

مدل‌سازی عددی تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و زیراساس روسازی راه

رضا مؤیدفر* (استادیار)

محمدرضا مظهری (دانشیار)

بهزاد سریدانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف (پهار ۲۰۲۱) (۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۱۰۵-۱۱۳، (پادداشت ثنی)

روش‌های گوناگونی برای بهبود پایداری خاکریز پیشنهاد می‌شود که از بین آن‌ها می‌توان به تسلیح خاک اشاره کرد. هدف از نوشتار حاضر، بهبود ضریب اطمینان خاکریز مسلح شده توسط ژئوتکستایل با زوایای گوناگون و مستقر بر خاک نرم با کمک نرم‌افزار PLAXIS بوده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تغییر زاویه‌ی ژئوتکستایل از 0° تا 9.5° درجه در خاک ماسه‌یی، باعث کاهش 53% درصدی ضریب اطمینان خاکریز شده است. اما تغییر زاویه‌ی اخیر، در خاک رسی تأثیر اندکی گذاشته است، به نحوی که با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل از 0° تا 1° درجه، کاهش $2/9\%$ درصدی در ضریب اطمینان آن مشاهده شده است. به علاوه، با افزایش حدود $2/86\%$ برابری مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌یی به طور میانگین $14/31\%$ در خاک رسی $2/125\%$ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش اخیر مقاومت ژئوتکستایل، حد نشست خاکریز تا لحظه‌ی قبل از گسیختگی، $64/6\%$ بیشتر شده است.

واژگان کلیدی: پایداری خاکریز، بهبود ضریب اطمینان، ژئوتکستایل، تسلیح خاک، نرم‌افزار PLAXIS.

۱. مقدمه

پروژه‌های ساخت بشر استفاده می‌شوند. این دسته از ژئوسنتتیک‌ها در واقع مانند منسوجاتی هستند که به جای کاربرد الیاف طبیعی، همانند نخ، ابریشم، یا پشم، از الیاف مصنوعی و عمدتاً پلیمری در آن‌ها استفاده می‌شود که متخلخل و نفوذپذیرند و از نظر ضخامت در ابعاد مختلف تولید می‌شوند.^[۱]

۱.۱. تاریخچه‌ی پژوهش

تاکنون مدل‌سازی‌های عددی بسیاری در زمینه‌ی تسلیح با ژئوتکستایل صورت گرفته است که از جمله می‌توان به مدل‌سازی با آزمایش CBR^۱ جهت تأثیر ژئوتکستایل در افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس مسلح شده با ژئوگرید و بررسی همبستگی آن‌ها اشاره کرد؛ که در نتیجه‌ی آن، با مسلح ساختن خاک و افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده و همچنین بهبود شرایط اندرکنش، مقدار مدول کشسانی و ظرفیت باربری خاک افزایش می‌یابد و باعث کاهش میزان کرنش

احداث سازه‌های روی خاک موجود در محل، حفاظت از گودبرداری‌ها و ساختمان‌های مجاور و بهینه‌سازی هزینه‌ی ساخت و ساز، همواره هدفی است که مهندسان 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 است. این در حالی است که خاک به خوبی در مقابل فشار مقاومت می‌کند، اما در برابر نیروی کششی از خود مقاومت چندانی نشان نمی‌دهد. در چنین مواردی، روش‌های مختلفی برای بهبود خاک پیشنهاد شده است. از روش‌های رایج در دو دهه‌ی اخیر، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها به‌عنوان مسلح‌کننده‌ی خاک را می‌توان برشمرد. استاندارد (۲۰۰۶) ASTM D4۲۳۹، ژئوسنتتیک را چنین تعریف می‌کند: مواد و مصالحی پلیمری هستند که به همراه خاک، سنگ و یا دیگر مصالح مرتبط ژئوتکنیکی، در سازه‌ها و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۲۸، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۲.

DOI:10.24200/J30.2022.60708.3119

استناد به این مقاله:

مؤیدفر، رضا، مظهری، محمدرضا و سریدانی، بهزاد (۱۴۰۲). «مدل‌سازی عددی تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و زیراساس روسازی راه»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۳۹-۲، ص. ۱۰۵-۱۱۳

گسیختگی می‌شود. در نوشتار عابدی و همکاران (۲۰۱۷)، با در برگرفتن ژئوگرید توسط لایه‌های ژئوتکستایل، به‌طور قابل‌توجهی مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس از طریق افزایش اندرکنش سطح تماس بهبود یافته است.^[۴] مینا و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعاتی بر روی جاده‌های بدون آسفالت در هند که فقط با مشخصات خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک) طراحی می‌شوند، انجام داده‌اند که اگر چسبندگی خاک در طراحی مذکور، معیار استحکام در نظر گرفته شود، مقاومت باربری کمتری ایجاد می‌شود که به تبع آن ضخامت لایه سنگدانه بیشتر خواهد شد و در نتیجه، هزینه ساخت راه افزایش خواهد یافت. در مطالعه‌ی مذکور، با افزودن یک لایه ژئوتکستایل در زیرلایه سنگدانه و تخمین ظرفیت باربری خاک در حضور و غیاب مسلح‌کننده‌ی مذکور، گزارش شده است که در نتیجه‌ی افزایش مقاومت ژئوتکستایل‌ها، ضخامت لایه سنگ‌دانه کاهش یافته است.^[۳] مطالعات ولاندی^۲ و همکاران (۲۰۱۵)، نشان داده است که ژئوتکستایل به‌طور فزاینده‌ی به عنوان تقویت در خاکریز جاده‌ی خاک نرم استفاده شده است. در پژوهش ایشان، استحکام کششی مطلوب ژئوتکستایل به عنوان تقویت در خاکریز جاده با توجه به ضریب مجاز اطمینان و جابه‌جایی تعیین شده و نتایج نشان داده‌اند که ضریب اطمینان تمایل دارد با افزایش مقاومت کششی ژئوتکستایل مسلح‌کننده افزایش یابد. از آنجا که جابه‌جایی با افزایش استحکام کششی ژئوتکستایل اثر معنی‌داری نداشته است، برای تعیین مقاومت کششی مطلوب ژئوتکستایل، می‌توان پارامتر مذکور را نادیده گرفت.^[۴]

جلالی^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، با مطالعه‌ی رفتار روسازی انعطاف‌پذیر که دارای نتایج آزمون CBR مختلف بوده است، با کمک مدل‌سازی نرم‌افزار المان محدود تحت بارگذاری استاتیکی و با وجود مشخصات غیرخطی خاک در حالت زهکشی شده، به این نتایج دست یافتند که تشابه زیادی در مقدار جابه‌جایی سطح راه بین آزمون‌های عملی و مدل‌سازی با نرم‌افزار PLAXIS وجود دارد.^[۵] کرمانی (۲۰۱۸)، مطالعات متعددی در مورد تأثیر ژئوتکستایل به عنوان لایه‌ی جداساز و فیلتراسیون در جهت کاهش جابه‌جایی ریزدانه‌های خاک بستر اشباع به لایه‌ی زیراساس انجام داده و دریافته است که ریزدانه‌هایی که به لایه‌ی زیراساس نفوذ کرده‌اند، براساس درصد جرم خاک زیراساس، در آزمایش‌های بدون ژئوتکستایل ۶/۳۹٪ و با حضور ژئوتکستایل به ۱/۸۱٪ کاهش یافته است. همچنین وجود ژئوتکستایل باعث کاهش ۳۰ درصدی در میزان خرابی شیارشدگی روسازی شده است.^[۶]

