

بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی دایره‌ای مستقر بر شیروانی ماسه‌ای مسلح با ژئوگرید

سلیمان داستانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد

اسلامشهر

مریم حق‌بین*، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر

Email: haghbin@iaau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

چکیده

در تحقیق حاضر، در مدل آزمایشگاهی پی دایره‌ای واقع بر شیروانی ماسه‌ای مسلح با ژئوگرید، به بررسی تأثیر ژئوگرید و تراکم خاک پرداخته شده است. در این تحقیق، شیب مورد نظر در حالت عادی پایداری نداشت و جهت عملیات خاکریزی غیرقابل استفاده بود. ولی با بهسازی خاک از طریق تسلیح و متراکم کردن به ظرفیت باربری مناسب جهت استفاده در عملیات خاکریزی رسید. هدف اصلی تحقیق، مقایسه میزان ظرفیت باربری و تورم در خاک در حالت‌های تسلیح شده با حالت بدون مسلح‌کننده و همچنین بررسی تأثیر دو حالت تراکم بود. تعداد ۱۹ حالت مختلف بررسی شده است. پارامترهای اصلی مورد بررسی عبارتند از تراکم خاک، تعداد لایه‌های ژئوگرید و فاصله پی از لبه شیب. نتایج نشان داد که شیب خاکی که در حالت غیرمسلح غیرمتراکم هیچ پایداری نداشت، با استفاده از ژئوگریدها و متراکم نمودن، ظرفیت باربری بالایی را به دست آورد. به طوری که حداکثر ظرفیت باربری در حالت تسلیح شده متراکم شده و در ۳۰ سانتی‌متری از لبه شیب نسبت به حالت فقط مسلح ۴۳۳ درصد و نسبت به حالت فقط متراکم ۳۲۵ درصد افزایش ظرفیت باربری داشت. در حالی که از تورم در لایه اول خاک تشکیل دهنده شیب به مقدار قابل توجهی نسبت به میزان تحمل ظرفیت باربری کاسته شده و یکنواختی بیشتر تورم در تمام نقاط شیب مشاهده می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد که در حالت متراکم شده- مسلح نشده، افزایش تعداد لایه‌های تراکم در شرایطی که پی در مجاورت شیب باشد، تأثیر چندانی بر ظرفیت باربری نداشت. اما با فاصله گرفتن پی از لبه شیب تا ۳۰ سانتی‌متر، افزایش تعداد لایه‌های تراکم از ۵ به ۷ لایه باعث افزایش ۳۴ درصدی ظرفیت باربری شد.

واژه‌های کلیدی: شیب، ظرفیت باربری، ژئوگرید، تسلیح

۱. مقدمه

وقوع ناپایداری و گسیختگی در شیروانی‌های طبیعی و مصنوعی از جمله پدیده‌هایی است که در ایران و بسیاری از نقاط جهان به وفور رخ می‌دهد. جابه‌جایی و لغزش توده‌ی زمین در کوله‌های خاک مسلح و شیروانی‌ها با مصالح مختلف اعم از خاک و سنگ اثرات مخرب فراوانی بر راه‌های ارتباطی، تونل‌ها، خطوط آب و فاضلاب و حتی ساختمان‌ها می‌گذارد. یکی از روش‌های نوین در پایدارسازی شیروانی‌های خاکی، استفاده از تسلیح‌کننده‌های سنتتیک است. از این رو، در دهه‌ی اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در این حوزه انجام شده است (کینگ و همکاران، ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴؛ گوئیدو و همکاران، ۱۹۸۵؛ قوش و برا، ۲۰۰۵؛ کولی و همکاران، ۲۰۱۳).

علمشاهی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعه‌ای روی اثرات ناشی از تسلیح شیروانی مسلح با ژئوگرید و گرید آنکر انجام دادند. نتیجه این مطالعه حاکی از افزایش ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر شیروانی مسلح شده با ژئوگرید و گرید آنکر می‌باشد. در این بررسی، نحوه‌ی توزیع ژئوگرید و گرید آنکرها در شیروانی ماسه‌ای به عنوان پارامتر اصلی مؤثر بر افزایش ظرفیت باربری عنوان شده است. یو (۲۰۰۱) اثرات افزایش ظرفیت باربری شیروانی مسلح با لایه‌های ژئوگرید را مطالعه کرده است. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر شیروانی ماسه‌ای مسلح با لایه‌های ژئوگرید نسبت به شیروانی غیرمسلح است. در این بررسی، توزیع لایه‌های ژئوگرید به عنوان عامل اصلی افزایش ظرفیت باربری شیروانی بیان شده است. داس و عمر (۱۹۹۴) مطالعه‌ای روی ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر ماسه و رس مسلح شده با ژئوگرید انجام دادند که تأثیر تسلیح ماسه با ژئوگرید نسبت به رس اشباع مسلح با ژئوگرید بر ظرفیت باربری مقایسه و نتایج آن گزارش شده است. شین و داس (۲۰۰۰) مطالعه‌ای بر ظرفیت

باربری پی نواری واقع بر ماسه مسلح با ژئوگرید ارائه کردند. در این بررسی، نتایج مدل آزمایشگاهی کوچک-مقیاس برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی نواری مستقر بر ماسه مسلح با چند لایه ژئوگرید ارائه شده است.

لنگ و گبر (۲۰۰۲) تحقیق خود را در خصوص مشخصات رفتار مصالح دانه‌ای مسلح با ژئوگرید تحت بارگذاری سیکلی ارائه دادند. در این بررسی، اثرات تسلیح مصالح دانه‌ای تحت بارگذاری سیکلی گزارش شده است. ال‌سواف (۲۰۰۷) مطالعه‌ای بر رفتار پی نواری مستقر بر ماسه مسلح با ژئوگرید که روی شیروانی رسی نرم قرار گرفته بود، انجام داد. در این مقاله، پتانسیل مفید تسلیح و جایگزینی لایه‌های ماسه‌ای مسلح ساخته شده در نزدیک شیروانی جهت افزایش ظرفیت باربری شیروانی رسی بررسی شده است. تفرشی و نوروزی (۲۰۱۶) مطالعه‌ای در رابطه با عملکرد پی دایره‌ای روی ماسه تسلیح شده با ژئوسل و ژئوتکستایل انجام دادند. در این بررسی، مجموعه‌ای از تست‌های آزمایشگاهی روی ظرفیت باربری پی دایره‌ای مستقر بر خاک ماسه‌ای مسلح با ژئوسل و ژئوتکستایل انجام شد و با توجه به خاصیت محصورکنندگی ژئوسل، ظرفیت باربری پی افزایش بیشتری نسبت به شرایط خاک مسلح با ژئوتکستایل داشت.

با توجه به مقاومت کششی ناچیز خاک و وابستگی مقاومت خاک به مقاومت برشی ذرات آن، استفاده از ژئوگریدها برای تسلیح شیروانی خاکی یکی از روش‌های نوین و مقرون به صرفه مطرح شده است. لیکن بیشتر مطالعات و بررسی‌های انجام شده ماهیت تحلیلی و عددی داشته و با استفاده از نرم افزارهای المان محدود و تفاضل محدود انجام شده است (گوئیدو و همکاران، ۱۹۸۵؛ قوش و برا، ۲۰۰۵؛ یو، ۲۰۰۱؛ داس و عمر، ۱۹۹۴؛ شین و داس، ۲۰۰۰). مدل‌سازی فیزیکی (آزمایشگاهی) نقش اساسی در پیشرفت‌های اخیر به وجود آمده در

بارگذاری محل قرارگیری صفحه پلیت باید کاملاً یک سطح صاف و مشابه زمین یا مدل مورد آزمایش باشد. چنانچه مصالح بر اثر ضربه صفحه سست شوند و یا برای به دست آوردن یک سطح صاف، مصالح دیگر زیر پلیت اضافه شود، آزمایش با خطا مواجه می‌شود. پیشنهاد می‌شود که سطح آزمایش با گچ یا ملات سیمان صاف شود. اگر سطح مورد آزمایش بسیار سخت باشد، استفاده از چند لایه از گچ یا ملات سیمان برای به دست آمدن یک سطح به طور کامل صاف ضروری است. در آزمایش‌هایی که روی سطح افقی انجام می‌شود، می‌توان از لایه نازکی از ماسه نرم و یکنواخت نیز استفاده نمود که در این صورت، ضخامت برای آن اغلب ۱ تا ۲ سانتی‌متر است. در مواردی که دانه‌های درشت نیز در مصالح مورد آزمایش دیده شود، این مقدار تا ۵ سانتی‌متر قابل افزایش است. این لایه، وظیفه زهکشی مصالح را در هنگام بارگذاری نیز به عهده دارد. در چنین مواردی، می‌توان اطراف صفحه را هم با لایه ماسه نرم و یکنواخت پوشش داد. استاندارد مورد استفاده در این آزمایش -ASTM D1195 و DIN 18134 و BS 1377:9 است. دو استاندارد فوق، آزمون بارگذاری صفحه‌ای استاتیک را روی خاک‌های ساب‌گرید و روسازی، چه در شرایط متراکم شده و چه در وضعیت طبیعی، بیان می‌کنند.

