

بررسی اثر تسلیح خاک با ژئوگرید بر پارامترهای مقاومتی بستر راه

آیدا مهرپژوه*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

جمشید آقائی، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

سید ناصر مقدس تفرشی، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mehrpajouh@yahoo.com

دریافت: ۹۴/۰۱/۱۸ - پذیرش: ۹۴/۰۴/۳۰

چکیده

یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری و کنترل میزان نشست و تغییر شکل خاک در روسازی راه، استفاده از ژئوگریدها می‌باشد. در این مقاله با مروری بر تحقیقات انجام شده در طول دو دهه‌ی اخیر در ارتباط با مکانیزم‌های عملکرد ژئوگرید و کاربردهای آن در راه‌سازی، خصوصیات مقاومتی بستر مسلح با ژئوگرید مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در اثر تسلیح خاک با ژئوگرید در خاک‌های با ظرفیت باربری کم، خصوصیات مقاومتی خاک از قبیل CBR، چسبندگی، سختی و مدول الاستیسیته، به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد ولی تغییر قابل ملاحظه‌ای در زاویه اصطکاک داخلی خاک ایجاد نمی‌کند. هرچه خاک بستر ضعیف‌تر باشد، تأثیر تسلیح با ژئوگرید پررنگ‌تر می‌گردد. همچنین در این مقاله مطالعات صورت گرفته در خصوص تعیین پارامترهای طراحی روسازی مسلح‌شده با ژئوگرید و ارزیابی عملکرد ژئوگرید برای روسازی دانه‌ای و روسازی انعطاف‌پذیر، ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: روسازی، ژئوگرید، بستر مسلح، CBR، ظرفیت باربری

۱- مقدمه

پیشنهاد شده است. از روش‌های رایج در دو دهه اخیر، استفاده از ژئوستتیک^۱ها به عنوان مسلح‌کننده خاک را می‌توان برشمرد. استاندارد (ASTM D-4439 (2006) ژئوستتیک را چنین تعریف می‌کند: «مواد و مصالحی پلیمری هستند که به همراه خاک، سنگ و یا دیگر مصالح مرتبط ژئوتکنیکی، در سازه‌ها و پروژه‌های ساخته بشر استفاده می‌شود.» از جمله ژئوستتیک‌های پرکاربرد در راه‌سازی، می‌توان به ژئوگریدها اشاره نمود. ژئوگریدها شبکه‌های پلیمری (پلی اتیلن با چگالی بالا^۲، پلی پروپیلن و یا پلی استر^۳) هستند که معمولاً به شکل شبکه‌های مشبک منظم در یک جهت و یا دو جهت ساخته می‌شوند. این شبکه‌ها و به خصوص حفره‌های میان آن‌ها موجب می‌شوند که ذرات خاک و یا مصالح سنگی به خوبی با

احداث سازه‌ها روی خاک موجود در محل، حفاظت از گودبرداری‌ها و ساختمان‌های مجاور و بهینه‌سازی هزینه ساخت و ساز، همواره هدفی است که مهندسین به آن توجه دارند. در مواردی، با توجه به وزن و ابعاد سازه‌های موردنظر، نیاز به مقاومت برشی زیاد خاک یا حتی مقاومت کششی در خاک می‌باشد. این در حالی است که خاک به خوبی در مقابل فشار مقاومت می‌کند اما در برابر نیروی کششی از خود مقاومت چندانی نشان نمی‌دهد. برای مثال در راه‌سازی، با افزایش خطوط عبوری، ظرفیت باربری لازم برای تحمل بار وارده افزایش می‌یابد. همچنین عبور متوالی ترافیک باعث افزایش تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک بستر راه خواهد شد.

در چنین مواردی، روش‌های مختلفی برای بهبود خاک

ABAQUS مثال زد که به کاهش ۲۰ درصدی جابجایی قائم در اثر تسلیح اشاره نموده است. یکی از جدیدترین مدل‌سازی‌های صورت گرفته توسط Pandy et al در سال ۲۰۱۲ می‌باشد که در نرم‌افزار plaxis، رفتار خاک مسلح شده با ژئوگرید را در برابر بارگذاری سیکلی بررسی نموده‌اند. آن‌ها میزان کاهش کرنش قائم و میزان کاهش تغییرشکل ناشی از خستگی را به ترتیب ۷.۳۹٪ و ۱۱.۸٪ گزارش نموده‌اند و طبق تحقیقات آن‌ها ارقام به دست آمده تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

۲- معرفی و کاربرد ژئوگرید در راه‌سازی

ژئوگریدها یکی از اعضای پرکاربرد خانواده ژئوستنتیک‌ها هستند که از خصوصیات مهم آن‌ها می‌توان به تغییرشکل کم در برابر نیروی کششی زیاد، مقاومت کششی نهایی بالا، رفتار بلند مدت مناسب به دلیل کرنش کم، مقاومت مطلوب در برابر میکروارگانیزم‌های خاک و مواد شیمیایی، اشعه ماورابنفش و آسیب‌های مکانیکی، اندرکنش مناسب بین شبکه ژئوگرید و دانه‌های خاکی، اجرای ساده به دلیل وزن کم، انعطاف‌پذیری مناسب آن حتی در هوای سرد و تولید در مقاومت‌های کششی متنوع اشاره نمود.

