

تحلیل عددی خاکریزهای راه مسلح به ژئوسل و بررسی پارامترهای مؤثر در عملکرد سیستم تسلیح با ژئوسل

سعید کوزه‌گوران (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۴
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۴/۲، ص. ۲۳-۱۳

ژئوسل‌ها از انواع ژئوسینتتیک‌ها هستند که اخیراً جهت تسلیح خاک به‌کار برده شده‌اند. با توجه به عملکرد منحصر به‌فرد این نوع سیستم تسلیح (محصورکنندگی بالا ناشی از هندسه سه‌بعدی)، استفاده از آن‌ها در حال توسعه بوده و پژوهش‌های وسیعی روی آن‌ها در حال شکل‌گیری است. مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً وسیعی روی سیستم تسلیح با ژئوسل صورت گرفته است، اما مطالعه‌ی عددی عملکرد آن‌ها، که برای درک رفتار دقیق‌شان لازم است، بندرت انجام شده است. به همین دلیل روش‌های تئوری و طراحی موجود برای این سیستم، بسیار عقب‌تر از کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف از جمله در راه‌سازی است. لذا در این پژوهش، به مطالعه‌ی عملکرد سیستم تسلیح با ژئوسل در خاکریزهای راه و عوامل مؤثر در آن بر مبنای روش عددی تفاضل محدود با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پرداخته شده و تأثیر پارامترهای خاک درون ژئوسل و نیز نحوه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوسل در عملکرد این خاکریزها مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: خاک مسلح، خاکریز راه، ژئوسینتتیک، ژئوسل، تفاضل محدود، FLAC3D.

۱. مقدمه

ایده‌ی استفاده از خاک مسلح جهت ارتقاء خواص خاک از دیرباز مورد توجه بوده است. در این راستا با پیشرفت تکنولوژی، مسلح‌کننده‌های مختلف شامل: انواع مسلح‌کننده‌های فولادی و ژئوسینتتیکی معرفی شده‌اند. ژئوسل‌ها یکی از انواع ژئوسینتتیک‌ها هستند، که اخیراً جهت تسلیح خاک معرفی و به‌کار برده شده‌اند. آن‌ها با توجه به هندسه‌ی سه‌بعدی و منحصر به‌فردی که دارند، قادرند محصورشدگی جانبی قابل توجهی را برای خاکی که درون آن‌ها قرار می‌گیرد، ایجاد کنند و در نتیجه خواص مقاومتی و سختی خاک موجود را به طرز چشم‌گیری ارتقاء دهند. این قابلیت - حتی در صورت نامرغوب بودن مصالح موجود در منطقه - امکان استفاده از آن مصالح را جهت لایه‌های راه‌سازی به‌عنوان زیرساز و اساس به کمک مسلح‌کردن آن‌ها با ژئوسل فراهم می‌آورد. به‌علاوه، به‌دلیل وجود سوراخ‌هایی در بدنه‌ی آن‌ها، امکان جریان‌یافتن آب از یک سلول به سلول بعدی و زهکشی جانبی را فراهم می‌کنند و همچنین مانع فرسایش خاک علی‌رغم جریان آب می‌شوند. علاوه بر این، امکان رشد پوشش گیاهی را در خاک فراهم می‌کنند، که ریشه‌ی این گیاهان نیز خود باعث افزایش مسلح‌شدگی خاک می‌شود. این ویژگی‌ها با توجه به اهمیت آن‌ها در راه‌سازی بیان‌گر آن است که یکی از اصلی‌ترین کاربردهای خاک مسلح به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۸/۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۲/۳، پذیرش ۱۳۹۳/۲/۱۵.

saeid.kouzegaran@modares.ac.ir
m.olyaei@modares.ac.ir

ژئوسل، استفاده در راه‌سازی است. نمونه‌ی از ژئوسل در شکل ۱ نشان داده شده است.

مطالعات در زمینه‌ی خاک مسلح به ژئوسل حاکی از آن است که روش‌های تئوری و طراحی موجود برای آن‌ها بسیار عقب‌تر از کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف است، که این امر به علت عدم شناخت کافی از مکانیزم تسلیح با ژئوسل و عوامل مؤثر در آن است.

با توجه به اینکه یکی از پرکاربردترین زمینه‌های استفاده از ژئوسل در راه‌سازی است، مطالعات آزمایشگاهی وسیعی در این زمینه صورت گرفته است. You و همکاران در مطالعه‌ی خود در سال ۲۰۰۸، ادبیات فنی گسترده‌ی در زمینه‌ی کاربرد تکنولوژی ژئوسل در راه‌سازی گردآوری کرده‌اند. آن‌ها اذعان داشته‌اند که علی‌رغم کارایی بالای سیستم تسلیح با ژئوسل، استفاده از آن در بهسازی خاکریزهای راه به دلیل نبود مطالعات تئوری کافی محدود است.^[۱] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۲، مقطعی از راه با روسازی^۱ ایجاد و تأثیر استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیکی از جمله ژئوسل در آن‌ها بررسی شده است.^[۲] بر روی مقاطع راه‌های بدون روسازی نیز آزمایش‌هایی صورت گرفته است. نتایج نشان داده است که مقاطع مسلح به ژئوسل عملکرد بسیار خوبی در چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب‌شدگی فصلی داشته‌اند.^[۳] با توجه به هزینه‌ی بالای مطالعات میدانی، برخی پژوهشگران آزمون‌های آزمایشگاهی بارگذاری صفحه به‌صورت دینامیکی را جهت شبیه‌سازی بار ترافیک



شکل ۱. ژئوسل در دو حالت تا شده و باز.

انجام داده‌اند. [۵۴] اما بارگذاری سیکنی صفحه نمی‌تواند به‌طور کامل اثر بارگذاری چرخ متحرک وسیله‌ی نقلیه را بر سطح جاده لحاظ کند. برای رفع این خطا در دانشگاه کانزاس، برخی پژوهشگران اقدام به مطالعات وسیعی بر روی آزمون‌های اعمال بار چرخ‌های متحرک بر بستر راه کرده‌اند. [۵۶-۵۸]

از بدو شروع مطالعات در این زمینه، با توجه به هزینه‌های بالا و محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی، لزوم انجام مطالعات عددی بسیار احساس شده است. با این هدف مطالعات عددی محدودی توسط برخی پژوهشگران دیگر در زمینه‌ی سیستم تسلیح با ژئوسل صورت گرفته است، اما در بیشتر مطالعات عددی صورت‌گرفته بر روی خاک مسلح به ژئوسل، خاک و مسلح‌کننده به‌صورت کامپوزیت مدل شده‌اند. بدین معنا که مجموعه‌ی خاک و مسلح‌کننده به‌صورت مرکب با خاکی با پارامترهای مقاومتی بالاتر جایگزین شده است. در روش کامپوزیت، میزان تغییر این پارامترها براساس رفتار خاک مسلح در آزمون‌های آزمایشگاهی صورت‌گرفته بر روی آن تعیین شده است. برای مثال، Bathurst و همکاران آزمایش فشاری سه‌بعدی را در مقیاس بزرگ بر روی ماسه‌ی مسلح به ژئوسل (به‌صورت تک‌سل) انجام داده‌اند. آن‌ها بعد از تحلیل دایره‌ی موهر خاک دانه‌ی بی با و بدون ژئوسل (در هنگام شکست) پیشنهاد کرده‌اند که جهت لحاظ‌کردن افزایش مقاومت خاک مسلح به ژئوسل، برای مجموعه‌ی خاک و مسلح‌کننده به‌صورت کامپوزیت از چسبندگی ظاهری (c_r) استفاده شود. [۹]

آن‌ها همچنین راه حلی تقریبی جهت تخمین این کمیت در کامپوزیت خاک - ژئوسل ارائه داده‌اند (رابطه‌ی ۱):

$$c_r = \frac{\Delta\sigma_r}{\gamma} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

که در آن، φ زاویه‌ی اصطکاک خاک درون ژئوسل و $\Delta\sigma_r$ فشار محصورشدگی افزایش یافته به جهت غشای ژئوسل است. [۹]

همچنین Henkel و همکاران میزان فشار محصورشدگی افزایش یافته‌ی $\Delta\sigma_r$ را مطابق رابطه‌ی ۲ تخمین زده‌اند: [۱۰]

$$\Delta\sigma_r = \frac{2M}{d} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \right) \quad (2)$$

که در آن، d قطر اولیه‌ی پاکت ژئوسل است. ε_a کرنش محوری کامپوزیت خاک - ژئوسل با فرض اینکه ژئوسل و خاک به همراه هم تغییرشکل می‌دهند، و M مدول سکانت ژئوسل، متناظر با کرنش محوری ε_a است.