لین^۴ و همکاران (۲۰۲۱)، در مطالعات خود بر روی نوع جدیدی از ژئوتکستایل‌ها با بافت فیتله مانند که برتری خاصی نسبت به ژئوتکستایل‌های رایج در زهکشی جانبی دارند، به این نتایج دست یافتند که با بهره‌گیری از ژئوتکستایل‌های مذکور می‌توان براساس طراحی استاندارد ایالات متحده، ضخامت لایه‌ی اساس را نزدیک به ۵۰٪ و همچنین عمق خرابی شیارشدگی سطح روسازی را تا ۳۵٪ کاهش داد.^[۷] نتایج مطالعات حلیمی و اسدی (۲۰۱۴)، در مورد تحلیل شیروانی‌ها نشان داده است که استفاده از مدل PLAXIS دوبعدی، نتایج نزدیک‌تری نسبت به مدل سه‌بعدی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی برای تعیین مقدار بیشینه‌ی ظرفیت باربری قبل از گسیختگی خاکریز ارائه خواهد داد.^[۸] سیاوش‌نیا (۲۰۱۰)، در نوشتار خود با عنوان «ارزیابی خاکریز مسلح شده با ژئوتکستایل بر روی خاک رس نرم»، تأثیر تعداد لایه‌های ژئوتکستایل، کاهش شیب خاکریز، مقاومت ژئوتکستایل و طول مؤثر ژئوتکستایل در رفتار خاکریز ماسه‌ی سیلیتی تقویت شده بر روی خاک رس نرم را بررسی کرده و دریافته‌اند که کاهش شیب و ارتفاع خاکریزی، عرض تاج و افزایش مقاومت ژئوتکستایل می‌تواند جابه‌جایی‌های سطح خاکریز را کاهش دهد. به نحوی که با اضافه کردن یک لایه ژئوتکستایل، جابه‌جایی قائم سطح خاکریز در حدود

۱۰٪ و جابه‌جایی افقی در پنجه‌ی خاکریز حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. همچنین با کاهش ۳/۵ درصدی در شیب خاکریز، میزان بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی در پنجه‌ی خاکریز، ۲۶/۷٪ کاهش یافته است.^[۹]

برگادو^۵ و همکاران (۲۰۰۲)، در یک مطالعه‌ی موردی خاکریزهای آزمایشی در مقیاس کامل، با و بدون تقویت ژئوتکستایل، ساخته شده بر روی خاک رس نرم و مقایسه با تحلیل المان محدود خاکریز مذکور دریافته‌اند که ژئوتکستایل با مقاومت بالا، تغییرشکل‌های خمیری خاک زیرلایه‌های روسازی را کاهش و ارتفاع بحرانی (شکست) خاکریز را نسبت به خاکریز مسلح نشده، ۱/۵ برابر افزایش داده است.^[۱۰] مجیدی و همکاران (۲۰۱۷)، نیز در نوشتاری با عنوان «تأثیر مسلح کردن خاکریز در پایداری و نشست: تحلیل المان محدود بر انواع مختلف مسلح‌سازی و شرایط سازه»، به بررسی اثر سختی محوری ژئوگرید، تعداد لایه‌های مسلح‌کننده و زاویه‌ی شیب خاکریز در خاک رسی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS پرداخته و دریافته‌اند که استفاده از مسلح‌کننده‌ها، منجر به کاهش تغییرشکل سطح خاکریز و افزایش پایداری آن شده است، به گونه‌ی که با مسلح کردن خاکریز، جابه‌جایی افقی پنجه‌ی خاکریز بین ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش یافته است. همچنین با افزایش مقاومت ژئوگرید از 9 (kN/m) تا 125 (kN/m) به 500 (kN/m) ، میزان ضریب اطمینان خاکریز در حدود ۹٪ افزایش یافته است.^[۱۱] خاکریز مدل‌سازی شده در نوشتار حاضر، در نرم‌افزار PLAXIS دوبعدی با یک مدل کرنش مسطح مدل‌سازی صورت گرفته و از المان ۱۵ گره‌بی (برای مدل کردن لایه‌های خاکی باید از اجزاء مثلثی ۱۵ گره‌بی و یا ۶ گره‌بی استفاده کرد)، جهت دقت بیشتر استفاده شده است. با توجه به اهداف پژوهش، باید به تعداد کافی مدل‌سازی صورت گیرد. به همین منظور، پارامترهای مقاومتی خاک، نظیر: مدول کشسانی، نسبت بواسون، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کششی ژئوتکستایل به عنوان متغیرهای مستقل و ضریب اطمینان پایداری خاکریز به عنوان متغیر وابسته تعریف شده‌اند.

۲.۱. انواع ژئوتکستایل

ژئوتکستایل‌ها، در دو گروه عمده طبقه‌بندی می‌شوند. در صورتی که الیاف ساخته شده از آن‌ها توسط دستگاه‌های بافندگی و به صورت دو مجموعه‌ی نخ عمود بر هم (تار و پود) بافته شوند، نوع محصول به ژئوتکستایل بافته شده^۶ موسوم است. ژئوتکستایل بافته، عموماً استحکام و سفتی بالایی دارد. اگر الیاف به صورت نامنظم و تصادفی در کنار هم قرار گیرند و توسط روش‌های حرارتی، مکانیکی و یا شیمیایی به هم متصل شوند، ژئوتکستایل بافته نشده^۷ به‌وجود می‌آید. ژئوتکستایل بافته نشده، ویژگی‌های: استحکام، سفتی متوسط، خواص درازشدگی در گسیختگی و نیز قابلیت زهکشی مناسب دارد. با توجه به تفاوت در مقاومت کششی در دو نوع ژئوتکستایل بافته شده و بافته نشده در نوشتار حاضر، جهت مدل‌سازی از هر دو نوع اخیر استفاده شده است. جهت انتخاب ژئوتکستایل، مشخصه‌ی جرم در واحد سطح، یکسان در نظر گرفته شده است.^[۱]

۳.۱. معیار انتخاب و کاربرد ژئوتکستایل در روسازی

ژئوتکستایل، یکی از اعضای پرکاربرد خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌هاست که از مهم‌ترین خصوصیات آن‌ها می‌توان به: مقاومت کششی بالا، قابلیت اتساعی پایین‌تر برای کاهش خزش روی ژئوممبرین، مقاومت سوراخ‌شوندگی بالا، فیلتر مناسب و چشمه‌های با اندازه‌ی گوناگون اشاره کرد.^[۱۲] از جمله مهم‌ترین کاربردهای ژئوتکستایل می‌توان به‌عنوان: جداکننده و ایجاد مرز بین مصالح برای جلوگیری از ورود دانه‌های خاک از

