Archive of SID

مهندسی عمران شریف، (پیاپی ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۳-۱۱

Original Article

تحلیل عددی بستر ماسه‌یی پی‌های مسلح به ژئوسل و مقایسه‌ی کارایی سیستم‌های تسلیح ژئوسینتتیک سلولی و صفحه‌یی

سعید کوزه‌گران (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمد علیایی* (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

ژئوسل‌ها از انواع ژئوسینتتیک‌ها هستند، که با توجه به مزایای متعدد، استفاده از آن‌ها درحال توسعه بوده و امروزه مطالعات وسیعی روی آن‌ها در حال شکل‌گیری است. مکانیزم رفتاری ژئوسل‌ها با ژئوسینتتیک‌های صفحه‌یی کاملاً متفاوت است. آن‌ها با ایجاد محصورکنندگی جانبی قابل‌توجه برای خاک (به علت هندسه‌ی سه بُعدی)، خواص مقاومتی آن را به طرز چشم‌گیری ارتقاء می‌دهند. با وجود مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً وسیع در زمینه‌ی ذکرشده، مطالعه‌ی عددی عملکرد ژئوسل‌ها که برای درک رفتار دقیق آن‌ها ضروری است، بندرت انجام شده است. بنابراین علی‌رغم ویژگی‌های منحصر به‌فرد ژئوسل و استفاده از آن در پروژه‌های راه‌سازی، به دلیل نبود روش‌های تئوری و طراحی کافی، این سیستم تسلیح همچنان نتوانسته است جایگاه واقعی خود را در پروژه‌های بهسازی‌خاک بیابد. لذا در این پژوهش، به مطالعه‌ی بستر ماسه‌یی پی‌های مسلح به ژئوسل بر مبنای روش عددی تفاضل محدود با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ پرداخته شده و عملکرد سیستم تسلیح ژئوسل و شرایط بهینه‌ی طراحی و اجرای آن در بستر فونداسیون‌ها مورد مطالعه قرارگرفته است. همچنین کارایی سیستم‌های تسلیح سلولی (ژئوسل) نسبت به سیستم‌های تسلیح صفحه‌یی به‌عنوان دو سیستم با جنس یکسان، ولی با مکانیزم رفتاری متفاوت مورد مقایسه قرارگرفته است.

واژگان کلیدی: خاک مسلح، بستر پی، بهسازی خاک، ژئوسینتتیک، ژئوسل، روش تفاضل محدود، $FLAC^{3D}$.

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

۱. مقدمه

در تاریخچه‌ی فنّاوری مصالح ساختمانی، خاک‌ها همواره به‌عنوان توده‌هایی با مقاومت فشاری خوب، که درکشش تاب چندانی ندارند، شناخته شده‌اند. فراوانی، ارزانی، و سهولت دسترسی به این ماده‌ی طبیعی تلاش‌هایی را برای چیره‌شدن بر ضعف کششی آن به دنبال داشته است. مهندسان بسیاری جهت رفع این نقیصه از ایده‌ی خاک مسلح استفاده کرده‌اند. اجرای دیوارهای خاک مسلح در ابتدا با استفاده از تسمه‌های فولادی صورت گرفته است، اما با توجه به اینکه ضعف عمده‌ی این تسمه‌ها مسئله‌ی خوردگی فلزات در طولانی‌مدت بوده است، لذا با پیشرفت علوم مهندسی پلیمر، استفاده از پلیمرها جهت ساخت عناصر تسلیح گسترش یافته است. در ابتدا از ژئوسینتتیک‌های صفحه‌یی جهت تسلیح خاک استفاده می‌شد، ولی اخیراً ژئوسینتتیک‌های سلولی نیز جهت تسلیح خاک مورد استفاده‌قرار می‌گیرد و امروزه پژوهش‌های وسیعی بر روی آن‌ها در حال شکل‌گیری است.

ژئوسل‌ها هندسه‌ی سه بُعدی دارند؛ هنگام حمل آن‌ها را به‌صورت تاشده جا به جا و برای اجرا، آن‌ها را باز می‌کنند، که با این کار شکلی مشابه کندوهای پرورش زنبور عسل به خود می‌گیرند. در این حالت، خاکریزی درون سلول‌های آن انجام می‌شود و بسته به نوع پروژه، ممکن است خاک ریخته‌شده‌ی درون آن‌ها نیز متراکم شود (شکل ۱).

