

مدل‌سازی عددی کارایی برخی پارامترهای ژئوگرید در میزان کاهش نشست شالوده قرار گرفته بر روی خاک دانه‌ای

امین جمشیدی^{۱*}، رسول یازلو^۲، سعید علیقلی^۳ و فرهاد نبی‌زاده^۴

۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی مهندسی، مؤسسه فناوری، علم و پایایی، دانشگاه فدراسیون، بالارات ۳۳۵۰، وی آی سی، استرالیا

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، چالوس، ایران

نویسنده مسئول: Jamshidi.am@lu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۲۷

نوع مقاله: کاربردی

چکیده

اعمال تسلیح می‌تواند به طور قابل‌ملاحظه‌ای نشست شالوده را کاهش دهد، اما یافتن طرحی اقتصادی برای این منظور نیاز به بررسی‌های دقیق عددی دارد. در پژوهش حاضر پایداری خاک دانه‌ای مسلح با ژئوگرید با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس (PLAXIS) مورد تحلیل قرار گرفته و تأثیر عوامل تعداد لایه ژئوگرید، طول لایه ژئوگرید، عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده و سختی کششی ژئوگرید بر میزان نشست بررسی شده است. نتایج دلالت بر این دارد که عوامل فوق‌الذکر نقش برجسته‌ای در میزان نشست شالوده دارند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه و طول ژئوگرید از میزان نشست کاسته شده است. علاوه بر این، به طور کلی با افزایش مقدار سختی کششی ژئوگرید، میزان نشست به میزان زیادی کاهش یافته است. در بررسی عمق ناحیه تسلیح شده، مشخص شد که قرارگیری اولین لایه ژئوگرید بعد از عمق مشخصی (عمق بهینه) از زیر شالوده، باعث کاهش محسوسی در میزان نشست نمی‌شود. بر اساس خروجی مدل‌ها از نرم‌افزار PLAXIS، مقادیر بهینه تعداد لایه ژئوگرید، طول لایه ژئوگرید، عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده و سختی کششی لایه ژئوگرید برای به حداقل رساندن مقدار نشست ارائه شده است. این می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های اقتصادی طراحی و اجرایی شالوده شود. مطابق با نتایج، کم‌ترین مقدار نشست (۴۱ میلی‌متر) برای حالتی بوده که ۵ لایه ژئوگرید در خاک استفاده شده است. بهینه‌ترین طول ژئوگرید و عمق برای قرارگیری اولین لایه ژئوگرید برای کاهش نشست خاک مسلح به ترتیب معادل با ۲/۵ و ۰/۵ برابر عرض شالوده است. همچنین کمترین مقدار نشست (۸۰/۵ میلی‌متر) برای سختی کششی ژئوگرید ۴۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر حاصل شده است. در پایان صحت نتایج، بر اساس مدل‌سازی داده‌های واقعی منتشر شده توسط لایوینا و همکاران بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی عددی، ژئوگرید، خاک مسلح، نشست شالوده، PLAXIS

۱- پیشگفتار

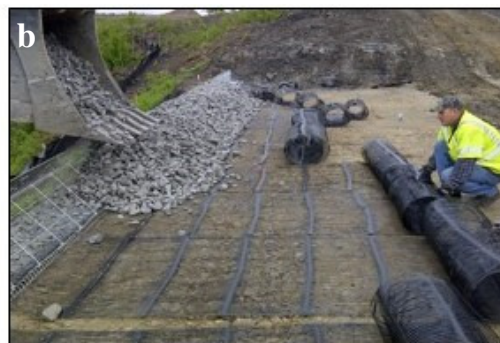
که در آن عناصر دارای استحکام کششی قابل توجه به عنوان تسلیح در توده خاک قرار می‌گیرند. از انواع روش‌های تسلیح خاک می‌توان به میخ کردن، تسلیح سه بعدی، تسلیح به وسیله ستون‌های خاکی، تزریق، پیش بارگذاری و تسلیح به وسیله مصالح مصنوعی اشاره کرد. طی دهه‌های اخیر، استفاده از مصالح مصنوعی مختلف (تحت عنوان ژئوسنتتیک) در پروژه‌های ژئوتکنیکی پیشرفت وسیعی داشته‌اند. این مصالح از مواد لاستیکی و پلاستیکی ساخته شده‌اند و با توجه به نوع کاربرد و عملکرد مورد انتظار، با اشکال و خصوصیات مختلف تولید می‌شوند. جداسازی، فیلتر کردن، حفاظت، زهکشی و عایق‌سازی در مقابل رطوبت برخی از عملکردهای اصلی

بهسازی و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک با استفاده از مواد و مصالح طبیعی و مصنوعی از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. امروزه، روش تسلیح خاک یکی از شاخه‌های مهندسی ژئوتکنیک است که با اصول علمی و استفاده از فناوری‌های جدید، مواد و مصالح مناسب را در تقویت خاک بکار گرفته و در نتیجه خصوصیات مختلف ژئوتکنیکی مانند مقاومت، ظرفیت باربری و نشست را بهبود می‌بخشد. خاک در خیلی از موارد در مقابل نیروهای فشاری و برشی مقاومت می‌کند، به هر حال قادر نیست در برابر نیروی کششی از خود استقامت چندانی نشان دهد. خاک مسلح، مصالح ساختمانی مرکبی است

ژئوگریدها دارای استحکام کششی بالایی هستند. بنابراین وجود آن‌ها در بین ذرات خاک باعث می‌شود تا نیروی وارد شده به توده خاک به آن‌ها منتقل شده و حرکات ذرات خاک محدود شود که نتیجه این فرآیند بهبود مقاومت کششی خاک است. شکل (۱b) کاربردی از ژئوگرید در تقویت خاک در محل یک پروژه ژئوتکنیکی را نشان می‌دهد. با توجه به مزایای فراوان فنی و اقتصادی و همچنین سهولت و سرعت زیاد در اجراء نسبت به سایر روش‌های تسلیح خاک، استفاده از ژئوگرید مورد توجه اکثر مهندسان ژئوتکنیک قرار گرفته است.



ژئوسنتتیک‌ها هستند. این مصالح مصنوعی در اغلب پروژه‌های سدسازی، راه‌سازی، ساختمان‌سازی، بهسازی خاک و بسیاری از پروژه‌های مرتبط با خاک کاربرد گسترده‌ای دارند. یکی از انواع متداول ژئوسنتتیک‌های استفاده شده در پروژه‌های ژئوتکنیکی، ژئوگریدها می‌باشند. در شکل (۱a) نمایی از ژئوگرید نمایش داده شده است. این نوع ژئوسنتتیک در اکثر موارد برای مقاوم‌سازی خاک استفاده می‌شوند. خاک مقاومت کششی پایینی دارد و به همین دلیل ذرات خاک در برابر نیروهای کششی به راحتی از هم جدا می‌شوند. از سوی دیگر،



شکل ۱. (a) ژئوگرید (b) استفاده از ژئوگرید در تقویت خاک در محل یک پروژه ژئوتکنیکی
Fig. 1. (a) Geogrid (b) the application of geogrid for reinforcement of soil in a geotechnical project

(۱۹۹۴) بررسی شد. آدامز و کولین (۱۹۹۷)، نتایج مجموعه‌ای از آزمون‌های مدل بزرگ مقیاس بر روی ماسه مسلح شده توسط ژئوگرید را گزارش کردند. این آزمون‌ها در یک جعبه بتنی با ۶/۹ متر طول، ۵/۴ متر عرض و ۶/۰ متر ارتفاع با شالوده‌های مربعی با اندازه‌های ۰/۳۰، ۰/۴۶، ۰/۶۱ و ۰/۹۱ متر انجام شدند. شین و همکاران (۲۰۰۲) آزمون‌های مدل آزمایشگاهی بر روی ماسه تقویت شده با ژئوگرید را انجام دادند. این محققین تعدادی رابطه تجربی میان نسبت ظرفیت باربری و نشست ارائه دادند. در یک مطالعه آزمایشگاهی، چن و همکاران (۲۰۰۷) تعدادی آزمایش مدل برای شالوده‌های مربعی پشتیبانی شده به وسیله خاک رسی (با خاصیت خمیری کم تا متوسط) مسلح با ژئوگرید انجام دادند. آزمایش‌های مدل در داخل یک جعبه فولادی با ابعاد ۱/۵ متر طول، ۰/۹۱ متر عرض و ۰/۹۱ متر ارتفاع انجام شدند. نتایج نشان داد که ژئوگرید با سختی بیشتر، کارایی بیشتری نسبت به ژئوگرید با سختی کمتر در کاهش نشست شالوده داشته است. ابوفارسخ و همکاران (۲۰۰۸) چند آزمایش صحرایی بزرگ مقیاس را روی یک خاکریز رس سیلنتی تقویت شده

پژوهش‌هایی در ارتباط با استفاده از مواد ژئوسینتتیک برای تسلیح خاک توسط محققین مختلف انجام شده است. گاییدو و همکاران (۱۹۸۶) یک مطالعه تجربی در مورد مقایسه نشست و ظرفیت باربری لایه‌های خاک تقویت شده با ژئوگرید و ژئوتکستایل انجام دادند. رامسوامی و پوروشوتامان (۱۹۹۲) با استفاده از یک شالوده دایره‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر، مطالعه‌ای تجربی برای خاک رسی مسلح با ژئوگرید انجام دادند. تأثیر نسبت عرض به طول شالوده (B/L) بر میزان نشست و ظرفیت باربری خاک تقویت شده با ژئوگرید توسط عمر و همکاران (۱۹۹۳) مطالعه شد. در پژوهشی دیگر، داس و عمر (۱۹۹۴) نقش عرض شالوده بر نشست و ظرفیت باربری را با آزمایش‌های مدل بر روی ماسه تقویت شده با ژئوگرید بررسی کردند. این محققین از اندازه مختلف شالوده‌های نواری با عرض‌های ۵۰/۸، ۷۶/۲، ۱۰۱/۶، ۱۲۷، ۱۵۲/۴ و ۱۷۷/۸ میلی‌متر در آزمایش‌های مدل استفاده کردند. نشست شالوده‌های مستطیلی شکل بنا نهاده شده بر ماسه مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از مدل آزمایشگاهی و همچنین روش‌های عددی توسط یتیموغللو و همکاران