۳. روش انجام آزمایش

در این تحقیق، شیب مدل‌سازی شده یا خاک مورد نظر در حالت عادی ناپایدار و جهت عملیات خاکریزی غیرقابل استفاده بود. ولی با تمهیداتی که صورت پذیرفت، با تسلیح و متراکم کردن خاک تشکیل دهنده، شیب مورد نظر به ظرفیت باربری مناسب جهت استفاده در عملیات خاکریزی رسانیده شد. به این صورت که ابتدا از دپوی ماسه استفاده شده در کارگاه پروژه توسعه بیمارستان شریعتی تهران به روش استاندارد AASHTO T2 (۲۰۱۱) نمونه‌برداری شد و انتقال نمونه به محل مورد

مسائل ژئوتکنیک دارد. در واقع، این مدل‌سازی‌ها به منظور ارزیابی و تأیید فرضیه‌های مبتنی بر تئوری و یا تجربه انجام می‌گیرند. با مدل‌سازی فیزیکی می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف را با دقت مناسب و تحت شرایط کنترل شده بررسی نمود و نتایج تحلیل‌های عددی را ارزیابی کرد. از جمله تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه توسط مرادی و همکاران (۲۰۱۸) انجام شده است. در این مطالعه، تأثیر تعداد لایه‌های مسلح کننده، عمق لایه‌ها نسبت به سطح زمین و شیب زمین بر باربری پی‌های دایره‌ای و حلقوی واقع بر شیب بررسی شده و نتایج با مدل عددی المان محدود مقایسه شده است. به همین ترتیب، محققان دیگری در زمینه مدل‌سازی آزمایشگاهی شیب‌های مسلح شده با ژئوگرید گزارش‌هایی ارائه داده‌اند (هاتف و فتح‌الزاده، ۲۰۱۸؛ سرکار و همکاران، ۲۰۱۹). در این تحقیقات، مقدار بهینه ظرفیت باربری پی واقع بر شیب مسلح تعیین شده است.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی مدل فیزیکی (آزمایشگاهی) پی دایره‌ای مستقر بر شیروانی ماسه‌ای مسلح با ژئوگرید می‌باشد. لازم به ذکر است که در این بررسی، پارامترهای اصلی مورد بررسی عبارتند از تراکم خاک، تعداد لایه‌های ژئوگرید و فاصله پی از لبه شیب. از جمله نوآوری این تحقیق، مقایسه تأثیر تراکم با تسلیح خاک تشکیل دهنده شیب می‌باشد و همچنین با توجه به اینکه صفحه معادل پی به صورت دایره‌ای است و تحلیل پی دایره‌ای واقع بر شیب در بررسی عددی دوبعدی امکان‌پذیر نیست، نتایج اهمیت دارند. همچنین، در این تحقیق، تورم در دو نقطه در لایه اول خاک تشکیل دهنده شیب که نشان‌دهنده شروع گوه گسیختگی در آن نقطه است، در شرایط مختلف بررسی شده است.

۲. آماده‌سازی محل آزمایش

در آزمایش‌هایی که روی خاک و یا سنگ ضعیف انجام می‌شود، محل آزمایش باید به طور کامل دست نخورده باشد و طبق استاندارد نشریه ۷۳۶ جهت انجام تست

فشار از سمت بالای مدل شیروانی و از طریق عکس العمل تیر مهاری طراحی شده است. جک هیدرولیکی، نیرو را به تیر مهاری که روی آن سربار قرار گرفته اعمال می کند و عکس العمل آن را از طریق صفحه دایره ای به مدل شیروانی خاکی وارد می کند. سپس، بر اساس آیین نامه ۷۳۶ وزارت نیرو (روش آزمایش بارگذاری صفحه) اعمال نیرو در پله های تنش برابر با ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به مدل شیروانی صورت می گیرد. در هر مرحله، جابه جایی پس از اعمال بار در زمان های ۱، ۲، ۴ و ۸ دقیقه بعد از اعمال بار، توسط گیج ها قرائت می شود. برای اندازه گیری نشست ناشی از بارگذاری روی صفحه بارگذاری دو گیج عقربه ای با دقت ۰/۱ میلی متر و با زاویه ۱۲۰ درجه نصب شده است. با این کار، نشست میانگین تعیین شده و احتمال خطا را به صفر می رساند. علاوه بر گیج های اندازه گیری نشست به منظور بررسی تغییر شکل های روی شیب شیروانی تحت بارگذاری، دو گیج عقربه ای با دقت اندازه گیری ۰/۱ میلی متر نیز نصب شد. برای این منظور، دو نقطه روی گوه گسیختگی دایره ای شکل ناشی از بارگذاری در لایه اول خاک تشکیل دهنده شیب برای نصب گیج های اندازه گیری تورم انتخاب شد. بر اساس خروجی ناشی از گیج های اندازه گیری نشست و تورم، منحنی های جابه جایی در برابر ظرفیت باربری ترسیم شد.

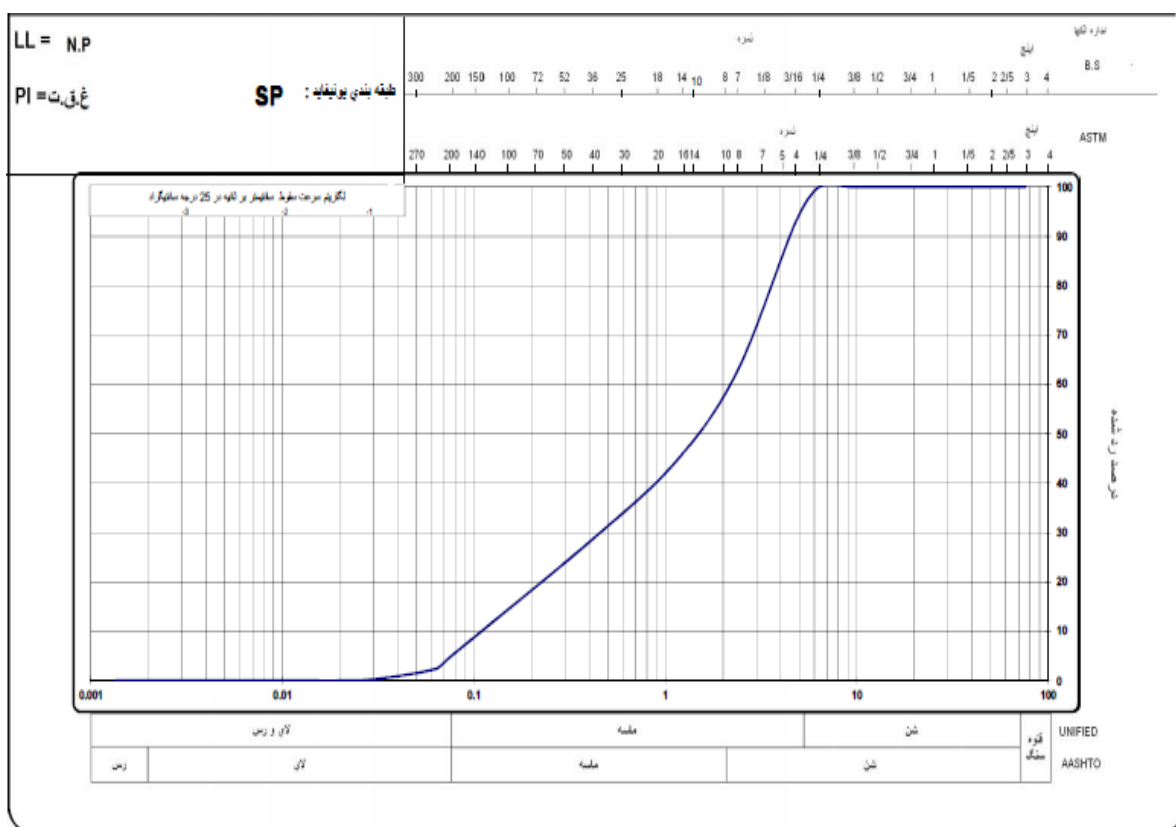
بعد از اینکه دستگاه همراه با تمامی بار مرده (جک، صفحات، ...) به درستی قرار داده شد، صفحه بارگذاری را قرار داده و با بارگذاری سریع و به مقدار کافی، تغییرشکلی به مقدار ۰/۲۵ mm تا ۰/۵۱ (in) تا ۰/۰۱ تا ۰/۰۲) ایجاد می شود. بعد از بارگذاری، زمانی که عقربه گیج ساکن شد، صفحه با وارد کردن نصف بار ثبت شده که تغییر شکل ۰/۰۱ in تا ۰/۰۲ را ایجاد می کند، دوبار مستقر می شود. زمانی که عقربه مجدداً ساکن گشت، ساعت به دقت صفر می شود (شکل ۵-ج).