آن‌ها همچنین جهت تعیین سختی افزایش یافته‌ی خاک مسلح به ژئوسل رابطه‌ی تجربی ۳ را ارائه کرده‌اند: [۱۰]

$$K_r = K_e + 200 M^{0.16} \quad (3)$$

که در آن، M مدول سکانت ژئوسل، متناظر با کرنش محوری ε_a است. K_e و K_r به ترتیب مدول‌های بدون بعد کامپوزیت خاک - ژئوسل و خاک غیرمسلح هستند. مدول K پارامتر مدل Duncan-Chang است، که توسط Duncan و همکاران معرفی شده است. [۱۱]

Madhavi و همکاران در نوشتار خود به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بارگذاری و همچنین مطالعات عددی بر روی پی‌های مربعی واقع بر بستر ماسه‌ی مسلح به انواع مختلف ژئوسینتتیک (سلولی و صفحه‌ی) پرداخته و جهت مدل‌سازی عددی این آزمون‌ها از نرم‌افزار FLAC3D استفاده کرده‌اند. [۱۲]

جهت شبیه‌سازی رفتار خاک نیز از مدل رفتاری موهر - کولمب استفاده شده است. ایشان برای شبیه‌سازی ژئوسینتتیک صفحه‌ی از آلمان سازی ژئوگرید (موجود در نرم‌افزار) استفاده و خاک مسلح به ژئوسل را نیز به‌صورت کامپوزیت مدل‌سازی کرده‌اند. پارامترهای مدل کامپوزیت خاک - ژئوسل نیز براساس نتایج Bathurst و همکاران، [۹] Henkel و همکاران [۱۰] (که قبلاً به آن اشاره شده است) لحاظ شده است.

اما در روش کامپوزیت میزان تغییر این پارامترها براساس رفتار خاک مسلح در آزمون‌های آزمایشگاهی صورت‌گرفته بر روی آن تعیین شده است. از آنجایی که این آزمون‌ها بر روی خاک‌های محدودی بوده است، انتظار می‌رود این پارامترها متناسب با همان خاک‌ها باشند و تعمیم آن‌ها به سایر انواع خاک در این‌گونه مدل‌های عددی با خطا همراه باشد. به‌علاوه همان‌طور که گفته شد، ژئوسل با توجه به هندسه‌ی منحصر به فرد سه‌بعدی آن، مکانیزم‌های رفتاری متنوع و پیچیده‌ی دارد که در این‌گونه مدل‌سازی‌های به‌صورت کامل لحاظ نمی‌شود.

لذا هدف از این پژوهش، مدل‌سازی خاکریز راه مسلح به ژئوسل با روشی دقیق‌تر و منطبق بر واقعیت در نرم‌افزار FLAC3D (با مدل‌سازی ژئوسل به‌صورت جداگانه برای اولین بار)، رفع خطای مدل‌های قبلی و بررسی عوامل مؤثر در رفتار این سیستم تسلیح از جمله تأثیر پارامترهای خاک درون ژئوسل و نیز تعیین نحوه‌ی چینش مناسب جهت ایجاد بالاترین کارایی است.

در این پژوهش ابتدا خاک مسلح به تک‌سل (یک سلول ژئوسل) شبیه‌سازی شده و تحت بارگذاری قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از این مدل عددی، جهت صحت‌سنجی با نتایج مطالعات آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار گرفته است. سپس خاکریز راه با اعمال شرایط واقعی و ایجاد تعداد سلول‌های منطبق بر واقعیت شبیه‌سازی شده است. پس از آن تأثیر پارامترهای خاک درون ژئوسل و نیز نحوه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوسل در عملکرد این خاکریزها مورد بررسی قرار گرفته و در انتها نیز نتایج بیان شده است.

۲. مدل عددی

همان‌طور که اشاره شد، با توجه به هزینه‌ی بالای مطالعات آزمایشگاهی و نیز وجود خطا در مطالعات عددی محدودی که با روش کامپوزیت در این زمینه صورت گرفته است، لزوم انجام مطالعات عددی با دقت بالا ضروری به نظر می‌رسد.

مدل کردن غشاهای انعطاف پذیر که اندرکنش برشی با خاک دارند، مناسب است. لذا در این پژوهش از این المان جهت شبیه سازی ژئوسل استفاده شده است. در شکل ۲، تنش هایی که بر المان ژئوگرید عمل می کنند و در شکل ۳، اندرکنش بین ژئوگرید و خاک به صورت شماتیک نشان داده شده است.

در این مدل سازی برای المان ژئوگرید رفتار کشسان خطی ایزوتروپ در نظر گرفته شده و رفتار سطح مشترک خاک و ژئوسل، به صورت اتصال صلب در جهت قائم و اتصال فنر - لغزنده^۲ در جهت مماس بر صفحه می ژئوگرید لحاظ شده است. عملکرد برشی سطح مشترک خاک - ژئوسل (شکل ۴)، اصطلاحاً کپی و چسبیده است و با پارامترهای فنر کوپلینگ^۳ کنترل می شود، که این پارامترها عبارت اند از: ۱. سختی بر واحد سطح k ، ۲. مقاومت چسبندگی c ، ۳. زاویه اصطکاک φ و تنش محصورکننده مؤثر σ_m .

۲.۲. مدل اولیه و صحت سنجی

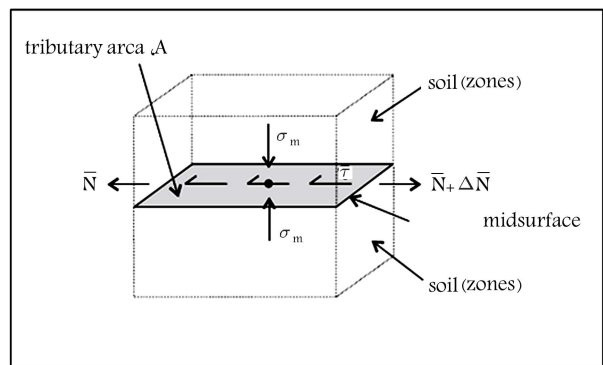
۱.۲.۲. مدل مرجع

جهت صحت سنجی مدل عددی، خاک مسلح به یک سلول ژئوسل (تک سل) و نیز خاک غیرمسلح توسط نرم افزار FLAC3D مدل سازی شده است. این مدل در واقع شبیه سازی عددی آزمون آزمایشگاهی انجام شده توسط Pokharel و همکاران است.^[۵] جزئیات جعبه ای آزمایش مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است. این جعبه ای آزمایش، مربعی شکل با سطح مقطع 3660×3660 mm و ارتفاع 120 mm است. خاک مورد استفاده در این آزمایش، ماسه ی رودخانه ای کانزاس^۴ است (جدول ۱). در حالت مسلح، ژئوسل در مرکز جعبه قرار داده شده و در آزمایش ها از ژئوسل هایی با دو شکل هندسی دایره و لوزی استفاده شده است. سلول لوزی شکل مورد استفاده در این آزمایش به قطرهای 260 و 185 mm و ارتفاع 100 mm با مدول کشسانی 355 Mpa است، که در کف جعبه گذاشته شده و ارتفاع خاک در جعبه ای مذکور

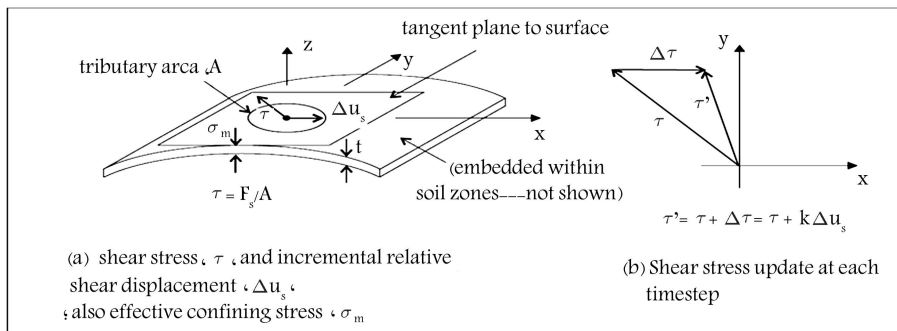
با همین هدف در مطالعه ی عددی صورت گرفته در این نوشتار، ژئوسل و خاک به صورت جداگانه و سه بعدی شبیه سازی شده اند. این شبیه سازی قابلیت به مدل عددی داده است که علاوه بر حذف خطاهای روش کامپوزیت، کلیه مکانیزم های رفتاری کلیدی ژئوسل را به صورت کامل شبیه سازی کند. در این روش مدل سازی، شناخت و انتخاب المان سازی مناسبی که رفتار ژئوسل و اندرکنش آن با خاک را به دقیق ترین نحو شبیه سازی کند، اساسی ترین مرحله در مدل سازی خاک مسلح به ژئوسل است.