به وسیله ژئوگرید با هدف مطالعه رفتار نشست شالوده انجام دادند. همچنین توزیع تنش در خاک بدون و با تقویت کننده و توزیع کرنش در امتداد ژئوگریدها در مطالعه این محققین ارزیابی شد. رفتار دینامیکی ماسه سیلتی مسلح شده با ژئوگرید از طریق آزمایش سه محوری دینامیکی تحکیم یافته-زهکشی نشده توسط یانگ و همکاران (۲۰۱۱) بررسی شد. نتایج دلالت بر این داشت که به دلیل مسلح بودن، افزایش فشار همه جانبه و نسبت تنش تحکیم، مدول الاستیسیته دینامیکی خاک مسلح در مقایسه با خاک غیر مسلح افزایش قابل توجهی از خود نشان داده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی روی یک خاک دانه‌ای توسط شیواشانکار و جیراج (۲۰۱۳) نشان داد که اعمال پیش‌تنیدگی به ژئوگرید، ظرفیت باربری و نشست خاک مسلح را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. همچنین این محققین نشان دادند که نتایج حاصل از FEM تطابق خوبی با یافته‌های آزمایشگاهی دارند. انتظامی و اخلاقی (۲۰۱۳) در پژوهش خود برخی از کاربردهای ژئوممبرین در سدهای خاکی را تجزیه و تحلیل کردند. در این پژوهش، با افزایش ارتفاع سد خاکی مسلح شده با ژئوگرید و ژئوممبران، تأثیر عوامل مختلفی مانند فاصله بهینه بین لایه‌های ژئوگرید، تعداد لایه‌های ژئوگرید و نوع الگوی رفتاری خاک بر کاهش نشست خاکریز سد بررسی شد. مطالعه حمیدی و هورسفند (۲۰۱۳) نشان داد که ژئوتکستایل به عنوان مصالح مسلح کننده، نه تنها مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهد بلکه مقاومت در برابر روانگرایی را نیز بهبود می‌بخشد. نتایج مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط لاکتر و همکاران (۲۰۱۳) در ارتباط با پیش‌تنیدگی مسلح کننده ژئوسنتتیک نشان داد که اعمال پیش‌تنیدگی ظرفیت باربری خاک را تقریباً به ۲ افزایش می‌دهد و همچنین جابجایی و نشست به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابند. بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی توسط داتراک و خان‌فاروخ (۲۰۱۴) در مورد عملکرد شالوده‌های مربعی بنا نهاده شده روی خاک ماسه‌ای مسلح، پیش‌تنیدگی ژئوگرید باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری شالوده و کاهش نشست آن در مقایسه با شرایط مسلح نشده می‌شود. نائینی و غلامپور (۲۰۱۴) در یک مطالعه آزمایشگاهی تعدادی آزمایش سه محوری چرخه‌ای بر روی ماسه سیلتی بدون و مسلح شده با

ژئوتکستایل انجام دادند. نمونه ماسه حاوی مقادیر مختلف سیلت (از ۰ تا ۵۰ درصد) آزمایش شد. بر اساس نتایج، نقش آرایش و تعداد لایه‌های ژئوتکستایل، فشار همه جانبه و مقدار سیلت بر روی رفتار خاک ماسه‌ای در مقابل بارگذاری چرخه‌ای بررسی شدند. شریف‌پور و همکاران (۲۰۱۴) با هدف مطالعه عملکرد ژئوسنتتیک‌ها به منظور افزایش عمر سرویس‌دهی سازه‌ها، کاهش میزان نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک، به بررسی آزمایشگاهی رفتار خاک‌های درشت دانه و ریز دانه مسلح شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید پرداختند. در پژوهش این محققان، مدل‌های آزمایشگاهی از هر دو نوع خاک ریزدانه و درشت دانه مسلح شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید ساخته شدند. با مقایسه میزان تأثیر ژئوتکستایل و ژئوگرید بر نشست خاک‌های در معرض بارگذاری، نتایج تجزیه و تحلیل شدند. تعدادی پژوهش در زمینه بررسی عملکرد ژئوسنتتیک‌ها در دیوارهای حائل انعطاف‌پذیر تقویت شده با ژئوتکستایل در دهه اخیر انجام شده است. یافته‌های این پژوهش‌ها نشان داده است که مقاومت کششی المان‌های ژئوسنتتیک نقش حیاتی در بهبود عملکرد خصوصیات شالوده در محل احداث سازه ژئوتکنیکی داشته است (دامیان و همکاران، ۲۰۱۴؛ یو و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷). باثورست و نفتچالی (۲۰۲۱) روش‌های مختلف شبیه‌سازی عددی به منظور بررسی تأثیر و کارایی استفاده از انواع مختلف ژئوسنتتیک‌ها در بهبود عملکرد پی‌ها و افزایش ظرفیت باربری را استفاده کردند. نتایج این محققین حکایت از تطابق خوب روش‌های عددی با کارایی عملی ژئوسنتتیک‌ها در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک محل شالوده پی‌ها است. در پژوهش دیگر این محققین، از مدل مشابه برای بررسی اثرات سختی ژئوسنتتیک‌ها در عملکرد آن‌ها در خاکریز دانه‌ای واقع در بالای فضاهای زیرزمینی استفاده شده است (نفتچالی و باثورست، ۲۰۲۲). بخش دیگری از تحقیقات اخیر در زمینه ژئوسنتتیک‌ها، استفاده از این مصالح مصنوعی در دیواره شمع‌های درجا ریز یا ستون‌های سنگی است. نتایج نشان داده که استفاده از المان‌های تسلیح کننده ژئوسنتتیک بطور چشمگیری کارایی و ظرفیت باربری ستون‌ها را افزایش داده است (فام، ۲۰۲۲؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به پیشرفت روزافزون فناوری و بکارگیری مصالح مصنوعی به منظور تقویت و

گودهای پایدار شده (با روش‌های مختلف مانند میخ کوبی، مهارگذاری، سازه نگهبان، سپر کوبی) و شالوده‌های بهسازی شده (توسط روش‌های مختلف همچون اختلاط عمیق خاک، تزریق پر فشار، شمع بتنی و فلزی، ستون شنی ارتعاشی، تراکم دینامیکی، ریزشمع، خاک مسلح با ژئوسنتتیک) کاربرد دارد. قابلیت‌های مهم PLAXIS که آن را از سایر نرم‌افزارهای مشابه متمایز ساخته است و شرکت‌های بسیاری در زمینه‌های مختلف ژئوتکنیک آن را به خدمت گرفته‌اند، عبارتند از:

- سهولت استفاده و داشتن پنجره‌های دسترسی آسان برای هر یک از بخش‌های آن
- داشتن اطلاعات کلی از روش اجزای محدود برای استفاده از آن کافی است
- قابلیت تحلیل مرحله به مرحله مسائل را دارد. این امکان، با فعال یا غیر فعال کردن گروه‌ها به وجود می‌آید.

- قابلیت شبیه‌سازی اجزای سازه‌ای را داشته و اندرکنش آن با خاک را در نظر می‌گیرد.
- مدل‌های مختلف رفتاری خاک را می‌شناسد (الاستیک خطی، موهر-کولمب، سخت شونده، نرم شونده و نرم شونده خزشی)
- قابلیت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی را هم به صورت نیرو و هم جابجایی دارد
- خروجی‌های آن به صورت منحنی و نمودار قابل نمایش است

در مجموع برای ساخت و تحلیل یک مسئله می‌توان چگونگی مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS را به صورت فلوچارت ارائه شده در شکل (۲) خلاصه نمود.

۲-۲- شرایط مسئله و هندسه مدل

برای تشکیل شبکه اجزای محدود و انجام محاسبات، از المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی برای جزء خاک و ۵ گرهی برای جزء ژئوگرید استفاده شده است. در شکل (۳) مدل اجزای محدود مسئله‌ای مورد بررسی در نرم‌افزار PLAXIS ارائه شده است. لایه خاکی از نوع دانه‌ای با الگوی رفتاری مور-کولمب و همچنین جهت انجام تحلیل‌های مورد نیاز بر روی شبکه‌های ساخته شده حالت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است.

کاهش نشست خاک، ژئوگریدها مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک می‌باشند. ژئوگریدها (به عنوان فرآورده‌های پلیمری) از جنبه اقتصادی با صرفه و سازگاری مناسبی با خاک دارند، از این‌رو دارای کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های ژئوتکنیکی هستند. به هر حال، چگونگی استفاده از ژئوگریدها در خاک باید به گونه‌ای باشد که بهترین نتایج عملی در پروژه ژئوتکنیکی رخ دهد. یکی از این نتایج، کاهش نشست شالوده بنا نهاده شده بر روی خاک است. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر چگونگی به کارگیری مسلح کننده ژئوگرید (از منظر تعداد لایه ژئوگرید، طول لایه ژئوگرید، عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید در زیر شالوده و سختی کششی ژئوگرید) جهت به حداقل رساندن نشست خاک دانه‌ای زیر شالوده از طریق مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار PLAXIS است.

۲- مواد و روش پژوهش

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS برای مدل‌سازی بهینه‌ترین شرایط از نظر تعداد لایه ژئوگرید، طول لایه ژئوگرید، عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده و سختی کششی ژئوگرید برای به حداقل رساندن نشست خاک استفاده شده است. مدل‌های گوناگون با توجه به متغیرهای فوق‌الذکر ساخته و مورد تحلیل قرار گرفتند. بر اساس خروجی مدل‌های ساخته شده، نقش هر یک از متغیرهای ژئوگرید بر میزان نشست شالوده نواری واقع بر خاک بررسی و بهینه‌ترین شرایط برای به حداقل رساندن میزان نشست پیشنهاد شده‌اند. در نهایت، صحت مدل‌ها با مقایسه نتایج واقعی یکی از مطالعات پیشین و نتایج بدست آمده از مدل‌سازی توسط نرم‌افزار PLAXIS مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲-۱- معرفی نرم‌افزار PLAXIS

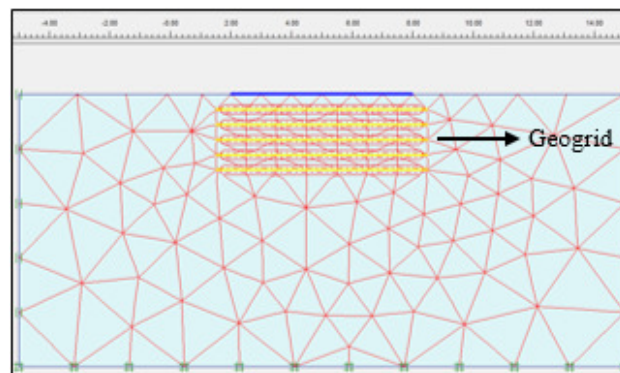
توسعه نرم‌افزار PLAXIS در سال ۱۹۷۸ میلادی در دانشگاه دلف (Delft) هلند آغاز شد. هدف اولیه، فراهم کردن یک برنامه اجزای محدود^۱ بود که به راحتی و آسانی قابلیت استفاده داشته باشد. این نرم‌افزار اولین بار برای مطالعه خاک‌های نرم رسی سواحل هلند استفاده شد. به هر حال، امروزه نرم‌افزار PLAXIS در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیکی مانند تونل‌ها، خاکریزها، معادن،