بار باید با سرعت نسبتاً سریع با افزایش های یکنواخت وارد شود. اندازه هر افزایش بار باید به مقدار

آزمایش انجام پذیرفت. سپس، به روش AASHTO T27 (۲۰۱۸) دانه بندی الک تا قطر ۰/۰۷۵ میلی متر انجام شد و دانه های ریزتر از این قطر به روش هیدرومتری AASHTO T88 (۲۰۰۴) دانه بندی شدند (شکل ۱). سپس، آزمایش تراکم به روش AASHTO T180D (۲۰۰۱) جهت تعیین حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه انجام شد (شکل ۲). بعد از حصول نتایج، جهت کنترل درصد تراکم لایه های مختلف، آزمایش دانسیته طبق استاندارد AASHTO T191 انجام شد (شکل ۳). همچنین، جهت به دست آوردن پارامترهای مقاومتی خاک به روش ASTM D3080 (۲۰۱۱) آزمایش برش مستقیم ۳۰۰×۳۰۰ میلی متر انجام شد (شکل ۴). خلاصه مشخصات خاک مورد استفاده در این آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. بعد از به دست آمدن C و ϕ خاک مورد نظر، با توجه به این نتایج از روش اسپیرال لگاریتمی جهت تعیین ارتفاع، طول و عرض گوه گسیختگی و به تبع آن ساخت هندسه مدل آزمایشگاه با ابعاد قابل تعریف برای صفحه ۱۳ سانتی متری (جهت بارگذاری) اقدام شد. بعد از ساخت باکس فلزی آزمایشگاهی، اساس تحقیق انجام شده بر طبق نشریه ۷۳۶ وزارت نیرو جهت بارگذاری و باربرداری روی خاک و سنگ ضعیف بنا شد. نکته قابل اهمیت این است که به دلیل استاتیک بودن پژوهش صورت گرفته، از انجام مرحله باربرداری برای آزمایش ها صرف نظر شد. صفحه بارگذاری به قطر مورد نظر با دقت در مرکز و در زیر جک قرار داده می شود. همچنین، صفحات باقیمانده با قطر کوچک تر، هم مرکز و روی صفحه بارگذاری قرار می گیرد. صفحه بارگذاری روی بستر نازکی از مخلوط ماسه و گچ پاریس یا ماسه ریز و یا گچ پاریس تراز می شود. برای تراز کردن سطح از حداقل مواد استفاده می شود. برای جلوگیری از کاهش رطوبت ساگرید در طول آزمایش، سطح آن به فاصله ۱/۸ m از محیط صفحه بارگذاری به وسیله تارپولین و یا کاغذ ضد آب پوشانده می شود. در این آزمایش، نیروی فشاری به صورت اعمال

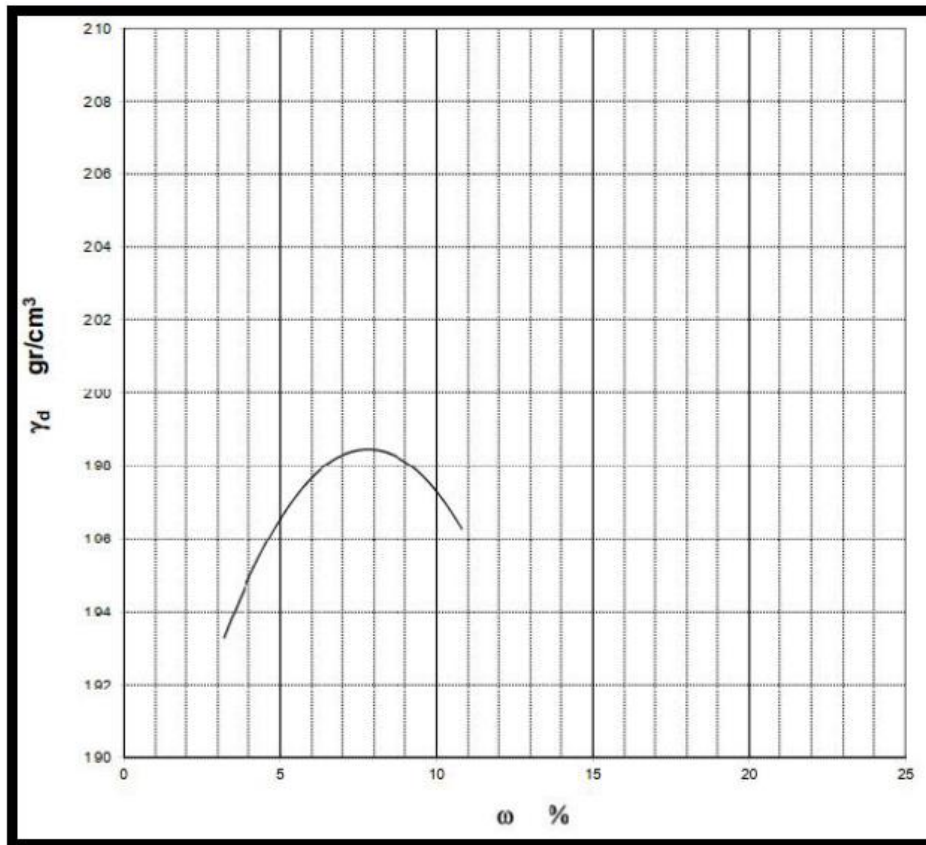
تغییر شکل اضافه شده برای سه زمان متوالی از in/min $0/001$ بیشتر نشود و تغییر شکل کل یادداشت می شود. از روی ترمومتر آویزان در نزدیک صفحه بارگذاری، دما در فواصل زمانی نیم ساعت ثبت می شود. در شکل های ۵- الف تا د، مراحل ساخت مدل و بارگذاری نشان داده شده است. برای تمام حالت های نشست، از سنجش گره های با کورس 30 میلی متر و برای بررسی تورم ها از سنجش- گره های با کورس 50 میلی متر و درصد خطای $0/01$ استفاده شده است.

لازم کوچک باشد تا امکان ثبت نقاط به تعداد کافی برای رسم منحنی تغییر شکل - بار ایجاد گردد (حداقل 6 نقطه). بعد از اعمال هر افزایش بار، باید منتظر شد تا نرخ تغییر شکل کمتر از $0/001 \text{ in}/\text{min}$ ($0/03 \text{ mm}/\text{min}$) برای سه زمان متوالی به دست آید. مقدار بار و تغییر شکل برای هر افزایش بار یادداشت می شود. به همین طریق، ادامه داده می شود تا تغییر شکل مجاز مورد نظر که برای پی تکی 25 میلی متر است، به دست آید و یا به ماکزیمم ظرفیت دستگاه برسد (هر کدام که زودتر اتفاق بیفتد). در این نقطه، بار ثابت نگه داشته می شود تا زمانی که



شکل ۱. نمودار دانه بندی خاک مورد نظر

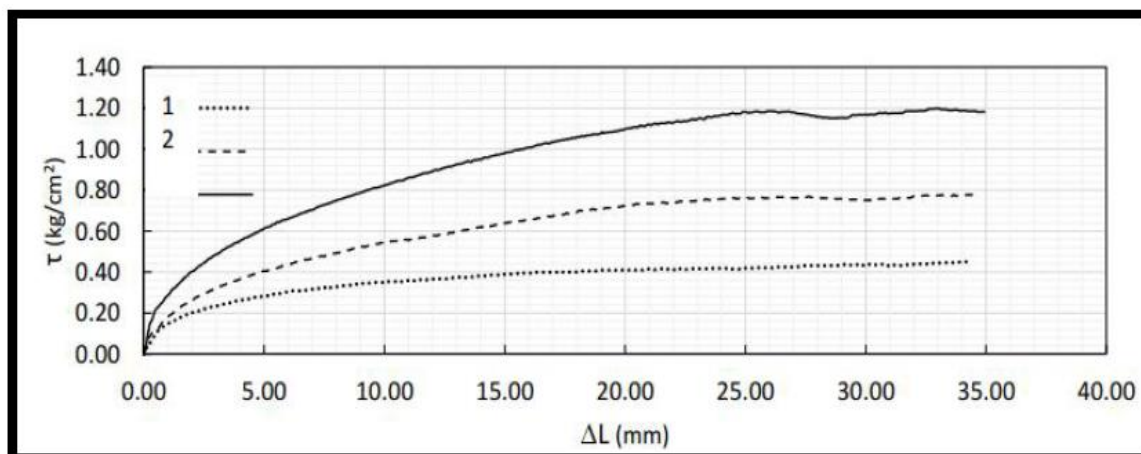
بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی دایره ای مستقر برشیروانی ماسه ای مسلح با ژئوگرید



شکل ۲. نتایج آزمایش تراکم



شکل ۳. آزمایش دانسیته



شکل ۴. تنش بر حسب جابه‌جایی در آزمایش برش مستقیم

جدول ۱. مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش تحقیق حاضر

جرم حجمی (gr/cm^3)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kg/cm^2)	نوع خاک
۰/۰۱	۳۷	۰/۰۶	ماسه بد دانه‌بندی شده

است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، تعداد ژئوگریدها (فاصله بین لایه ژئوگرید)، فاصله پی از لبه شیب (b) و تراکم خاک است. مشخصات مدل مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۶ نشان داده شده است. خلاصه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در جدول ۳ نشان داده شده است. تراکم به دو صورت به وسیله غلتک ۵۰ کیلوگرمی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵-الف): تراکم در ۷ لایه ۱۴ سانتی متری و تراکم در ۵ لایه ۲۰ سانتی متری.



ب

برای جلوگیری از اثرات دست‌خوردگی زمین زیر صفحه، می‌توان پیش از بارگذاری اصلی، چند بارگذاری تناوبی سریع و با فشارهای کم اعمال نمود. در این تحقیق، آزمایش‌های مختلفی تحت شرایط متفاوت با دستگاه بارگذاری صفحه انجام شده است (شکل ۵-ج). بارگذاری در تمامی حالت‌ها با استفاده از صفحه ۱۳ سانتی متری (B) انجام شده است. ژئوگرید مورد استفاده در این آزمایش در شکل ۵-د و مشخصات ژئوگرید در جدول ۲ نشان داده شده است.