مکانیزم رفتاری ژئوسل‌ها با ژئوسینتتیک‌های صفحه‌یی کاملاً متفاوت هستند. ژئوسل‌ها با توجه به هندسه‌ی سه‌بُعدی و منحصر به‌فردی که دارند، قادر هستند محصورشدگی جانبی قابل توجهی را برای خاکی که درون آن‌ها قرار می‌گیرد، ایجاد کنند و در نتیجه باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست آن خاک شوند.[۱] این موضوع ناشی از آن است که خواص مقاومتی خاک موجود به طرز چشم‌گیری ارتقا می‌یابند. مطالعات میدانی صورت‌گرفته در زمینه‌ی کاربرد ژئوسل نیز حاکی از مزایای متعدد این سیستم تسلیح در بهسازی خاک است.[۲]

برای بررسی عوامل مؤثر در رفتار خاک مسلح به ژئوسل‌ها مطالعات آزمایشگاهی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۲۴، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۱۴.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱. ژئوسل در دو حالت تا شده و باز.

نسبتاً وسیعی صورت گرفته است. برای مثال در پژوهشی در سال ۲۰۰۶، آزمایش‌هایی جهت بررسی اثرات محصورشدگی ناشی از ژئوسل در کاهش تغییرشکل‌های دائمی انجام شده است.[۳] همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۰۷)، آزمون‌های آزمایشگاهی متعددی جهت مشاهده‌ی تأثیر مسلح‌کردن خاک در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست انجام شده است.[۴] برخی پژوهشگران (۲۰۱۲) نیز تأثیر استفاده از سیستم تسلیح ژئوسل را در اساس راه بررسی و برای این کار آزمون آزمایشگاهی تمام‌مقیاسی را برای مدل‌کردن اثر ترافیک ایجاد کرده‌اند.[۵] در سال ۲۰۱۰ نیز رفتار پی تحت بار سیکلی در دو حالت بستر مسلح با انواع ژئوسینتتیک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.[۶] پژوهشگران دیگری ۲۰۱۰ نیز در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی عوامل مؤثر در رفتار خاک مسلح به تک‌سل (یک سلول ژئوسل) پرداخته و پارامترهایی شامل: شکل، نوع، دفن‌شدگی ژئوسل، ارتفاع ژئوسل و کیفیت مصالح پرکننده‌ی ژئوسل را مورد بررسی قرار داده‌اند.[۷]

همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۹۳، آزمایش فشاری سه‌بُعدی در مقیاس بزرگ بر روی ماسه‌ی مسلح به ژئوسل (به‌صورت تک‌سل) انجام و بعد از تحلیل دایره‌ی موهر خاک دانه‌یی با و بدون ژئوسل (در هنگام شکست) پیشنهاد نمودند که جهت لحاظ‌کردن افزایش مقاومت خاک مسلح به ژئوسل، برای مجموعه‌ی خاک و مسلح‌کننده به‌صورت کامپوزیت، از چسبندگی ظاهری (c_r) استفاده شود و بدین منظور رابطه‌یی برای تخمین چسبندگی ظاهری به‌عنوان تابعی از زاویه‌ی اصطکاک خاک درون ژئوسل (φ) و فشار محصورشدگی افزایش‌یافته به جهت غشاء ژئوسل ($\Delta\sigma_r$) ارائه کردند، و همچنین مقایسه‌یی بین مقادیر چسبندگی ظاهری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های سه محوری و مقادیر محاسبه‌شده از فرمول پیشنهادی انجام دادند. نتایج مقایسه‌ی مذکور نشان داده است که روابط پیشنهادی برای خاک‌های مورد آزمایش تا ۱۸٪ خطا دارد.[۸]

مطالعات آزمایشگاهی اگرچه داده‌های موثق و ارزشمندی را درباره‌ی رفتار ژئوسل‌ها در اختیار گذاشته‌اند، اما به‌دلیل وجود محدودیت‌های آزمایشگاهی (ابعاد، عدم امکان اعمال شرایط مختلف، هزینه‌های زیاد، و...) از بدو شروع مطالعات، لزوم انجام مطالعات عددی کاملاً احساس می‌شده است. در این میان، علی‌رغم انجام مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً وسیع در زمینه‌ی مسلح‌سازی خاک با ژئوسل، به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود، مدل‌سازی عددی رفتار ژئوسل‌ها که برای درک رفتار دقیق آن‌ها لازم است، بندرت انجام شده است. در بیشتر مطالعات عددی صورت‌گرفته نیز خاک و ژئوسل به‌صورت کامپوزیت معادل مدل‌سازی شده‌اند. بدین معنا که مجموعه‌ی خاک و ژئوسل به‌صورت خاکی با پارامترهای فنی بالاتر جایگزین شده‌اند.