دو عامل مهم در عملکرد ژئوگریدها، عامل اصطکاک خاک با ژئوگرید و عامل قفل شدگی ذرات خاک در چشمه‌های ژئوگرید می‌باشد. (گرایلی افرا، ۱۳۸۹)

۲-۱- مکانیزم تسلیح با ژئوگرید

طبق مطالعات صورت گرفته توسط vulcanhammer (2002)، ژئوگرید در سیستم راه‌سازی عموماً به دو منظور جدایش و تسلیح استفاده می‌شود. اما با توجه به اندازه چشمه‌های ژئوگریدهای معمول، از آن به عنوان فیلتر استفاده نمی‌گردد و منظور از جدایش، غالباً رعایت ترتیب لایه‌های روسازی می‌باشد. لذا کاربری اصلی آن، تقویت لایه‌های روسازی است.

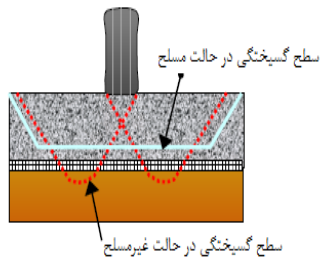
آن‌ها درگیر شده و مجموعه ژئوگرید و مصالح اطراف آن از خاصیت قفل و بست خوبی برخوردار گردد. به این ترتیب ژئوگرید به کار گرفته شده در لایه‌های خاکریز، همانند عناصر مقاوم در مقابل کشش عمل کرده و نواحی که تنش‌ها و تغییرشکل‌های کششی در خاک به وجود می‌آید به خوبی می‌تواند نیروها و تغییرشکل‌ها را در خود مهار نماید (شفابخش، ۱۳۸۴).

تولید اولین نسل ژئوگریدهای یکپارچه از جنس پلی استر و پلی پروپیلن به کشور انگلستان باز می‌گردد. پس از آن در سال ۱۹۸۰ نسل دیگری از ژئوگریدها با انعطاف‌پذیری بالا و از جنس پلی‌استر با روکش پلی‌پروپیلن در کشور انگلستان تولید شد. در این نوع از ژئوگرید از بافتن نوارهای ژئوگرید، متشکل از رشته‌های بسیار زیاد پلی استری استفاده گردید. سپس نسل سوم ژئوگریدها با جوش دادن نوارهای یکپارچه ی پلی استری با پروپیلن به یکدیگر در آلمان و برخی کشورهای اروپایی دیگر تولید و به بازار معرفی و عرضه شدند (صدریان‌زاده، ۱۳۸۳).

از ژئوگریدها در راه‌سازی جهت جلوگیری از بروز ترک‌های انعکاسی و همچنین جلوگیری از ترک خوردگی های ناشی از حرارت نیز استفاده می‌شود. (ظهورکاشانی و همکاران، ۱۳۸۹) Gupta and Zornberg در سال ۲۰۰۹ مطالعاتی بر روی کاهش عرض ترک در راه‌سازی بر روی خاک‌های رسی متورم شونده در ایالت تگزاس انجام دادند. در خاک‌هایی با شاخص خمیری بالا، در فصول مرطوب، پدیده تورم و در فصول گرم و خشک، انقباض رخ می‌دهد. این چرخه باعث ترک‌خوردگی در روسازی جاده‌ها می‌گردد. آزمایش‌های این دو تن نشان داده است که وجود لایه ژئوگرید در بستر، از وقوع ترک‌خوردگی تا حد امکان جلوگیری می‌کند.

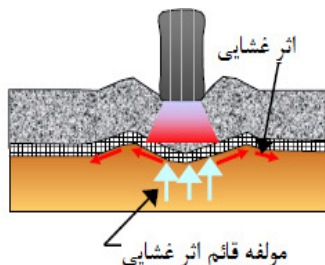
علاوه بر کارهای آزمایشگاهی، مدل‌سازی‌های عددی بسیاری نیز در زمینه تسلیح با ژئوگرید صورت گرفته است. از جمله می‌توان مدل Dondi(1994) را در نرم‌افزار

مناسب در لایه اساس صورت می‌گیرد. شکل ۲، مکانیزم موردنظر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصویر شماتیک انتقال سطح گسیختگی در حالت مسلح (Vulcanhammer Company, 2002)

سومین اثر حضور ژئوگرید، اثر غشایی^۴ نام دارد. بار وارده به ژئوگرید، باعث ایجاد تنش کششی در لایه ژئوگرید تغییرشکل یافته می‌شود. مولفه قائم این تنش کششی، تنش قائم رسیده به بستر را کاهش می‌دهد. شکل ۳، مبین اثر غشایی در ژئوگرید می‌باشد.



شکل ۳. تصویر شماتیک عملکرد غشایی در حالت مسلح (Vulcanhammer Company, 2002)

۲-۲- انواع ژئوگریدها

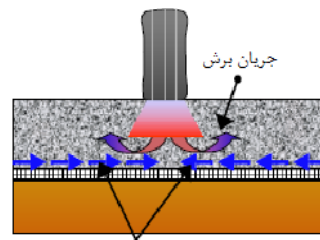
ژئوگریدها به سه دسته تقسیم می‌شوند: بافته‌شده، تزریقی و اتصالی.

ژئوگریدهای بافته‌شده از بافتن الیاف پلی‌استر به همدیگر ساخته می‌شوند که به شبکه‌های تار و پودی آن، چشمه می‌گویند. همچنین با پوشاندن این الیاف بافته‌شده با پلی‌وینیل کلراید^۵، ژئوگریدهای انعطاف‌پذیر پلی‌استری ایجاد می‌شود. مهمترین مزیت این نوع از ژئوگریدها، کرنش پایین و در نتیجه مقاومت مناسب در برابر خزش و همچنین اجرای راحت‌تر آن‌ها می‌باشد. این نوع ژئوگرید

سه هدف اصلی استفاده از ژئوگرید در ساختار راه، تقویت بستر نرم، افزایش عمر بهره‌وری و کاهش سطح مقطع عرضی لازم برای یک پروژه می‌باشد.