جدول ۱. پارامترهای اولیه‌ی خاک. [۱۵، ۱۴]

| | اساس | | زیراساس | |
|---|------|------|---------|------|
| | ۱ | ۲ | ۱ | ۲ |
| وزن مخصوص اشباع $\frac{kN}{m^3}$ | ۲۳/۵ | ۲۲ | ۱۶/۲ | ۲۰ |
| وزن مخصوص غیراشباع $\frac{kN}{m^3}$ | ۲۲/۲ | ۲۰ | ۱۵/۵ | ۱۸ |
| نفوذپذیری در جهت افق $(\frac{m}{day})$ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| نفوذپذیری در جهت قائم $(\frac{m}{day})$ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| چسبندگی $(\frac{kN}{m^2})$ | ۱ | ۳۰ | ۱ | ۲۰ |
| زاویه‌ی اصطکاک | ۴۳ | ۴۳ | ۴۰ | ۴۰ |
| زاویه‌ی اتساع | ۱۳ | ۱۳ | ۱۰ | ۱۴ |
| مدول کشسانی $(\frac{kN}{m^2})$ | ۲۰۰۰ | ۱۰۰۰ | ۴۲۰۰ | ۵۰۰۰ |
| نسبت پواسون | ۰/۳۵ | ۰/۳۵ | ۰/۳۵ | ۰/۳ |
| ضخامت (mm) | ۲۵۰ | ۳۰۰ | ۳۸۰ | ۴۰۰ |

جدول ۲. خواص لایه‌ی زیر خاکریز.

| پارامترها | خاک رس |
|---|--------|
| وزن مخصوص اشباع $(\frac{kN}{m^3})$ | ۱۵ |
| وزن مخصوص غیراشباع $(\frac{kN}{m^3})$ | ۱۸ |
| نفوذپذیری در جهت افق $(\frac{m}{day})$ | ۰/۰۱ |
| نفوذپذیری در جهت قائم $(\frac{m}{day})$ | ۰/۰۱ |
| چسبندگی $(\frac{kN}{m^2})$ | ۲۰ |
| زاویه‌ی اصطکاک | ۲۴ |
| زاویه‌ی اتساع | ۰ |
| مدول کشسانی $(\frac{kN}{m^2})$ | ۱۰۰۰ |
| نسبت پواسون | ۰/۳۳ |
| ضخامت (mm) | ۴۰۰۰ |

پرداخته و مشاهده شده است تسلیح روسازی در بارگذاری استاتیکی، تأثیرگذار اما در بارگذاری دینامیکی، فقط برای بسامد بالا نتیجه بخش بوده است. نکته‌ی قابل توجه در این است که رویکرد مدل‌سازی در دو نوشتار اخیر به این صورت بوده است که هندسه‌ی مدل خاکریز به صورت کاملاً افقی و شرایط تکیه‌گاهی در سرتاسر مدل در نظر گرفته شده است؛ اما در مطالعه‌ی حاضر، هندسه‌ی مدل مشابه خاکریز اجرایی انتهای شیب خاکریز آزاد بوده است، تا جابه‌جایی مسلح‌کننده در پنجه‌ی خاکریز مشاهده شود. [۱۵، ۱۴]

با توجه به جدول ۱، فقط پارامتر R_{inter} باقی می‌ماند که برای معرفی میزان درگیری سطح تماسی بین دو سطح مختلف است. بنابراین مقدار ۱ برای ضریب مذکور در نظر گرفته شده است. [۱۶] همچنین برای خاک بستر نیز فرضیات جدول ۲ در نظر گرفته شده است. برای خاک بستر نیز خاک رسی خوب دانه‌بندی شده مدنظر بوده است. خاک‌های رسی تمایل به تورم ندارند، بنابراین زاویه‌ی اتساع برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت پواسون که حاصل از آزمایش‌های سهم‌محوری زهکش‌ی شده‌ی استاندارد است و در بیشتر موارد مقدار آن بین ۰/۳

لایه‌های مختلف، تقویت‌کننده‌ی مقاومت کششی خاک، زهکش مایعات و گازهای محبوس در لایه‌ی خاک و فیلتر جهت ایجاد مرزی پایدار بین خاک و زهکش در مسیر حرکت آب نام برد. از بین کاربردهای گوناگون ژئوتکنستایل در نرم‌افزار عددی، فقط به عنوان تقویت‌کننده جهت افزایش مقاومت کششی خاک مد نظر قرار می‌گیرد. [۱]

۲. روش شناسی پژوهش

برای راستی‌آزمایی نرم‌افزار PLAXIS از نوشتاری با عنوان «مدل‌سازی عددی خاکریز بزرگراه با روش‌های مختلف بهسازی زمین»، استفاده شده است؛ که در آن، با مدل‌سازی خاکریز راه با نرم‌افزار PLAXIS برای مصالح متفاوت سعی بر یافتن بیشترین ضریب اطمینان شده است. همچنین برای مدل‌سازی از چهار نوع مصالح در مدل موهر-کلمب^۸، به صورت خاک ساده، خاک به همراه خاکستر بادی، خاک مسلح شده با ژئوگرید، و خاک به همراه خاکستر بادی و مسلح شده با ژئوگرید استفاده شده است. [۱۳]

جهت راستی‌آزمایی نیز در نوشتار حاضر، از حالت اول (خاک ساده) استفاده شده است. ضریب اطمینان به دست آمده در نوشتار اخیر، [۱۳] برای حالت اول، معادل ۱/۴۰۶ و ضریب اطمینان حاصل شده توسط نرم‌افزار PLAXIS در نوشتار حاضر، معادل ۱/۴۰۷ بوده است (مدل حاصل در دسترس است). بنابراین با استناد به نتایج به دست آمده، نرم‌افزار PLAXIS، قابلیت بررسی نوشتار حاضر را دارد.

۳. مدل‌سازی

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد فراوانی کاربرد و اهمیت ژئوتکنستایل‌ها در شیروانی خاکی و برخلاف سایر مطالعات رایج که مسلح‌کننده‌های خاکریز در مرز بین خاک بستر و لایه‌های روسازی و یا مرز بین لایه‌های روسازی و رویه‌ی آسفالت قرار گرفته‌اند، در نوشتار حاضر، مسلح‌کننده‌ها در داخل لایه‌های اساس و زیراساس و با هدف تأثیر تغییر زاویه‌ی ژئوتکنستایل با تغییر همزمان شیب گونه‌ی خاکریز و مقاومت کششی ژئوتکنستایل در دو نوع خاک رسی و ماسه‌ی جهت دستیابی به ضریب اطمینان بیشتر نسبت به سایر مطالعات قرار گرفته‌اند. جهت ساخت مدل در نرم‌افزار PLAXIS، نیاز به یک سری پارامتر اولیه است، پارامترهای مذکور از چند نوشتار، استخراج و بررسی شده‌اند.

۱.۳. مواد و روش‌ها

در نوشتار حاضر، برای مدل‌سازی خاکریز راه، علاوه بر هندسه‌ی مدل و تعیین شرایط محیطی، مهم‌ترین موضوع تعیین پارامترهای اولیه‌ی خاک بستر و لایه‌های روسازی بوده است (جدول ۱) که برای تعیین آن‌ها، از دو نوشتار با عنوان‌های «آنالیز اجزاء محدود روسازی انعطاف‌پذیر با ژئوگریدها» [۱۴] و «مدل‌سازی المان محدود با نرم‌افزار PLAXIS از روسازی آسفالتی مسلح شده با ژئوگرید» [۱۵] استفاده شده است که رویکردی مشابه با مطالعه‌ی حاضر داشته‌اند. با این تفاوت که در نوشتار اول، به بررسی و تحلیل روسازی با نرم‌افزار المان محدود پرداخته شده است، و علاوه بر استفاده از ژئوگرید، ضخامت لایه‌های روسازی را افزایش داده‌اند. در نتیجه، تغییر شکل سطح راه افزایش یافته است، ولی در تمامی حالت‌ها با حضور مسلح‌کننده، تغییر شکل سطح راه کاهش یافته است. در نوشتار دوم، به مدل‌سازی روسازی تسلیح شده و تسلیح نشده با ژئوگرید به همراه بارگذاری دینامیکی و استاتیکی در نرم‌افزار المان محدود

جدول ۳. مراحل آنالیز مدل.

| Time (Day) | Loading input | Calculation | Start from | Phase no. | identification |
|------------|-------------------------|------------------------|------------|-----------|----------------|
| ۰ | N/A | N/A | ۰ | ۰ | Initial phase |
| ۲ | Staged construction | Plastic analysis | ۰ | ۷ | < Phase ۰ > |
| ۵ | Staged construction | Consolidation analysis | ۷ | ۱ | < Phase ۱ > |
| ۲۰۰ | Staged construction | Consolidation analysis | ۱ | ۲ | < Phase ۲ > |
| ۵ | Staged construction | Consolidation analysis | ۲ | ۶ | < Phase ۳ > |
| - | Minimum Pore pressure | Consolidation analysis | ۶ | ۴ | < Phase ۴ > |
| - | Incremental multipliers | Phi/c reduction | ۴ | ۵ | < Phase ۵ > |

جدول ۴. شرایط در نظر گرفته شده در ساخت مدل.