۱.۲. ژئوسل و سطح مشترک آن با خاک

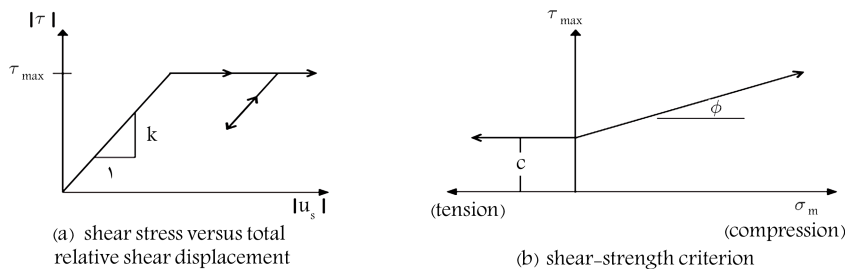
در این مدل عددی، از المان های سازی صفحه ای کسسان geogridSEL، جهت شبیه سازی مسلح کننده ی ژئوسل استفاده شده است. المان geogridSEL (به عنوان یکی از سه المان صفحه ای موجود در نرم افزار FLAC3D)، المانی پوسته ای است که بار غشایی را تحمل می کند، اما قادر به تحمل بار خمشی نیست. این المان برای



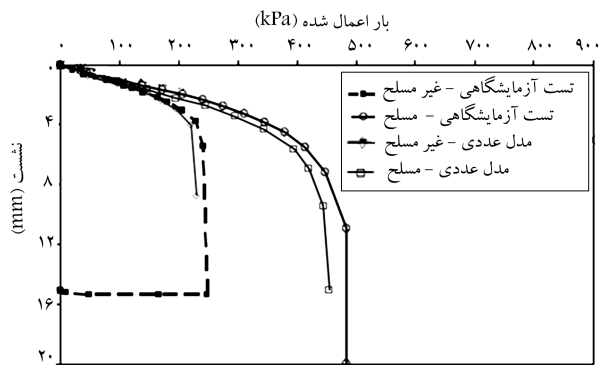
شکل ۲. نمایش تنش ها روی گره در المان ژئوگرید.^[۱۳]



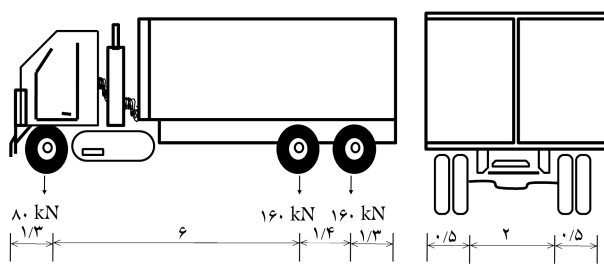
شکل ۳. ایده آل سازی رفتار یک گره ی ژئوگرید.^[۱۳]



شکل ۴. نمودار سطح مشترک بین خاک و المان سازی ژئوگرید.^[۱۳]



شکل ۷. نمودار نشست خاک در برابر بار اعمال شده برای خاک‌های مسلح و غیرمسلح (مقایسه‌ی مدل عددی و آزمون آزمایشگاهی).



شکل ۸. انتخاب فاصله‌ی محورها و اندازه‌ی بار وارده به هر محور.

مدل عددی، نتایج به دست آمده از آن با نتایج مطالعات آزمایشگاهی Pokharel و همکاران،^[۵] مقایسه شده است (شکل ۷). مطابق شکل مذکور، انطباق مناسبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و آزمون آزمایشگاهی مذکور مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه یکی از پرکاربردترین زمینه‌های استفاده از ژئوسل در راه‌سازی است، در ادامه به مطالعه‌ی عملکرد خاک مسلح در این زمینه و بررسی پارامترهای مؤثر در رفتار خاک مسلح به ژئوسل پرداخته شده است.

۳.۲. مدل عددی (مدل‌سازی خاکریز راه)

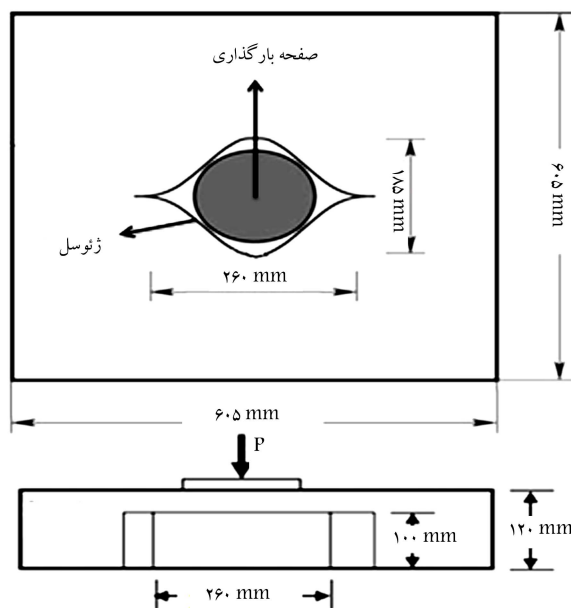
از آنجایی که هدف اصلی این مطالعه بررسی کاربردی خاک مسلح به ژئوسل در مقیاس واقعی است، مدل‌سازی با اعمال شرایط واقعی، ایجاد تعداد سلول‌های واقعی و برای لایه‌های مختلف خاک، منطبق بر واقعیت صورت می‌گیرد.

۱.۳.۲. انتخاب ابعاد مدل خاکریز راه

جهت انتخاب ابعاد مدل خاکریز راه، یک خط حرکتی جاده (باند) با عرض ۳٫۶ متر در نظر گرفته شده و با وسیله‌ی نقلیه انتخابی (کامیون) به آن وارد شده است. در این مدل با توجه به تقارن موجود در طول باند و در طول کامیون نیمی از این عرض یعنی ۱٫۸ متر لحاظ شده است. از طرفی با توجه به فاصله‌ی زیاد محور جلوی کامیون از محور عقب و عدم تأثیرپذیری نتایج، فقط محور عقب (محور تاندوم) در نظر گرفته شده است.

۲.۳.۲. انتخاب ابعاد و سطح بارگذاری در مدل خاکریز راه

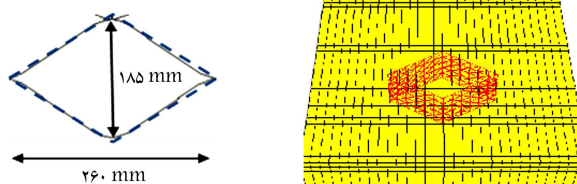
جهت اعمال بار به سطح جاده، بار کامیون استاندارد انتخاب شده است. ابعاد، وزن و فاصله‌ی چرخ‌های کامیون براساس کامیون استاندارد پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌ی بارگذاری پل‌ها (نشریه‌ی ۱۳۹) انتخاب شده است، که در شکل ۸ مشاهده می‌شود. در این آیین‌نامه، کامیونی با بار ۴۰۰ kN، به طول ۱۰ m، فاصله‌ی محور جلو و عقب (تاندوم) ۶ متر و عرض محور ۳ متر معرفی شده است. همان‌طور که در



شکل ۵. تصویر شماتیک جعبه‌ی آزمایش برای تک‌سل با ژئوسل در وسط جعبه.^[۵]

جدول ۱. پارامترهای خاک ماسه‌ی رودخانه‌ی کانزاس.

مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص (kg/m^3)	زاویه‌ی اصطکاک	چسبندگی (KPa)
۳٫۲	۰٫۳۳	۱۷۳۰	۴۵	۱



شکل ۶. شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D.

برابر ۱۲۰ mm (۲۰ mm بالاتر از سطح ژئوسل) بوده است. بارگذاری در سطحی به مساحت ۱۷۶۷۰ mm^2 با افزایش‌های پلکانی به سطح نمونه اعمال شده و در هر مرحله تا زمان متوقف شدن نشست، بار بدون تغییر بوده است.

۲.۲.۲. مدل عددی اولیه

در این پژوهش، ایجاد هندسه‌ی مدل براساس آزمایش Pokharel و همکاران برای دو حالت مسلح و غیرمسلح صورت گرفته است. در حالت مسلح، ژئوسل با ابعاد ذکر شده در نوشتار مذکور (با قطرهای ۲۶۰ و ۱۸۵، و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر) با نزدیک‌ترین شکل هندسی به سلول ژئوسل یعنی لوزی شبیه‌سازی و در مرکز مدل قرار داده شده است. در شکل ۶، مدل عددی خاک مسلح به ژئوسل و نیز تصویر شماتیک تک‌سلول ژئوسل نشان داده شده است.

جهت انطباق کامل مدل عددی با شرایط آزمایش، ابعاد مدل برابر با ابعاد جعبه‌ی آزمایش و شرایط مرزی مدل بدین صورت در نظر گرفته شده است که در مرزهای چپ و راست مدل، جابه‌جایی در جهت عمود بر صفحات و در پایین مدل، جابه‌جایی در هر سه جهت بسته شده است. همچنین از مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل موهر - کولمب برای مدل‌سازی المان‌های خاک استفاده و جهت بررسی صحت

جدول ۲. جنس ژئوسل.