برای مثال برخی پژوهشگران در مطالعه‌ی خود (۲۰۰۹)، جهت مدل‌سازی خاک مسلح به ژئوسل با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3}D$ از روش ذکرشده استفاده کرده و خاک مسلح به ژئوسل را به‌صورت کامپوزیت مدل کرده‌اند،[۹] و از روابط به‌دست‌آمده از مطالعات آزمایشگاهی اخیر (۱۹۹۳)،[۸] برای تخمین پارامترهای مدل کامپوزیت استفاده کرده‌اند. از آنجایی که مطالعات آزمایشگاهی مذکور بر روی خاک‌های محدودی انجام شده است، انتظار می‌رود این پارامترها متناسب با همان خاک‌ها باشد (همان‌طور که اشاره شده است، در روابط پیشنهادی برای خاک‌های مورد آزمایش نیز تا ۱۸٪ خطا مشاهده شده است)، بنابراین تعمیم آن به سایر انواع خاک در این‌گونه مدل‌های عددی با خطا همراه خواهد بود. به‌علاوه ژئوسل مکانیزم‌های رفتاری متنوع و پیچیده‌یی دارد، که در این‌گونه مدل‌سازی‌ها به‌صورت کامل لحاظ نمی‌شود.

مطالعات در زمینه‌ی خاک مسلح به ژئوسل حاکی از آن است که علی‌رغم ویژگی‌های منحصربه‌فرد این سیستم تسلیح (مانند عملکرد بسیار خوب در بهسازی خاک و نیز سرعت و سهولت در اجرا) روش‌های تئوری و طراحی موجود برای آن‌ها بسیار عقب‌تر از کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف است. این امر به علت نبود مطالعات تئوری کافی و عدم شناخت مناسب از مکانیزم سیستم تسلیح با ژئوسل و عوامل مؤثر در آن است.[۱۰]

برای گسترش مطالعات و تعمیم آن به شرایط واقعی و توسعه‌ی روش‌های تئوری و طراحی، نیاز به وجود مدل‌های عددی قوی و دقیق کاملاً محسوس است. جهت نیل به هدف ذکرشده، در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3}D$ ، مطالعاتی بر روی سیستم تسلیح بستر پی‌ها با ژئوسل انجام شده است. در این مطالعات برای اولین بار، ژئوسل و خاک زیر پی به‌صورت جداگانه شبیه‌سازی شده‌اند. روش شبیه‌سازی ذکرشده در کنار مدل‌سازی سه‌بُعدی، این قابلیت را به مدل عددی داده است که علاوه‌بر حذف خطاهای روش کامپوزیت، کلیه‌ی مکانیزم‌های رفتاری کلیدی ژئوسل (از جمله مکانیزم محصورکنندگی ژئوسل) کاملاً در مدل عددی ایجاد شوند.

در این پژوهش ابتدا خاک مسلح به تک‌سل (یک سلول ژئوسل) شبیه‌سازی شده و تحت بارگذاری قرارگرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل عددی، جهت صحت‌سنجی با نتایج مطالعات آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرارگرفته است.

از آنجایی که یکی از پرکاربردترین زمینه‌های استفاده از خاک مسلح، تسلیح بستر زیر پی‌هاست؛ در گام بعدی جهت بررسی رفتار مسلح‌کننده‌ی ژئوسل در این کاربری، بستر واقع در زیر پی‌ها در حالت مسلح به ژئوسل و غیرمسلح شبیه‌سازی شده است. با توجه به اینکه هدف از تسلیح خاک، علاوه بر بهبود عملکرد آن (افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست)، صرفه‌جویی در هزینه‌ی پروژه‌ها نیز است؛ در این پژوهش شرایط بهینه طراحی و اجرای سیستم تسلیح ژئوسل در بستر فونداسیون‌ها مورد مطالعه قرارگرفته و عمق مدفون، عرض و ارتفاع بهینه‌ی قرارگیری لایه‌ی ژئوسل در زیر پی تعیین شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