ژئوگرید به عنوان مسلح‌کننده، باعث می‌شود عمل تراکم لایه بستر راحت‌تر صورت گیرد و مقدار مصالح درشت‌دانه موردنیاز را کاهش می‌دهد. (Cancelli et al., 1996; Douglas, 1997; Haas et al., 1988; Santoni et al., 2001). ژئوگرید همچنین برای پایداری مکانیکی بستر، تسلیج لایه اساس و تسلیج پوشش آسفالت بتنی نیز به کار می‌رود (Haas et al., 1984; Brown et al., 1984; Chang, 1999).

طبق مطالعات صورت گرفته، مکانیزم تسلیج ژئوگرید در بستر راه از طریق ایجاد مقاومت جانبی، تقویت ظرفیت باربری و عملکرد غشایی رخ می‌دهد (Perkins, 1997). مقاومت جانبی به علت محصورشدگی دانه‌ها درون چشمه‌های ژئوگرید تامین می‌گردد. از آنجا که خصوصیات مقاومتی دانه‌های خاک وابسته به تنش است، افزایش محصورشدگی باعث افزایش مدول مصالح لایه اساس می‌گردد. این افزایش در مدول مواد دانه‌ای، باعث بازتوزیع تنش قائم روی بستر و به تبع آن، کاهش تنش رسیده به بستر تا حد تحمل آن می‌گردد. شکل ۱، مکانیزم ایجاد مقاومت جانبی را توسط ژئوگرید نشان می‌دهد.



شکل ۱. تصویر شماتیک مقاومت جانبی ایجادشده به علت تسلیج (Vulcanhammer Company, 2002)

عملکرد بعدی ژئوگرید که به آن نقش مسلح‌کننده می‌دهد، تقویت ظرفیت باربری می‌باشد. این مکانیزم، از طریق انتقال سطح گسیختگی از بستر ضعیف به مصالح

(al., 2006) به عنوان گابیون در ساختمان دیوارها و سازه‌های کنترل فرسایش و حتی تسلیح بتن اشاره نمود.

۴- بررسی خصوصیات مقاومتی بستر مسلح با ژئوگرید

در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری در زمینه تسلیح با ژئوگرید صورت گرفته است. Zhao and Foxworthy, 1999; Retzlaff et al., 2006; Virgili et al., 2009; Abu Farsakh et al., 2010; Singh and Gill, 2012) مطالعات صورت گرفته حاکی از بهبود رفتار خاک به واسطه‌ی تسلیح می‌باشد، به طوری که قرارگیری لایه تسلیح در خاک به خصوص در خاک‌های با ظرفیت باربری اولیه کم، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش پارامترهای مقاومتی آن از جمله CBR، چسبندگی، سختی و مدول الاستیسیته خاک دارد. (Kamel et al., 2004) مطالعاتی جهت بررسی رفتار خاک مسلح با ژئوگرید با استفاده از آزمایش‌های CBR، فشاری تک محوری، فشاری سه محوری استاتیکی و دینامیکی انجام دادند. خاک‌های مورد مطالعه، خاک ماسه‌ای نرم (SP)، ماسه رس (SC) و رس سیلتی (CM) می‌باشد. همچنین خصوصیات دو نوع ژئوگرید به کار گرفته شده در جدول ۱ آمده است. میزان دانسیته خشک بیشینه خاک‌ها به ترتیب، 13 kg/m^3 ، 1740 ، 1660 و رطوبت بهینه نظیر آن‌ها 11.7% ، 13% و 19% گزارش شده است.

جدول ۱. خصوصیات ژئوگرید به کار گرفته شده (Kamel et al., 2004)

خصوصیات	ژئوگرید نوع ۱	ژئوگرید نوع ۲
شکل	صفحه ای	صفحه ای
اندازه چشمه	۲۲*۲۲	۱۹*۱۹
مقاومت کششی طولی در کرنش ۲٪	۵۸	۲۰۵
سختی کششی طولی	۲۹۰	۱۲۵
مقاومت کششی عرضی در کرنش ۲٪	۵۲	۲۸
سختی کششی عرضی	۲۶۰	۱۴۰
قابلیت ازدیاد طول	۱۶.۵٪	۱۵٪
قابلیت ازدیاد طول (در خلاف جهت دستگاه)	۱۰٪	۱۰٪

به روش مکانیکی و اصطکاک با بلوک‌های خاکی ارتباط برقرار می‌کند و به دلیل ماهیت تار و پودی، از دو جهت دارای مقاومت کششی می‌باشد. در کارهای راه‌سازی، به دلیل رویکرد دوسویه، به این نوع ژئوگرید بیشتر توجه می‌گردد. (شه کلاهی، ۱۳۹۰).

اکثر ژئوگریدهای پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن به روش تزریقی تولید می‌شوند. این نوع ژئوگرید دچار پوسیدگی نمی‌گردد و یکپارچگی کامل دارد. اما محدودیت این ژئوگریدها در این است که باید به صورت مکانیکی با بلوک‌ها اتصال پیدا کنند. همچنین خزش زیاد، عملکرد این نوع را در درازمدت دچار مشکل می‌کند. ژئوگریدهای تزریقی به صورت تک‌سویه در دنیا وجود دارد و در ایران تنها از این نوع به ویژه در کوله‌های خاک مسلح استفاده می‌شود. ژئوگریدهای اتصالی نوع خاصی از ژئوگریدها هستند که به صورت تسمه‌های تزریقی در جهت‌های طولی و عرضی روی هم قرارداد شده و از طریق اشعه‌های لیزری، نوارهای طولی و عرضی به هم متصل شده‌اند. محدودیت این نوع از ژئوگریدها، عدم اتصال آن‌ها به روش مکانیکی است (شه کلاهی، ۱۳۹۰).