^۱ Finite Element



شکل ۲. فلوچارت مراحل ساخت و اجرای مدل توسط نرم‌افزار PLAXIS

Fig. 2. Flowchart of the steps of designing and running a model using PLAXIS software



شکل ۳. الگوی اجزای محدود مسئله مورد بررسی در نرم‌افزار PLAXIS

Fig. 3. Finite element model of the investigated problem in PLAXIS software

عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده و سختی کششی ژئوگرید و پارامترهای خاک شامل نوع شالوده، نوع و خصوصیات خاک، شرایط خاک و بارگذاری استاتیکی می‌باشند. در ابتدا هندسه مدل در نرم‌افزار

در بررسی تأثیر ژئوگرید بر میزان نشست خاک زیر شالوده، پارامترهای مرتبط به ژئوگرید متغیر و پارامترهای مرتبط با خاک ثابت در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای ژئوگرید شامل تعداد لایه ژئوگرید، طول لایه ژئوگرید،

افزایش خواهد یافت. مدل رفتاری موهر-کولمب^۱ یکی از معروف‌ترین و متداول‌ترین تئوری‌ها برای مدل‌سازی رفتار واقعی خاک است. مدل رفتاری موهر-کولمب خاک را به صورت الاستو-پلاستیک^۲ در نظر می‌گیرد. از آن جایی که اغلب مهندسان ژئوتکنیک با پارامترهای ورودی لازم برای این مدل آشنایی کامل دارند و کمتر به مقادیر دقیق سایر پارامترها دسترسی دارند، عمدتاً از این مدل رفتاری برای خاک‌های مختلف استفاده می‌کنند. در پژوهش حاضر، یک خاک دانه‌ای برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای به کارگیری این مدل، ۵ پارامتر اصلی و پایه‌ای خاک شامل وزن واحد حجم (γ)، مدول الاستیسیته (E)، نسبت پواسون (ν)، چسبندگی (C)، و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) مورد نیاز است. در جدول (۱) خصوصیات خاک دانه‌ای مورد استفاده در مدل‌سازی ارائه شده است.

۲-۴- مشخصات ژئوگرید استفاده شده در

مدل‌سازی

یکی از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار PLAXIS، امکان تحلیل جزء ژئوگرید می‌باشد. ژئوگرید عنصر سازهای است که صرفاً می‌تواند استحکام کششی داشته باشد و در برابر نیروهای فشاری، برشی و خمشی استقامتی ندارد. در این نرم‌افزار از مدل الاستیک خطی^۳ برای مدل‌سازی رفتار تنش-کرنش ژئوگرید استفاده شده است. به این منظور سختی کششی ژئوگرید با پارامتر EA به نرم‌افزار PLAXIS معرفی می‌شود. مسلح کننده ژئوگرید بصورت غشاء شبیه‌سازی شده، تنها نیروی درون صفحه‌ای را انتقال می‌دهد و هیچ‌گونه سختی خمشی ندارد. عضو غشایی می‌تواند مناسب‌ترین عضو برای مدل‌سازی ژئوگرید باشد. همچنین برای لحاظ کردن اندرکنش ژئوگرید با خاک اطراف، عنصر فصل مشترک^۴ اطراف ژئوگرید به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند اندرکنش کامل خاک و ژئوگرید را مدل نماید. میزان ضریب اندرکنش بین ژئوگرید و خاک به میزان ۲/۳ زاویه اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر با ۳۲ درجه است، بنابراین در نرم‌افزار PLAXIS، ضریب اندرکنش بین ژئوگرید و خاک ۲۱/۵ درجه در نظر گرفته شد.

PLAXIS با فرض این که طرح صنعتی بوده و از فضای کافی برای اجراء برخوردار است، طراحی شد. در فرآیند مدل‌سازی به منظور ایجاد محیطی مشخص و محصور برای انجام عملیات تحلیل، شرایط نوار مرزی مدل از نظر مؤلفه‌های دوران و جابجایی مشخص شد تا در روند حل مسئله با محدوده مشخصی از محیط اطراف به منظور گستردگی توزیع تنش و نحوه توزیع آن و چگونگی جابجایی نقاط مختلف واضح باشد. در نرم‌افزار PLAXIS ابزارهایی برای تعریف این شرایط وجود دارد. در مدل‌سازی اغلب مسائل ژئوتکنیکی، لازم است شرایط هندسی برای لایه خاک تعریف کرد تا به واسطه آن جابجایی افقی و عمودی در آن محدوده مشخص گردد. از جمله شرایط مرزی هندسی قابل تعریف در لایه خاک، نخست محدود نمودن جابجایی افقی و عمودی در لبه پایینی به منظور در نظر گرفتن جابجایی صفر در این مرز می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری میزان نشست و بررسی رفتار خاک در بارهای وارده، این مرز در دو طرف شالوده به صورت آزاد در نظر گرفته شده است. در این زمینه، گیرداری استاندارد در PLAXIS برای آسان‌تر کردن و دادن اطلاعات سریع استفاده شده است.

با توجه به اینکه مدل مورد بحث یک شالوده نواری در منطقه شهری می‌باشد و بار اعمالی به خاک دانه‌ای زیر شالوده توسط یک ساختمان با ارتفاع متوسط وارد می‌شود، لذا، با محاسبه تقریبی وزن این ساختمان و مراجعه به آیین‌نامه‌های بتن ایران (آبا) و ASTM، حداکثر بار اعمالی وارده ۲۰۰ کیلوپوتن بر متر مربع، در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی، روند بارگذاری با اعمال جابجایی فزاینده پیوسته شالوده تا رسیدن به جابجایی پیش‌بینی شده تحلیل شده است.

۲-۳- مدل رفتاری و خصوصیات خاک استفاده

شده در مدل‌سازی

بطور کلی خاک‌ها تحت عمل بارگذاری، رفتار غیرخطی تنش-کرنش از خود نشان می‌دهند. این نوع رفتار را می‌توان در سطوح مختلفی در نرم‌افزار PLAXIS مدل‌سازی نمود. به هر حال، هر چه مدل مدنظر واقع بینانه‌تر باشد، تعداد پارامترهای لازم برای مدل‌سازی نیز

³ Linear Elasticity

⁴ Interface

¹ Mohr-Coulomb

² Elasto-Plasticity

جدول ۱. خصوصیات خاک دانه‌ای زیر شالوده

Table 1. Granular soil characteristics beneath the foundation

Parameter	Unit	Value
Model type: Mohr-Coulomb	-	-
Drainage condition: Drained	-	-
Dry unit weight, γ_{dry}	kN/m ³	17.0
Saturated unit weight, γ_{sat}	kN/m ³	20.0
Modulus of elasticity, E	kN/m ²	13000
Poisson's ratio, ν	-	0.3
Cohesion, C	kN/m ²	1.0
friction angle, ϕ	Degree	32.0

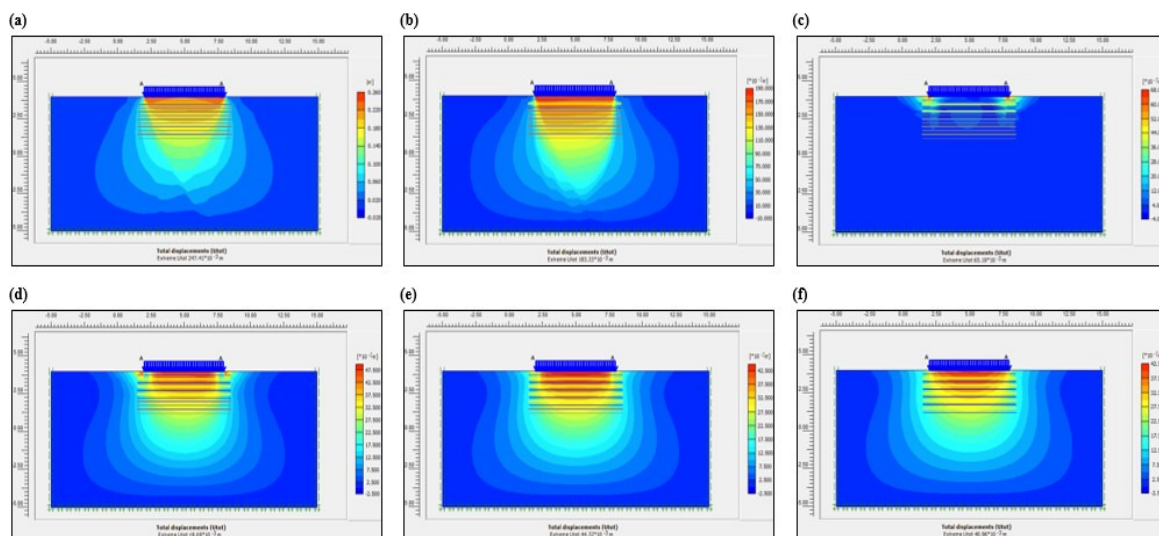
۳- نتایج

برای ارزیابی نقش ژئوگرید بر میزان نشست خاک مسلح، به بررسی پارامترهای مختلف ژئوگرید پرداخته شد. از جمله عوامل مؤثر بر پایداری و نشست خاک مسلح، تعداد لایه‌های ژئوگرید می‌باشد. برای بررسی اثر این پارامتر، الگوهایی از مسئله مورد نظر با تعداد لایه‌های ژئوگرید مختلف $N = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ مورد بررسی قرار گرفت. در این الگوسازی طول ژئوگرید و فاصله بین لایه‌های ژئوگرید ثابت و به ترتیب برابر 1.5B و 0.5B، و همچنین سختی کششی ژئوگرید معادل با ۲۰۰۰ کیلو نیوتن متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۴) توزیع نشست مربوط به خاک دانه‌ای مورد مطالعه با تعداد لایه‌های ژئوگرید مختلف ارائه شده است. از دیگر عوامل مؤثر بر نشست خاک مسلح، طول ژئوگرید می‌باشد. به منظور بررسی طول ژئوگرید بر تغییرات نشست خاک زیر شالوده، مدل‌هایی با طول‌های متفاوت ژئوگرید شامل B، 1.5B، 2B، 2.5B و 3B ساخته و بررسی شدند. در مدل‌سازی‌ها، فرض بر این بوده که اولین لایه ژئوگرید از سطح تحتانی شالوده و همچنین فواصل لایه‌های ژئوگرید از همدیگر در فاصله 0.5B قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، سختی کششی ژئوگرید ثابت و برابر با ۲۰۰۰ کیلو نیوتن متر در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی و میزان نشست برای طول‌های متفاوت ژئوگرید بر اساس خروجی نرم‌افزار PLAXIS در شکل (۵) نمایش داده شده‌اند. جهت تعیین عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده، ۴ مدل در فواصل 0.25B، 0.5B، 0.75B و 1B از زیر شالوده ساخته شد. در این مدل‌سازی‌ها طول ژئوگرید ثابت و برابر 1.5B و سختی کششی ژئوگرید ۲۰۰۰ کیلو نیوتن متر فرض شده‌اند. در شکل (۶) خروجی مدل‌سازی‌ها برای فواصل مختلف عمق قرارگیری اولین ژئوگرید از زیر شالوده ارائه شده است. سختی کششی یکی از مهم‌ترین و بارزترین خصوصیات

ژئوگریدها است که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد شالوده‌های واقع بر خاک‌های مسلح شده دارد. برای بررسی اثر سختی کششی ژئوگرید بر میزان نشست خاک، یک لایه ژئوگرید با سختی‌های کششی (EA) متفاوت ۱۵۰۰، ۲۵۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی‌ها، سایر پارامترهای مربوط به ژئوگرید به صورت بارگذاری ۲۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع، طول ژئوگرید 1.5B و عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید از زیر شالوده ثابت فرض شده‌اند. خروجی‌های نرم‌افزار PLAXIS در ارتباط با تأثیر سختی‌های کششی متفاوت بر نشست خاک در شکل (۷) نمایش داده شده‌اند.