نوع پلیمر	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون
HDPE	۲۰۰	۰٫۴۵

۳. نتایج مدل سازی خاکریز راه

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش، مطالعه‌ی عملکرد سیستم تسلیح ژئوسل در خاکریزهای راه (به‌عنوان پرکاربردترین زمینه‌ی استفاده از ژئوسل) بوده است، نوع بارگذاری و جنس خاک منطبق بر این هدف در نظر گرفته شده است. لذا (همان‌طور که در بخش ۴.۳.۲ ذکر شده است) در این مطالعات جنس خاک در محدوده خاک‌های مورد استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس راه (که گستره‌ی مشخص و تعریف شده دارند) انتخاب شده است.^[۱۶] و در ادامه نیز جهت بررسی دقیق‌تر رفتار این سیستم تسلیح، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای جنس خاک صورت گرفته است. لذا با توجه به نوع بارگذاری و جنس خاک مورد استفاده در این پژوهش، گستره‌ی اعتبار نتایج در حیطه‌ی خاکریزهای راه است.

۱.۳.۱. اعمال بار به مدل در حالت مسلح و غیرمسلح

مدل با پارامترهای انتخاب شده در حالت مسلح و غیرمسلح تحت بارگذاری قرار گرفته است. در حالت مسلح، ژئوسل در لایه‌ی اساس و ۵ cm پایین‌تر از سطح زمین قرار داده شده است. در شکل ۱۰، مدل خاکریز مسلح به ژئوسل و نیز تصویر این مدل از بالا نشان داده شده است.

با توجه به اینکه هزینه‌ی مصالح مصرفی در لایه‌ی اساس زیاد است و در بسیاری مواقع لازم است که از منابعی که از محل پروژه دور هستند، منتقل شوند و هزینه‌های بسیاری جهت حمل و انتقال مصالح تحمیل می‌شود و حتی در برخی مناطق با توجه به شرایط، حمل و انتقال مصالح غیرممکن است، لذا در مناطقی که مصالح مناسب در دسترس نیست، مدت‌هاست که استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسینتیکی در ساخت خاکریزهای راه جهت کاهش ضخامت لایه‌ی اساس و حتی

قبل اشاره شده است، فقط محور تاندوم کامیون در مدل لحاظ شده است، که مطابق شکل ۸، فاصله‌ی بین چرخ‌های عقب و جلوی این محور برابر ۱/۴ متر است.^[۱۴]

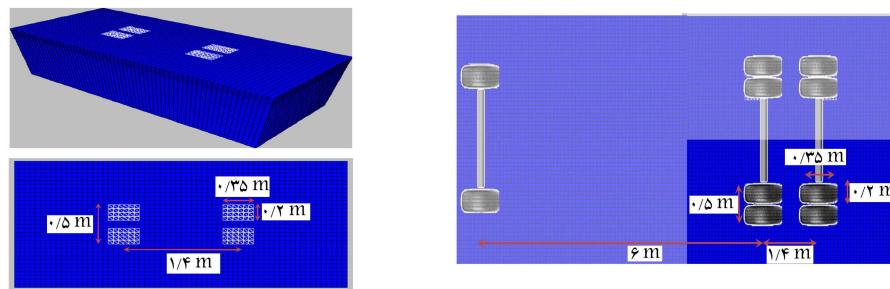
سطح تماس چرخ‌ها با زمین براساس توصیه‌ی این آیین‌نامه برابر 20×35 سانتی‌متر فرض شده است. با توجه به این سطح تماس و نیز شکل ۸، فاصله‌ی چرخ‌های کنار هم در محور تاندوم برابر ۱۰ سانتی‌متر لحاظ شده است.^[۱۴] در این مطالعات، بار بر روی سطوحی منطبق بر سطوح تماس چرخ‌ها با زمین (شکل ۹) به این دو صورت اعمال شده است: در حالت اول، وزن کامیون استاندارد براساس آیین‌نامه‌ی بارگذاری پل به‌صورت بار ثابت بر این سطوح اعمال شده و تحلیل حساسیت برای پارامترهای مختلف صورت گرفته است، که در بخش‌های بعدی به آن اشاره شده است. بار ناشی از کامیون براساس آیین‌نامه‌ی بارگذاری پل برابر 320 KN برای محور تاندوم است، که سهم هر یک از چرخ‌ها برابر 40 KN شده است. برای در نظر گرفتن اثر ضربه‌ی ناشی از عبور کامیون و بار دینامیکی وارده براساس پیشنهاد آیین‌نامه‌ی اشنو^۵ باید ضریبی به بار استاتیکی وارده اعمال شود (علاوه بر بار استاتیکی). بیشینه‌ی مقدار این ضریب 30% بار استاتیکی اعمالی توصیه شده است.^[۱۵] که بر این اساس ضریب اثر ضربه در این مطالعه نیز برابر $0/3$ در نظر گرفته شده است. در حالت دوم، با هدف بررسی نتایج با رویکردی متفاوت (اعمال بارهای افزایشی تا گسیختگی به جای اعمال بار ثابت) بارگذاری به شکل دیگری بر سطوح مذکور اعمال شده است، به این صورت که بار به‌صورت پلکانی تا لحظه‌ی گسیختگی افزایش یافته است.

۳.۳.۲. جنس ژئوسل

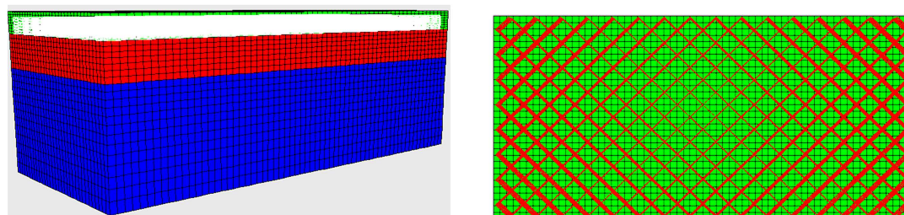
پارامترهای جنس ژئوسل و نوع پلیمر مورد استفاده در این مدل در جدول ۲ بیان شده است.

۴.۳.۲. جنس خاک (اساس، زیراساس و بستر)

در این مرحله پارامترهای خاک اساس و زیراساس متناسب با بزرگراهی با بار ترافیک طراحی 20 میلیون محور استاندارد در سال، که بر روی بستررسی قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته شده است.^[۱۶] این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



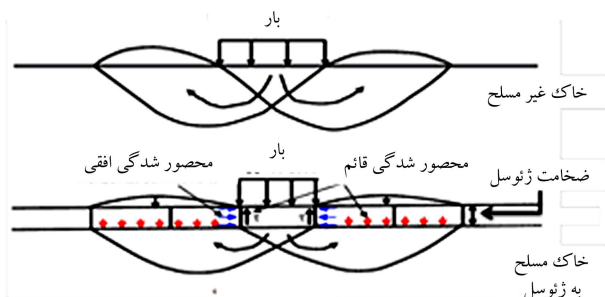
شکل ۹. سطوح اعمال بار کامیون در مدل عددی.



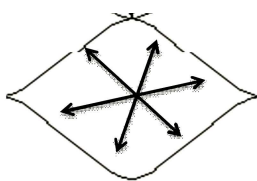
شکل ۱۰. مدل سه‌بعدی خاکریز مسلح به ژئوسل و تصویر لایه‌ی ژئوسل از بالا.

جدول ۳. پارامترهای خاک مدل راه.

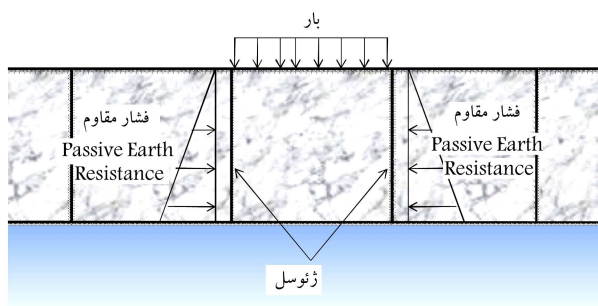
لایه	ضخامت (cm)	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص (kg/m^3)	زاویه اصطکاک	چسبندگی (KPa)
اساس	۲۰	۲۰۰	۰٫۳۷	۲۱۰۰	۴۰	۵
زیراساس	۳۰	۷۵	۰٫۳۸	۲۱۰۰	۴۰	۵
بستر	۱۰۰	۴۰	۰٫۴۵	۱۹۰۰	۰	۱۰۰



شکل ۱۱. کاهش گسیختگی برشی با استفاده از ژئوسل به صورت کاهش تورم.



الف) محصور کنندگی؛



ب) ایجاد فشار مقاوم در سلول های مجاور.

شکل ۱۲. دو مکانیزم رفتاری ژئوسل.

