه‌های مسلح کننده است. به نظر میرسد این فاصله بهینه با ویژگی‌های خاک رس، خصوصیات ژئوکامپوزیت و میزان رطوبت در ارتباط باشد. همچنین می‌توان گفت که فراهم نمودن لایه‌های ژئوکامپوزیت در داخل خاکریزهای رسی نه تنها باعث افزایش مقاومت برشی این خاک‌ها خواهد شد بلکه می‌تواند به عنوان لایه‌های زهکشی افقی عمل نموده و از ایجاد فشارهای آب حفره‌ای در صورت اشباع شدن خاکریز جلوگیری به عمل آورند.

### ۳.۳. نتایج رادیوگرافی

پس از انجام آزمایشات، جهت بررسی وضعیت صفحه گسیختگی در حضور ژئوگرید و ژئوکامپوزیت نمونه‌ها مورد پرتونگاری قرار گرفتند. این تصاویر توسط تیوب اشعه ایکس و با استفاده از تکنیک  $SWSI^1$ ، فیلم کدک (MX125)، فیلم فاکتور  $120^2$ ، ولتاژ  $70Kv$ ،  $SFD^3=0.8m$ ،  $Ug^4=.025$  و  $Exposure\ Time=45s$  و با بهره‌گیری از امکانات کامل حفاظت فردی و محیطی تهیه گردیده است. شکل شماره (۹) مربوط به نمونه مسلح شده با یک لایه ژئوگرید و شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب تصاویر نمونه‌های مسلح شده با یک و دو لایه ژئوکامپوزیت را نشان می‌دهد. این تصاویر پس از خشک شدن نمونه‌ها و ظهور ترک‌ها بعد از آزمون (UU) تهیه گردیده است.



شکل ۹- نمونه مسلح شده با یک لایه ژئوگرید



شکل ۱۰- نمونه مسلح شده با یک لایه ژئوکامپوزیت

<sup>1</sup> - Single Wall Single Image

<sup>2</sup> - Film Factor

<sup>3</sup> - Source to Film Distance

<sup>4</sup> - Unharness Geometric

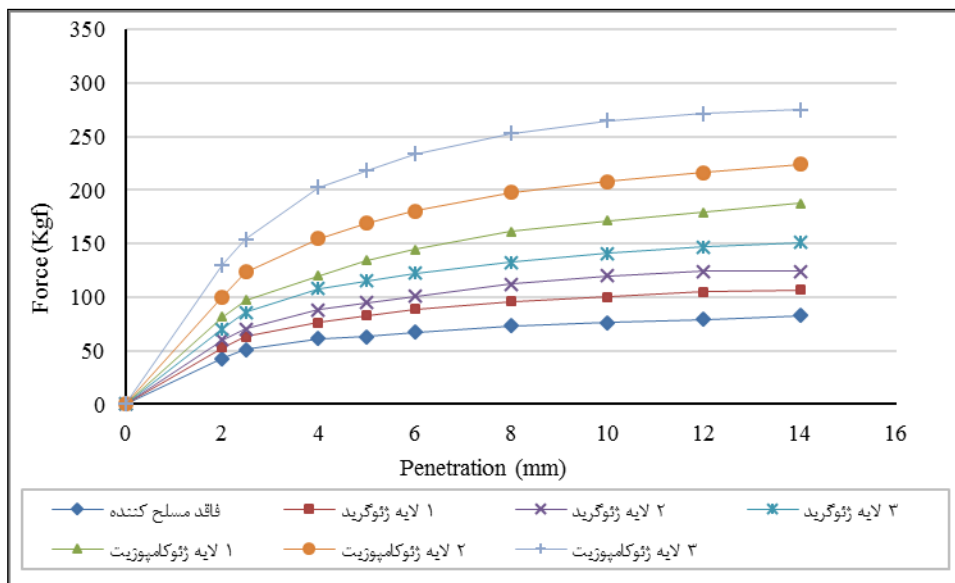


شکل ۱۱- نمونه مسلح شده با دو لایه ژئوکامپوزیت

این تصاویر نشان می‌دهند صفحه گسیختگی فقط در محل حضور مسلح کننده ژئوکامپوزیت، دچار انعکاس یا حالت Mirror نسب به المان مسلح کننده می‌شود و وجود لایه‌های ژئوگرید تاثیری بر تغییر وضعیت صفحه گسیختگی ندارد. دلیل این امر را میتوان عدم توانایی ژئوگرید در محدود نمودن حرکت ذرات خاک دانست اما قرارگیری لایه های ژئوتکستایل در فصل مشترک خاک- ژئوگرید منجر به بهبود اندرکنش و افزایش مقاومت اصطکاکی بسیج شده در نقاط تماس دانه ها می گردد.