۲-۳- کاربرد ژئوگرید در راه‌سازی

از ژئوگریدها در راه‌سازی جهت افزایش ظرفیت باربری لایه‌های خاک، پایداری شیروانی‌های خاکی با شیب تند، مسلح کردن لایه اساسی جاده‌ها با روکش آسفالتی، مسلح کردن قسمت اساسی جاده‌ها بدون روکش آسفالت، توزیع مناسب‌تر بار بر روی بستر روسازی و کاهش ضخامت لایه‌های سنگی روسازی استفاده می‌گردد. علاوه بر این، ژئوگریدها در پروژه‌های زیست محیطی از جمله محل دفن زباله‌ها، ایجاد سایت فاضلاب‌های صنعتی و دیوارهای حائل صوتی نیز کاربرد دارند. از دیگر موارد استفاده از ژئوگریدها می‌توان به کوله پل‌ها (Fakharian and Attar, 2007) اشاره کرد. کاهش مساحت زمین موردنیاز به دلیل ایجاد شیروانی با شیب تند، به عنوان لایه جداساز بین لایه‌های بستر و زیر بالاست در راه آهن (Indraratna et

ژنوگرید نسبت به حالت غیرمسلح باشد. بدین منظور آن‌ها، آزمایش‌های CBR را طبق استاندارد ASTM D1883-99 روی خاک مسلح شده با یک لایه ژنوگرید انجام دادند.

برای تعیین ضخامت لایه سنگریزه لازم در راه‌سازی عموماً از آزمایش CBR برای لایه بستر استفاده می‌شود. اگرچه آزمایش CBR برای یک ماده واحد معتبر است، با این حال می‌تواند معیاری کیفی برای تأثیر مثبت تسلیج با

جدول ۲. درصد CBR با توجه به نوع خاک، نوع ژنوگرید و محل قرارگیری آن (Kamel et al., 2004)

نوع ژنوگرید	محل قرارگیری (%)	درصد CBR اشباع			درصد تغییر با توجه به مقدار آن در حالت غیرمسلح		
		SP	SC	CM	SP	SC	CM
بدون ژنوگرید	-	۴.۱۵	۱.۱	۱.۰۵	-	-	-
ژنوگرید نوع ۱	۲۰	۵.۲۵	۱.۵۲	۱.۲۶	۲۸	۳۸	۲۰
	۴۰	۵.۸۳	۱.۸۴	۱.۵۲	۴۰	۶۷	۴۵
	۶۰	۶.۴۶	۲.۲۴	۱.۸۴	۵۶	۱۰۴	۷۵
	۸۰	۶.۸۳	۲.۵۲	۲.۱۵	۶۵	۱۲۹	۱۰۵
ژنوگرید نوع ۲	۲۰	۴.۶۲	۱.۴۱	۱.۱۵	۱۱	۲۸	۵
	۴۰	۴.۹۹	۱.۷	۱.۳۱	۲۰	۶۶	۲۵
	۶۰	۵.۸۳	۱.۹۷	۱.۵۸	۴۰	۷۹	۵۰
	۸۰	۶.۳	۲.۲۳	۱.۸۴	۵۲	۱۰۳	۷۵

شده است. آن‌ها گزارش نموده‌اند که تنش انحرافی با افزایش تنش محصورکنندگی و افزایش سختی ژنوگرید، بیشتر می‌شود.

آن‌ها همچنین با رسم دواير مور، تأثیر تسلیج را بر چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک خاک بررسی کردند. طبق این تحقیق، تسلیج با ژنوگرید باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود. این در حالی است که تغییر مشهودی در زاویه اصطکاک داخلی خاک دیده نمی‌شود.

در این آزمایش‌ها، با توجه به فشار محصورکنندگی ثابت و جانمایی ژنوگرید در موقعیت‌های مختلف، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار مدول الاستیسیته اولیه^۷ خاک گزارش کردند. همانند آنچه در مورد آزمایش CBR گفته شد، در این جا نیز بیشینه مقدار مدول الاستیسیته در ۰.۸ ارتفاع نمونه از پایین آن رخ داده است. به عبارت دیگر، نمونه خاک مسلح، رفتار انعطاف‌پذیرتری نسبت به حالت غیرمسلح، از خود بروز می‌دهد. افزایش مقاومت ژنوگرید نیز تأثیر بیشتری بر افزایش مدول الاستیسیته داشته است. در مورد جانمایی ژنوگرید، براساس نتایج حاصل از آزمایش CBR و درون‌یابی، بازه‌ای در حدود ۷۲-۷۶٪ ارتفاع نمونه از پایین آن پیشنهاد شده است.

لایه ژنوگرید در موقعیت‌های ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ نسبت به پایین نمونه قرارداد شده. جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش CBR را نشان می‌دهد. تفاوت در میزان افزایش ظرفیت خاک به دلیل تفاوت در نوع خاک، نوع ژنوگرید و همچنین محل قرارگیری آن می‌باشد.

همان‌طور که دیده می‌شود، هرچه خاک بستر غیرمسلح ضعیف‌تر باشد، تأثیر تسلیج با ژنوگرید، پررنگ‌تر است. ژنوگرید با سختی بیشتر، عملکرد تأثیرگذارتری داشته است.