ژئوسینتتیک‌های صفحه‌یی و سلولی (ژئوسل) را می‌توان دو سیستم تسلیح با مصالح و جنس یکسان، اما مکانیزم‌های رفتاری متفاوت دانست؛ بنابراین تعیین اینکه کدام سیستم کارایی بالاتری دارد، از نظر فنی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. لذا در بخش پایانی این پژوهش جهت مقایسه‌ی عملکرد این دو سیستم تسلیح، بستر پی مسلح به ژئوسینتتیک صفحه‌یی نیز با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D شبیه‌سازی شده و عملکرد این سیستم تسلیح هم مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور انجام مقایسه‌ی مناسب بین عملکرد ژئوسل و ژئوسینتتیک صفحه‌یی، جنس ژئوسینتتیک صفحه‌یی کاملاً مشابه ژئوسل‌ها لحاظ شده و برای رسیدن به مقایسه‌ی معنادار، مقدار ژئوسینتتیک‌های مصرفی در دو سیستم تسلیح مساوی لحاظ شده است (دو مسلح‌کننده با مساحت و در نتیجه جرم تقریباً یکسان استفاده شده است).

۲. مدل عددی

همان‌طور که اشاره شد، با توجه به هزینه‌ی بالای مطالعات آزمایشگاهی و نیز وجود خطا در مطالعات عددی محدود، که با روش کامپوزیت در این زمینه صورت گرفته، لزوم انجام مطالعات عددی با دقت بالا ضروری است. با همین هدف در مطالعه‌ی عددی صورت‌گرفته در این پژوهش، ژئوسل و خاک به‌صورت جداگانه و سه‌بُعدی شبیه‌سازی شده‌اند.

در این روش مدل‌سازی، شناخت و انتخاب المان سازه‌یی مناسبی که رفتار ژئوسل را به دقیق‌ترین نحو شبیه‌سازی کند، اساسی‌ترین مرحله در مدل‌سازی خاک مسلح به ژئوسل است. لذا در مدل مذکور، المان‌های سازه‌یی صفحه‌یی کشسان ژئوگرید جهت شبیه‌سازی مسلح‌کننده‌ی ژئوسل استفاده شده است.

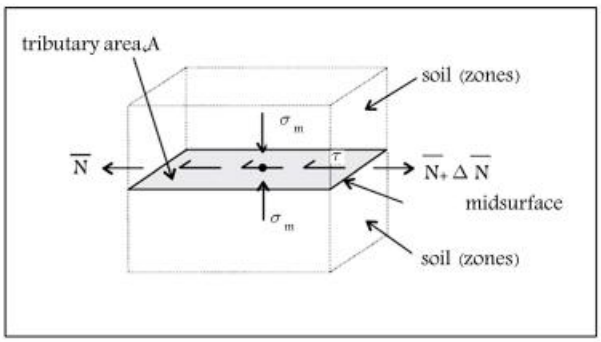
المان ژئوگرید، رفتارکشسان خطی ایزوتروپ یا اورتروپ دارد و بین شبکه و المان، برش اصطکاکی وجود دارد. از این نوع اجزا برای مدل‌کردن غشاهای انعطاف‌پذیر، که اندرکنش برشی با خاک دارند، استفاده می‌شود. تنش‌هایی که بر المان ژئوگرید عمل می‌کنند، در شکل ۲ و اندرکنش بین ژئوگرید و خاک در شکل ۳ به‌صورت خلاصه نشان داده شده است (شامل تنش همه جانبه‌ی مؤثر (σ) و تنش برشی کل (τ) که باعث ایجاد تنش‌های غشایی در ژئوسل می‌شوند). عملکرد سطح مشترک[1] بین المان سازه‌یی ژئوگرید و خاک نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور کلی رفتار سطح مشترک بین المان ژئوگرید و خاک در جهت نرمال به‌صورت صلب و در جهت مماسی به‌صورت چسبنده و اصطکاکی است و با استفاده از پارامترهای سختی بر واحد سطح (K)، مقاومت چسبندگی (c) و زاویه‌ی اصطکاک (Φ) کنترل می‌شود.