شده است. علاوه بر این مکانیزم، برای هر سلول، خاک موجود در سلول های مجاور آن با ایجاد فشار مقاوم باعث تأمین مقاومت بیشتر در خاک می شود. نحوه ی ایجاد این فشار مقاوم در شکل ۱۲ ب نشان داده شده است.

۲.۳. بررسی تأثیر پارامترهای سطح مشترک در دقت مدل عددی

ژئوسل

جهت بررسی تأثیر پارامترهای سطح مشترک در دقت نتایج، در مدل مربوط به خاکریز راه، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای سطح مشترک صورت گرفته است. نتایج این بررسی در شکل های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. مطابق شکل های مذکور این تحلیل حساسیت نشان داده است که هر دو پارامتر سطح مشترک (چسبندگی cs_scoh و زاویه ی اصطکاک cs_sfric)، در نتایج مربوط به نشست خاک تقریباً

جدول ۴. مقایسه ی نتایج برای دو نوع لایه بندی خاک در شرایط مسلح و غیرمسلح.

	بیشینه ی نشست		
	بیشینه ی تورم (mm)	بیشینه ی نشست (mm)	
اساس - زیراساس - بستر	غیرمسلح	۸٫۶	۲٫۳
	مسلح	۷٫۷	۱٫۵
زیراساس - بستر	غیرمسلح	۹٫۶	۳٫۷
	مسلح	۷٫۸	۱٫۹

زیراساس - به عنوان راهکاری مقرون به صرفه - بسیار رایج شده است. در سال های اخیر، استفاده از ژئوسینتتیک های سه بعدی (ژئوسل) به علت اثر محصورکنندگی آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. [۱۷]

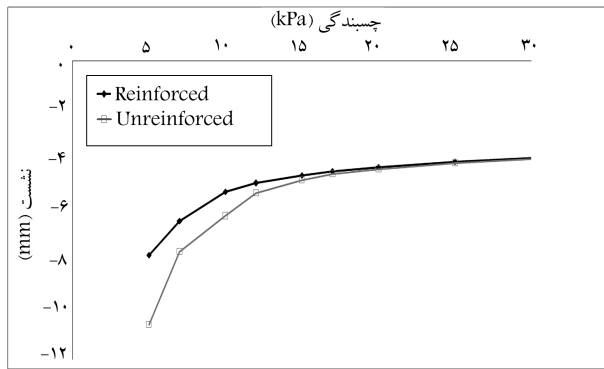
با توجه به نکات ذکرشده، علاوه بر مدل نشان داده شده در شکل ۱۰، در این بخش با هدف حذف لایه ی اساس، مدلی بدون لایه ی اساس و فقط با لایه ی زیراساس به ارتفاع ۳۰ cm ساخته شده است. در حالت مسلح، ژئوسل در لایه ی زیراساس ۵ cm پایین تر از سطح زمین قرار داده شده است. نتایج بارگذاری برای دو حالت مذکور، در جدول ۳ ارائه شده است.

همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، بیشینه ی نشست در حالت مسلح برابر ۷٫۸mm و در حالت غیرمسلح برابر ۹٫۶mm است. ضمناً مشاهده می شود که وجود لایه ی ژئوسل باعث می شود حتی عملکرد خاک مسلح زیراساس به همراه بستر بهتر از خاک غیرمسلح اساس - زیراساس - بستر باشد.

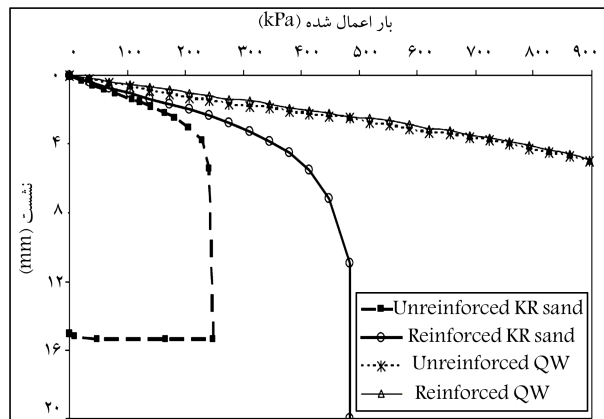
به عبارت دیگر، نکته ی جالب توجه این است که نشست در خاک ضعیف تر مسلح به ژئوسل از نشست در خاک قوی بدون ژئوسل کمتر است و می توان انتظار داشت که رفتار خاک ضعیف مسلح به ژئوسل مشابه خاک قوی باشد. این بدان معناست که در مناطقی که امکان دسترسی به خاک های مناسب برای لایه های اساس و زیراساس نیست و هزینه های زیادی به پروژه اعمال می شود، استفاده از ژئوسل می تواند بسیار کمک کننده باشد.

به علاوه همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، تورم خاک در حالت مسلح به ژئوسل بسیار کمتر از حالت غیرمسلح است. در واقع کم شدن تورم، نشان دهنده ی تأثیر ژئوسل در کنترل گسیختگی برشی کلی است. زیرا خاک سست تحت بارگذاری، دچار گسیختگی برشی می شود و این گسیختگی به صورت تورم در خاک اطراف ناحیه ی تحت بارگذاری نمایان می شود. در حالت خاک مسلح به ژئوسل، بارگذاری قائم منجر به ایجاد شدن تنش های جانبی قابل توجه در دیواره ی ژئوسل و لذا منجر به کنترل گسیختگی برشی و در نتیجه، کاهش تورم خاک می شود. این مکانیزم به صورت خلاصه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

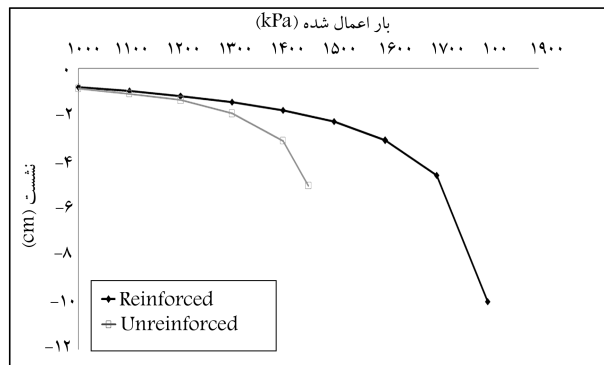
همان طور که ذکر شد، اصلی ترین مکانیزم رفتاری ژئوسل، ایجاد محصورشدگی برای خاکی است که درون آن قرار می گیرد. این مکانیزم در شکل ۱۲ الف نشان داده



شکل ۱۵. تأثیر میزان چسبندگی خاک درون ژئوسل در رفتار خاک مسلح به ژئوسل تحت بار ثابت.



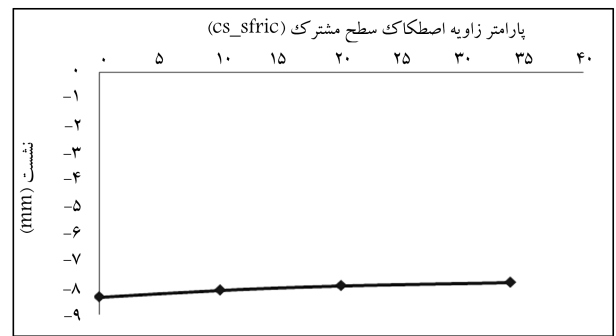
شکل ۱۶. نتایج آزمایش Pokharel و همکاران. [۵]



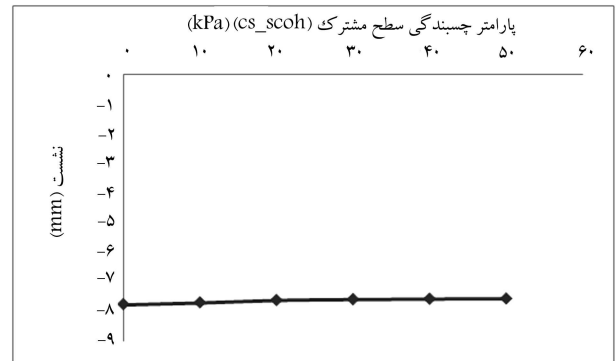
شکل ۱۷. نمودار بار- تغییر مکان برای خاک با چسبندگی $C = 30 \text{ kPa}$.

روی خاک‌ها با چسبندگی‌های مختلف انجام شده است. در این روش برخلاف روش قبل که بار ثابت بوده، میزان بار تا گسیختگی خاک افزایش یافته است. نتایج این تحلیل‌ها در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ ارائه شده است. در این مرحله، کلیه پارامترهای خاک ثابت در نظر گرفته شده و در هر مرحله فقط چسبندگی خاک افزایش یافته است.

همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، با افزایش چسبندگی، تحت بارهایی که خیلی کمتر از ظرفیت باربری خاک هستند، ژئوسل اثر چندانی در کاهش نشست‌ها نداشته است؛ اما با افزایش بار و نزدیک شدن آن به ظرفیت باربری خاک، ژئوسل نیز وارد عمل شده و منجر به بهبود عملکرد خاک و افزایش ظرفیت باربری شده



شکل ۱۳. تأثیر پارامتر زاویه اصطکاک سطح مشترک در عملکرد ژئوسل.



شکل ۱۴. تأثیر پارامتر چسبندگی سطح مشترک در عملکرد ژئوسل.

بی‌تأثیر است. این موضوع بیانگر آن است که عملکرد ژئوسل به دلیل هندسه‌ی منحصر به فردش مستقل از پارامترهای سطح مشترک است و مستقیماً باعث ایجاد محصورشدگی خاک می‌شود.

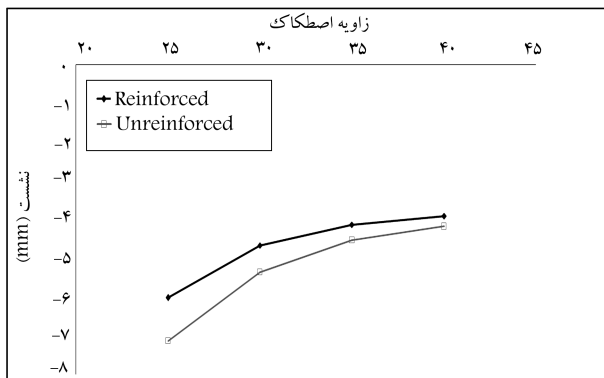
۳.۳. تأثیر چسبندگی خاک درون ژئوسل در عملکرد آن

جهت بررسی تأثیر پارامترهای خاک درون ژئوسل در رفتار آن، تحلیل حساسیت‌هایی در میزان تأثیر این پارامترها در روند تأثیر تسلیح با ژئوسل (با در نظر گرفتن میزان نشست و ظرفیت باربری) انجام شده است، که نتایج آن در ادامه بیان شده است.

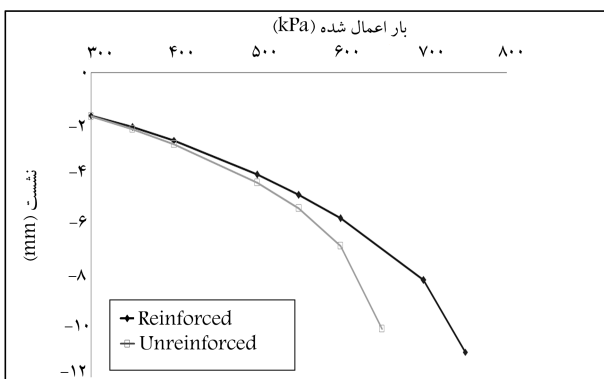
ابتدا به بررسی تأثیر میزان چسبندگی خاک در رفتار خاک مسلح به ژئوسل پرداخته شده است. در مرحله‌ی اول تحت بار ثابت کامیون استاندارد (که قبلاً تعریف شده است)، چسبندگی‌های مختلف به مدل اعمال شده است. نتیجه‌ی این مرحله در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

مطابق شکل مذکور این‌گونه به نظر می‌رسد که با افزایش چسبندگی، تأثیر ژئوسل در کاهش نشست‌ها کمتر شده است. این نتیجه‌گیری مشابه نتایج Pokharel و همکاران، [۵] است. آن‌ها در نوشتار خود دو نوع خاک چسبنده و غیرچسبنده را تحت بارگذاری (تا بیشینه‌ی 900 kPa) قرار داده بودند. نمودار نشست در برابر بار وارده‌ی حاصل از آزمایش آن‌ها در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. این‌گونه به نظر می‌آید که در خاک چسبنده، تسلیح با ژئوسل تأثیری در کاهش نشست خاک نداشته است. آن‌ها دلیل این اتفاق را این‌گونه بیان کرده‌اند که چون یکی از مکانیزم‌های ژئوسل، ایجاد چسبندگی ظاهری بر اثر محصورشدگی جانبی در مصالح دانه‌ی است، با افزایش چسبندگی خاک این عملکرد از بین رفته و مزیت استفاده از ژئوسل به حداقل رسیده است.

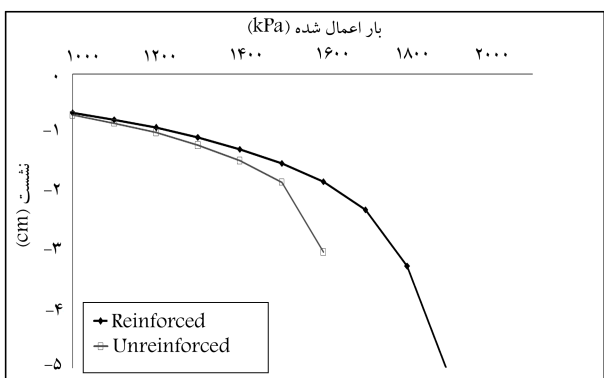
جهت بررسی صحت و دقت این نتایج، به روشی دیگر تحلیل حساسیت بر



شکل ۲۰. تأثیر میزان زاویه‌ی اصطکاک خاک درون ژئوسل در رفتار خاک مسلح به ژئوسل تحت بار ثابت.



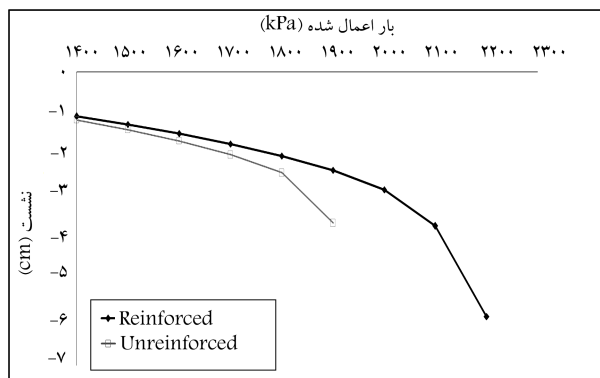
شکل ۲۱. نمودار بار- تغییرمکان برای خاک با زاویه‌ی اصطکاک $\Phi = 25^\circ$.



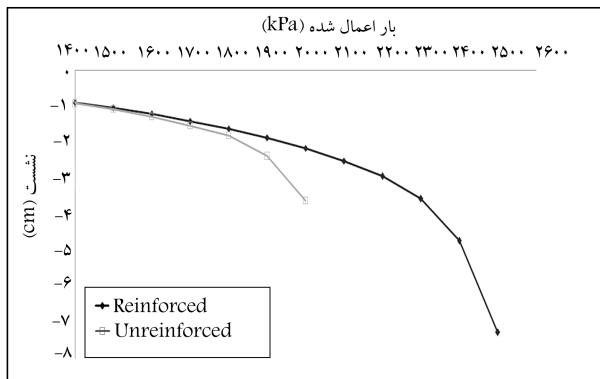
شکل ۲۲. نمودار بار- تغییرمکان برای خاک با زاویه‌ی اصطکاک $\Phi = 40^\circ$.

بار و نزدیک شدن آن به ظرفیت باربری خاک، ژئوسل نیز وارد عمل شده و منجر به بهبود عملکرد خاک و افزایش ظرفیت باربری شده است.

از دو بخش اخیر می‌توان نتیجه گرفت تا زمانی که نیروی کافی به ژئوسل وارد نشود، وجود یا عدم وجود ژئوسل در ارتقاء عملکرد خاک بی‌تأثیر است و فقط زمانی استفاده از آن مفید است که تنش‌ها و تغییرشکل‌های وارد بر ژئوسل در حدی باشند که وادار به کشش شده و نیروی ایجادشده در آن باعث ایجاد محصورشدگی در خاک شده و این امر منجر به غلبه بر ضعف کششی خاک شده است. این شرایط بسته به پارامترهای مقاومتی و سختی خاک در اندازه‌ی بارهای اعمالی مختلف ایجاد می‌شود.



شکل ۱۸. نمودار بار- تغییرمکان خاک با چسبندگی $C = 60 \text{ kPa}$.



شکل ۱۹. نمودار بار- تغییرمکان خاک با چسبندگی $C = 80 \text{ kPa}$.

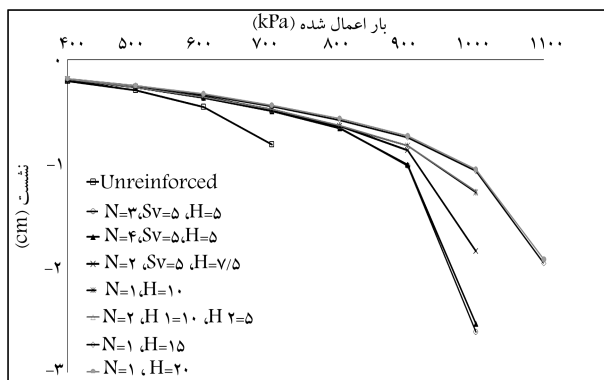
است. در واقع علت نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در آزمون آزمایشگاهی Pokharel و همکاران،^[۵] محدودیت ایشان در اعمال بار بوده است (دستگاه مورد استفاده در آن آزمایش تا بیشینه‌ی 900 kPa امکان اعمال بار داشته است)، و به این دلیل که بار وارده خیلی کمتر از ظرفیت باربری خاک چسبیده بوده است، ژئوسل در خاک به کار نیفتاده است.