#### ۴.۳. نتایج آزمون CBR

نتایج آزمون های CBR نیز در قالب نمودار نیرو-نفوذ در شکل (۱۲) و اعداد CBR در جدول (۴) بیان شده است.



شکل ۱۲- نمودار نیرو-نفوذ برای نمونه رس در حالات مختلف تسلیح

نتایج آزمون CBR نیز بوضوح اثر لایه های ژئوتکستایل بر بهبود اندرکنش خاک-ژئوگرید و در نهایت افزایش نیروی لازم جهت نفوذ سمبه را نشان می‌دهد. در حالتی که نمونه با لایه‌های ژئوکامپوزیت مسلح گردیده بخشی از نیرویی که می‌توانست به لایه‌های زیرین اعمال شود، بواسطه لایه‌های ژئوکامپوزیت به خاک مجاور آن انتقال می‌یابد [۲۵].

جدول ۴- مقادیر اعداد CBR برای حالات مختلف تسلیح

وضعیت تسلیح	تعداد لایه مسلح کننده	رطوبت اولیه (%)	رطوبت پایانی (%)	CBR (0.1)	CBR (0.2)
فاقد مسلح کننده	۰	۲۲.۴	۲۲.۴	۳.۱	۳.۶
مسلح شده با ژئوگرید	۱	۲۲.۴	۲۲.۴	۴	۴.۶
	۲	۲۲.۴	۲۲.۱	۴.۴	۴.۹
	۳	۲۲.۴	۲۲	۵.۱	۵.۴
مسلح شده با ژئوکامپوزیت	۱	۲۲.۴	۲۱.۹	۵.۶	۶.۳
	۲	۲۲.۴	۲۱.۶	۷.۲	۸.۱
	۳	۲۲.۴	۲۱.۴	۹	۱۰.۷

میزان افزایش عدد CBR برای نمونه مسلح شده با ۱، ۲ و ۳ لایه ژئوگرید در برگرفته شده با ژئوتکستایل (ژئوکامپوزیت) نسبت به نمونه مسلح شده با صرفاً ژئوگرید به ترتیب برابر ۴۰٪، ۶۵٪ و ۹۸٪ می باشد.

### ۵.۳. همبستگی<sup>۱</sup> و ارتباط میان پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمون سه محوری و اعداد CBR

یکی از اهداف این پژوهش بیان ارتباطی میان مقاومت برشی و ظرفیت باربری نمونه خاک رس در وضعیت تسلیح است. دانیستانند و همکارانش در سال (۲۰۱۰) رابطه (۱) را برای تبدیل مقاومت برشی به عدد CBR بری خاک های رس CL بیان نمودند [۲۶].

$$CBR = 0.56 S_u^{1.07} \quad (1)$$

که در آن  $S_u$  مقاومت برشی زهکشی نشده و CBR عدد CBR بیشتر از میان  $CBR(0.1)$  و  $CBR(0.2)$  می باشد. پس از تبدیل پارامترهای مقاومت برشی بدست آمده از آزمون سه محوری به اعداد CBR از رابطه (۱)، مقادیر بدست آمده جهت مقایسه در جدول (۵) بیان شده است.

جدول ۵- همبستگی پارامترهای مقاومت برشی و اعداد CBR از طریق رابطه (۱)

وضعیت تسلیح	عدد CBR بدست آمده از آزمون CBR	عدد CBR بدست آمده از پارامترهای مقاومت برشی	اختلاف میانگین (%)
فاقد مسلح کننده	۳.۶	۱.۱۷	۱۰۲
۱ لایه ژئوگرید	۴.۶	۲	۷۸
۲ لایه ژئوگرید	۴.۹	۲.۹	۵۱
۳ لایه ژئوگرید	۵.۴	۳.۹	۳۲
۱ لایه ژئوکامپوزیت	۶.۳	۵.۴	۱۵
۲ لایه ژئوکامپوزیت	۸.۱	۷.۷	۵
۳ لایه ژئوکامپوزیت	۱۰.۷	۱۰.۴	۲

همان گونه ملاحظه می شود رابطه (۱) رابطه چندان مناسبی جهت ایجاد ارتباط و تبدیل پارامترهای مقاومت برشی به عدد CBR و ظرفیت باربری برای نمونه های رسی فاقد مسلح کننده یا مسلح شده با ژئوگرید نمی باشد. اما با مسلح نمودن نمونه رسی بوسیله ژئوکامپوزیت و افزایش تعداد لایه های آن بویژه برای حالت تسلیح با سه لایه ژئوکامپوزیت می توان از این رابطه با تقریب مناسبی برای ایجاد همبستگی میان پارامترهای مقاومت برشی و عدد CBR استفاده نمود.