در این پژوهش، ۱۹ مورد آزمایش در نظر گرفته شده



الف



د



ج

شکل ۵. الف) غلتک مورد استفاده در آزمایش، ب) ساخت مدل، ج) تجهیزات بارگذاری بر شیب خاکی و د) ژئوگرید مورد استفاده در آزمایش

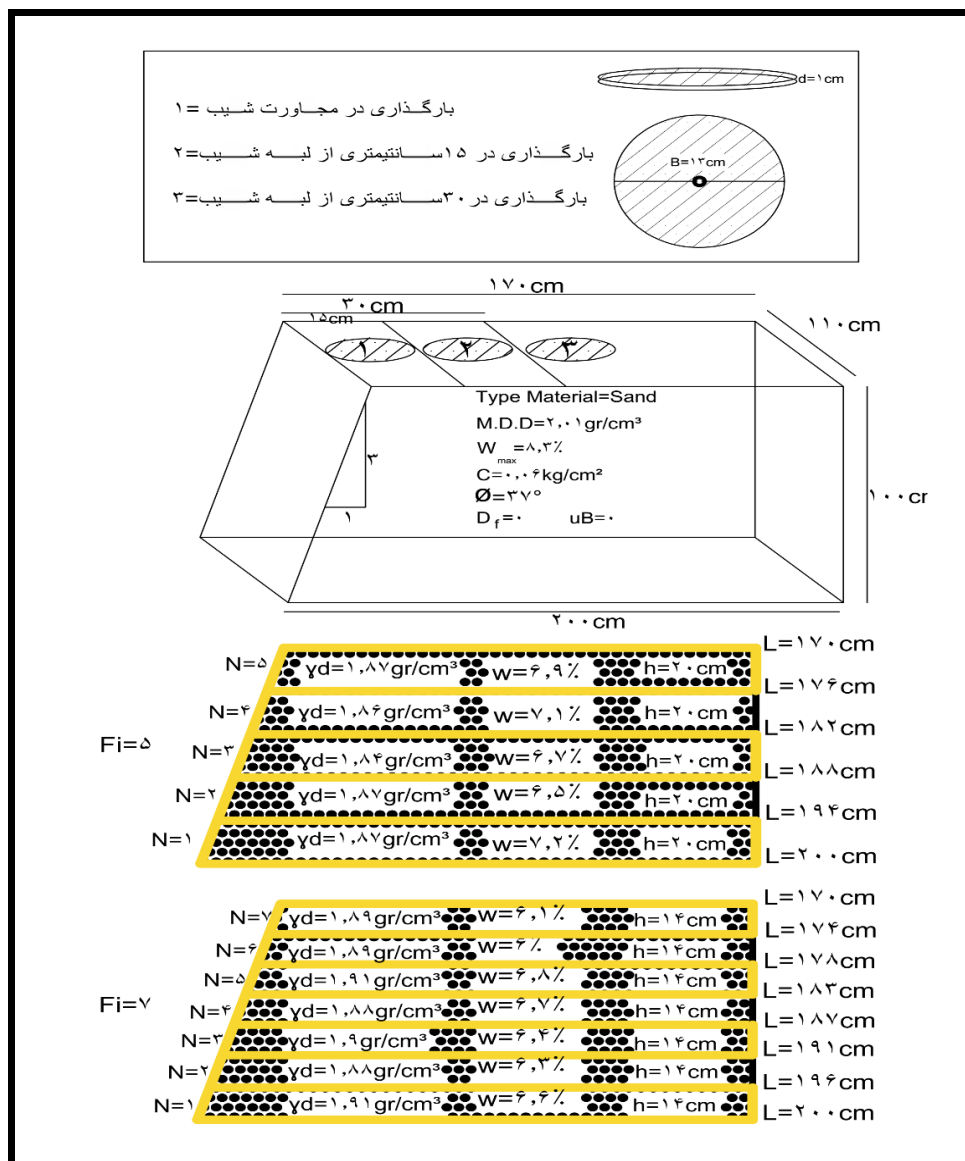
جدول ۲. مشخصات ژئوگرید مورد استفاده

اندازه چشمه مسلح کننده (mm×mm)	حداکثر مقاومت کششی در مسیر دستگاه (kN/m)	حداکثر مقاومت کششی عمود مسیر دستگاه (kN/m)	افزایش طول گسیختگی در مسیر دستگاه (kN/m)	افزایش طول گسیختگی عمود بر مسیر دستگاه (kN/m)	جرم در واحد سطح (gr/m ²)	مدول الاستیسیته (kPa)
۵۰×۵۰	۸۰	۳۰	۱۵	۱۵	۴۲۵	۸۰۰۰۰

جدول ۳. خلاصه آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر

شماره آزمایش	شرایط تسلیح	شرایط تراکم	تعداد لایه‌ها	ضخامت لایه‌ها (cm)	محل قرارگیری صفحه (cm)	اختصار
۱	غیر مسلح	متراکم شده	۵	۲۰	مجاورت شیب	غ م ۵-۳
۲	غیر مسلح	متراکم شده	۵	۲۰	۱۵	غ م ۵-۱۵
۳	غیر مسلح	متراکم شده	۵	۲۰	۳۰	غ م ۵-۳۰
۴	غیر مسلح	متراکم شده	۷	۱۴	مجاورت شیب	غ م ۷-۳
۵	غیر مسلح	متراکم شده	۷	۱۴	۱۵	غ م ۷-۱۵
۶	غیر مسلح	متراکم شده	۷	۱۴	۳۰	غ م ۷-۳۰
۷	تسلیح شده	متراکم نشده	۵	۲۰	مجاورت شیب	ت م ۵-۳
۸	تسلیح شده	متراکم نشده	۵	۲۰	۱۵	ت م ۵-۱۵
۹	تسلیح شده	غیر متراکم	۵	۲۰	۳۰	ت غ ۵-۳۰
۱۰	تسلیح شده	غیر متراکم	۷	۱۴	مجاورت شیب	ت غ ۷-۳
۱۱	تسلیح شده	غیر متراکم	۷	۱۴	۱۵	ت غ ۷-۱۵
۱۲	تسلیح شده	غیر متراکم	۷	۱۴	۳۰	ت غ ۷-۳۰
۱۳	تسلیح شده	متراکم شده	۵	۲۰	مجاورت شیب	ت م ۵-۳

ت م ۵-۱۵	۱۵	۲۰	۵	متراکم شده	تسلیح شده	۱۴
ت م ۵-۳۰	۳۰	۲۰	۵	متراکم شده	تسلیح شده	۱۵
ت م ۷-۳	مجاورت شیب	۱۴	۷	متراکم شده	تسلیح شده	۱۶
ت م ۷-۱۵	۱۵	۱۴	۷	متراکم شده	تسلیح شده	۱۷
ت م ۷-۳۰	۳۰	۱۴	۷	متراکم شده	تسلیح شده	۱۸



شکل ۶. مشخصات مدل و پارامترهای مورد بررسی

۴. نتایج و بحث

در صورت تراکم خاک و استفاده از ژئوگریدها در لایه‌های متعدد می‌توان ظرفیت باربری خاک را تا چندین برابر حالت فقط تراکم یافته افزایش داد. در این بخش از تحقیق، نتایج هر سری از آزمایش‌ها در شرایط مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. ذکر این موضوع ضروری

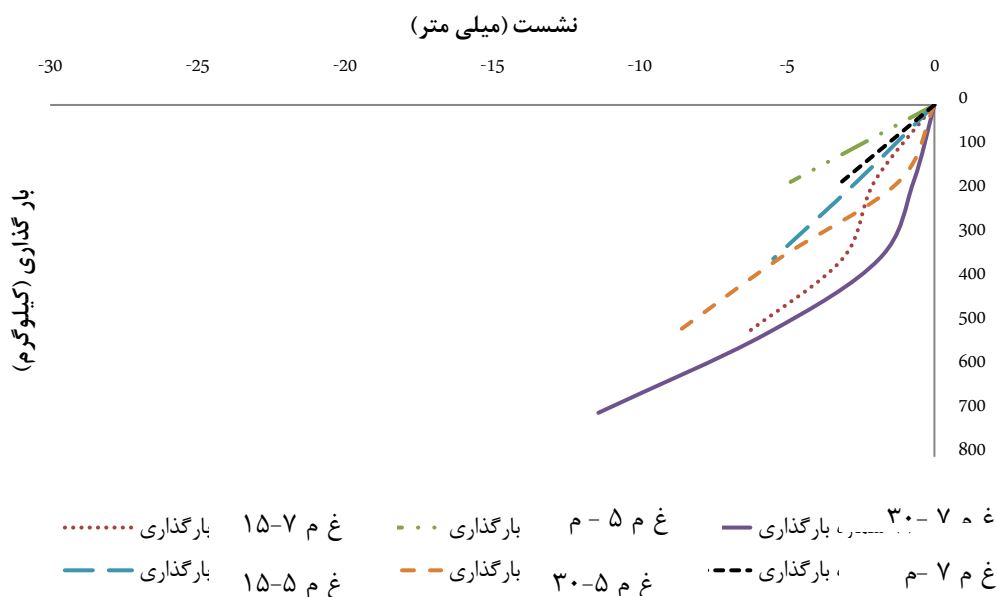
نتایج به وضوح حاکی از این بود که در نمونه‌های ساخته شده و آزمایش شده، نقش ژئوگرید در افزایش ظرفیت باربری خاک به هیچ عنوان قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد و

ژئوگرید

بعد از مشخص شدن نشست در تمام نمونه‌ها، مقایسه‌ای بین نمودارهای به‌دست آمده انجام شده است. با توجه به مقایسه نمودارهای نشست در تمام نمونه‌ها، به وضوح مشخص است که با افزایش تراکم خاک، ظرفیت باربری آن به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است. همچنین، با افزایش فاصله بارگذاری از لبه شیب، همانطور که پیش‌بینی می‌شد، نمونه‌ها مقاومت بیشتری را در مقابل بارگذاری از خود نشان دادند و هر چه بارگذاری به لبه شیب نزدیک می‌شد، ظرفیت باربری به مقدار چشم‌گیری کاهش نشان می‌داد. در حالت متراکم شده در ۷ لایه و بارگذاری در ۳۰ سانتی‌متری لبه شیب، ظرفیت باربری خاک ۴۰۰ درصد نسبت به حالت متراکم شده در ۵ لایه و بارگذاری در لبه شیب بیشتر شده است (شکل ۷). همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش لایه‌های تراکم در شرایط پی در مجاورت شیب، افزایش ظرفیت باربری برابر ۶۰ درصد مشاهده می‌شود.