۴.۳. تأثیر زاویه‌ی اصطکاک خاک درون ژئوسل در عملکرد آن

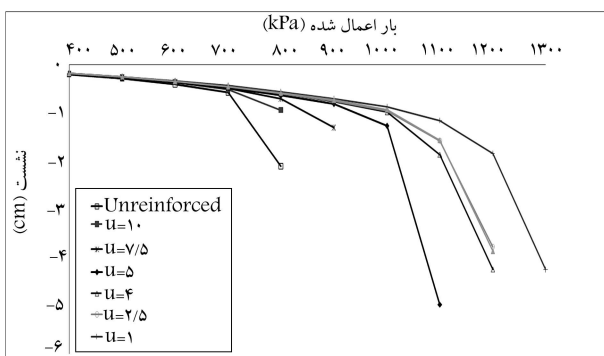
در ادامه‌ی بررسی‌های تأثیر پارامترهای خاک داخل ژئوسل، به بررسی تأثیر میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در رفتار مسلح‌کننده‌ی ژئوسل پرداخته شده است. در مرحله‌ی اول، تحت بار ثابت کامیون استاندارد، زاویه‌ی اصطکاک‌های مختلف برای خاک مدل لحاظ شده است. نتیجه‌ی این مرحله در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، این‌گونه به‌نظر می‌رسد که مشابه مرحله‌ی قبل (بررسی چسبندگی)، با افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاک تأثیر ژئوسل در کاهش نشست‌ها کمتر شده است.

جهت بررسی صحت و دقت این نتایج، مشابه مرحله‌ی قبل در تحلیل حساسیتی دیگر، میزان بار تاگسیختگی خاک افزایش یافته است. نتایج تحلیل مربوط به بارگذاری تاگسیختگی در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ ارائه شده است. در این مرحله، کلیه‌ی پارامترهای خاک ثابت در نظر گرفته شده و در هر مرحله فقط زاویه‌ی اصطکاک خاک افزایش یافته است.

همان‌طور که در تصاویر مذکور مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاک نیز مانند حالت چسبندگی، تحت بارهایی که خیلی کمتر از ظرفیت باربری خاک بوده‌اند، ژئوسل اثر چندانی در کاهش نشست‌ها نداشته است؛ اما با افزایش



شکل ۲۴. نتایج چینش‌های متفاوت برای لایه‌های ژئوسل (N تعداد، H ارتفاع و SV فاصله‌ی لایه‌های ژئوسل).



شکل ۲۵. بررسی تأثیر عمق مدفون ژئوسل در خاک در عملکرد خاک مسلح (U) فاصله‌ی لایه‌ی ژئوسل از سطح خاک).

روی هم اجرا شوند. این امر در شکل ۲۴ نیز مشهود است. در شکل مذکور، نتایج چینش‌های متفاوت برای لایه‌های ژئوسل نشان داده شده است. به عبارت دیگر، یک لایه‌ی ژئوسل با ارتفاع زیاد، عملکرد بهتری از چند لایه‌ی ژئوسل با ارتفاع کم، که با فاصله از هم قرار می‌گیرند، خواهد داشت. هر چند اجرای یک لایه‌ی ژئوسل به ارتفاع زیاد ممکن است با محدودیت‌هایی مواجه باشد.

۲.۵.۳. تأثیر عمق مدفون ژئوسل در خاک (فاصله‌ی بالای ژئوسل تا سطح خاک)

همان‌طور که در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، با کاهش عمق مدفون ژئوسل، ابتدا ظرفیت باربری افزایش و سپس کاهش یافته است. این بدان معناست که قراردادن ژئوسل در فواصل نزدیک به سطح بهتر است، ولی این فاصله نباید از حد معینی کمتر باشد. دلیل این رفتار را می‌توان این‌گونه بیان کرد که وجود مقداری پوشش خاک بر روی لایه‌ی ژئوسل مانع از بالازدگی ژئوسل و خارج شدن دو طرف لایه‌ی ژئوسل از خاک در اطراف ناحیه‌ی تحت بارگذاری می‌شود (که این اتفاق یک نوع تغییرشکل رایج برای خاک مسلح به ژئوسل در لحظه‌ی گسیختگی است)؛ اما با افزایش این پوشش و در واقع زیاد شدن عمق قرارگرفتن ژئوسل، نتایج به تدریج به سمت نتایج بستر غیرمسلح پیش می‌رود. البته این شرایط در راه‌های بدون روسازی حائز اهمیت است و در صورت استفاده از ژئوسل در راه‌های با روسازی، به علت وجود لایه‌ی آسفالتی، کمیته‌ی لازم عمق مدفون وجود خواهد داشت و برای این راه‌ها، قراردادن ژئوسل در بالاترین سطح خاکریز راه پیشنهاد می‌شود.

۵.۳. تأثیر نحوه‌ی قرارگیری ژئوسل در خاک

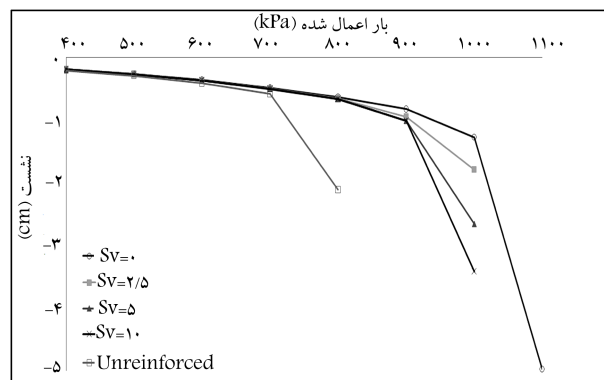
با توجه به اینکه هدف از تسلیح خاک، علاوه بر بهبود عملکرد خاک، صرفه‌جویی در هزینه‌ی پروژه‌ها نیز است (به جهت کاهش هزینه‌ی تهیه‌ی مصالح قرصه و نیز کاهش هزینه‌های اجرا و...)؛ تعیین شرایط بهینه‌ی لایه‌های مسلح‌کننده به لحاظ تعداد، وضعیت قرارگیری آن‌ها در خاک و ابعاد آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. این عوامل مانند فاصله‌ی قرارگرفتن لایه‌ها از یکدیگر و عمق مناسب قرارگیری آن‌ها در خاکریزهای راه در ادامه بررسی شده است.

لازم به توضیح است از آنجایی که مدل خاکریز انتخابی در مرحله‌ی قبل، از دو جنس (زیراساس و بستر) تشکیل شده است، فاصله‌دادن لایه‌های ژئوسل باعث افزایش عمق نهایی قرارگیری آن‌ها می‌شود. این افزایش عمق می‌تواند منجر به قرارگیری لایه‌های ژئوسل در دو نوع خاک شود، که این اتفاق می‌تواند در نتایج تأثیرگذار باشد و در تفسیر نتایج خطا ایجاد کند. لذا جهت حذف این عامل خطا و ایجاد امکان درک رفتار ژئوسل به صورت دقیق‌تر و بدون تأثیر پذیرفتن از اختلاف جنس لایه‌ها، در این مرحله جنس کل خاک در مدل یکسان و از جنس زیراساس خاک لحاظ شده است. خاطرنشان می‌شود در نمودارهایی که در ادامه ارائه شده است، فاصله، عمق و ارتفاع لایه‌ها بر حسب سانتی‌متر بیان شده است.

۱.۵.۳. تأثیر فاصله و ترتیب قرارگیری لایه‌های ژئوسل نسبت به یکدیگر

در این قسمت به بررسی مناسب‌ترین فاصله‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوسل از هم پرداخته شده است. بدین صورت که دو لایه‌ی ژئوسل با ارتفاع ۵ cm در فواصل مختلف از هم قرار داده شده و بار تا لحظه‌ی گسیختگی به مدل اعمال شده است. در این مرحله در تمام حالات عمق مدفون ژئوسل (فاصله‌ی بالای ژئوسل تا سطح خاک) ثابت و برابر ۵ cm در نظر گرفته شده است. نتایج این بخش در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه ژئوسل‌ها با ارتفاعات مختلف موجود هستند (با ارتفاعات ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و... سانتی‌متر)، امکان استفاده از آن‌ها با چینش‌های متفاوت وجود دارد. در شکل ۲۴ نیز نتایج استفاده از ژئوسل‌ها با چینش و مجموع ارتفاعات مختلف نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، ایجاد فاصله بین لایه‌های ژئوسل باعث تضعیف عملکرد آن شده است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد: از آنجایی که مهم‌ترین مکانیزم ژئوسل در تسلیح، محصورکنندگی است، فاصله‌دادن لایه‌ها از یکدیگر باعث ایجاد وقفه در ایجاد این مکانیزم می‌شود و لذا بهترین عملکرد ژئوسل در شرایطی خواهد بود که لایه‌های ژئوسل با کمترین فاصله‌ی ممکن بر



شکل ۲۳. بررسی تأثیر فاصله‌ی بین لایه‌های ژئوسل در عملکرد خاک مسلح (SV) فاصله‌ی لایه‌های ژئوسل).