<sup>1</sup> - correlation

## ۱۱. نتیجه گیری

بخش اعظم مقاومت ژئوگرید در حین گسیختگی سطح تماس در نمونه مسلح شده با ژئوگرید بلااستفاده باقی می ماند. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان می دهند که در برگرفتن ژئوگرید توسط لایه های ژئوتکستایل بطور قابل توجهی مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس را از طریق افزایش اندرکنش سطح تماس بهبود می بخشد.

با مسلح نمودن خاک و افزایش تعداد لایه های مسلح کننده و همچنین بهبود شرایط اندرکنش مقدار مدول الاستیسیته و ظرفیت باربری خاک افزایش می یابد. افزایش تعداد لایه های مسلح کننده همچنین سبب کاهش میزان کرنش گسیختگی شده که نشان دهنده تضعیف رفتار پلاستیک خاک می باشد.

در آزمون سه محوری، تنش های برشی با افزایش تنش همه جانبه افزایش یافته و شیب منحنی های تنش-کرنش در مراحل اولیه آزمایش بیشتر و با افزایش میزان جابجایی های برشی تدریجاً کاهش می یابند. مشاهده عینی سطح گسیختگی نمونه ها پس از انجام آزمایش نشان داده که ذرات رس به داخل ژئوتکستایل نفوذ و اتصال خوبی در سطح تماس بوجود آمده است. کاهش تنش برشی در خاک با فاصله گرفتن از مسلح کننده باعث می گردد که این تنش ها به راحتی توسط سطح تماس رس-ژئوتکستایل جذب گردد. نتایج پرتونگاری بعمل آمده از نمونه های گسیخته شده حاکی از آن بود که صفحه گسیختگی فقط در محل حضور مسلح کننده ژئوکامپوزیت، دچار انعکاس یا حالت Mirror نسبت به المان مسلح کننده می شود و وجود لایه های ژئوگرید تاثیری بر تغییر وضعیت صفحه گسیختگی ندارد.

رابطه  $(CBR = 0.56 S_u^{1.07})$  چندان مناسبی جهت تبدیل پارامترهای مقاومت برشی به عدد CBR برای نمونه های رسی فاقد مسلح کننده یا مسلح شده با ژئوگرید نمی باشد. اما با مسلح نمودن نمونه رسی بوسیله ژئوکامپوزیت و افزایش تعداد لایه های آن بویژه برای حالت تسلیح با سه لایه ژئوکامپوزیت می توان از این رابطه با تقریب مناسبی برای ایجاد همبستگی میان پارامترهای مقاومت برشی و عدد CBR استفاده نمود.

## ۱۲. مراجع

1. Bergado, d.T., Sampaco, C.L., Shivashankar, R, Alfaro, M.C, Anderson, L.R. & Balasubramaniam, A.S, (1991). Performance of a welded wire wall with poor quality backfills on soft clay, *In Proceedings of ASCE 1991 Geotechnical Engineering Congress, Boulder, CO, USA, ed. F.G. McLean, D.A. Campbell & D.W. Harris. ASCE Geotechnical Special Publication. (27)*, 908-922.
2. Saez, J. (1997). Curso sobre técnicas generales de refuerzo del terreno y sus aplicaciones, *Caracterización geomecánica de geotextiles, Madrid, Espanha: Centro de estudios y experimentación de obras publicans.*
3. Abdi, M.R., Zandieh, A.R. (2014). Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(5), 492-504.
4. Al-Omari, R.R., Al-Dobaissi, H.H., Nazhat, Y.N., Al-Wadood, B.A. (1988). Shear strength of geomesh reinforced clay, *Geotextiles and Geomembranes* 8 (4), 325-336.
5. Tatsuoka F.O.H., hwasaki, K., Nakamura, K. (1986). Performance of clay test embankments reinforced with a non-woven geotextile, *Proc of 3<sup>th</sup> Int. conf. on Geotextiles Vienna*, 3, 355-360.
6. Fabian, K.J., Fourie, A.B. (1986). Performance of geotextile reinforced clay samples in undrained triaxial test, *Geotextiles and Geomembranes*, 4 (1), 53-63.
7. Lafleur, J., Sall, M., Ducharme, A. (1987). Frictional characteristics of geotextiles with compacted lateritic gravels and clay, *Proceedings of Geosynthetics*, 87 (1), 205-215.
8. Krishnaswamy, N.R., Srinivasula Reddy, (1988). Behavior of reinforced earth under triaxial compression, *In: Proceeding of the First Indian Geotextiles Conference on Reinforced Soil and Geotextiles*, 1988.