است که از سری آزمایش‌ها روی نمونه‌های تسلیح نشده و متراکم نشده به دلیل عدم پایداری شیب، صرف نظر شده و فقط نمونه‌های متراکم شده تسلیح نشده، متراکم نشده تسلیح شده و متراکم شده تسلیح شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که برای تعیین تورم خاک در سطح شیب‌دار، دو عدد گیج در لایه اول، یکی در مرکز لایه و دیگری در ۱۲ سانتی‌متری از لبه سمت راست مدل، کار گذاشته شده است. همچنین، برای تعیین نشست صفحه، دو عدد گیج به زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم روی لبه پلیت قرار گرفته و میانگین نشست این دو گیج در نظر گرفته شده است و مرکز صفحه محل قرارگیری پیستون است. باید ذکر شود که بارگذاری تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که خاک دچار گسیختگی شود یا نشست به ۲۵ میلی‌متر، که نشست مجاز برای پی‌های تکی است، برسد.

۴-۱. مقایسه نتایج نمونه‌های متراکم شده بدون



شکل ۷. مقایسه نتایج نشست در نمونه‌های مختلف در حالت تسلیح نشده متراکم شده

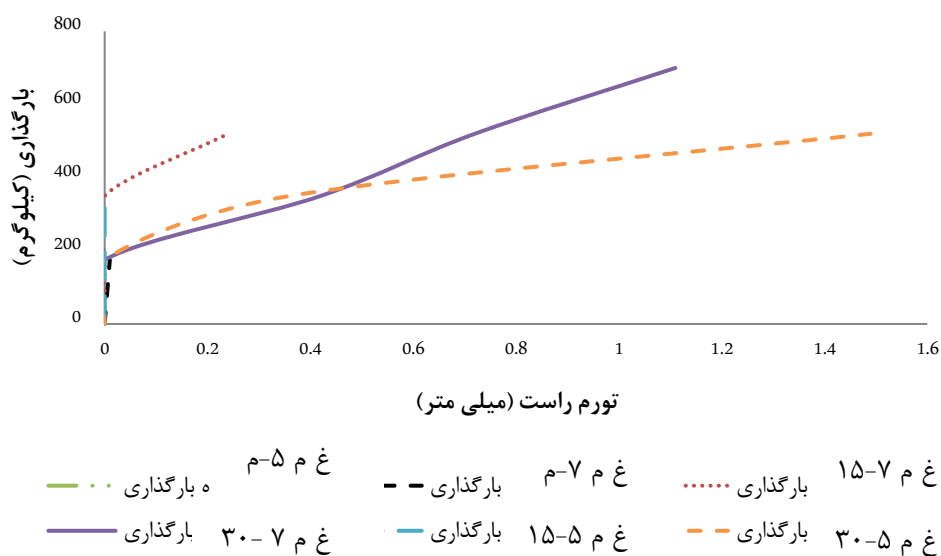
نمونه خاک مورد آزمایش می‌توان تا حدی بر ظرفیت باربری خاک افزود. در حالی که نتایج نشان می‌دهد که

در شرایط متراکم شده در ۵ لایه ۲۰ سانتی‌متری و بارگذاری در لبه شیب، نتایج نشان داد که با متراکم کردن

همین دلیل است که در شکل ۸، سه نمودار دیده می‌شود. باید ذکر شود که تورم در سمت راست لایه اول خاک تشکیل‌دهنده شیب تعیین شده و نشان‌دهنده شروع گوه گسیختگی در آن نقطه است. در شرایط غ م ۵-، غ م ۷-، م و غ م ۵-۱۵، با توجه به موقعیت پی که در نزدیکی شیب است، محدوده تشکیل گوه گسیختگی کاهش می‌یابد و به همین دلیل تورم در سمت راست در این حالت مشاهده نمی‌شود. با فاصله گرفتن بارگذاری از لبه شیب و با گسترش گوه گسیختگی، تورم در سمت راست به طرز چشمگیری افزایش داشته است. همچنین، با افزایش تراکم خاک و افزایش درگیری بین لایه‌ها، عمق گوه گسیختگی و در نتیجه تورم ایجاد شده در سمت راست خاک بیشتر شده است. به طوری که در تراکم ۷ لایه در حالت پی در ۳۰ سانتی‌متری از لبه شیب، ۴۰ درصد افزایش تورم سمت راست نسبت به حالت مشابه با ۵ لایه تراکم دیده شده است (شکل ۸).

در شرایطی که پی در مجاورت شیب باشد، افزایش تعداد لایه‌های تراکم از ۵ به ۷ تأثیری بر ظرفیت باربری خاک ندارد. علت این نتیجه، گوه گسیختگی ایجاد شده زیر پی در مجاورت شیب می‌باشد (شکل ۷). همچنین، با افزایش لایه‌های تراکم و فاصله گرفتن بارگذاری از لبه شیب، ظرفیت باربری خاک در شرایط غ م ۷-۳۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم افزایش یافته و نسبت به شرایط غ م ۵-۳۰، ۳۴ درصد افزایش مشاهده شده است. به این ترتیب، با افزایش تراکم لایه‌ها، ظرفیت باربری پی با فاصله گرفتن از لبه شیب افزایش می‌یابد. از دلایل رفتار الاستیک اکثر نمودارهای بار-نشست، نوع خاک تشکیل‌دهنده شیب که ماسه و بدون چسبندگی است، می‌باشد و باعث می‌شود که خاک از حالت الاستیک به یک باره برش بخورد.

نتایج تورم سمت راست نمونه در شکل ۸ نشان می‌دهد که در بارگذاری‌های نزدیک به لبه شیب تورمی رخ نداده است (غ م ۵-، غ م ۷-، غ م ۵-۱۵). به



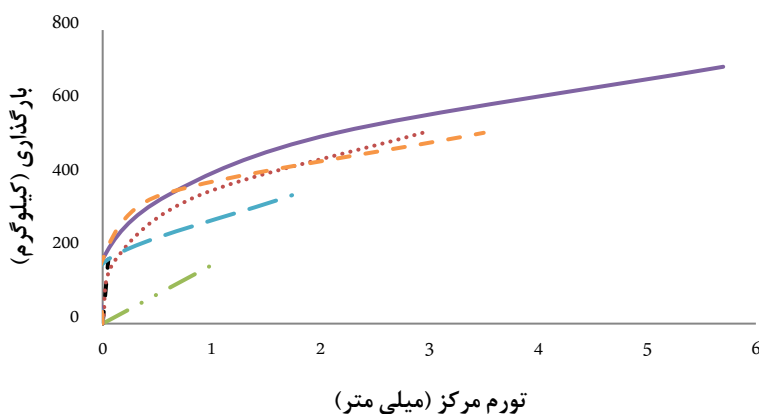
شکل ۸. مقایسه نتایج بین تورم در سمت راست حالت‌های مختلف در حالت تسلیم نشده متراکم شده

می‌باشد، طوری است که در شرایطی که محدوده گوه گسیختگی به علت مجاورت با شیب و یا کمتر بودن تراکم گسترده نمی‌باشد هم تورم در این نقطه مشاهده

تورم در مرکز، بر خلاف تورم در سمت راست لایه اول خاک تشکیل‌دهنده شیب، در تمام آزمایش‌ها دیده می‌شود. زیرا محل تعیین تورم که در مرکز لایه خاک

افزایش تورم در مرکز نسبت به حالت غ م ۷-۳۰ مشاهده می شود. زیرا با زیاد شدن فاصله لایه ها از ۱۴ به ۲۰ سانتی متر، میزان ظرفیت باربری کم می شود و گسترش گوه گسیختگی ایجاد شده کاهش می یابد و در نتیجه تورم کمتری نسبت به حالت ۷ لایه مشاهده می شود (شکل ۹).

می شود. تورم در مرکز برای حالت های با تراکم بیشتر به دلیل گسترش گوه گسیختگی مقدار بیشتری است. به طوری که در حالت ۷ لایه تراکم و بارگذاری در ۳۰ سانتی متری از لبه شیب، تورم در مرکز تا ۶ میلی متر هم قرائت شده است. در حالی که در حالت متراکم شده در ۵ لایه و در ۳۰ سانتی متری از لبه شیب، این مقدار ۳،۵ میلی متری باشد. بنابراین، در حالت غ م ۵-۳۰، ۷۲ درصد



شکل ۹. مقایسه نتایج بین تورم در مرکز در حالت های مختلف در حالت تسلیح نشده متراکم شده

غ م ۷-۱۵	ناری ۱۱	غ م ۷-۳	گذاری ۱۰-	غ م ۵-۳۰	گذاری ۲
غ م ۵-۳۰	بارگذاری	غ م ۵-۱۵	بارگذاری	غ م ۷-۳۰	ناری ۱۲