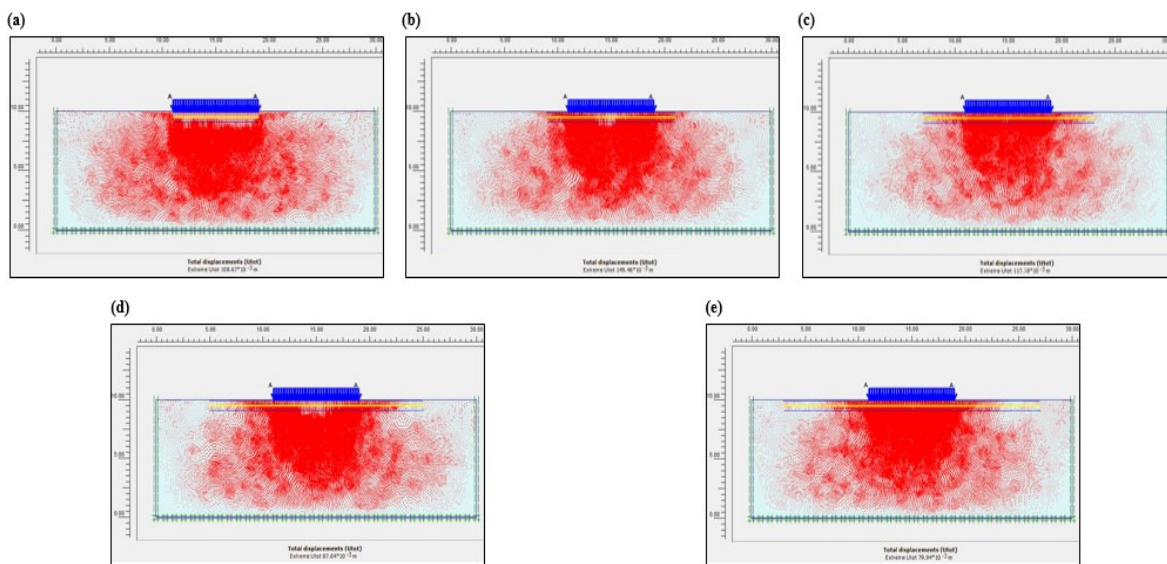
۴- بحث

تعداد لایه‌های ژئوگرید: در شکل (۸) مقادیر نشست خاک برای تعداد لایه‌های مختلف ژئوگرید نمایش داده شده است. از این شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید از از صفر تا ۳ لایه میزان نشست به شدت کاهش یافته است و در ادامه تا ۵ لایه نرخ شدت کاهش نشست کمتر شده است. بیش‌ترین مقدار نشست با ۲۴۷/۴ میلی‌متر در شرایطی رخ داده که خاک غیر مسلح (بدون لایه ژئوگرید) است و در مقابل کم‌ترین مقدار نشست (۴۱/۰ میلی‌متر) برای حالتی بوده که ۵ لایه ژئوگرید در خاک استفاده شده است. به هر حال مقدار کاهش نشست تا تعداد ۳ لایه ژئوگرید محسوس می‌باشد به طوری که درصد تغییرات کاهش نشست برای ۱، ۲ و ۳ لایه در مقایسه با حالتی که هیچ لایه ژئوگریدی در خاک استفاده نشده است به ترتیب معادل با ۳۵/۰، ۲۷۹/۴ و ۴۰۵/۹ درصد می‌باشند. در مقابل، با افزایش لایه‌های ژئوگرید به ۴ و ۵ لایه، درصد تغییرات نشست نسبت به خاک بدون لایه ژئوگرید به ترتیب برابر با ۴۵۸/۵ و ۵۰۳/۴ درصد می‌باشند.



شکل ۴. میزان نشست شالوده: (a) بدون لایه ژئوگرید (b) ۱ لایه ژئوگرید (c) ۲ لایه ژئوگرید (d) ۳ لایه ژئوگرید (e) ۴ لایه ژئوگرید (f) ۵ لایه ژئوگرید.

Fig. 4. The amount of settlement of the foundation: (a) No geogrid layer (b) 1 geogrid layer (c) 2 geogrid layers (d) 3 geogrid layers (e) 4 geogrid layers (f) 5 geogrid layers.



شکل ۵. نشست شالوده با ژئوگرید به طول (a) B (b) 1.5B (c) 2B (d) 2.5B (e) 3B

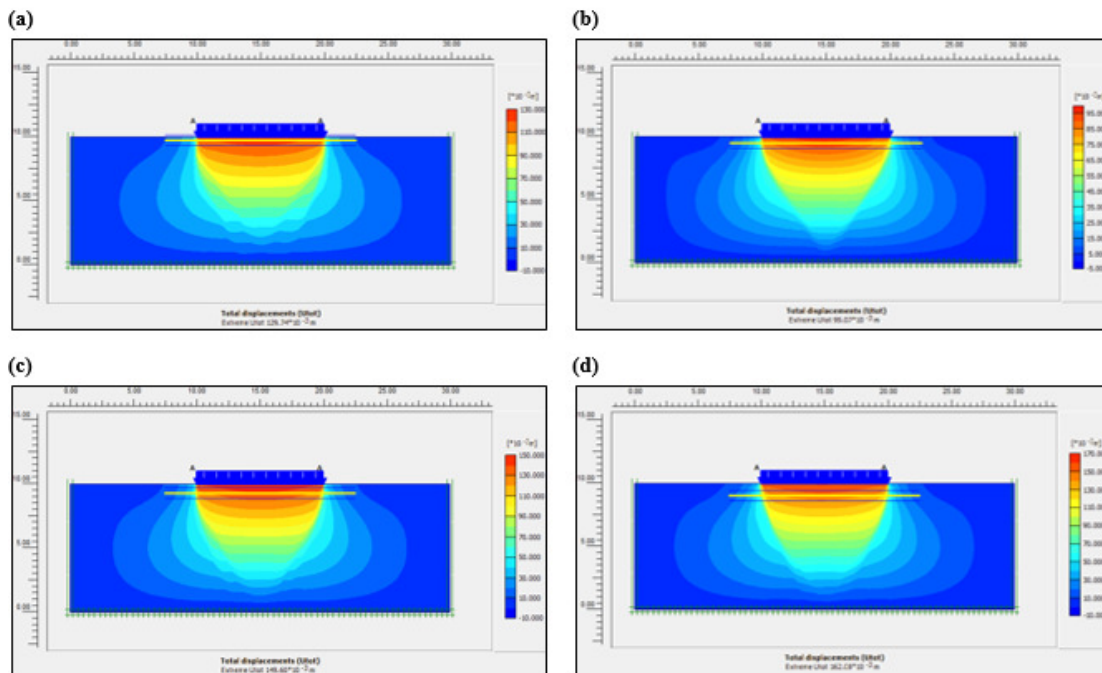
Fig. 5. The amount of settlement of the foundation with a geogrid length (a) B (b) 1.5B (c) 2B (d) 2.5B (e) 3B

اندک است. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که وقتی خاک مسلح با چند لایه ژئوگرید در معرض بارگذاری قرار می‌گیرد، ابتدا لایه‌های بالایی دچار کشش می‌شوند و بخشی از نیروهای کششی ایجاد شده در خاک را جذب می‌کنند. این فرآیند موجب می‌شود که تنش‌های کم‌تری به لایه‌های ژئوگرید زیرین برسد. به عنوان نتیجه، کرنش‌های کمی در راستای محور طولی ژئوگرید ایجاد می‌شود. بنابراین وجود لایه‌های اضافی ژئوگرید بیش‌تر از تعداد لایه بهینه، تأثیر چندانی بر کاهش نشست ندارند.