9. Srivastava, R.K., Jalota, A.V., Pankaj Kumar, (1988). Strength and deformation behaviour of geotextile reinforced alluvial sil, In: *Proceeding of the First Indian Geotextiles Conference on Reinforced Soil and Geotextiles, 1988*.
10. Indraratna, B., Satkunaseelan, K.S., Rasul, M.G, (1991). Laboratory properties of a soft marine clay reinforced with woven and nonwoven geotextil, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM 14 (3), 288–295.
11. Ling, H.I., Tatsuoka, F. (1993). Laboratory evaluation of a nonwoven geotextile for reinforcing, *on-site soil. Proceedings of Geosynthetics*, 93 (2), 533–546.
12. Unnikrishnan, N., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R. (2002), Behavior of reinforced clay under monotonic and cyclic loadin, *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 117–133.
13. Vinod, P., Bhaskar, Ajitha, Lekshmi, C.S. (2007). Triaxial compression of clay reinforced with sand–coir fiber cor, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM 30 (4), 333–336.
۱۴. ارجمند، م.ع. و دارسی، س. (۱۳۹۳). بررسی اندرکنش خاک - ژئوگرید بوسیله آزمایش های برش مستقیم و بیرون کشش، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، [http://www.civilica.com/Paper-NCCE08-NCCE08\\_1199.html](http://www.civilica.com/Paper-NCCE08-NCCE08_1199.html)
۱۵. طهماسبی، م. محمدصالحی، ف. ارجمند، م.ع. باقریه، ع.ر. (۱۳۹۲). ارزیابی عددی تأثیر پارامترهای ژئوگرید چند لایه‌های دربرگرفته شده با ماسه بر ظرفیت باربری و نشست شالوده احداث شده بر روی رس مسلح، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، [http://www.civilica.com/Paper-NCCE07-NCCE07\\_0252.html](http://www.civilica.com/Paper-NCCE07-NCCE07_0252.html)
۱۶. صلاح اصفهانی، ف. ارجمند، م.ع. حاجیان نیا، الف. (۱۳۹۵). ارزیابی پارامترهای مقاومت گسیختگی خاک رس مسلح شده با ژئوسنتتیک و لایه های ماسه بوسیله آزمایش سه محوری، کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و مهندسی، ترکیه، دبیرخانه دائمی همایش، دانشگاه استانبول، [http://www.civilica.com/Paper-ICRSIE01-ICRSIE01\\_111.html](http://www.civilica.com/Paper-ICRSIE01-ICRSIE01_111.html)
17. Houston, S.L., Perez-Garcia, N., Houston, W.N. (2008). Shear strength and shearinduced volume change behavior of unsaturated soils from a triaxial test program. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 134 (11), 1619–1632.
18. Subaida, E.A., Chandrakaran, S., Sankar, N. (2009). Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextile, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1), 204–210.
19. Abdi, M.R., Arjomand, M.A. ( 2011). Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of san, *Geotextiles and Geomembranes*, 29(6), 588-595.
20. Noorzad, R., Mirmoradi, S.H. (2010). Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced cla, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(4), 386-392.
21. Carlos, D.M., Lopes, M.P., Lopes, M.L. (2016). Effect of Geosynthetic Reinforcement Inclusion on the Strength Parameters and Bearing Ratio of a Fine Soi, *Procedia Engineering*, 143, 34-41.
22. Chia, NanLiu, Yu., Hsien, Ho., Jian, WenHuang. (2009). Large scale direct shear tests of soil/pet-yarn geogrid interface. *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (3), 19–30.
23. Ghiassian.H. Jahannia.M. (2004). Influence of Encapsulated Geogrid–Sand System on Bearing Capacity and Settlement Characteristics of Reinforced clay. *International Journal of Civil Engineering*, 2, (1), 45-53.
24. Shin E. C, Das , V. M., Pur, V, K. Cook , E. E., and Yen , S. C. (1993). Bearing capacity of a strip foundation on geogrid – reinforced clay. *Geotec. Testing Jour.*, ASTM, 16 (4), 534- 541.
25. Giroud, J.P., & Noiray, L. (1981). Geotextile-reinforced unpaved roads. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 107(9), 1233-1254.
26. Danistan, J. and Vipulanandan, C. (2010). Correlation Between California Bearing Ratio (CBR) and Soil Parameters, In: *CIGMAT-2010 Conference & Exhibition*, Available from <http://cigmat.cive.uh.edu>.