آن‌ها همچنین رفتار خاک مسلح را در آزمایش تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده^۶ طبق استاندارد ASTM D2850-03 بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر میزان فشار محصورکننده و محل قرارگیری ژنوگرید را بر مدول الاستیسیته خاک مورد مطالعه قراردادند. با توجه به نتایج حاصله، در حضور تسلیج، گسیختگی در تنش انحرافی بیشتری رخ می‌دهد. در یک تنش محصورکنندگی به اندازه ۴۰ کیلوپاسکال، میزان تنش انحرافی نظیر گسیختگی، از ۲۱۵.۴ کیلوپاسکال در حالت غیرمسلح به ۴۲۶ کیلوپاسکال در حالت مسلح رسیده است. این نتیجه از جانمایی ژنوگرید در ۰.۸ ارتفاع کل نمونه نسبت به پایین آن حاصل

مطابق شکل ۴، با افزایش تنش محصورکنندگی، میزان کرنش ماندگار کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش تنش انحرافی به میزان آن افزوده می‌شود. همچنین نمودارها حاکی از آن است که افزایش سختی ژئوگرید، نقش موثری در کاهش کرنش‌های ماندگار دارند.

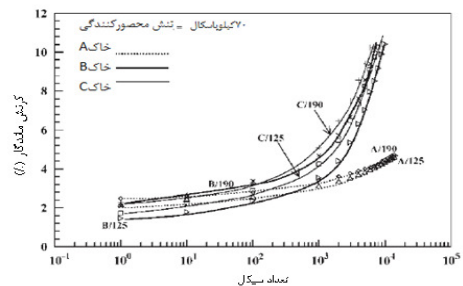
۴- طراحی روسازی مسلح با ژئوگرید

تسلیح با ژئوگرید در راه سازی، برای پایداری بستر و کاهش ضخامت لایه اساس به کار می‌رود. Al Ghadi et al., (1997) میزان کارایی تسلیح با ژئوستتیک ها، با توجه به مقاومت خاک و نوع ژئوستتیک قابل پیش بینی می‌باشد. ژئوگرید در بسترهای بسیار ضعیف عموماً برای پایداری بستر به کار می‌رود و با افزایش مقاومت بستر، هدف، بهینه سازی ضخامت لایه اساس می‌باشد. Zhao and Foxworthy در سال ۱۹۹۹ رفتار خاک مسلح شده با ژئوگرید جهت تعیین پارامترهای طراحی روسازی انعطاف-پذیر با استفاده از استاندارد AASHTO مورد بررسی قرار داده اند. بار سیکلی روی یک صفحه صلب دایره ای با شعاع ۳۰۰ میلی متر اعمال شده و بیشینه بار وارده ۴۰ کیلونیوتن است که در نتیجه آن مقدار تنش اعمالی ۵۷۰ کیلوپاسکال می‌باشد. ضخامت لایه آسفالت ۷۵ میلی متر و ضخامت لایه اساس ۳۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. ژئوگرید به کار رفته دارای خصوصیات زیر می‌باشد.

جدول ۳. خصوصیات ژئوگرید به کار رفته در آزمایش Zhao and Foxworthy (1999)

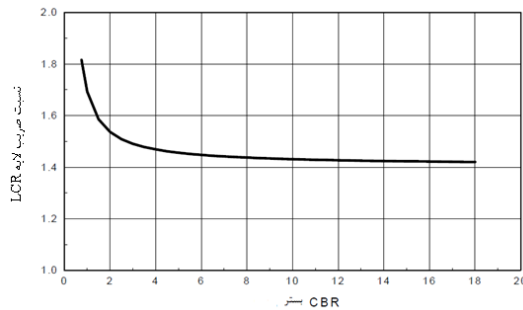
عمود بر جهت دستگاه	در جهت دستگاه	واحد	جنس
پلی پروپیلن تزریقی			وزن مخصوص
240		g/m ²	اندازه چشمه
75		%	مقاومت کششی نهایی
20.5	13.5	kN/m	مدول کششی در کرنش ۲٪
325	220	kN/m	مدول کششی در کرنش ۵٪
260	180	kN/m	مقاومت نقطه اتصال
19.2	12.2	kN/m	

براساس آیین‌نامه AASHTO مقدار ۵۴٪ از کل تغییرشکل‌های ماندگار روسازی، مربوط به تغییرشکل لایه بستر و زیراساس می‌باشد. بنابراین خصوصیات پلاستیک خاک بستر دارای اهمیت می‌باشد. از این رو، آن‌ها آزمایش سه محوری سیکلی را برای بررسی رفتار خاک مسلح تحت بار دینامیکی انجام دادند. محل قرارگیری ژئوگرید در این آزمایش‌ها، ۰/۸ ارتفاع نمونه (مقدار بهینه جانمایی) در نظر گرفته شد. در این آزمایش‌ها، تاثیر تنش انحرافی، تعداد سیکل، تنش محصورکنندگی و تسلیح، بر نرخ کرنش‌های ماندگار مورد بررسی قرار گرفت. مقدار تنش اصلی حداکثر بین ۱۹۵ تا ۲۶۰ کیلوپاسکال با سرعت ۷۰ سیکل بر دقیقه و مقدار تنش محصورکنندگی به ترتیب ۴۰، ۷۰ و ۱۴۰ کیلوپاسکال اعمال شد. تغییرشکلی معادل ۲۰٪ ارتفاع نمونه را به عنوان تغییرشکل لحظه گسیختگی در نظر گرفته شده است. آن‌ها مشاهده نمودند که با افزایش سیکل بارگذاری پس از ۱۰۰ سیکل و خارج شدن نمونه از محدوده الاستیک، میزان کرنش‌های ماندگار افزایش می‌یابد. در هزارمین سیکل بارگذاری، در خاک ماسه‌ای، میزان کرنش‌های ماندگار از ۴.۸۶٪ در حالت غیرمسلح به ۴.۵۱٪ در حالت مسلح با ژئوگرید نوع دو و ۴.۰۷٪ با ژئوگرید نوع اول کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزودن ژئوگرید به خاک، میزان کرنش‌های ماندگار در حدود ۷ تا ۱۶ درصد کاهش می‌یابد و میزان کاهش تغییرشکل، بستگی به نوع خاک و میزان سختی ژئوگرید دارد. نمودار شکل ۴ نیز تاثیر تنش انحرافی را بر کرنش‌های ماندگار در یک تنش محصورکنندگی ثابت ارائه می‌دهد.