۱.۲. مدل اولیه و صحت‌سنجی

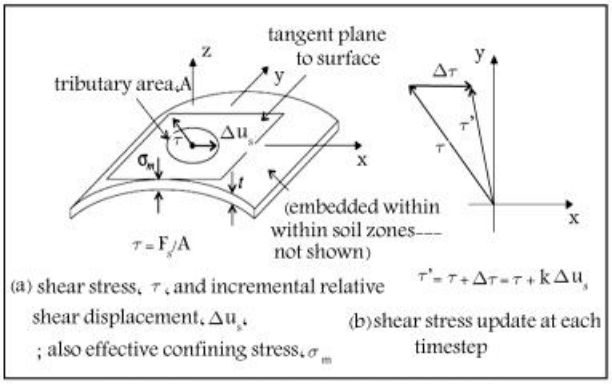
۱.۱.۲. مدل مرجع

جهت صحت‌سنجی مدل عددی، خاک مسلح به یک سلول ژئوسل (تک‌سل) و نیز خاک غیرمسلح با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی شده‌اند. این مدل در واقع شبیه‌سازی عددی آزمون آزمایشگاهی انجام‌شده توسط Pokharel و همکاران،[1] است.

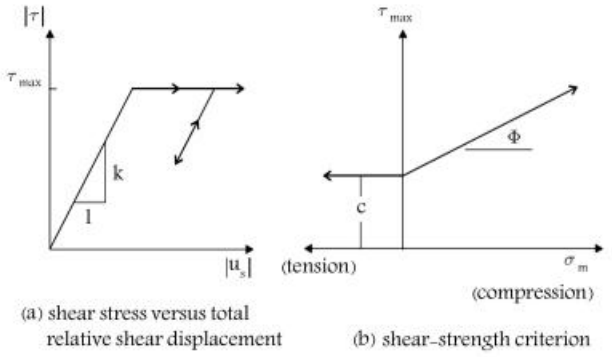
جزئیات جعبه‌ی آزمایش مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است. این جعبه‌ی آزمایش به شکل مربع و با سطح مقطع ۳۶۶۰۰۰ میلی‌متر مربع و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر است. خاک مورد استفاده در این آزمایش، ماسه‌ی رودخانه کانزاس[2] است (جدول ۱). در حالت مسلح، ژئوسل در مرکز جعبه قرار داده شده است. آن‌ها در



شکل ۲. نمایش تنش‌ها روی گره در المان ژئوگرید.[11]



شکل ۳. ایده‌آل‌سازی رفتار یک گره‌ی ژئوگرید.[11]



شکل ۴. نمودار سطح مشترک بین خاک و المان سازه‌یی ژئوگرید.[11]

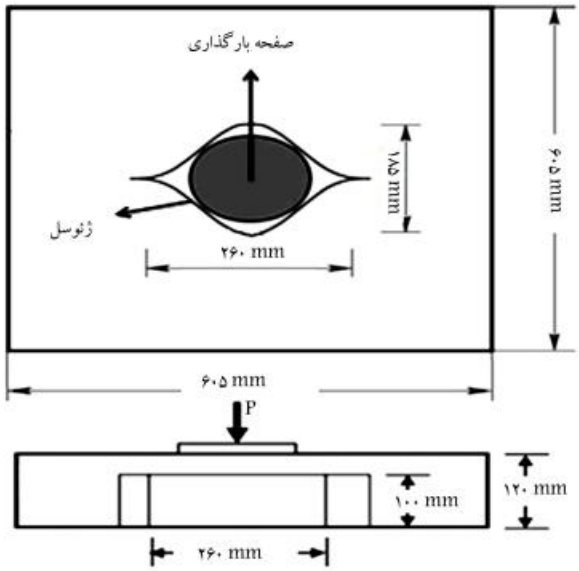
جدول ۱. پارامترهای خاک ماسه‌ی رودخانه‌ی کانزاس.