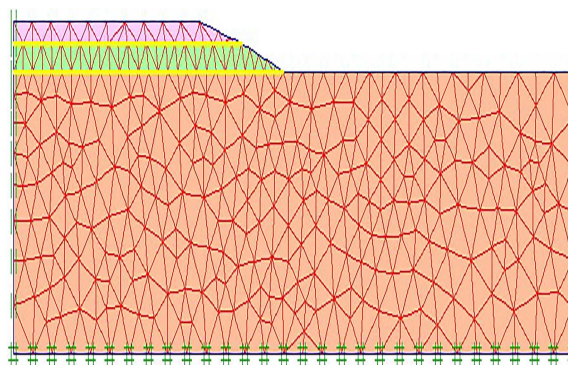
| زاویه ی ژئوتکستایل (درجه) | مقاومت های ژئوتکستایل (kN/m) | شیب های خاکریز | نوع خاکریز |
|---------------------------|----------------------------------|----------------|------------|
| ۰ - ۰/۴۸ - ۰/۷۲ - ۰/۹۵ | ۱۴ - ۴۰ | ۰/۱۸ - ۰/۲۴ | ۱ |
| ۰ - ۰/۶۷ - ۱/۳۴ - ۲/۰۱ | ۱۴ - ۴۰ | ۰/۱۸ - ۰/۲۳ | ۲ |

شرایط اولیه ی پروژه به ایجاد فشارهای آب، غیرفعال کردن سازه ها و بارها و ایجاد تنش های اولیه نیاز دارد. فشار آب براساس ورود ترازهای ایستابی و ارتفاعات آب زیرزمینی است. بنابراین جهت تعریف تراز ایستابی عمومی، به طور اتوماتیک برای همه ی توده ها جهت تولید فشارهای منفذی تخصیص داده شده است. سطح ایستابی آب زیرزمینی ۵/۰ متر از سطح زمین اصلی پایین تر است.

۲.۳. آنالیز مدل

پس از معرفی هندسه ی مدل و تکمیل قسمت ورودی مدل سازی، نوبت به آنالیز مدل می رسد. در آنالیز مدل با توجه به وجود خاک بستر در مدل مذکور، ابتدا خاکریز راه با آنالیز خمیری جهت ایجاد خاک بستر آغاز شد. سپس با فرایند تحکیم، لایه ی زیراساس در مدت ۵ روز ساخته و در فاز بعدی، همان لایه به مدت ۲۰۰ روز آنالیز تحکیم انجام شده است. مجدداً برای لایه ی اساس، با آنالیز تحکیم در ۵ روز، ساخت آن مدل شده و در مرحله ی بعد برای بررسی رفتار خاکریز در سال های آینده، آنالیز تحکیم تا زائل شدن کامل فشار آب حفزه یی و با استفاده از گزینه ی Minimum pore pressure انجام شده است. برای دستیابی به میزان ضریب اطمینان که شروع آن از انتهای مرحله ی قبل آغاز و با آنالیز Ignore undrained behaviour، رفتار زهکشی نشده به علت طولانی بودن این فاز محاسباتی در نظر گرفته نشده است. در جدول ۳، فازهای مربوط به آنالیز مدل ارائه شده است.

با توجه به توضیحاتی که ارائه شده است، برای ساخت مدل ها به این صورت عمل شده است که ۲ نوع خاکریز از لحاظ جنس خاک، با ۲ شیب متفاوت خاکریز نسبت به افق (مقدار واقع در جدول حاصل تقسیم ارتفاع به عرض گوهی شیب خاکریز است)، ۲ نوع ژئوتکستایل از نظر مقاومت و با ۴ زاویه ی گوناگون نسبت به افق برای ژئوتکستایل که این شرایط در جدول ۴ ارائه شده است، باعث ایجاد ۳۲



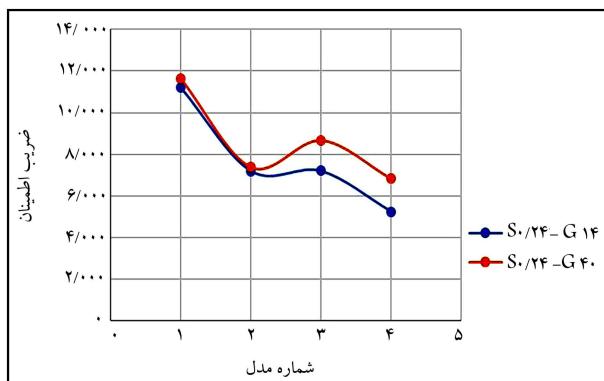
شکل ۱. تصویری از مش.

تا ۴/۰ است، به همین دلیل در نوشتار حاضر نسبت پواسون معادل ۳۳/۰ فرض شده است.^[۱۶] همچنین، برای نشان دادن دانه بندی خوب با نفوذپذیری پایین، مقدار نفوذپذیری در هر دو جهت افقی و قائم برابر ۰/۰۱ فرض شده است. پس از ایجاد مدل هندسی و تعیین مشخصات مصالح، هندسه ی مدل باید به المان های محدود به منظور انجام محاسبات المان محدود تقسیم شود. مش بندی در نرم افزار PLAXIS به صورت خودکار برای تمام مدل انجام شده است که برای افزایش دقت در محاسبات، مش بندی مطابق شکل ۱، ریز در نظر گرفته شده است.

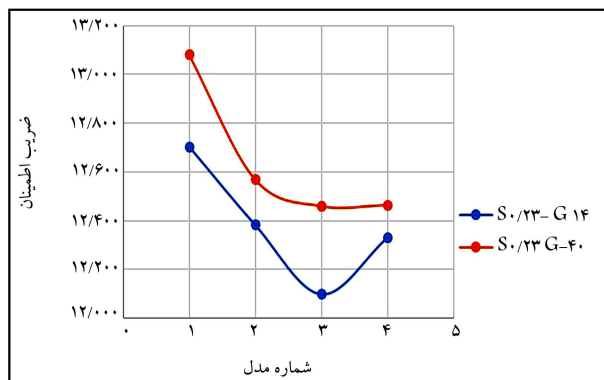
معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک ها، بسته به هدف مورد نظر لازم است که در نوشتار حاضر، از مدل موهر - کلمب استفاده شده است. با نرم افزار مذکور می توان خاک برداری و خاکریزی مرحله یی با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان های مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدل سازی کرد. با توجه به اینکه در مرزها در جهت های خاصی، مدل از لحاظ حرکت و تغییر شکل محدود است، کمینه ی ابعاد مدل باید طوری باشد که شرایط مرزی در نتایج تأثیرگذار نباشد.