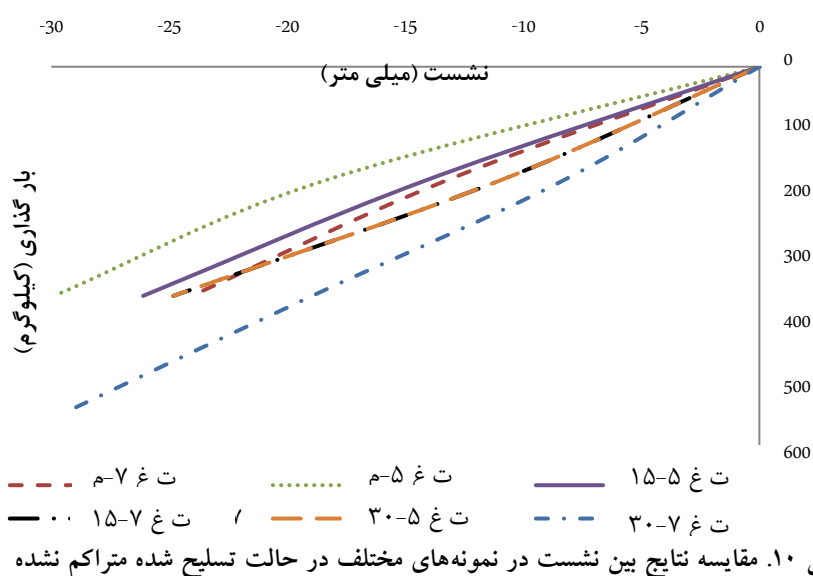
باربری ماکزیمم قرائت شده است. در حالی که نسبت به ۵ لایه و بارگذاری در مجاورت شیب، یعنی ضعیف ترین حالت، ۴۸ درصد افزایش در ظرفیت باربری مشاهده می شود (شکل ۱۰). همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، افزایش تعداد لایه های مسلح کننده بدون تراکم لایه ها، در شرایطی که پی در نزدیکی لبه شیب قرار دارد، تأثیری بر باربری پی ندارد. علت آن است که گوه گسیختگی محدود است و وجود لایه های مسلح کننده تأثیر چندانی بر ظرفیت باربری نمی گذارد. در حالی که با افزایش فاصله پی از لبه شیب تا ۳۰ سانتی متر و گسترش گوه گسیختگی تأثیر مسلح کننده ها بر ظرفیت باربری افزایش می یابد. همچنین، مقایسه شرایط متراکم نشده،

۲-۴. مقایسه نتایج نمونه های متراکم نشده و مسلح شده

در این بخش نیز نتایج محاسبه نشست در نمونه های تسلیح شده و متراکم نشده با یکدیگر مقایسه شده اند. این مقایسه نیز مانند حالت قبلی (تسلیح نشده متراکم شده) نشان داد که با فاصله گرفتن بارگذاری از لبه شیب، نمونه ها به مراتب ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان می دهند. همچنین، بدیهی است که با افزایش تعداد لایه های ژئوگرید، ظرفیت باربری نمونه افزایش از خود نشان داده و برای حالت های با لایه های بیشتر، مقدار بیشتری بوده است. به طوری که در حالت ۷ لایه ژئوگرید و در فاصله ۳۰ سانتی متری از مجاورت شیب، ظرفیت

دلیل نزدیک بودن تمام ظرفیت باربری‌ها با همدیگر، می‌توان به این نکته پی برد که این امر نشان‌دهنده این است که ظرفیت باربری در حالت‌های تسلیح شده متراکم نشده مربوط به ژئوگرید است و خاک استفاده شده در اینجا حالت پُرکننده فواصل بین لایه‌ها را دارد، زیرا ظرفیت باربری در همه نقاط اختلاف چندانی نداشته و تورم چندانی به دلیل سست بودن مصالح و عدم اندرکنش بین دانه‌ها در تمامی این حالات رخ نداده است (شکل ۱۰).

مسلح شده با متراکم شده، مسلح نشده نشان می‌دهد که در حالت م غ ۷-۳۰، ظرفیت باربری پی واقع بر شیب نسبت به حالت م غ ۷-۳۰، ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. در حالی که در شرایط فرارگیری پی در مجاورت شیب و ۱۵ سانتی‌متری از پی، نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری در شرایط تسلیح شده بیشتر از متراکم شده می‌باشد. این نتیجه به دلیل شکل گوه گسیختگی و گسترش آن در موقعیت‌های مختلف پی نسبت به لبه شیب می‌باشد. در حالت متراکم نشده مسلح شده، به



۳-۴. مقایسه نتایج نمونه‌های تسلیح شده و

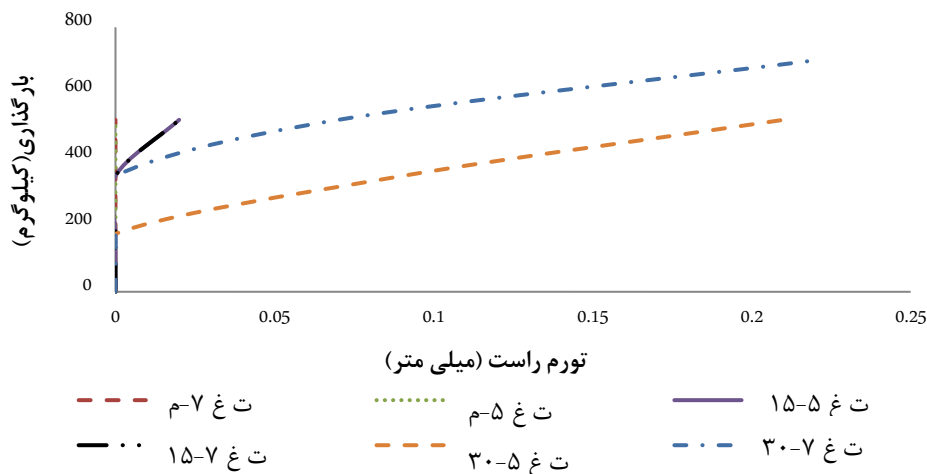
متراکم شده

در این بخش نیز نتایج محاسبه نشست در نمونه‌های تسلیح شده و متراکم شده با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۱۲). این مقایسه نیز نشان داد که با فاصله گرفتن بارگذاری از لبه شیب و افزایش تراکم و ژئوگریدها، نمونه‌ها به مراتب ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان می‌دهند. همچنین، بدیهی است که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید، ظرفیت باربری نمونه افزایش چشم‌گیری از خود نشان داده است. در حالت تسلیح شده و متراکم شده در ۷ لایه ۱۴ سانتی‌متری و بارگذاری در ۳۰ سانتی‌متری لبه شیب، بیشترین مقاومت نمونه نتیجه

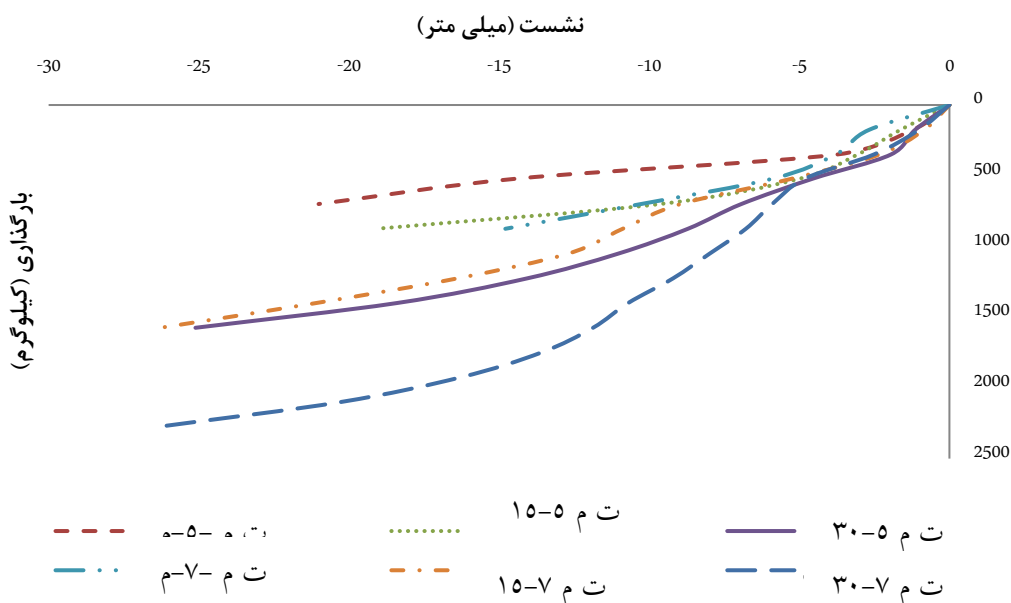
با توجه به شکل ۱۱، به دلیل عدم قفل‌وبست بین مصالح و ژئوگریدها، تورم در سمت راست خاک بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است و تورم در سمت راست در سه حالت ت غ ۵-۳۰، ت غ ۷-۳۰ و ت غ ۷-۱۵ رخ نداده است. در سه بارگذاری دیگر نیز در ابتدا تورم رخ نداده، ولی با افزایش بار، اندکی تورم مشاهده شده است. حداکثر تورم در حالت مسلح شده در ۷ لایه و بارگذاری در ۳۰ سانتی‌متر از شیب رخ داده است که این مقدار کم بوده و در حالت حداکثر برابر با ۰/۲۲ میلی‌متر می‌باشد. به همین ترتیب، تورم در مرکز هم در این شرایط قابل صرف‌نظر کردن است.

بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی دایره ای مستقر بر شیروانی ماسه ای مسلح با ژئوگرید

می‌شود. زیرا در این آزمایش، فاصله بارگذاری تا شیب در بیشترین حالت ممکن بوده و همچنین، از ۷ لایه ژئوگرید نیز استفاده شده است.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج بین تورم در سمت راست حالت‌های مختلف در حالت تسلیح شده متراکم نشده



شکل ۱۲. مقایسه نتایج بین نشست در نمونه‌های مختلف در حالت تسلیح شده متراکم شده

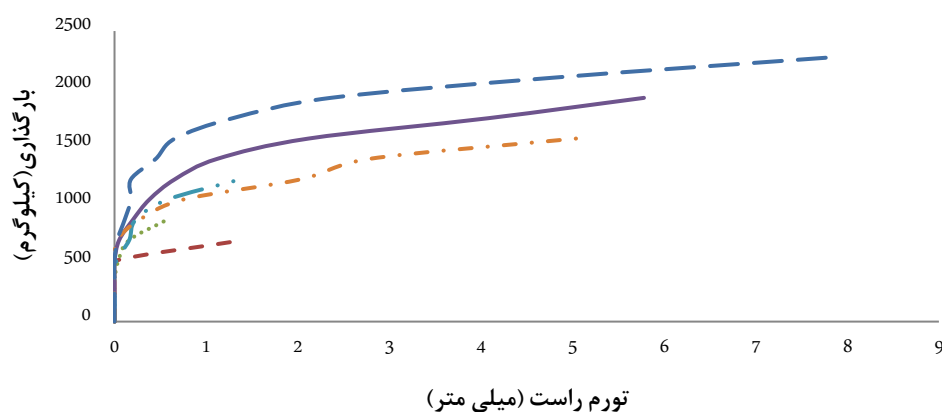
در حالت ت م ۳۰-۷ که بیشترین تراکم و ژئوگرید را دارا بوده، ظرفیت باربری خاک برابر ۲۲۷۵ کیلوگرم بود که نسبت به حالت متراکم شده مسلح نشده ۳/۲۵ برابر و نسبت به حالت متراکم نشده مسلح شده ۴/۳ برابر شده است. در مقایسه حالت متراکم شده، مسلح شده با

نتایج در این حالت نشان از افزایش چشمگیر ظرفیت باربری خاک دارد (شکل ۱۲). به طوری که در بحرانی‌ترین حالت بارگذاری، یعنی با کمترین لایه تراکم و ژئوگرید و بارگذاری در لبه شیب، ظرفیت باربری خاک به مراتب از نمونه‌های مشابه در دو حالت قبلی بیشتر بود.

نشان‌دهنده افزایش چشمگیر تورم می‌باشد. این مقدار در حالت تسلیح شده و متراکم شده در ۷ لایه ۱۴ سانتی‌متری و بارگذاری در ۳۰ سانتی‌متری لبه شیب تا ۷/۸۵ میلی‌متر هم قرائت شده است که در مقایسه با نمونه تقریباً مشابه در حالت متراکم نشده مسلح شده افزایش ۳۶ برابری را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده پیوستگی بین مصالح و ژئوگرید و به تبع آن کشیده شدن گوه گسیختگی از مرکز به گوشه‌ها و پخش‌شدگی تورم در تمام قسمت‌های شیب می‌باشد (شکل ۱۳).

حالت‌های متراکم شده، مسلح نشده و متراکم نشده، مسلح شده، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط ۵ لایه تراکم و مجاورت شیب، ظرفیت باربری در حالت متراکم شده، مسلح شده ۲ برابر حالت متراکم نشده، مسلح شده و ۴ برابر حالت متراکم شده، مسلح نشده می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط متراکم شده، مسلح شده، با توجه به افزایش سختی، رفتار پلاستیک دیده می‌شود. اما در دو حالت قبل، رفتار بار-نشست اکثر نمودارها الاستیک می‌باشد.

نمودارهای تورم در سمت راست صفحه بارگذاری



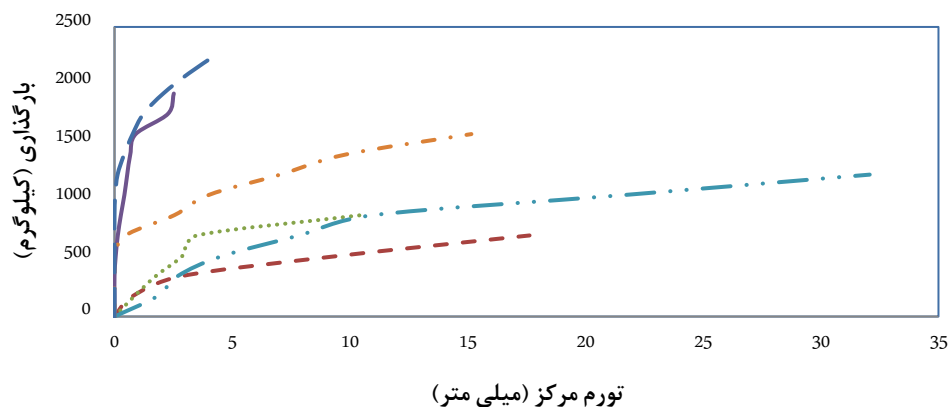
شکل ۱۳. مقایسه نتایج بین تورم در سمت راست حالت‌های مختلف در حالت تسلیح شده متراکم شده

۵ م - بارگذاری (—) ، ۵ م - بارگذاری (.....) ، ۵ م - بارگذاری (---) ، ۵ م - بارگذاری (---) ، ۵ م - بارگذاری (---) ، ۵ م - بارگذاری (---)
 ۷ م - بارگذاری (---) ، ۷ م - بارگذاری (---) ، ۷ م - بارگذاری (---) ، ۷ م - بارگذاری (---) ، ۷ م - بارگذاری (---) ، ۷ م - بارگذاری (---)

این تحقیق نشان داد که تراکم خاک و استفاده از ژئوگریدها تأثیر به‌سزایی بر ظرفیت باربری خاک می‌گذارند. در صورت استفاده به تنهایی از ژئوگرید، بدون تراکم کردن نمونه، نیز ظرفیت باربری خاک افزایش خواهد یافت. ولی در مقایسه با تراکم به تنهایی، مقدار کمتری خواهد داشت. به بیان دیگر، در صورت تراکم کردن خاک، ظرفیت باربری افزایش بیشتری نسبت به حالتی که از ژئوگرید به تنهایی (بدون تراکم) استفاده شود، خواهد داشت. ولی در صورت بهبود توأمان نمونه-ها به وسیله تراکم در ۷ لایه و استفاده از ژئوگرید، مقاومت خاک به طرز شگرفی از خود افزایش نشان

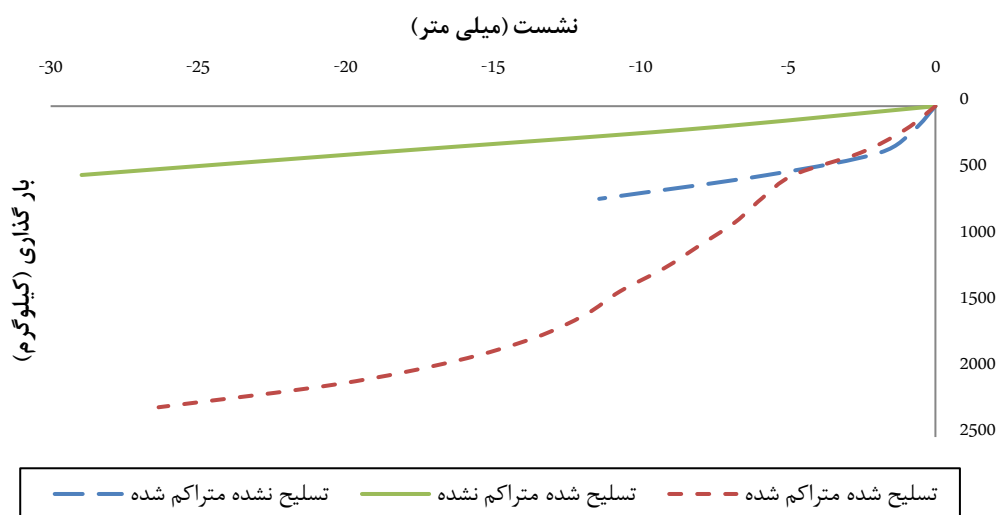
تورم در مرکز نمونه خاک مورد استفاده در این تحقیق در حالت مسلح شده متراکم شده مقادیر بسیار بیشتری را نسبت به دو حالت قبلی نشان می‌دهد که این موضوع ارتباط مستقیم با افزایش ارتباط دانه‌های خاک در اثر افزایش تراکم و استفاده از ژئوگریدها دارد. ذکر این موضوع حائز اهمیت است که در حالت ۷ لایه تراکم و ژئوگرید و بارگذاری در مجاورت شیب، بیشترین مقدار تورم (۳۲/۰۸ میلی‌متر) ثبت شده است (شکل ۱۴). از دلایل افزایش تورم در مرکز نمونه خاک در این حالت، گوه گسیختگی است که در این حالت در مرکز متمرکز شده است.

خواهد داد. به طوری که مقاومت خاک تا بیش از ۳ برابر حالت‌های قبل افزایش خواهد داشت. در شکل ۱۵، مقایسه‌ای بین بیشترین مقاومت نمونه‌ها (۷ لایه، ۳۰ سانتی متری از لبه شیب) در سه حالت مختلف آزمایش نشان داده شده است.