شکل ۴. نمودار کرنش‌های ماندگار در برابر در تنش محصورشدگی ثابت و ژئوگرید نوع اول (Kamel et al., 2004)

کمتر باشد میزان LCR بیشتر شده و ضخامت بهینه افزایش می یابد.



شکل ۶: نمودار نسبت ضریب لایه در برابر CBR در آزمایش (Zhao and Foxworthy, 1999).

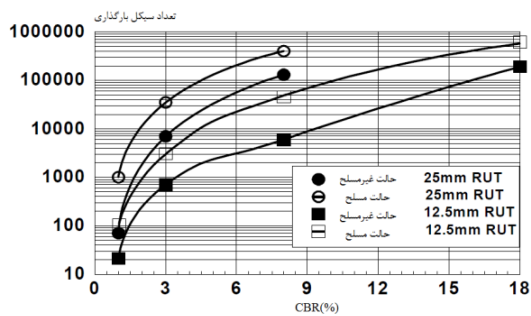
با توجه به آزمایش ها و نتایج فوق، ضخامت لایه دانه‌ای مورد نیاز برای خاکی با $CBR = 5\%$ و $SN = 1500000$ از 42.52 به 32.58 سانتی متر کاهش خواهد یافت. آن‌ها همچنین برای ارزیابی این بررسی، چندین آزمایش بزرگ مقیاس نیز ترتیب دادند. نتایج آزمایش های بزرگ مقیاس نیز در تایید نتایج آزمایش های آزمایشگاهی برآمد و نشان داد که با افزودن ژئوگرید به روسازی، میزان ضخامت لایه دانه ای کاهش می یابد و این امر باعث صرفه جویی در هزینه‌های ساخت می‌گردد. طبق مطالعات صورت گرفته توسط شرکت (2002) vulcanhammer، گام اول در طراحی یک سیستم تسلیح مناسب برای روسازی راه، تعیین

ویژگی‌های بستر شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ، مقاومت برشی درجا و ظرفیت باربری می‌باشد. مقاومت برشی برجا را می توان از طریق آزمایش برش پره به صورت مستقیم بدست آورد و یا به صورت غیرمستقیم از نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) و جداول تبدیل، تعیین نمود.

۴-۱- ارزیابی عملکرد ژئوستتیک ها برای روسازی دانه‌ای

در تحقیقی از شرکت (2002) vulcanhammer، میزان تسلیح مورد نیاز برای روسازی های دانه ای با توجه به CBR لایه بستر، تقسیم بندی شده است.

در خصوص نحوه آزمایش به استاندارد ASTM D1883-94 اشاره شده است. با توجه به تحقیقات آن‌ها، نمودار شکل ۵ تعداد سیکل‌های بارگذاری در مقابل مقدار CBR را نشان می‌دهد که برای میزان گودافتادگی چرخ ۱۲.۵ میلی متر و ۲۵ میلی متر رسم شده است.



شکل ۵: نمودار میزان CBR در برابر تعداد سیکل بارگذاری در حالت مسلح و غیرمسلح (Zhao and Foxworthy, 1999)

طبق آیین نامه AASHTO برای طراحی روسازی مسلح شده با ژئوگرید، از رگرسیون زیر می توان استفاده کرد که در آن تعداد ساختمانی SN نشان دهنده ظرفیت باربری لازم برای گروه لایه های روسازی می باشد.

$$SN = a_1 * d_1 + LCR * a_2 * d_2 \quad (1)$$

a_1 و a_2 : ضریب لایه های روسازی یعنی لایه آسفالت و لایه اساس دانه‌ای می‌باشد که از روی مدول ارتجاعی مصالح تخمین زده می‌شود.

d_1 و d_2 : ضخامت لایه های روسازی

LCR: ضریبی تحت عنوان نسبت ضریب لایه تعریف شده است که اگر این ضریب کوچکتر از یک شود، میتوان ضخامت لایه دانه‌ای را کاهش داد و در صورت ثابت ماندن ضخامت، عمر بهره وری افزایش خواهد یافت.

پیش از این، Carroll et al. (1997) چنین ضریبی را برای کمی کردن اثر تسلیح روسازی انعطاف پذیر با ژئوگرید معرفی کردند.

آن‌ها رابطه بین LCR و CBR بستر را با استفاده از تابع شکل زیر تعیین کردند که نشان می دهد هرچه CBR

- بستر با CBR کمتر از ۰.۵

تسلیح بستر با CBR کمتر و یا مساوی ۰.۵، عموماً جهت پایداری صورت می‌گیرد. در این تحقیق یک لایه ژئوتکستایل بافته نشده برای جدایش و یک لایه ژئوگرید دومحوری برای تسلیح پیشنهاد شده است. با توجه به مقاومت کم بستر، ضخامت لایه اساس باید به همان میزانی باشد که برای بستر غیرمسلح مورد استفاده قرار می‌گیرد. لایه ژئوگرید در این موقعیت، از طریق انتقال سطح گسیختگی، ظرفیت باربری بستر را افزایش می‌دهد.