جدول ۵. ضریب اطمینان مدل‌های ایجاد شده.

| نوع خاکریز | شماره مدل | ضریب اطمینان | شماره مدل | ضریب اطمینان | شماره مدل | ضریب اطمینان | شماره مدل | نوع خاکریز |
|------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|------------|
| ۲ | ۱ | ۱۲/۷۰۳ | ۵ | ۱۳/۰۸۰ | ۹ | ۱۳/۱۵۹ | ۱۳ | ۱۴/۵۰۲ |
| | ۲ | ۱۲/۳۸۲ | ۶ | ۱۲/۵۶۸ | ۱۰ | ۱۳/۰۱۶ | ۱۴ | ۱۳/۱۵۹ |
| | ۳ | ۱۲/۰۹۸ | ۷ | ۱۲/۴۵۹ | ۱۱ | ۱۳/۰۱۸ | ۱۵ | ۱۳/۰۷۸ |
| | ۴ | ۱۲/۳۳۰ | ۸ | ۱۲/۴۶۴ | ۱۲ | ۱۲/۹۵۳ | ۱۶ | ۱۴/۲۵۴ |
| ۱ | ۱۷ | ۱۱/۱۹۸ | ۲۱ | ۱۱/۶۲۳ | ۲۵ | ۱۲/۸۵۲ | ۲۹ | ۱۲/۰۵۱ |
| | ۱۸ | ۷/۱۹۶ | ۲۲ | ۷/۳۹۱ | ۲۶ | ۷/۰۲۵ | ۳۰ | ۹/۹۵۶ |
| | ۱۹ | ۷/۲۰۳ | ۲۳ | ۸/۶۷۹ | ۲۷ | ۹/۷۷۷ | ۳۱ | ۱۰/۹۸۹ |
| | ۲۰ | ۵/۲۵۰ | ۲۴ | ۶/۸۳۹ | ۲۸ | ۱۰/۳۴۲ | ۳۲ | ۹/۰۳۴ |



شکل ۲. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به نوع ژئوتکستایل در خاک ماسه‌یی.



شکل ۳. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به نوع ژئوتکستایل در خاک رسی.

مطابق آن‌ها، به علت زهکشی و تحکیم، ژئوتکستایل در کل طول خود دارای حرکت به سمت پایین بوده است. همچنین ذکر این نکته لازم است که جهت بررسی میزان نشست ژئوتکستایل، نمونه‌ی بررسی شده است که ژئوتکستایل به صورت افقی بر روی سطح لایه قرار گرفته باشد تا تغییرشکل مسلح‌کننده، نشان‌دهنده‌ی تغییر سطح

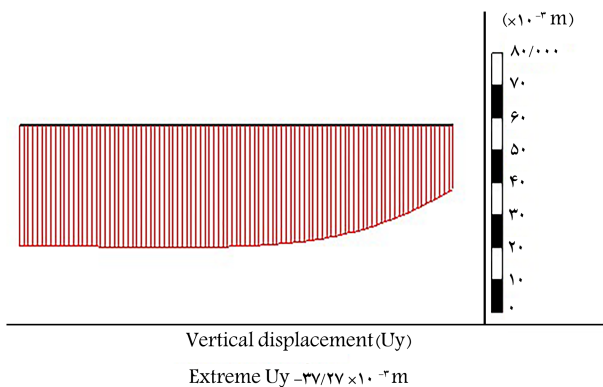
مدل شده است. ضرایب اطمینان شیروانی خاکریز برای تمامی مدل‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

۴. بحث و نتایج

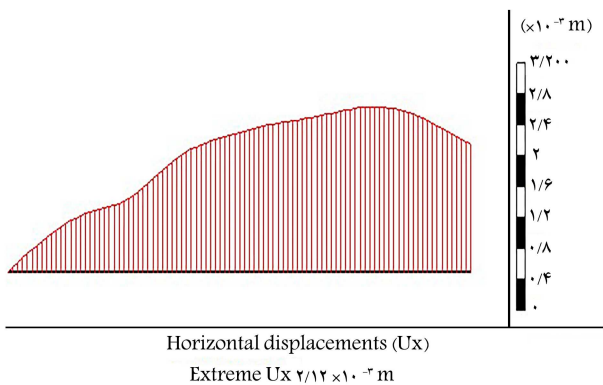
با توجه به تعداد بالای نمودارها، برای نام‌گذاری آن‌ها به این صورت عمل شد که به عنوان مثال $S_{0.24} - G_{14}$ یعنی مدل با شیب خاکریز 24° و مقاومت ژئوتکستایل 14 (kN/m) است. با نام‌گذاری ذکر شده (در شکل‌های ۲ و ۳) این نتیجه حاصل شد که با شیب خاکریز برابر و مقایسه با زاویه‌ی مساوی با افزایش حدود $2/86$ برابری مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌یی به طور میانگین $14/31\%$ و در خاک رسی، $2/125\%$ افزایش یافته است. در سایر مطالعات به این نتیجه دست یافتند که با ۴ برابر کردن مقاومت مسلح‌کننده، ضریب اطمینان خاکریز در حدود $8/69$ افزایش یافته است.^[۱۱]

همچنین با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، با بررسی ضریب اطمینان در حالت وجود مسلح‌کننده با مقاومت و زاویه‌ی قرارگیری یکسان با کاهش حدود $33/33$ درصدی شیب خاکریز، به طور میانگین در خاک ماسه‌یی $24/22\%$ و در خاک رسی $8/74\%$ افزایش در میزان ضریب اطمینان مشاهده می‌شود. با بررسی دیگر نوشتارها، پس از تغییر شیب خاکریز از $(1 : 1)$ به $(1 : 2)$ ، مقدار ضریب اطمینان $33/5\%$ افزایش یافته است که به نتیجه‌ی بررسی مطالعه‌ی حاضر در خاک ماسه‌یی نزدیک بوده است.^[۱۱] همچنین با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که با ثابت بودن تمامی پارامترها و فقط با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از 0° تا 95° در خاک درشت‌دانه، ضریب اطمینان خاکریز در حدود 53% کاهش یافته است. اما در خاک ریزدانه با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از 0° تا $1/51^\circ$ درجه، کاهش $2/9$ درصدی در ضریب اطمینان مشاهده می‌شود. بنابراین، بهینه‌ترین حالت برای قرارگیری مسلح‌کننده در لایه‌های روسازی به صورت افقی است.