بررسی روند تغییرات نشست دلالت بر این دارد که افزایش هر چه بیشتر تعداد لایه‌های ژئوگرید لزوماً باعث کاهش محسوس‌تر نشست نمی‌شود. در واقع می‌توان گفت برای هر نوع خاک و ژئوگرید با خصوصیات خاص خود، مقدار بهینه‌ای برای تعداد لایه‌های ژئوگرید وجود دارد که در آن مقدار کاهش نشست به بهینه‌ترین مقدار خود می‌رسد. همان‌طور که در شکل (۸) قابل مشاهده است، کاهش نشست تا ۳ لایه ژئوگرید کاملاً محسوس و بعد از آن با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید تغییرات نشست بسیار

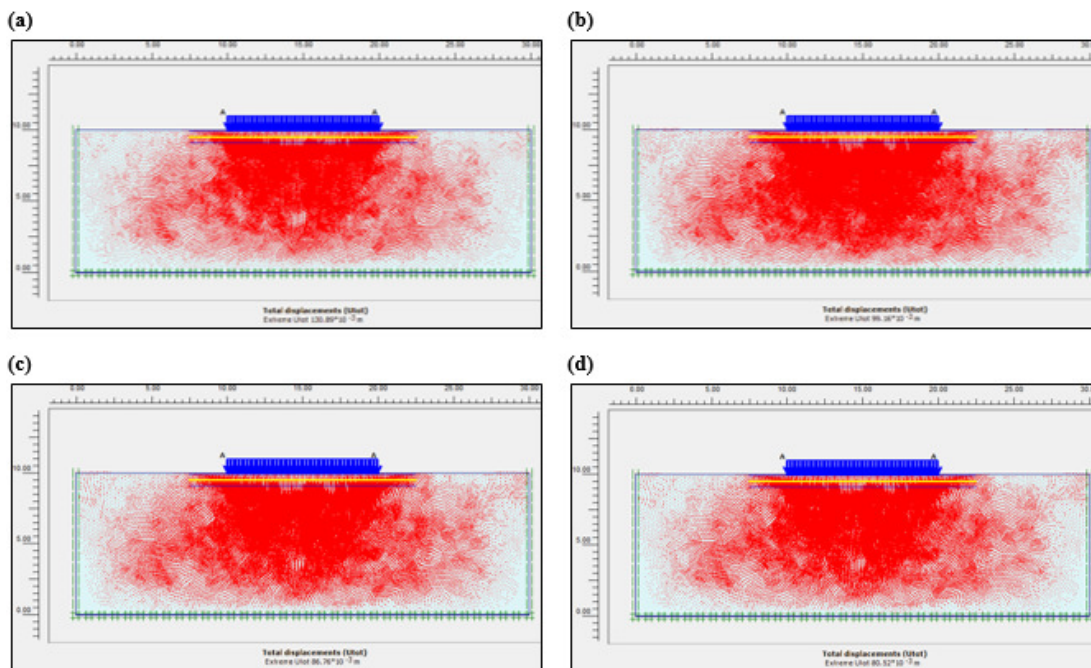
استفاده از توزیع تنش در خاک و نمودارهای حباب تنش قابل توضیح است.

دلیل دیگر عدم تغییرات محسوس در میزان نشست خاک مسلح با تعداد لایه‌های ژئوگرید بیشتر از تعداد بهینه، با



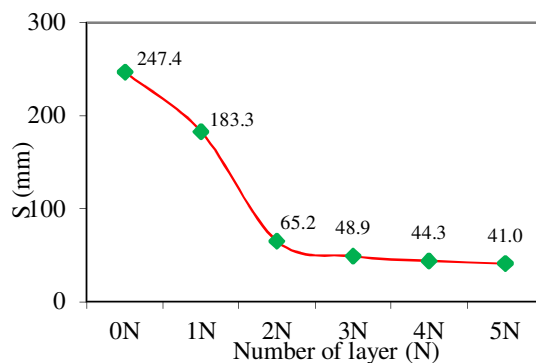
شکل ۶. نشست شالوده ناشی از قرارگیری اولین لایه ژئوگرید در فاصله (a) 0.25B از زیر شالوده (b) 0.5B از زیر شالوده (c) 0.75B از زیر شالوده (d) 1B از زیر شالوده

Fig. 6. The amount of settlement of the foundation caused by placing the first geogrid layer in the depth: (a) 0.25B from the bottom of the foundation (b) 0.5B from the bottom of the foundation (c) 0.75B from the bottom of the foundation (d) 1B from the bottom of the foundation



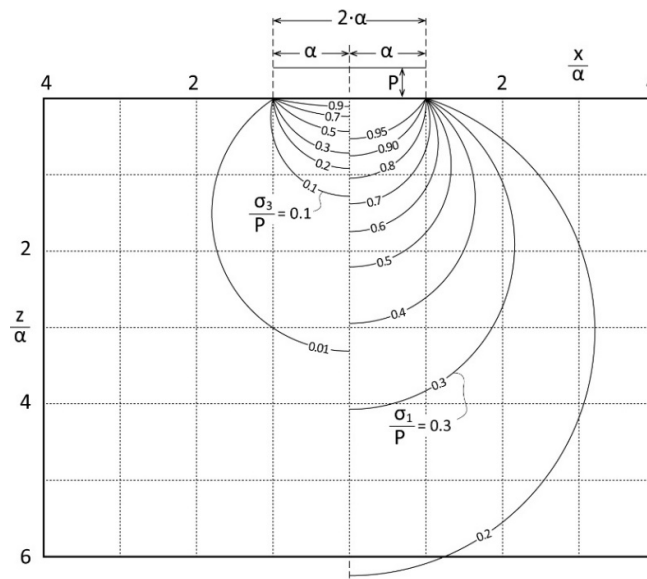
شکل ۷. نشست شالوده با سختی کششی ژئوگرید معادل با: (a) ۱۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر (b) ۲۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر (c) ۳۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر (d) ۴۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر

Fig. 7. The amount of settlement of the foundation caused with geogrid tensile strength equal to: (a) 1500 kN/m (b) 2500 kN/m (c) 3500 kN/m (d) 4500 kN/m



شکل ۸. مقادیر نشست شالوده (S) در مقابل تعداد لایه‌های ژئوگرید (N)

Fig. 8. Values of the foundation settlement (S) with the number of geogrid layers (N)



شکل ۹. حباب تنش (نقاط هم تنش) در زیر شالوده‌های مربعی و نواری

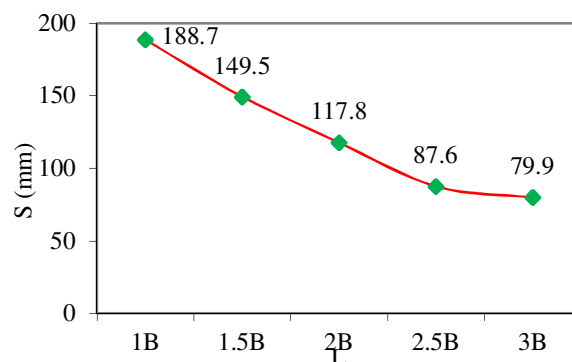
Fig. 9. The stress bulb (stress distribution) beneath the square and strip foundations

(۲۰۰۹) برای ارزیابی شالوده نواری در یک شیب ایجاد شده در خاک ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید، مجموعه‌ای از آنالیزهای اجزای محدود را با نرم‌افزار PLAXIS انجام دادند. نتایج این محققین نشان داد که نشست یک شالوده بدون لایه ژئوگرید می‌تواند با گنجاندن یک لایه ژئوگرید به طور قابل توجهی بهبود یابد. این نتیجه در تطابق خوبی با یافته‌های مطالعه حاضر است به طوری که افزایش یک لایه ژئوگرید به خاک منجر به تغییر نشست خاک از ۲۴۷/۴ میلی‌متر به ۱۸۳/۳ میلی‌متر (معادل با کاهش تقریباً ۳۵/۰ درصدی) شد. از سوی دیگر، نتایج این محققین دلالت بر بهینه‌ترین مقدار کاهش نشست خاک مسلح با ۲ لایه ژئوگرید دارد، در مقابل، پژوهش حاضر نشان‌دهنده ۳ لایه ژئوگرید بوده است.

با توجه به نمودارهای حباب تنش در خاک زیر شالوده در شکل (۹)، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق در زیر شالوده، فواصل نقاط هم‌تنش از هم‌دیگر بیش‌تر و در نتیجه میزان تنش وارد به خاک به شدت کاهش می‌یابد. این موضوع دلیلی بر این است که لایه‌های عمیق‌تر ژئوگرید تأثیر چندانی در کاهش نشست خاک مسلح ندارد، زیرا از محدوده حباب تنش خارج شدند. در واقع، تنش اصلی ناشی از بارگذاری توسط لایه‌های بالایی خاک و نزدیک به شالوده تحمل می‌شود و اثر تنش روی خاک با افزایش عمق کم‌تر می‌شود. به همین دلیل کاربرد ژئوگرید در اعماق زیاد و خارج از حباب تنش به دلیل تأثیر کم تنش در آن نقاط، از نظر مبانی علمی و اقتصادی قابل توجیه نمی‌باشد. نتایج مطالعه حاضر با مطالعات پیشین صورت گرفته توسط محققین مختلف مقایسه شده‌اند. علمشاهی و هاتاف

بهینه‌ترین طول ژئوگرید برای کاهش نشست خاک مسلح معادل با ۲/۵ برابر عرض شالوده (2.5B) است. در ارتباط با تأثیر پارامترهای مختلف ژئوگرید بر مقادیر نشست شالوده نواری واقع شده بر خاک رسی مسلح، ماهارج (۲۰۰۳) از طریق مدل‌سازی تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS نشان داد بهینه‌ترین طول ژئوگرید که از لحاظ فنی و اقتصادی قابل توجه است معادل با ۴ برابر عرض شالوده است (4B). همچنین لاته و ساموانشی (۲۰۰۹) با مدل‌سازی عددی شالوده مربعی قرار گرفته بر خاک ماسه‌ای به نتیجه‌ای مشابه با یافته‌های ماهارج (۲۰۰۳) دست یافتند. به هر حال، در مطالعه حاضر بهینه‌ترین شرایط کاهش نشست برای طول ژئوگرید معادل با 2.5B حاصل شد. اختلاف میان نتایج را می‌توان به تفاوت میان نوع و خصوصیات خاک‌های مدل‌سازی شده نسبت داد به طوری که در مطالعه حاضر خاک دانه‌ای و در مطالعه ماهارج (۲۰۰۳) خاک از نوع رسی بوده است. همچنین از دیگر عوامل تأثیرگذار روی طول بهینه ژئوگرید، می‌توان به متفاوت بودن سایر پارامترهای مربوط به ژئوگرید (برای مثال سختی کششی) استفاده شده در مدل‌سازی اشاره کرد.