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

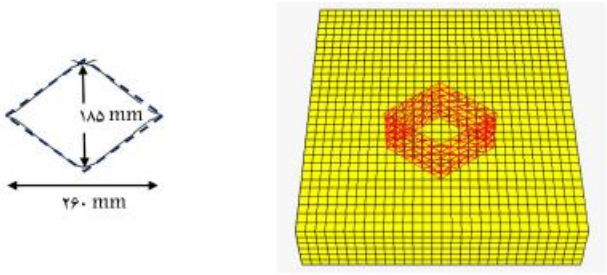
آزمایش‌های خود از ژئوسل‌هایی با دو شکل هندسی دایره و لوزی استفاده کرده‌اند. سلول لوزی‌شکل مورد استفاده در این آزمایش، قطرهای ۲۶۰ و ۱۸۵ و نیز ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر با مدول کشسانی ۳۵۵ Mpa دارد، که در کف جعبه گذاشته شده و ارتفاع خاک جعبه‌ی مذکور برابر با ۱۲۰ میلی‌متر (۲۰ میلی‌متر بالاتر از سطح ژئوسل) بوده است. بارگذاری در سطحی به مساحت ۱۷۶۷۰ میلی‌مترمربع با افزایش‌های پلکانی به سطح نمونه اعمال شده و در هر مرحله تا زمان متوقف‌شدن نشست، بار بدون تغییر بوده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵. تصویر شماتیک جعبه‌ی آزمایش برای تکسل با ژئوسل در وسط جعبه.[۱]



شکل ۶. شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3}D$.

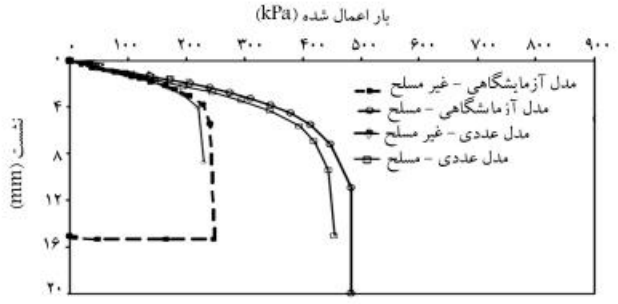
۲.۱.۲. مدل عددی اولیه

در این پژوهش، ایجاد هندسه‌ی مدل براساس آزمایش Pokharel و همکاران،[۵] برای دو حالت مسلح و غیرمسلح صورت گرفته است. در حالت مسلح، ژئوسل با ابعاد ذکرشده 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 کشسان‌خمیری کامل موهر ـ کولمب برای مدل‌سازی المان‌های خاک استفاده و جهت بررسی صحت مدل عددی، نتایج به‌دست‌آمده از آن با نتایج مطالعات آزمایشگاهی Pokharel و همکاران،[۱] مقایسه شده است (شکل ۷). مطابق شکل مذکور، انطباق مناسبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و آزمون آزمایشگاهی مذکور مشاهده می‌شود.

۲.۲. مدل عددی بستر پی

در این بخش، ابتدا مدل‌های عددی ساخته‌شده برای بستر مسلح به ژئوسل و سپس مدل‌های عددی ساخته‌شده مربوط به بستر مسلح به ژئوسینتتیک صفحه‌یی و نمادهای استفاده‌شده معرفی شده است.



شکل ۷. نمودار نشست خاک در برابر بار اعمال‌شده برای خاک‌های مسلح و غیرمسلح (مقایسه‌ی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی).

جدول ۲. پارامترهای بستر ماسه‌یی واقع در زیر پی.

مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص (kg/m^{3})	چسبندگی (kPa)	زاویه‌ی اصطکاک (Deg)
۷۰	۰٫۳۵	۲۱۰۰	۵	۳۵

جدول ۳. جنس ژئوسل.

مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون
۲۰۰	۰٫۴۵

۱.۲.۲. مدل عددی بستر پی مسلح با ژئوسل

همان‌طورکه قبلاً اشاره شده است، هدف از شبیه‌سازی بستر پی مسلح با ژئوسل، بررسی عملکرد سیستم تسلیح ذکرشده جهت بهسازی بستر زیر پی و تعیین شرایط بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های مسلح‌کننده‌ی ژئوسل در بستر زیر پی است. ابعاد این مدل عددی برابر ۱٫۵ m × ۳ × ۳ و سطح بارگذاری (پی مربعی) برابر ۰٫۵ m × ۰٫۵ در نظر گرفته شده است. پارامترهای خاک بستر پی و ژئوسل مورد استفاده در این مدل در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

۲.۲.۲. مدل عددی بستر پی مسلح با ژئوسینتتیک صفحه‌یی

برای سیستم تسلیح با ژئوسینتتیک صفحه‌یی نیز پارامترهای خاک مطابق جدول ۲ است. همچنین جهت ایجاد امکان مقایسه‌ی مناسب، جنس ژئوسینتتیک صفحه‌یی مشابه جنس ژئوسل لحاظ شده است (جدول ۳). عمق مدفون بهینه، عرض بهینه، تعداد و فواصل بهینه بین لایه‌های ژئوسینتتیک صفحه‌یی نیز براساس مطالعات پیشین در این زمینه انتخاب شده است.[۱۲-۱۷]