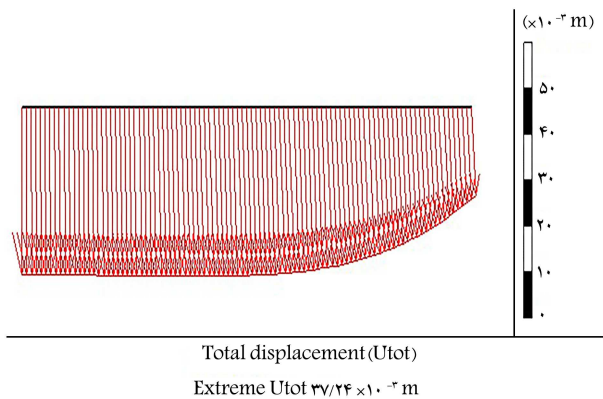
در شکل‌های ۸ الی ۱۱، تغییرشکل‌های قائم، افقی، کلی و میزان نیروی وارد بر ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵، در لایه‌ی زیراساس پس از انتهای تحکیم با بزرگ‌نمایی 5° برابر به همراه مقیاس کنار شکل مشاهده می‌شوند که



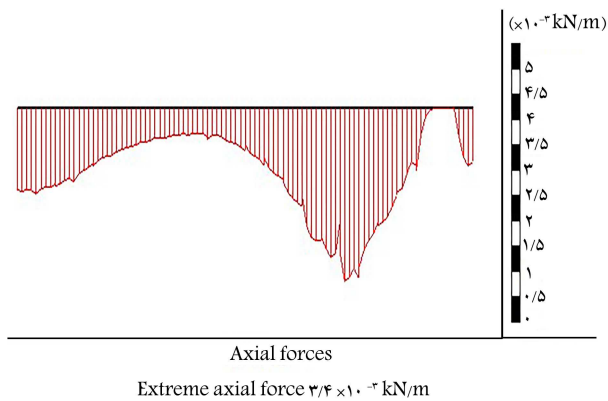
شکل ۸. تغییر مکان قائم ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی اساس.



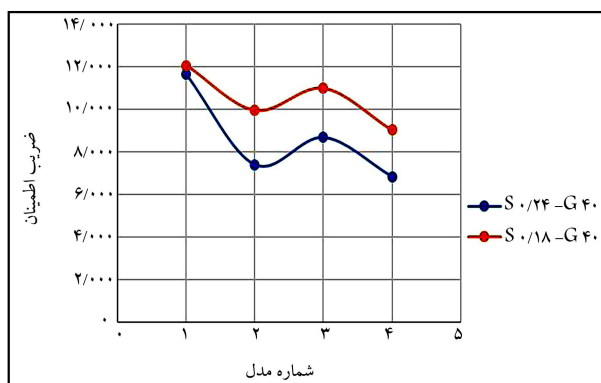
شکل ۹. تغییر مکان افقی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی اساس.



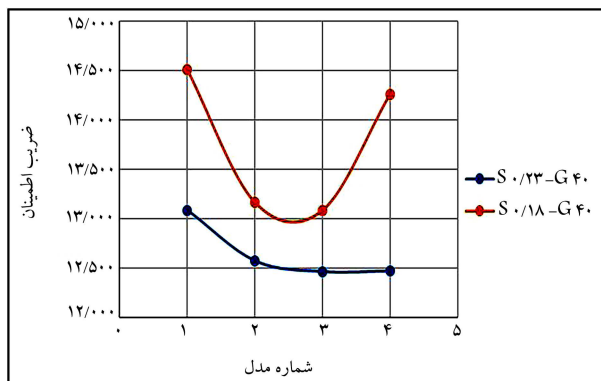
شکل ۱۰. تغییر مکان کلی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی اساس.



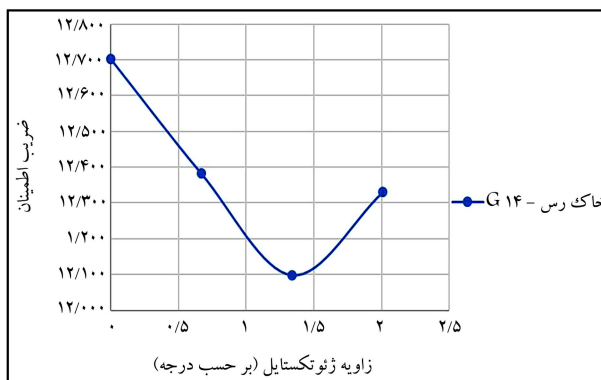
شکل ۱۱. میزان نیروی وارده به ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس.



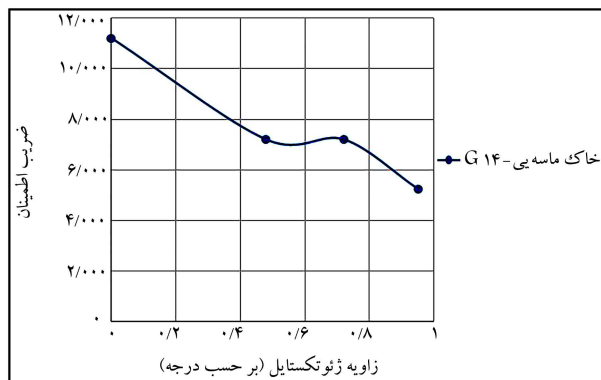
شکل ۴. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به شیب خاکریز در خاک ماسه‌یی.



شکل ۵. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به شیب خاکریز در خاک رسی.



شکل ۶. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به زاویه‌ی ژئوتکستایل در خاک رسی.



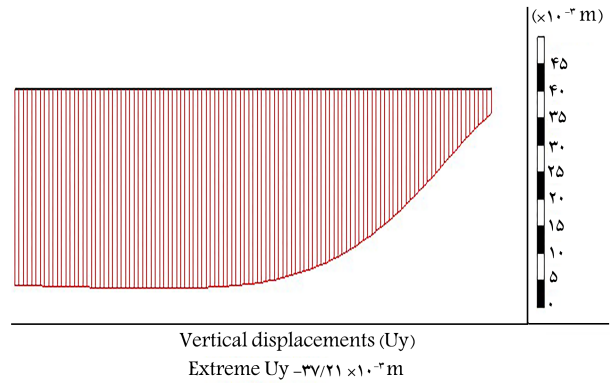
شکل ۷. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به زاویه‌ی ژئوتکستایل در خاک ماسه‌یی.

لایه‌های روسازی نیز باشد. تصاویر ارائه شده، از یک نمونه انتخاب شده است، در شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار جابه‌جایی قائم ژئوتکستایل در پاشنه یا وسط خاکریز معادل ۳۷/۲۷ میلی‌متر و کمترین مقدار مربوط به پنجه‌ی خاکریز بوده است.

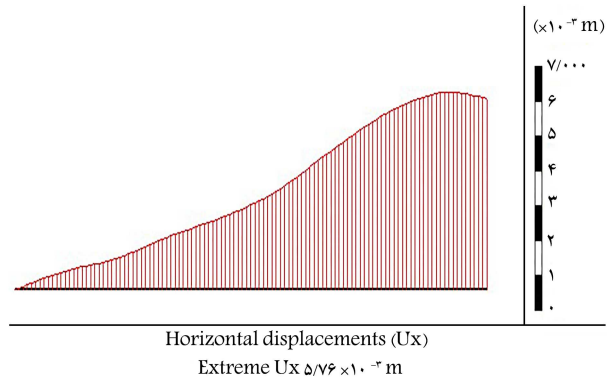
همچنین در شکل ۹، بیشترین تغییر شکل افقی ژئوتکستایل پس از تحکیم، معادل ۲/۱۲ میلی‌متر مشاهده می‌شود، که نشان می‌دهد در پنجه‌ی خاکریز، ژئوتکستایل تمایل حرکت به سمت بیرون خاکریز را داشته است. در شکل ۱۰، تصویری از تغییر شکل کلی ژئوتکستایل که نمایی از مجموع حرکت افقی و قائم خاکریز است، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار مربوط به پاشنه‌ی خاکریز، معادل ۳۷/۳۱ میلی‌متر بوده است.