- بستر با CBR بین ۰.۵ تا ۲

تسلیح در این حالت علاوه بر پایداری بستر، برای بهینه سازی ضخامت لایه اساس نیز به کار گرفته می‌شود. یک لایه ژئوتکستایل بافته نشده جهت جدایش و یک لایه ژئوگرید دومحوری برای کاهش ضخامت لایه اساس توصیه شده است.

- بستر با CBR بین ۲ تا ۴

در این حالت غالباً از ژئوتکستایل بافته نشده برای جدایش استفاده می‌گردد اما تسلیح با ژئوگرید باید از لحاظ اقتصادی سنجیده شود. حضور ژئوگرید به عنوان تسلیح به منظور افزایش چرخه عمر بهره وری، می‌تواند یک گزینه اقتصادی باشد.

۴-۲- ارزیابی عملکرد ژئوستتیک‌ها برای روسازی انعطاف‌پذیر

- بستر با CBR کمتر از ۰.۵

همانند آن چه در روسازی دانه ای گفته شد، یک لایه ژئوتکستایل به عنوان فیلتر و یک لایه ژئوگرید برای تسلیح به کار می‌رود و ضخامت لایه دانه ای نباید نسبت به حالت غیرمسلح کاهش یابد.

- بستر با CBR بین ۰.۵ تا ۴

در این حالت نیز، یک لایه ژئوتکستایل به عنوان فیلتر و یک لایه ژئوگرید برای تسلیح به کار می‌رود و ضخامت لایه دانه‌ای طبق روش تجربی (Webster 2001) در صورت امکان کاهش می‌یابد.

- بستر با CBR بین ۴ تا ۸

برای چنین بستری، لایه ژئوتکستایل جهت جدایش لازم نیست. همچنین استفاده از ژئوگرید نیز باید با توجه به هزینه چرخه عمر بهره وری سنجیده شود.

- بستر با CBR بزرگتر از ۸

چنین بستری غالباً بدون تسلیح، از خود عملکرد مناسبی نشان می‌دهد؛ مگر این که برای فیلتر لایه های روسازی نیاز به استفاده از یک لایه ژئوتکستایل بافته نشده داشته باشد.



شکل ۷. نمودار وبستر برای تعیین ضخامت لایه مسلح

(Webster, 2001)

۵- نتیجه گیری

در دو دهه اخیر، رونق استفاده از ژئوستتیک‌ها در مهندسی عمران، محققین را به سوی انجام مطالعات گسترده‌ای پیرامون عملکرد این مصالح سوق داده است. طبق مطالعات صورت گرفته، استفاده از ژئوستتیک‌ها موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌شود. علاوه بر آن، حضور تسلیح، باعث توقف یا کاهش نرخ کرنش قائم خواهد شد. بهبود عملکرد خاک مسلح با ژئوگرید به عنوان نوع خاصی از ژئوستتیک‌ها، استفاده از آن را در مواردی همچون راه‌سازی مورد توجه قرار داده است.

با در نظر گرفتن دو اثر افزایش ظرفیت باربری بستر و توزیع مناسب بارهای متمرکز بر بستر مسلح با ژئوگرید، استفاده از این محصولات می‌تواند عاملی در جهت کاهش ضخامت لایه روسازی گردد. همچنین تسلیح با ژئوگرید باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود. این در حالی است که تغییر مشهودی در زاویه اصطکاک داخلی خاک دیده

- 97, IFAI, Vol. 2, Long Beach, California, pp. 647-662.
- Al-Qadi, I. L., Dessouky, S., Tutumluer, E. and Kwon, J. (2010) "geogrid mechanism in low volume flexible pavements: accelerated testing of full scale heavily instrumented pavement sections", *International Journal of Pavement Engineering*, 12 (2), pp.121-135.
- ASTM D4439. (2006), "Standard Terminology for Geosynthetics", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4.13, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 19-23.
- ASTM D1557-02. (2002), "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort".
- ASTM D1883-99. (1999), "Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soil".
- ASTM D2850 – 03. (2003) "Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils".
- Basset, R.H., and Last, N.C. (1978) "Reinforcing earth below footings and embankments, Proe", symposium on earth reinforcement, Pittsburgh, pp. 202-231.
- Brown, S. F., Brodrick, B. V., and Hughes, D. A. B. (1984). "Tensar Reinforcement of Asphalt: Laboratory Studies Polymer Grid Reinforcement", A Conference Sponsored by SERC and Netlon, Ltd, London, England, pp. 158-165.
- Cancelli A., M. F. (1996) "Full scale laboratory testing on geosynthetics reinforced paved roads. on Earth Reinforcement", pp. 573-578.
- Carroll, R.G., Walls, J.C. and Haas, R. (1997) "Granular base reinforcement of flexible pavements using geogrids", *Proceeding of Geosynthetics '87*, IFAI, New Orleans, pp. 46-57.
- Chang, F. W. K. (1990) "Permanent Deformation Resistance of Granular Layers in نمی‌شود. حضور ژئوگرید در خاک، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار مدول الاستیسیته خاک می‌گردد. طبق مطالعات ارائه شده در این مقاله، قرارگیری ژئوگرید در فاصله کمتر از لایه‌های روسازی درون بستر راه، باعث بهبود قابل توجهی در پارامترهای مقاومتی آن می‌گردد.
- ### ۶- پی‌نوشت
1. Geosynthetic
 2. High Density Polyethylene (HDPE)
 3. Polyethylene Terephthalate (PET)
 4. Membrane effect
 5. Polyvinyl chloride (PVC)
 6. Unconfined un drained(UU)
 7. Elasticity modulus initial
- ### ۷- مراجع
- شفابخش، غ.ع.، (۱۳۹۰) "تسلیج خاکریز و بستر راهها با استفاده از ژئوگرید"، پژوهشکده حمل و نقل.
- شه‌کلاهی، الف.ر.، (۱۳۹۰) "معرفی و تاریخچه محصولات ژئوسنتتیک"، مجله ژئوسنتتیک صص. ۱۵-۱۱.
- گرایلی افرا، م.، (۱۳۸۹) "ژئوگرید و کاربرد آن در پروژه‌ها"، فناوری حمل و نقل صص. ۶۵-۶۰.
- صدریان‌زاده، م.، (۱۳۸۳) معرفی ژئوسنتتیک‌ها و کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران، یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور.
- ظهیر کاشانی، ح.ر.، خداوردیان، ه.، بهنیا، س.، (۱۳۸۹)، معرفی ژئوسنتتیک‌ها و کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران، کنفرانس مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
- Abu Farsakh, M. Y., and Qiming, C. (2010) "Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing", *International Journal of Pavement Engineering*, 12 (3), pp.275-287.
- Al-Qadi, I. L., Brandon, T. L., and Bhutta, A. (1997) "Geosynthetic Stabilized Flexible Pavements, *Proceedings of Geosynthetics*",