ت م ۵- گذاری
ت م ۷- گذاری
ت م ۵- اری
ت م ۷- اری
ت م ۵- ناری
ت م ۷- ناری

شکل ۱۴. مقایسه نتایج بین تورم در مرکز در حالت‌های مختلف در حالت تسلیح شده متراکم شده



شکل ۱۵. مقایسه نشست نمونه‌ها با حداکثر ظرفیت باربری در سه حالت مختلف

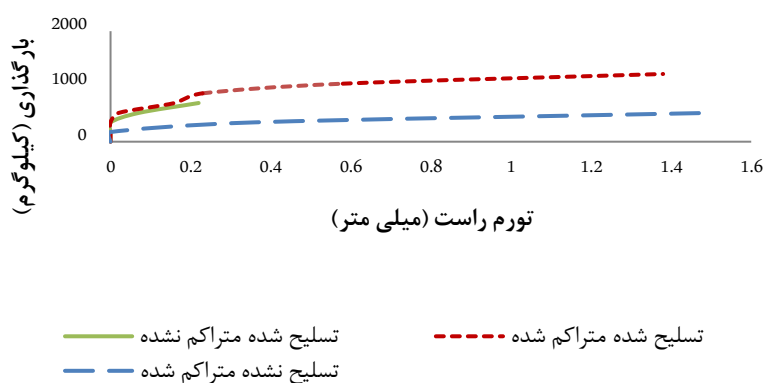
همانطور که از شکل ۱۵ مشخص است، ظرفیت باربری در حالت تسلیح نشده متراکم شده، نسبت به حالت تسلیح شده متراکم نشده، ۳۳ درصد بیشتر است. همچنین، با متراکم شدن و تسلیح خاک نسبت به حالت

ذکر این نکته ضروری است که شیب خاک مورد نظر در این تحقیق بدون بهسازی پایداری ندارد و با تمهیدات صورت گرفته در این پژوهش، ظرفیت باربری مدل شیب خاکی ساخته شده بسیار بالا رفته است.

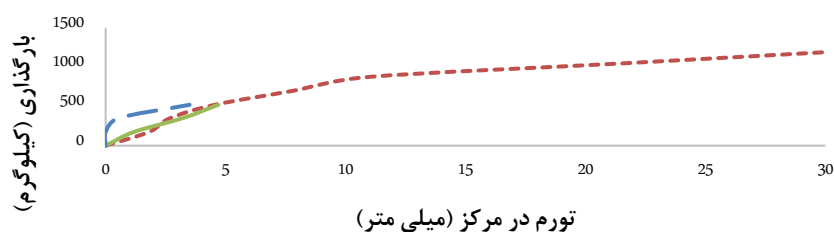
تا حد قابل قبولی از شدت تورم خاک در این تحقیق، هم در مرکز و هم در قسمت سمت راست نمونه خاک، کاسته شده است که به نسبت تحمل ظرفیت باربری در سه حالت مختلف در بار ۵۲۵ کیلوگرم مقایسه شده است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).

فقط مسلح ۴۳۳ درصد افزایش و نسبت به حالت فقط متراکم ۳۲۵ درصد افزایش ظرفیت باربری را نشان می‌دهد (شکل ۱۵).

با مقایسه حداکثر تورم‌ها در سمت راست در سه حالت مختلف می‌توان بیان کرد که نقش تراکم خاک در افزایش تورم به مراتب پُرننگ‌تر از نقش تسلیح خاک می‌باشد (شکل ۱۶) و با مسلح نمودن خاک متراکم شده



شکل ۱۶. مقایسه نتایج بین تورم در سمت راست نمونه‌ها با حداکثر ظرفیت باربری در سه حالت مختلف



شکل ۱۷. مقایسه نتایج بین تورم در مرکز نمونه‌ها با حداکثر ظرفیت باربری در سه حالت مختلف

و بارگذاری در ۳۰ سانتی‌متری شیب صورت پذیرفت. نتایج حاصله حاکی از آن بود که در شیب خاکی که در حالت عادی هیچ‌گونه پایداری نداشت، در حالت فقط متراکم و در ۳۰ سانتی‌متری از لبه شیب، ۳۳ درصد نسبت به حالت فقط تسلیح، افزایش ظرفیت باربری مشاهده شده است. در حالی که در فواصل نزدیک‌تر به شیب، با توجه به شکل گوه گسیختگی، ظرفیت باربری در شرایط

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ۱۹ مرحله تست‌های مختلف که به سه حالت متراکم شده تسلیح نشده، متراکم نشده تسلیح شده و متراکم شده تسلیح شده تقسیم شدند، انجام شد. برای هر حالت، ۷ لایه ۱۴ سانتی‌متری و ۵ لایه ۲۰ سانتی‌متری و برای هر مرحله سه طریق مختلف بارگذاری در مجاورت شیب، بارگذاری در ۱۵ سانتی‌متری از لبه شیب

سانتی متر، افزایش تعداد لایه‌های تراکم از ۵ به ۷ لایه، باعث افزایش ۳۴ درصدی ظرفیت باربری می‌شود. با بررسی تورم‌ها که گوه گسیختگی تشکیل شده در خاک منجر به آن می‌شود، در همه حالات، هم در گوشه سمت راست لایه اول خاک و هم در مرکز، این نتیجه حاصل شد که در صورت فقط تراکم کردن خاک، تورم خیلی بیشتری نسبت به میزان تحمل ظرفیت باربری، هم در گوشه راست و هم در مرکز نسبت به حالت‌های دیگر مشاهده می‌شود و با تسلیح خاک به تنهایی بدون تراکم کردن، به دلیل پانچ شدن صفحه در خاک، تورم بسیار ناچیزی به سبب عدم تراکم خاک و ناپیوستگی بین مصالح و ژئوگرید مشاهده می‌شود. ولی با تسلیح و تراکم کردن خاک، با اضافه شدن اندرکنش دانه‌ها و قفل‌ویست بین دانه‌ها و ژئوگرید، این پیوستگی باعث افت تورم و یکپارچگی تورم در گوشه و مرکز می‌شود.

فقط مسلح شده بیشتر از فقط متراکم است. همچنین، باید ذکر شود که در شرایطی که بارگذاری در نزدیکی لبه شیب باشد، تعداد لایه‌های ژئوگرید تأثیر چندانی بر باربری پی ندارد و با افزایش فاصله پی از لبه شیب تا ۳۰ سانتی متر، تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر باربری پی دیده می‌شود. ولی به دلیل عدم تراکم خاک و نقش پُرکنندگی آنها، تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید قابل توجه نیست. همچنین، در حالت متراکم شده و مسلح شده و در فاصله ۳۰ سانتی متری از لبه شیب، رشد چشم‌گیر ظرفیت باربری نسبت به حالت فقط تسلیح شده ۴۳۳ درصد و نسبت به حالت فقط متراکم ۳۲۵ درصد می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در حالت متراکم شده-مسلح نشده، افزایش تعداد لایه‌های تراکم در شرایطی که پی در مجاورت شیب باشد، تأثیر چندانی بر ظرفیت باربری ندارد. اما با فاصله گرفتن پی از لبه شیب تا ۳۰

۶. مراجع

- AASHTO T2. 2011. "Sampling of aggregates".
- AASHTO T27. 2018. "Sieve analysis of fine and coarse aggregates".
- AASHTO T88. 2004. "Standard method of test for particle size analysis of soils".
- AASHTO T180. 2001. "Standard method test for moisture-density relation of soils".
- Alamshahi, S. and Hataf, N. 2009. "Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor". *Geotext. Geomembranes*, 27: 217-226.
- ASTM D3080. 2011. "Standard test methods for direct shear test of soils under consolidated drained conditions".
- ASTM D4318. 2010. "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils".
- Das, B. M. and Omar, M. T. 1994. "The effects of foundation width on model tests for bearing capacity of sand with geogrid reinforcement". *Geotech. Geolog. Eng.*, 12(2): 133- 141.
- El. Sawwaf, M. A. 2007. "Behaviour of strip footing on geogrid reinforced sand over a soft clay slope". *Geotext. Geomembranes*, 25: 50-60.
- Guido, V. A., Biesiadecki, G. I. and Sullivan, M. J. 1985. "Bearing Capacity of a Geotextile Reinforced Foundation". *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, Vol. 3, San Francisco, California, USA, August, pp. 1777-1780.
- Ghosh, A. and Bera, A. K. 2005. "Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile". *Geotext. Geomembranes*, 23(2): 144-173.
- Hataf, N. and Fatollahzadeh, A. 2018. "An experimental and numerical study on the bearing capacity of circular and ring footings on rehabilitated sand slopes with geogrid". *Rehabil. Civ. Eng.*, 7(1): 174-185.
- Khing, K. H., Das, B. M., Puri, V. K., Cook, E. E. and Yen, S. C. 1993. "The bearing capacity of a strip foundation on geogrid reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 12: 351-361.
- Khing, K. H., Das, B. M., Puri, V. K., Yen, S. C. and Cook, E. E. 1994. "Foundation on strong sand underlain by weak clay with geogrid at the interface". *Geotext. Geomembranes*, 13: 199-206.
- Kolay, P. K., Kumar, S. and Tiwari, D. 2013. "Improvement of bearing capacity of shallow foundation on geogrid reinforced silty clay and sand". *J. Constr. Eng.*, 2013: 293809.
- Leng, J. J. and Gabr, M. 2002. "Characteristics of geogrid-reinforced aggregate under cyclic load". *Transport. Res. Record, J. Transport. Res. Board*, 1786(1): 29-35.

- Moradi, G., Abdolmaleki, A., Soltani, P. and Ahmadvand, A. 2018. "A laboratory and numerical study on the effect of geogrid-box method on bearing capacity of rock-soil slopes". *Geomech. Eng.*, 14(4): 345-354.
- Sarkar, R., Shrivastva, A. K. and Mudgal, A. 2019. "An experimental investigation on bearing capacity behavior of rectangular footing over reinforced soil slope". *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, pp. 883-888.
- Shin, E. C. and Das, B. M. 2000. "Experimental study of bearing capacity of a strip foundation geogrid-reinforced sand". *Geosynth. Int.*, 7(1): 59-71.
- Tafreshi, N. M. and Norouzi, A. 2016. "Performance of circular footings on sand by use of multiple-geocell or geotextile". *Constr. Build. Mater.* 35: 547-556.
- Yoo, C. 2001. "Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope". *Geotext. Geomembranes*, 19(5): 279-298.