در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ که مربوط به لایه‌ی زیرساز هستند و شباهت بسیاری با تغییر مکان ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس دارد، مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر مکان قائم مسلح‌کننده در پاشنه‌ی خاکریز معادل ۳۷/۲۱ میلی‌متر و بیشینه‌ی تغییر مکان افقی معادل ۵/۷۶ میلی‌متر و در نهایت برآیند تغییر مکان‌های قائم و افقی معادل ۳۷/۲۴ میلی‌متر بوده است، که می‌توان گفت با تغییر مکان کلی ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس برابر است. اما با مقایسه‌ی نمودارها، نیروی وارد بر ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس، که معادل 0.34 kN/m و در لایه‌ی زیرساز معادل 0.1624 kN/m بوده است، نتایج نشان می‌دهد که ژئوتکستایل موجود در لایه‌ی اساس نسبت به لایه‌ی زیرساز، $0.6/0.79$ نیروی کمتری را تحمل کرده است. بنابراین می‌توان برای افزایش بهره‌وری و بهینه شدن طرح، مسلح‌کننده‌ی داخل لایه‌ی اساس را با مقاومت کمتری نسبت به لایه‌ی زیرساز انتخاب کرد.

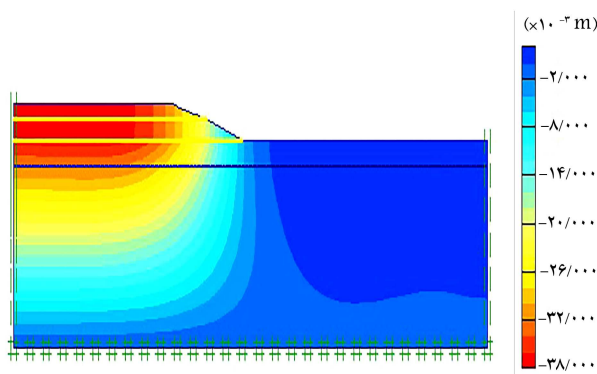
در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، یک نمای کلی از خاکریز که میزان تغییر شکل‌های



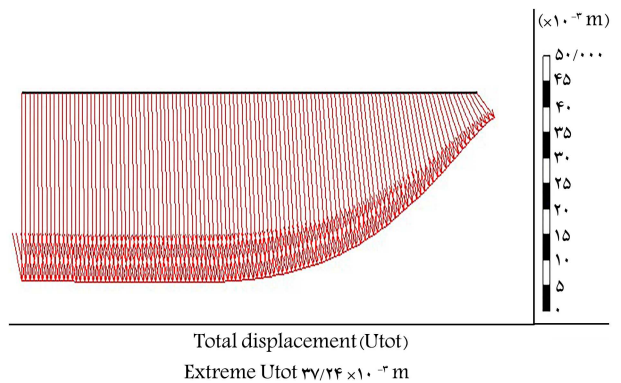
شکل ۱۲. تغییر مکان قائم ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیرساز.



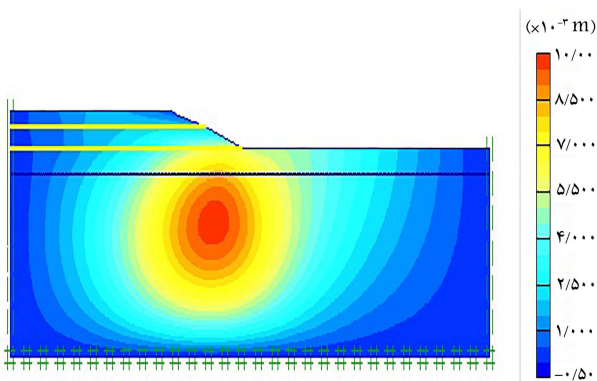
شکل ۱۳. تغییر مکان افقی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیرساز.



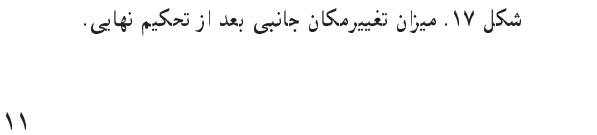
شکل ۱۴. تغییر مکان کلی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیرساز.



شکل ۱۵. میزان نیروی وارد به ژئوتکستایل در لایه‌ی زیرساز.



شکل ۱۶. میزان نشست بعد از تحکیم نهایی.



شکل ۱۷. میزان تغییر مکان جانبی بعد از تحکیم نهایی.

PLAXIS به این صورت عمل شده است که از ۲ نوع خاکریز متفاوت از لحاظ جنس خاک، با ۲ شیب متفاوت خاکریز نسبت به افق، ۲ نوع ژئوتکتایل از نظر مقاومت و با ۴ زاویه ی گوناگون نسبت به افق برای ژئوتکتایل که در نهایت ۳۲ مدل به دست آمده است، به منظور بررسی و مقایسه ی نتایج پژوهش حاضر استفاده شده است.

۱. با افزایش حدود ۲/۸۶ برابری مقاومت ژئوتکتایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه یی به طور میانگین ۱۴/۳۱٪ و در خاک رسی به طور میانگین ۲/۱۲۵٪ افزایش یافته است، که نشان از اهمیت بیشتر وجود مسلح کننده در خاک ماسه یی است.

۲. ژئوتکتایل موجود در لایه ی اساس نسبت به لایه ی زیراساس، ۷۹/۰۶٪ نیروی کمتری را تحمل کرده است. بنابراین می توان برای افزایش بهره وری و بهینه شدن طرح، مسلح کننده ی داخل لایه ی اساس را با مقاومت کمتری نسبت به لایه ی زیراساس انتخاب کرد.

۳. با افزایش زاویه ی ژئوتکتایل نسبت به افق از ۰ تا ۹۵/۰ درجه در خاک درشت دانه، ضریب اطمینان خاکریز در حدود ۵۳٪ کاهش یافته است. اما در خاک ریزدانه با افزایش زاویه ی ژئوتکتایل نسبت به افق از ۰ تا ۱/۰۱ درجه، ضریب اطمینان ۲/۹٪ کاهش یافته است. بنابراین، بهینه ترین حالت برای قرارگیری مسلح کننده در لایه های روسازی به صورت افقی است.

۴. با توجه به هندسه ی مدل، بیشترین میزان نشست مربوط به پاشنه ی خاکریز و بیشینه ی جابه جایی افقی مربوط به پنجه ی خاکریز است. همچنین تغییر شکل کلی لایه های روسازی (اساس و زیراساس) با هم برابر و مشابه بوده است.

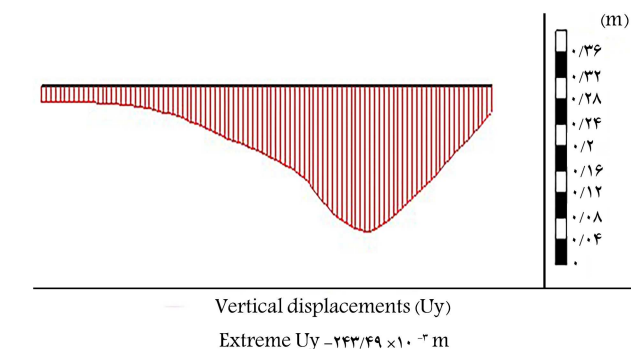
۵. با افزایش حدود ۲/۸۶ برابری در مقاومت ژئوتکتایل، میزان نشست مسلح کننده در لحظه ی گسیختگی در کف لایه ی اساس به میزان ۶۰/۶۴٪ افزایش یافته است. بنابراین با افزایش مقاومت ژئوتکتایل، حد نشست خاکریز تا لحظه ی قبل از گسیختگی خاکریز بیشتر شده است.