طول ژئوگرید: مقادیر نشست شالوده با تغییر طول ژئوگرید در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که می‌توان از این شکل مشاهده کرد، هنگامی که طول ژئوگرید از 1B به 1.5B تغییر پیدا می‌کند (B عرض شالوده است)، میزان نشست شالوده از ۱۸۸/۷ به ۱۴۹/۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد که این تغییر در حدود ۲۶/۲ درصد است. همچنین با افزایش طول ژئوگرید در خاک مسلح به 2B و 2.5B، نشست شالوده به ترتیب ۱۱۷/۸ و ۸۷/۶ میلی‌متر است که این تغییرات در مقایسه با طول ژئوگرید 1B به ترتیب معادل با ۶۰/۲ و ۱۱۵/۴ درصد می‌باشند. در مقابل، هنگامی که طول ژئوگرید از 2.5B به 3B افزایش می‌یابد، تغییرات کاهش کمی‌تری در نشست شالوده مشاهده شده است. بر اساس شکل (۱۰)، میزان نشست برای طول ژئوگرید 3B برابر با ۷۹/۹ میلی‌متر بوده است که وقتی با طول ژئوگرید B مقایسه می‌شود متناظر با یک کاهش ۱۳۶/۲ درصدی است. به دلیل این‌که کاهش نشست رخ داده در طی افزایش طول ژئوگرید از 2.5B به 3B قابل توجه نیست، بنابراین افزایش هر چه بیشتر طول ژئوگرید از لحاظ فنی و اقتصادی قابل توجه و به صرفه نمی‌باشد. از این‌رو، به نظر می‌رسد



شکل ۱۰. مقادیر نشست شالوده (S) در مقابل طول لایه ژئوگرید (L)

Fig. 10. Values of the foundation settlement (S) against the length of the geogrid layer (L)

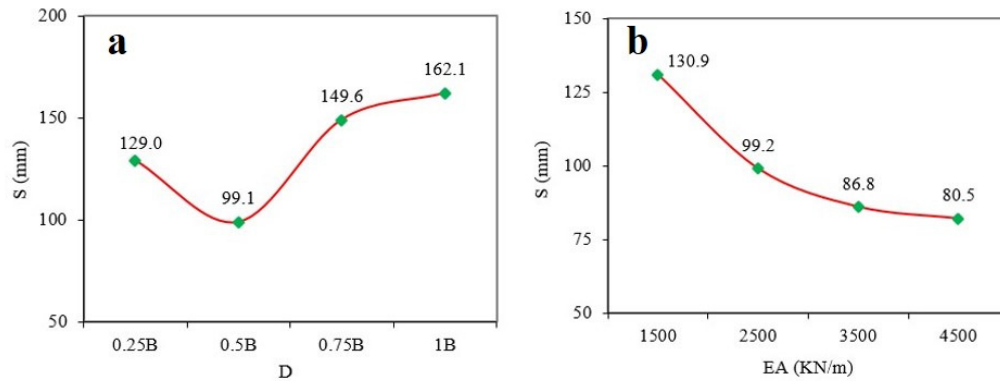
نشست در عمق 0.5B نسبت به عمق‌های 0.25B، 0.75B و 1B به ترتیب ۳۰/۲، ۵۱/۰ و ۶۳/۶ درصد کاهش از خود نشان داده است. این داده‌ها دلالت بر این دارد که بهینه‌ترین عمق برای قرارگیری اولین لایه ژئوگرید برابر با 0.5B است. مقایسه‌ای میان نتایج مطالعه حاضر و برخی مطالعات پیشین انجام شده توسط محققین مختلف صورت گرفته است.

عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده:

شکل (۱۱) نتایج حاصل از نرم‌افزار PLAXIS برای تعیین عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود قرارگیری اولین لایه ژئوگرید در اعماق 0.25B، 0.5B، 0.75B و 1B از زیر شالوده نشست‌های به ترتیب معادل با ۱۲۹/۰، ۹۹/۱، ۱۴۹/۶ و ۱۶۲/۱ میلی‌متر را به همراه داشته است (B دلالت بر عرض شالوده دارد). میزان

دیگر، ماهراج (۲۰۰۳) به این نتیجه رسید که عمق بهینه اولین لایه ژئوگرید زیر شالوده تابعی از سختی کششی ژئوگرید است. با مقایسه نتایج پژوهش حاضر و سایر مطالعات پیشین می‌توان گفت که عمق بهینه اولین لایه ژئوگرید در زیر شالوده مقدار معینی نیست و تابعی از نوع و خصوصیات خاک و همچنین پارامترهای مربوط به ژئوگرید به‌ویژه سختی کششی است.

باسودار و همکاران (۲۰۰۸) رفتار یک بستر ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید تحت بارگذاری نواری را با استفاده از روش اجزای محدود تجزیه و تحلیل کردند. نتایج این محققین نشان داد که عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید در زیر شالوده ۰.۶B است. همچنین در مطالعه علمشاهی و هاتف (۲۰۰۹) روی یک شالوده نواری بنا نهاده شده بر یک شیب ماسه‌ای، عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید معادل با ۰.۷B حاصل شد. در پژوهشی



شکل ۱۱. (a) مقادیر نشست شالوده (S) با عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید (D) و (b) مقادیر نشست شالوده (S) در مقابل سختی کششی ژئوگرید (EA)

Fig. 11. a) Values of foundation settlement (S) with the depth of the first layer of the geogrid (D), b) Values of foundation settlement (S) with the tensile strength of the geogrid (EA)

بالتر از ۳۵۰۰ کیلونیوتن بر متر از دیدگاه فنی و عملیات اجرایی توجیه اقتصادی ندارد. در این زمینه، ماهراج (۲۰۰۳) با مطالعه عددی تأثیر پارامترهای مختلف ژئوگرید بر میزان نشست شالوده نواری بر یک خاک ریزدانه رسی نشان داد که افزایش سختی کششی ژئوگرید منجر به کاهش نشست شالوده می‌گردد. علاوه بر این، مطالعه مشابهی توسط لانه و ساموانشی (۲۰۰۹) نیز انجام شد که نتایج این محققین دلالت بر این داشت که طرح و آرایش ژئوگریدها نسبت به سختی کششی ژئوگرید، نقش مهم‌تری در بهبود کاهش نشست شالوده دارد.

۵- صحت‌سنجی مدل‌های توسعه یافته توسط

نرم‌افزار PLAXIS

برای صحت‌سنجی مدل‌های توسعه داده شده در پژوهش حاضر، نتایج تجربی منتشر شده توسط لاوزا و همکاران (۲۰۱۰) و نتایج مدل حاصل از نرم‌افزار PLAXIS مقایسه شده‌اند. این محققان با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، به بررسی تجربی میزان بهسازی خاک به دلیل اضافه کردن

سختی کششی ژئوگرید: در شکل (۱۱ b) نمودار تغییرات نشست شالوده با سختی کششی ژئوگرید ارائه شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سختی کششی ژئوگرید، مقادیر نشست روندی کاهشی داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد وقتی سختی کششی ژئوگرید از ۱۵۰۰ به ۲۵۰۰ کیلونیوتن بر متر افزایش پیدا می‌کند، مقدار نشست از ۱۳۰/۹ به ۹۹/۲ میلی‌متر کاهش یافته است که معادل با ۳۲/۰ درصد می‌باشد. همچنین مقادیر نشست برای سختی کششی ژئوگرید ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ کیلونیوتن بر متر به ترتیب برابر با ۸۶/۸ و ۸۰/۵ میلی‌متر می‌باشند که در مقایسه با سختی ژئوگرید ۱۵۰۰ کیلونیوتن بر متر به ترتیب معادل با ۵۱/۰ و ۶۲/۲ درصد کاهش هستند. این نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات نشست تا سختی کششی ژئوگرید ۳۵۰۰ کیلونیوتن بر متر قابل توجه است در صورتی که افزایش سختی کششی ژئوگرید به ۴۵۰۰ کیلونیوتن بر متر تغییرات محسوسی را در کاهش نشست نداشته است. از سوی دیگر، با توجه به هزینه‌های اجرایی تسلیح کردن خاک با ژئوگرید، استفاده از ژئوگرید با سختی

استفاده در مدل صحت‌سنجی در جدول (۲) ارائه شده است. خاکی که در این مدل استفاده شده است خاک دانه‌ای می‌باشد. همچنین در جدول (۳)، مشخصات ژئوگرید استفاده شده در پژوهش لایوفا و همکاران (۲۰۱۰) برای صحت‌سنجی مدل مطالعه حاضر نشان داده شده‌اند.

لایه ژئوگرید در اعماق مختلف زیر شالوده بنا نهاده شده روی یک بستر ماسه‌ای پرداختند. هدف از مطالعه لایوفا و همکاران (۲۰۱۰)، ارائه مدل آزمایشگاهی به منظور مشاهده رفتار فیزیکی خاک مسلح شده با ژئوگرید بود که در آن تحلیل‌های المان محدود غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS انجام شد. خصوصیات خاک مورد

جدول ۲. خصوصیات خاک دانه‌ای برای مدل‌سازی در PLAXIS (لایوفا و همکاران ۲۰۱۰)
Table 2. Characteristics of granular soil for modeling in PLAXIS (Lovisa et al. 2010)

Parameter	Unit	Value
Specific gravity, G_s	-	2.62
Minimum dry unit weight, $\gamma_{dry(min)}$	kN/m ³	13.9
Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry(max)}$	kN/m ³	16.3
Average dry unit weight, $\gamma_{dry(avr)}$	kN/m ³	15.0
Minimum void ratio, e_{min}	-	0.58
Maximum void ratio, e_{max}	-	0.84
Average void ratio, e_{avr}	-	0.71
Relative density, D_r	%	50.0
Effective grain size, D_{10} (mm)	mm	0.14
D_{30} (mm)	mm	0.22
D_{60} (mm)	mm	0.38
Coefficient of uniformity, C_u	-	2.71
Coefficient of curvature, C_c	-	0.91
Cohesion, C	kN/m ²	0
Peak friction angle, ϕ_{peak}	Degree	39.5
Ultimate friction angle, ϕ_{ult}	Degree	31.0

جدول ۳. مشخصات ژئوگرید برای مدل‌سازی در PLAXIS (لایوفا و همکاران ۲۰۱۰)
Table 3. Geogrid characteristics for modeling in PLAXIS (Lovisa et al. 2010)

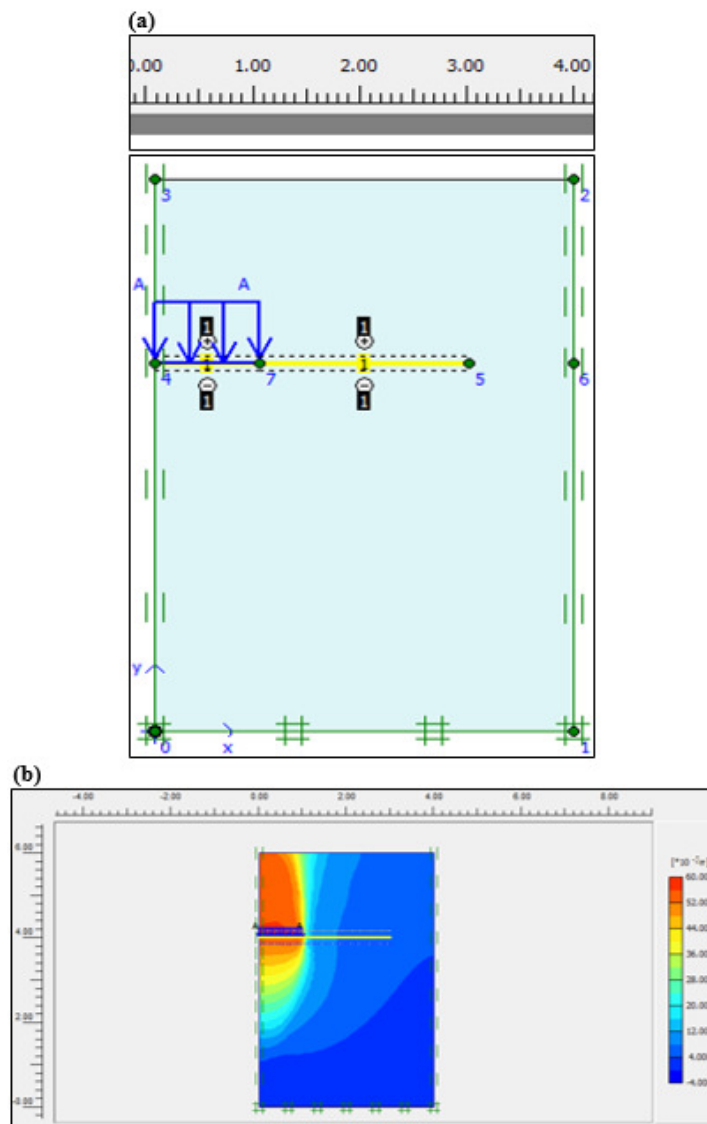
Parameter	Value
Mass per unit area (g/m ²)	186
Thickness (mm)	0.74
Tensile strength (kN/m)	40
Elongation – MD (%)	15
Elongation – XD (%)	8
Tearing strength – MD (N)	400
Tearing strength – XD (N)	676
Burst strength – CBR plunger (N)	4800
Puncture resistance – drop cone (mm)	13