- (2004), "behavior of subgrade soil reinforced with geogrid", the international journal of pavement engineering , 5 (4), pp.201-209.
- Nishigata, Tatsuaki and Nishida, Kazuhiko, (1995) Journal of the Society of Materials Science, Japan, 44 (503), pp.1011-1014.
 - Pandey, S., Ramachandra, R., and Devesh, T. (2012), "effect of geogrid reinforcement on critical responses of bituminous pavements", 25th ARRB conference, Perth, Australia, pp. 1-13.
 - Perkins, S. a. (1997), "A synthesis and evaluation of geosynthetic-reinforced base layers in flexible pavements", Geosynthetics International , 4 (6), pp.549-604.
 - Retzlaff, J., Turczynski, K., and Schwerdt, S. (2006), "The effect of geogrids under unbound sub base layers", the 8th International Conference on Geosynthetics. Yokohama.
 - Santoni, Rosa L., Smith, Carroll J., Tingle, J.S., and Webster, S.L. (2001), "Expedient Road Construction Over Soft Soils", Technical Report TR-01-7, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
 - Saran, S. (2013), "Reinforced Soil and Its Engineering Applications (2 ed.)" , New Delhi: I K International Publishing House.
 - Shukla, S. K., and Yin, J.-H. (2006), "Fundamental of geosynthetic engineering", London: Taylor and Francis group.
 - Singh, P., and Gill, K. (june 2012), "CBR improvement of clayey soil with geogrid reinforcement", international journal of Emerging technology and advance engineering , 2 (6), pp.315-318.
 - The American Association of State Highway and Transportation Officials, A. A. (1993), AASHTO design of pavement structures.
 - Virgili, A., Canestrari, F., Grilli, A. and Santagata, F.A. (2009), "Repeated Load Test on Bituminous. Systems Reinforced by Geosynthetics", pp.187-195.
 - Pavements", Ph.D. Thesis, University of Nottingham, United Kingdom.
 - Dondi, G. (1994) "Three-dimensional finite element analysis of a reinforced paved road", 5th international conference on geotextile, singapore, 1, pp. 95-100.
 - Douglas, R. A. (1993), "Stiffness's of Geosynthetic Built Unpaved Road Structures: Experimental Program, Analysis and Results", Proceedings of Geosynthetics '93, IFAI, Vol. 1, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 21-34.
 - Fakharian, K. & Attar, I. H. (2007), "Static and seismic numerical modeling of geosynthetic-reinforced soil segmental bridge abutments" , Geosynthetics International 14, No. 4, pp.228-243.
 - Fukuoka, M. (1988), "Earth Reinforcement West and East", Proceeding of the International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement, pp.33-47.
 - Gupta, R., and Zornberg, J. (2005), "quantifying the benefits for using geosynthetics in unbound base course of pavement in high PI clays", the Graduate Engineering Council. Austin: University of Texas at Austin.
 - Gupta, R., and Zornberg, J. G. (2009), "reinforcement of pavements over expansive clay subgrades", the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, pp. 765-768.
 - Haas, R. (1984) "Structural Behavior of Tensar Reinforced Pavements and Some Field Applications, Polymer Grid Reinforcement", A Conference Sponsored by SERC and Netlon, Ltd., Thomas Telford, London, England, pp. 166-170.
 - Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W., Christie, D., (2006), Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilization, Ground Improvement, 10, No. 3, pp.91-101.
 - Kamel, M. A., Satish, C., and Kumar, P.

- Zornberg, J., Gupta, R.,and Ferreira, J. (2010), "Field performance of geosynthetic reinforced pavements over expansive", 9th International Conference on Geosynthetics. Brazil.
- Zornberg, J., Gupta, R., Prozzi, J.,and Goehi, D. (2008), "case histories on geogrid reinforced pavements to mitigate problems associated with expansive subgrade soils", the first Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition, Mexico., pp.983-992.
- Vulcanhammer company. (2002), "use of geogrid in pavement construction".
- Wathugala, G. B. (1996), "Numerical Simulation of Geosynthetic Reinforced", Transportation Research Record , 58-65.
- Zhao, A.,and Foxworthy, P. T. (1999), "geogrid reinforcement of flexible pavements a practical perspective", Technical reference, GRID-DE-6 , pp.28-34.