۳.۲.۲. معرفی نمادها

به منظور ارزیابی میزان افزایش ظرفیت باربری، از پارامتر بدون بُعد BCR استفاده شده است، که از رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$BCR = \frac{q_r}{q_u} \qquad (۱)$$

که در آن، q_u ظرفیت باربری بستر در حالت غیرمسلح و q_r ظرفیت باربری بستر در حالت مسلح (به ازاء بیشینه‌ی نشست مجاز ۳۲ میلی‌متر برای ماسه و بیشینه‌ی نشست مجاز ۴ برای رس)[۱۸] است.

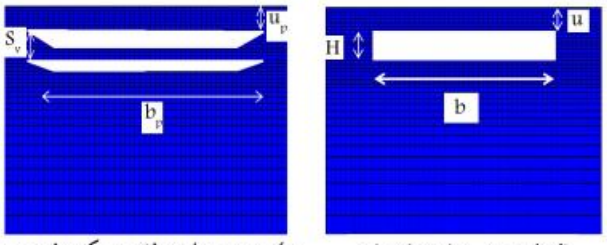
به منظور برآورد q_u و q_r، پارامترهای مورد استفاده در این نوشتار در جدول ۴ معرفی شده‌اند. پارامترهای مذکور در شکل ۸الف برای خاک مسلح به ژئوسل و در شکل ۸ب برای خاک مسلح به ژئوسینتتیک صفحه‌یی نشان داده شده‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. معرفی پارامترهای مورد استفاده.

پارامترهای پی	عرض پی	B
پارامترهای ژئوسل	عمق مدفون	u
	ارتفاع	H
	عرض	b
پارامترهای ژئوسینتتیک صفحه‌یی	عمق مدفون	u_p
	تعداد لایه‌ها	N
	فاصله‌ی لایه‌ها	S_v
	عرض	b_p



الف) بستر پی مسلح به ژئوسل؛ ب) بستر پی مسلح به ژئوسینتتیک صفحه یی.

شکل ۸. معرفی پارامترهای مورد استفاده در جدول ۴.

۳. نتایج مدل بستر پی

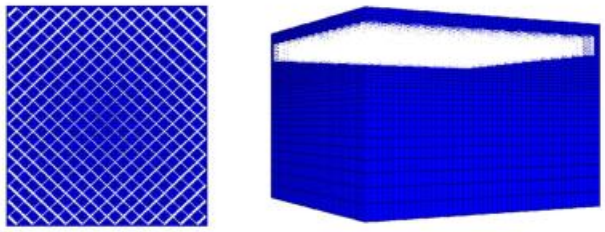
همان‌طور که اشاره شده است، یکی از پرکاربردترین زمینه‌های استفاده از خاک مسلح، تسلیح بستر زیر پی‌ها برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌های ایجادشده است. لذا در این مرحله جهت بررسی رفتار مسلح‌کننده‌ی ژئوسل در این کاربری، بستر واقع در زیر پی‌ها در حالت‌های مسلح به ژئوسل و غیرمسلح شبیه‌سازی و مقایسه‌ی نتایج مربوط به دو حالت مسلح و غیرمسلح در ادامه ارائه شده است.

با توجه به اینکه هدف از تسلیح خاک، علاوه بر بهبود عملکرد خاک، صرفه‌جویی در هزینه‌ی پروژه‌ها نیز است؛ تعیین شرایط بهینه‌ی لایه‌های مسلح‌کننده به لحاظ وضعیت قرارگیری آن‌ها در خاک و ابعاد آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. لذا در این پژوهش با شبیه‌سازی بستر پی مسلح به ژئوسل، کلیه‌ی این عوامل بررسی شده است.

در مرحله‌ی پایانی این پژوهش نیز جهت مقایسه‌ی عملکرد سیستم تسلیح ژئوسینتتیک سلولی (ژئوسل) با ژئوسینتتیک صفحه‌یی (به‌عنوان دو سیستم تسلیح با جنس یکسان و مکانیزم رفتاری کاملاً متفاوت)، نتایج نشست ـ بارگذاری در شرایط بهینه‌ی اجرا برای دو سیستم تسلیح ذکرشده مورد ارزیابی و مقایسه قرارگرفته است.