۴. نتیجه‌گیری

ژئوسل‌ها یکی از انواع ژئوسینتتیک‌ها هستند که اخیراً جهت تسلیح خاک معرفی و به‌کار برده شده‌اند. آن‌ها با توجه به هندسه‌ی سه بُعدی و منحصر به‌فردی که دارند، قادرند محصورشدگی جانبی قابل توجهی را برای خاکی که درون آن‌ها قرار می‌گیرد، ایجاد کنند و در نتیجه خواص مقاومتی و سختی خاک موجود را به طرز چشم‌گیری ارتقاء می‌دهند.

از بدو شروع مطالعات در این زمینه، با توجه به هزینه‌های بالا و محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی، لزوم انجام مطالعات عددی، بسیار احساس شده بود. با این هدف، مطالعات عددی محدودی توسط دیگر پژوهشگران در زمینه‌ی سیستم تسلیح با ژئوسل صورت گرفته است، اما در بیشتر مطالعات عددی صورت‌گرفته بر روی خاک مسلح به ژئوسل، خاک و مسلح‌کننده به‌صورت کامپوزیت مدل شده است. بدین معنا که مجموعه‌ی خاک و مسلح‌کننده به‌صورت مرکب با خاکی با پارامترهای مقاومتی بالاتر جایگزین شده است. در روش کامپوزیت میزان تغییر این پارامترها براساس رفتار خاک مسلح در آزمون‌های آزمایشگاهی صورت‌گرفته بر روی آن تعیین شده است.

با وجود این، با توجه به هندسه‌ی منحصر به‌فرد سه بُعدی ژئوسل، مکانیزم رفتاری واقعی آن در مدل‌سازی به‌صورت کامپوزیت، به‌طور کامل قابل ارزیابی نیست. لذا در این پژوهش، مدل‌سازی خاکریز راه مسلح به ژئوسل با روشی دقیق‌تر و منطبق بر واقعیت (برای اولین بار با مدل‌سازی ژئوسل و خاک به‌صورت جداگانه) انجام شده است. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به این قرار هستند:

۱. وجود لایه‌ی ژئوسل باعث می‌شود حتی عملکرد خاک مسلح زیرساز به همراه بستر بهتر از خاک غیرمسلح اساس - زیرساز - بستر باشد. به‌عبارت دیگر، نکته‌ی جالب توجه اینکه نشست در خاک ضعیف‌تر مسلح به ژئوسل از نشست در خاک قوی بدون ژئوسل کمتر است و می‌توان انتظار داشت که رفتار خاک ضعیف مسلح به ژئوسل مشابه خاک قوی باشد؛ این بدان معناست که در مناطقی که امکان دسترسی به خاک‌های مناسب برای لایه‌های اساس و

زیرساز نیست و هزینه‌های زیادی به پروژه اعمال می‌شود، استفاده از ژئوسل می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد.

۲. تحلیل حساسیت بر روی چسبندگی خاک نشان داده است که بر خلاف نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات Pokharel و همکاران، که حاکی از عدم تأثیر ژئوسل در خاک‌های چسبنده بوده است،^[۵] حتی برای خاک‌های با چسبندگی بالا نیز ژئوسل باعث افزایش سختی خاک می‌شود و نشست خاک را کاهش می‌دهد و همچنین موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود. تفاوت خاکی با چسبندگی بالا با خاکی با پارامترهای یکسان و چسبندگی کمتر، فقط در مقدار باری است که در آن اثر ژئوسل قابل مشاهده است. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل زاویه‌ی اصطکاک خاک نیز مشابه نتایج مربوط به چسبندگی خاک است.

۳. با ارزیابی اثر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک خاک درون ژئوسل می‌توان به این نتیجه‌گیری کلی رسید که تا زمانی که نیروی کافی به ژئوسل وارد نشود، وجود یا عدم وجود ژئوسل در ارتقاء عملکرد خاک بی‌تأثیر است و فقط زمانی استفاده از آن مفید است که تنش‌ها و تغییرشکل‌های وارد بر ژئوسل در حدی باشند که وادار به کشش شود و نیروی ایجادشده در آن، باعث ایجاد محصورشدگی در خاک و سپس منجر به غلبه بر ضعف کششی خاک شود. این شرایط بسته به پارامترهای مقاومتی و سختی خاک در اندازه‌ی بارهای اعمالی مختلف ایجاد می‌شود (برای خاک‌های قوی‌تر، اثر ژئوسل در بارهای بزرگ‌تر قابل مشاهده است).

۴. در بررسی‌هایی که جهت تعیین بهترین حالت قرارگیری لایه‌های ژئوسل نسبت به هم به عمل آمده است، این نتیجه مشهود است که بهترین عملکرد خاک مسلح به ژئوسل در شرایط قرارگیری آن‌ها بدون هیچ‌گونه فاصله‌ی از یکدیگر است (لایه‌های ژئوسل باید روی هم و با کمی‌هی فاصله‌ی ممکن اجرا شوند).

۵. با کاهش عمق مدفون ژئوسل، ظرفیت باربری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. این بدان معناست که قراردادن ژئوسل در فواصل نزدیک به سطح، باعث عملکرد بهتر آن می‌شود؛ اما برای رسیدن به بهترین عملکرد، باید مقداری پوشش خاک بر روی آن قرار گیرد.

پانوشته‌ها

1. paved road
2. spring-slider
3. coupling spring
4. Kansas river sand
5. AASHTO

منابع (References)

1. Yuu, J.J., Han, A., Rosen, R.P. and Leshchinsky, D. "Technical review of geocell-reinforced base courses over weak subgrade", in *First Pan American Geosynthetics Conference*, Cancun, Mexico (2008).
2. Edil, T.B., Benson, C.H., Bin-Shafique, M.S., Tanyu, B.F., Kim, W.H. and Senol, A. "Field evaluation of construction alternatives for roadways over soft subgrade", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1786**(1), pp. 36-48 (2002).
3. Henry, K.S., Olson, J.P., Farrington, S.P. and Lens, J. "Improved performance of unpaved roads during spring thaw", US Army Corps of Engineers, *Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, of ERDC/CRREL TR, **5**(1), 169 p. (2005).
4. Mhaskar, S. and Mandal, J. "Three dimensional geocell structure: performance under repetitive loads", in *Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*, **1**, pp. 155-158 (1994).

5. Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L. and Halahmi, I. "Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(6), pp. 570-578 (2010).
6. Pokharel, S.K., Han, J., Manandhar, C., Yang, X., Leshchinsky, D., Halahmi, I. and Parsons, R.L. "Accelerated pavement testing of geocell-reinforced unpaved roads over weak subgrade", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2204**(-1), pp. 67-75 (2011).
7. Han, J., Pokharel, S.K., Yang, X., Manandhar, C., Leshchinsky, D., Halahmi, I. and Parsons, R.L. "Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(11), pp. 1525-1534 (2011).
8. Yang, X., Han, J., Pokharel, S.K., Manandhar, C., Parsons, R.L. Leshchinsky, D. and Halahmi, I. "Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases", *Geotextiles and Geomembranes*, **32**, pp. 95-103 (2011).
9. Bathurst, R. and Karpurapu, R. "Large-scale triaxial compression testing of geocell-reinforced granular soils", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, **16**(3), pp. 296-303 (1993).
10. Henkel, D. and Gilbert, G. "The effect measured of the rubber membrane on the triaxial compression strength of clay samples", *Geotechnique*, **3**(1), pp. 20-29 (1952).
11. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **96**(5), pp. 1629-1653 (1970).
12. Madhavi Latha, G. and Somwanshi, A. "Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footings on sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(6), pp. 409-422 (2009).
13. Itasca, *FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions*, Online Manual.
14. Iran management organization, "Bridges Loading Regulations" (Bultein 139), first revision (1379).
15. Aashto, L. "Standard specifications for highway bridges", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (1996).
16. Huang, Y.H. "Pavement analysis and design", Prentice-Hall, Englewood Clifs, Nj (1993).
17. Yang, X., Han, J., Leshchinsky, D. and Parsons, R.L. "A three-dimensional mechanistic-empirical model for geocell-reinforced unpaved roads", *Acta Geotechnica - Springer Verlag*, **8**(2), pp. 201-213 (2012).