۶. با کاهش حدود ۳۳/۳۳ درصدی شیب خاکریز، به طور میانگین در خاک ماسه یی، ۲۴/۲۲٪ و در خاک رسی، ۸/۷۴٪ افزایش در میزان ضریب اطمینان مشاهده می شود.

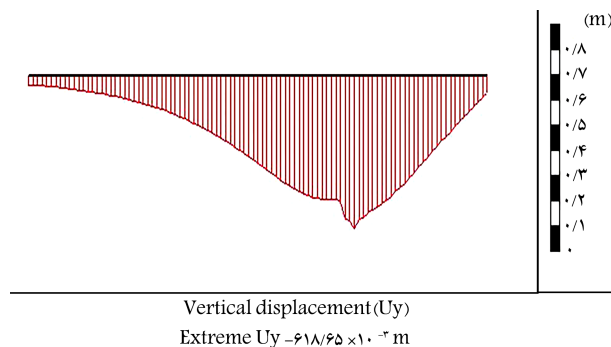
به این نکته نیز باید اشاره کرد که نتایج مطالعه ی حاضر، فقط برای فرایند ساخت لایه های روسازی انجام گرفته است و می توان در مطالعات آبی، تأثیر بارگذاری دینامیکی را نیز اعمال و بررسی کرد. همچنین مسلح کننده های لایه های روسازی به صورت مجزا در هر لایه قرار گرفته اند که با توجه به مقاومت کششی بالای ژئوتکتایل ها، پیشنهاد می شود مسلح کننده مذکور در سرتاسر محیط لایه ی روسازی قرار گیرد و نتایج از نظر جابه جایی سطح روسازی بررسی شود.

۶. بیانیه ی در دسترس بودن داده ها

تمام داده ها، مدل ها، و نتایج خروجی نرم افزار، که یافته های مطالعه ی حاضر را پشتیبانی می کنند، براساس درخواست منطقی از نویسنده ی مسئول نوشتار در دسترس است.



شکل ۱۸. تغییر مکان قائم ژئوتکتایل با مقاومت (kN/m) ۱۴ در لحظه ی شکست در لایه ی اساس.



شکل ۱۹. تغییر مکان قائم ژئوتکتایل با مقاومت (kN/m) ۴۰ در لحظه ی شکست در لایه ی اساس.

لایه های روسازی را پس از فرایند تحکیم نشان می دهد، مشاهده می شود که مطابق آن ها، بیشینه ی میزان تغییر شکل های قائم در پاشنه ی خاکریز و تغییر شکل جانبی قابل توجه در پنجه ی خاکریز بوده است. قابل ذکر است که جابه جایی های ژئوتکتایل نیز تأیید کننده ی تغییر شکل های لایه های روسازی است. نحوه ی تغییر شکل در خاکریز مشابه با نتایج به دست آمده در سایر نوشتارهاست.^[۱۱] در شکل های ۱۸ و ۱۹، تأثیر مقاومت ژئوتکتایل موجود در لایه ی اساس در میزان نشست آن ها در لحظه ی گسیختگی مشاهده می شود؛ که مطابق آن، با افزایش حدود ۲/۸۶ برابری در مقاومت ژئوتکتایل، میزان نشست مسلح کننده در کف لایه ی اساس از ۲۴۳/۴۹ میلی متر به ۶۱۸/۶۵ میلی متر، یعنی به میزان ۶۰/۶۴٪ افزایش یافته است. بنابراین، با افزایش مقاومت ژئوتکتایل، حد نشست خاکریز تا لحظه ی قبل از گسیختگی خاکریز بیشتر شده است.

۵. نتیجه گیری

یکی از روش های بهبود پایداری خاکریز، تسلیح خاک است. نوشتار حاضر، با هدف تأثیر تغییر زاویه ی ژئوتکتایل با تغییر همزمان شیب گوه ی خاکریز و مقاومت کششی ژئوتکتایل در دو نوع خاک رسی و ماسه یی جهت دستیابی به ضریب اطمینان بیشتر نسبت به سایر مطالعات صورت گرفته است. جهت ساخت مدل ها در نرم افزار

پانویس ها

- Wulandari
- Djellali
- Lin

5. Bergado
6. Woven
7. Non-Woven
8. Mohr-Coulomb

منابع (References)

1. Shafabakhsh, Gh. "Embankment reinforcement with using of geogrid", Deputy of Education, Research and Technology, Transportation Research Center (In Persian) (1383/2005).
2. Abedi, M.M. and et al. "Study of the influence of geotextile on increasing shear strength and boring capacity of reinforced clay with geogrid and considering the correlation coefficients", *Science and Engineering Elite Journal*, 2538-581X (In Persian) (1395/2017).
3. Shivraj, M., Choudhary, L. and Dey, A. "Quasi-Static analysis subgrade", *2nd Conference of Transportation Research Group of India* (2013).
4. Wulandari, P.S. and Tjandra, D. "Analysis of geotextile reinforced road embankment using PLAXIS 2D", *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum*, pp. 358-362 (2015).
5. Djellali, A., Houam, A., Saghafi, B. and et al. "Static analysis of flexible pavements over expansive soils", Iran University of Science (2016).
6. Kermani, B., Xiao, M., Stoffels, Sh.M. and et al. "Reduction of subgrade fines migration into subbase of flexible pavement using geotextile", *Geotextiles and Geomembranes*, **46**(4), pp. 377-383 (2018).
7. Lin, Ch., Galinmoghdam, J., Han, J. and et al. "Quantifying and Incorporating the Benefits of Wicking Geotextile into Pavement Design", *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, **147**(3), p. 04021044 (2021).
8. Halimi, B. and Asadi, B. "Validation the numerical and experimental prediction of parametric models of the reinforced gable with full scale geotextile", *2ed National Conference on Geotechnical Engineering*, Kermanshah (In Persian) (1393/2014).
9. Siavoshnia, M., Kalantari, F. and Shakiba, A. "Assessment of geotextile reinforced embankment on soft clay soil", The 1st International Applied Geological Congress, Islamic Azad University- Mashad Branch (2010).
10. Bergado, D.T., Long, Ph.V. and Srinivasa Murthy, B.R. "A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground", *Geotextiles and Geomembranes*, **20**(6), pp. 343-365 (2002).
11. Majedi, P., Karimi Ghalehjough, B., Akbulut, S. and et al. "Effect of reinforcement on stability and settlement of embankment: A finite element analysis of different kinds of reinforcing and construction conditions", *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, **4**(10), pp. 759-764 (2017).
12. Emami, R. and Badoo, K. "Subsidence Analysis of Shahid Kalantari road in 7+800 kilometer", Msc Thesis, Orumia University (In Persian) (1386/2007).
13. Abbas, S. and Khan, S. "Numerical modelling of highway embankment by different ground improvement techniques", *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, (IJIRAE), pp. 2349-2163 (2014).
14. Faheem, H. and Hassan, A.M. "2D PLAXIS finite element modeling of asphalt concrete pavement reinforced with geogrid", *Journal of Engineering Sciences Assiut University*, (2014).
15. Ahirwar, S.K. and Mandal, J.N. "Finite element analysis of flexible pavement with geogrids", *Procedia Engineering*, **189**, pp. 411-416 (2017).
16. Behpor Ghohari, and et al. "Plaxis manual", 2nd, Tabriz, Frozsh, (In Persian) (1393/2015).