یک سیستم بارگذاری گسترده مدل شده است و با تولید یک مش متوسط محاسبات انجام شد. مسلح کننده ژئوتکستایل، توسط المان ژئوگرید در PLAXIS و به عنوان مصالح الاستیک خطی با در نظر گرفتن اندرکنش کامل با خاک اطراف مدل‌سازی شده است. با دادن مقادیر مختلف

برای صحت‌سنجی مدل، یک شالوده دایره‌ای به صورت تقارن محوری و مشابه با ابعاد مدل ایجاد شده در پژوهش لایوفا و همکاران (۲۰۱۰) تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلو نیوتن در نرم‌افزار PLAXIS مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفت. در فرآیند مدل‌سازی، شالوده توسط

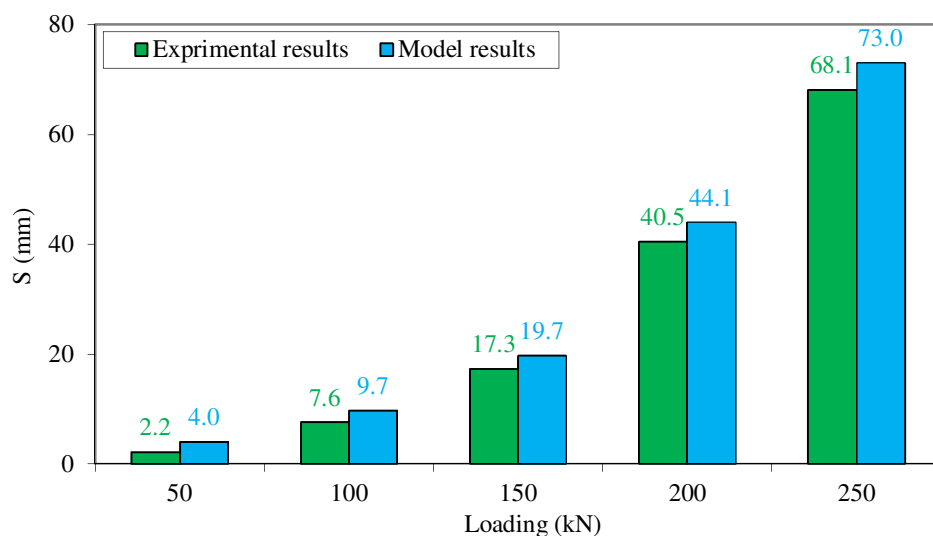
برخوردار است. یکی از دلایل اختلاف جزئی نتایج مدل‌سازی و نتایج تجربی می‌تواند به عدم ارائه تمامی خصوصیات خاک در پژوهش لایوینا و همکاران (۲۰۱۰) نسبت داده شود. به هر حال نتایج نشان می‌دهد که مسلح کردن خاک به ژئوگرید به طور قابل توجهی باعث بهبود کیفیت خاک از منظر کاهش نشست شده است. همچنین تحلیل نتایج دلالت بر این دارد که نرم‌افزار PLAXIS به خوبی توانایی مدل‌سازی نشست شالوده را داشته و می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب، سریع و کم هزینه در ارائه راهکاری مناسب برای به حداقل رساندن نشست خاک مسلح شده با ژئوگرید در نظر گرفته شود.

بارگذاری از ۵۰ تا ۲۵۰ کیلونیوتن، مقادیر نشست شالوده تعیین شد. در شکل (۱۲) چگونگی مدل‌سازی و خروجی PLAXIS برای یکی از شرایط بارگذاری (۲۰۰ کیلونیوتن) نمایش داده شده است. در شکل (۱۳) مقادیر نشست خاک ماسه‌ای بر اساس نتایج تجربی پژوهش لایوینا و همکاران (۲۰۱۰) و نتایج مدل‌سازی شده در نرم‌افزار PLAXIS ارائه شده‌اند. بر اساس این شکل، می‌توان مشاهده کرد که نتایج به دست آمده از مدل توسعه داده شده در نرم‌افزار PLAXIS به نتایج تجربی پژوهش لایوینا و همکاران (۲۰۱۰) نزدیک و قابل قبول می‌باشند. به هر حال نمونه خاک مدل‌سازی شده نسبت به نمونه خاک مطالعه شده در پژوهش لایوینا و همکاران (۲۰۱۰) از نشست بیش‌تری



شکل ۱۲. (a) مدل‌سازی شالوده تقویت شده با ژئوگرید (b) نشست شالوده ناشی از بارگذاری ۲۰۰ کیلونیوتن

Fig. 12. (a) Modeling of the geogrid-reinforced foundation (b) foundation settlement caused by a loading of 200 kN



شکل ۱۳. مقایسه نشست شالوده ناشی از بارگذاری‌های مختلف بر اساس نتایج تجربی و مدل‌سازی

Fig. 13. Comparison of foundation settlement due to various loading based on the experimental and model results

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به ارزیابی نشست شالوده نواری بنا نهاده شده بر خاک دانه‌ای مسلح با ژئوگرید از طریق نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS پرداخته شد. به این منظور، تأثیر پارامترهای مربوط به ژئوگرید شامل تعداد لایه ژئوگرید، طول لایه ژئوگرید، عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید در زیر شالوده و سختی کششی ژئوگرید بر میزان نشست بررسی و مدل شدند. بر اساس تجزیه و تحلیل خروجی‌های حاصل از مدل‌های مختلف نتایج زیر حاصل شدند:

۱- با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید از صفر به ۵ لایه، نشست شالوده روند کاهشی از خود نشان داد. به هر حال کاهش نشست تا ۳ لایه ژئوگرید محسوس بود و در خاک مسلح شده با ۴ و ۵ لایه ژئوگرید تغییرات اندکی در نرخ کاهش نشست مشاهده شد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش هر چه بیشتر تعداد لایه‌های ژئوگرید لزوماً باعث کاهش هر چه بیش‌تر نشست نمی‌شود. در واقع برای هر نوع خاص خاک و ژئوگرید، مقدار معینی برای تعداد لایه‌های ژئوگرید وجود دارد که در آن بهینه‌ترین مقدار کاهش نشست شالوده رخ می‌دهد.

۲- افزایش طول لایه ژئوگرید منجر به کاهش نشست شالوده می‌شود. به هر حال تحلیل‌ها حکایت از این داشت که مقدار کاهش نشست فقط تا طول ژئوگرید معادل با 3B (عرض شالوده است) محسوس است و برای طول

ژئوگرید بزرگ‌تر از 3B، نرخ کاهش نشست شالوده ناچیز می‌شود.

۳- یافته‌های حاصل از مدل‌سازی توسط PLAXIS دلالت بر این داشت که با تعبیه اولین لایه ژئوگرید در عمقی برابر با نصف عرض شالوده (0.5B)، مقدار نشست شالوده به حداقل مقدار ممکن خود می‌رسد. به عبارت دیگر، عمق بهینه قرارگیری لایه اول ژئوگرید در فاصله 0.5B از زیر شالوده می‌باشد.

۴- نشست شالوده یک روند کاهشی با افزایش سختی کششی ژئوگرید نشان داد. صرف‌نظر از تعداد لایه‌های ژئوگرید، شالوده دارای ژئوگرید با سختی کششی بالاتر نشست کم‌تری نسبت به ژئوگرید با سختی کششی کم‌تر از خود نشان می‌دهد. با این حال، وقتی سختی کششی ژئوگرید به بیش از ۳۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر می‌رسد، تغییر قابل توجهی در نرخ نشست حاصل نمی‌شود.

۵- نتایج نشان داد که در میان پارامترهای ژئوگرید، تعداد لایه‌های ژئوگرید و عمق بهینه قرارگیری اولین لایه ژئوگرید در زیر شالوده به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را در کاهش نشست داشته‌اند.

۶- با توجه به این‌که در محل هر پروژه ژئوتکنیکی، نوع و خصوصیات خاک آن با دیگر پروژه‌ها متفاوت است، بنابراین نتایج مدل‌سازی در پژوهش حاضر صرفاً برای خاک‌های دانه‌ای با خصوصیات اشاره شده در مقاله حاضر کاربرد دارند.

References

- Abu-Farsakh, M., Chen, Q., Sharma, R., Zhang, X (2008) Large-Scale model footing tests on geogrid-reinforced foundation and marginal embankment soils. *Geotechnical Testing Journal*, 31: 413–423. <https://doi.org/10.1520/GTJ101465>.
- Adams, M. T., Collin, J. G (1997) Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123: 66–72.
- Alamshahi, S., Hataf, N (2009) Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor. *Geotextiles and Geomembranes*, 27: 217–226. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.011.
- Basudhar, P. K., Dixit, P. M., Gharpure, A., Deb, K (2008) Finite element analysis of geotextile-reinforced sand-bed subjected to strip loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 26: 91–99. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.04.002.
- Bathurst, R. J., Naftchali, F. M (2021) Geosynthetic reinforcement stiffness for analytical and numerical modelling of reinforced soil structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4): 921–940. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.002>.
- Chen, Q., Abu-Farsakh, M. Y., Sharma, R., Zhang, X (2007) Laboratory investigation of behavior of foundations on geosynthetic reinforced clayey soil. *Journal of the Transportation Research Board*, 2004: 28–38. <https://doi.org/10.3141/2004-04>.
- Damians, I. P., Bathurst, R. J., Josa, A., Lloret, A (2014) Numerical study of the influence of foundation compressibility and reinforcement stiffness on the behavior of reinforced soil walls. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8 (3): 247–259. doi.org/10.1179/1939787913Y.0000000039.
- Das, B. M., Omar, M. T (1994) the effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 12: 133–141. <https://doi.org/10.1007/BF00429771>.
- Dhatrak, A. I., Khan Farukh, A (2014) Behaviour of square footings on prestressed geosynthetic reinforced sand. *The International of Engineering and Science*, 3: 72–83. <https://doi.org/10.1913/0373072083>.
- Entezami, M., Akhlaghi, T (2013) the application of geosynthetics in reinforcing and increasing the height of earthen dams. *The Conference on Commercialization, National Development and Engineering Sciences*, Sari, Iran (In Persian).
- Guido, V. A., Chang, D. K., Sweeny, M. A (1986) Comparison of geogrid and geotextile reinforced slabs. *Canadian Geotechnical Journal*, 20: 435–440. <https://doi.org/10.1139/t86-073>.
- Guo, X., Pham, T. A., Dias, D (2023) Multi-objective optimization of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments. *Acta Geotechnica*, 18: 3783–3798. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01782-4>.
- Hamidi, A., Hooresfand, M (2013) Effect of reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 36: 1–9. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.10.005.
- Lackner, C., Bergado, D. T., Semprich, S (2013) Prestressed reinforced soil by geosynthetics - Concept and experimental Investigations. *Geotextiles and geomembranes*, 37: 109–123. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.02.002.
- Latha, G. M., Somwanshi, A (2009) Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27: 281–294. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.02.001.
- Lovisa, J., Shukla, S. K., Sivakugan, N (2010) Behaviour of Prestressed geotextile-reinforced Sand bed supporting a loaded circular footing. *Geotextiles and Geomembranes*, 28: 23–32. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.002.
- Maharaj, D. K (2003) Nonlinear finite element analysis of strip footing on reinforced clay,” *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8, Bundle C.
- Naeini, S. A., Gholampoor, N (2014) cyclic behavior of dry silty sand reinforced with a geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, 42: 611–619.
- Naftchali, F. M., Bathurst, R. J (2022) Influence of geosynthetic stiffness on analytical solutions for reinforced fill over void. *Geosynthetics International*, 30(1): 95–107. <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00015a>.
- Omar, M. T., Das, B. M., Yen, S. C., Puri, V. K., Cook, E. E (1993) Ultimate bearing capacity of rectangular foundations on geogrid-reinforced sand. *Geotechnical Testing Journal*, 16: 246–252. <https://doi.org/10.1520/GTJ10041J>.
- Pham, T. A (2022) Design and analysis of geosynthetic-reinforced and loading column-supported embankments. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(10): 1276–1292.
- PLAXIS (2005) PLAXIS Version 8.2, Reference manual, Web: <http://www.plaxis.nl.com>.
- Ramaswamy, S. D., Puroshothama, P (1992) Model footings of geogrid reinforced clay. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference on Geotechnique Today*, 1: 183–186.
- Sharifpour, K., Saba, H. R., Mohamadi, S (2014) Comparison of geosynthetic performance on the bearing capacity of reinforced fine-grained and coarse-grained soils. *The First Iranian Conference on Geotechnical Engineering*, Ardabil, Iran (In Persian).

- Shin, E. C., Das, B. M., Lee, E. S., Atalar, C (2002) Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20: 169–180. <https://doi.org/10.1023/A:1015059427487>.
- Shivashankar, R., Jayaraj, J (2013) Effect of prestressing the reinforcement on the behavior of reinforcement on the behavior of reinforced granular beds overlying weak soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 42: 69–75. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.08.008.
- Yang, S. D., Yu, X. J (2011) the experimental study on the dynamic behavior of reinforced silty. *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering*, 2745–2750. doi.org/10.1109/ICETCE.2011.5775696.
- Yetimoglu, T., Wu, J. T. H., Saglam, A (1994) Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120: 2083–2099.
- Yu, Y., Bathurst, R. J., Allen, T. M (2016) Numerical modelling of the SR-18 geogrid reinforced modular block retaining walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142 (5): 04016003.
- Yu, Y., Bathurst, R. J., Allen, T. M (2017) Numerical modelling of two full-scale reinforced soil wrapped-face walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 45 (4): 237–249. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.02.004.

Numerical modeling of the effectiveness of some geogrid parameters in reducing the settlement of the foundation on granular soil

A. Jamshidi^{1*}, R. Yazarloo², S. Aligholi³ and F. Nabizadeh⁴

1- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Assist. Prof., of Civil Engineering, Islamic Azad University, Gonbad Kavous branch, Gonbad Kavous, Iran

3- Dept., of Engineering Geology, Institute of Innovation, Science and Sustainability, Federation University, Ballarat 3350, VIC, Australia

4- Assist. Prof., of Civil Engineering, Islamic Azad University, Chaloos branch, Chaloos, Iran

* Jamshidi.am@lu.ac.ir

Received: 2024.4.8 Accepted: 2024.6.16

Abstract

Reinforcement can significantly reduce foundation settlement, but finding an economic plan requires detailed numerical studies. In the present study, the stability of granular soil reinforced with geogrid was analyzed using PLAXIS software and the effect of factors such as the number and length of geogrid layers, the optimal depth of the first geogrid layer below the foundation, and the tensile strength of the geogrid on the of settlement were investigated. The results indicate that the factors mentioned above play a significant role in the foundation settlement. The analysis shows that by increasing the number and length of geogrid, the settlement value has decreased. Moreover, with the increase in the tensile strength of the geogrid, the settlement has significantly reduced. In regard the depth of the reinforced area, it was found that placing the first layer of geogrid after a certain depth (optimal depth) below the foundation does not cause a noticeable reduction in the settlement. Based on the output of PLAXIS software, the optimal values of the number and length of geogrid layers, the optimal depth of the first geogrid layer below the foundation, and the tensile strength of the geogrid layer to minimizing the amount of settlement have been proposed. This can lead to a reduction in the costs of foundation design and implementation. According to the results, the lowest settlement (41 mm) was for the conditions where 5 layers of geogrid were used. The most optimal geogrid length and depth of the first geogrid layer to reduce the settlement is equal to 2.5 and 0.5 times the foundation width, respectively. Also, the lowest settlement (80.5 mm) for geogrid with tensile strength of 4500 kN/m was obtained. Finally, the accuracy of the results has been checked based on the modeling of actual data published by Laviza et al.

Keywords: Numerical evaluation, Geogrid, Reinforced soil, Foundation settlement, PLAXIS

Introduction

Improving and enhancing the geotechnical properties of soil using natural and synthetic materials has been of interest to mankind for a long time. Today, the method of soil improvement is one of the branches of geotechnical engineering that with scientific principles and the use of new technologies, uses appropriate materials to strengthen the soil, and as a result, improves various geotechnical characteristics such as strength, bearing capacity, and settlement. During the recent decades, the use of different synthetic materials (under the name of geosynthetics) in geotechnical projects have made significant progress. These materials are made of rubber and plastic materials. According to the type of application and expected performance, synthetic materials are produced with different shapes and characteristics. Separation,

filtering, protection, drainage, reinforcement and insulation against water are some of the main functions of geosynthetics. These synthetic materials are widely used in most projects such as dam construction, road construction, retaining wall, building construction, soil improvement and many other related-soil projects. One of the common types of geosynthetics used in geotechnical projects is geogrid.

Due to the increasing progress of technology and the use of synthetic materials to strengthen and reduce soil settlement, geogrids are of interest to geotechnical engineers. Geogrids (as polymer products) are economical and compatible with the soil, so they are widely used in geotechnical projects. Anyway, use of geogrids in the soil should be so that the best practical results obtained in the geotechnical project. One of these results is the reduction of

the settlement of the foundation built on the soil. Accordingly, the aim of this research is propose design parameters geogrid reinforcement (parameters including the number of geogrid layers, the length of the geogrid layer, the optimal depth of the first geogrid layer under the foundation, and the tensile strength of the geogrid) to minimizing the settlement of the foundation on granular soil through numerical modeling in PLAXIS software.

Materials and methods

In this study, PLAXIS finite element software was used to model the most optimal conditions in terms of the number of geogrid layers, the length of the geogrid layer, the optimal embedding depth of the first geogrid layer under the foundation, and the tensile strength of the geogrid to minimize soil settlement. Various models were built and analyzed according to the variables mentioned above. Based on the output of the numerical models, the role of each of the geogrid variables on the amount of settlement of the strip foundation located on the soil was investigated and the most optimal conditions were suggested to minimize the settlement. Finally, the accuracy of the results has been examined by comparing the actual results of one of the previous experimental studies and the results obtained from modeling by PLAXIS software.

Results and discussion

By increasing the number of geogrid layers from 0 to 5 layers, the settlement of the foundation showed a decreasing trend. However, the reduction of settlement up to 3 layers of geogrid was noticeable. Besides, for soil reinforced with 4 and 5 layers of geogrid, slight changes in the rate of settlement reduction were observed. Based on this, it can be concluded that increasing the number of geogrid layers does not necessarily decrease

the settlement. In fact, for each specific type of soil and geogrid, there is a particular value for the number of geogrid layers in which the most optimal amount of foundation settlement reduction occurs. However, the analyses revealed that the amount of settlement reduction is noticeable for up to the geogrid length equal to $3B$ (B is the width of the foundation). In contrast, for geogrid with length greater than $3B$, the foundation settlement reduction rate becomes insignificant. The modeling results attained from PLAXIS indicated that by embedding the first layer of geogrid at a depth equal to half the width of the foundation ($0.5B$), the amount of foundation settlement reaches its minimum possible value. In other words, the optimal embedding depth of the first layer of the geogrid is at a distance of $0.5B$ from under the foundation. The settlement of the foundation showed a decreasing trend with the increase of the tensile stiffness of the geogrid. Regardless of the number of geogrid layers, the foundation containing geogrid with higher tensile strength shows less settlement than the geogrid with lower tensile strength. However, when the tensile strength of the geogrid reaches more than 3500 kN/m , a significant change in the settlement rate is not achieved.

Conclusion

The results revealed that the geogrid parameters including the number and length of geogrid layers, the optimal depth of the first geogrid layer below the foundation, and the tensile strength of the geogrid had a critical role in the amount of foundation settlement. Moreover, the data analysis indicated that among the geogrid parameters, the number of layers and the optimal depth of the first geogrid layer below the foundation had the most and least effects in reducing settlement, respectively.