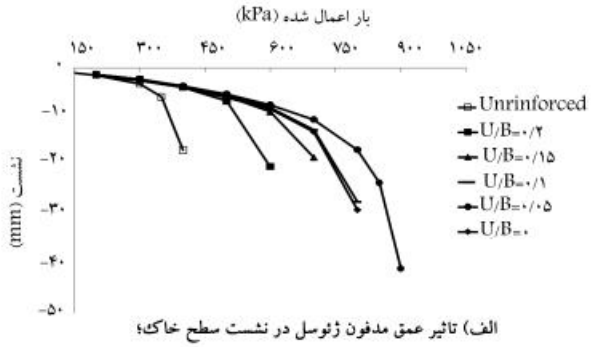
۱.۳. نتایج مدل عددی بستر ماسه‌یی پی مسلح به ژئوسل

در این قسمت از پژوهش، جهت یافتن شرایط هندسی بهینه‌ی قرارگیری مسلح‌کننده‌ی ژئوسل شامل عمق قرارگیری لایه‌ی ژئوسل (فاصله‌ی زیر پی تا بالای لایه‌ی ژئوسل)، ارتفاع بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل و عرض بهینه‌ی ژئوسل‌ها در زیر پی، ۴ نوع مدل عددی ایجاد شده است. در مدل عددی اول، بستر پی بدون مسلح‌کننده شبیه‌سازی شده است (جهت مقایسه با حالت‌های مسلح و بررسی تأثیر تسلیح). در سایر مدل‌ها (مدل‌های دوم تا چهارم) بستر پی، مسلح به ژئوسل

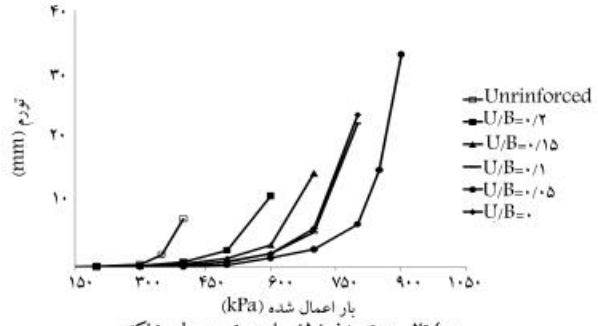


الف)مدل سه‌بعدی بستر پی مسلح به‌ژئوسل؛ ب) تصویر لایه مسلح به ژئوسل از سطح بالا.

شکل ۹. مدل سه بُعدی خاک مسلح به ژئوسل.



الف) تاثیر عمق مدفون ژئوسل در نشست سطح خاک؛



ب) تاثیر عمق مدفون ژئوسل در تورم سطح خاک.

شکل ۱۰. بررسی تأثیر عمق مدفون ژئوسل در عملکرد خاک ماسه‌ی مسلح ($b/B = ۶$ و $H/B = ۰/۳$).

است. تصویر سه بُعدی این مدل به همراه تصویر لایه‌ی مسلح ژئوسل از بالا در شکل ۹ نشان داده شده است. در گروه دوم مدل‌ها، ارتفاع ژئوسل و عرض ژئوسل ثابت بوده و مدل برای عمق مدفون‌های متفاوت تحت بارگذاری قرار گرفته است.

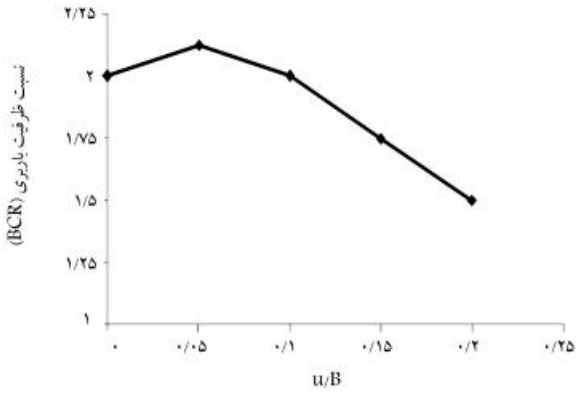
در مرحله‌ی سوم، جهت تعیین ارتفاع بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل، پارامترهای عمق مدفون و عرض ژئوسل ثابت فرض شده و مدل برای ارتفاع‌های مختلف ژئوسل تحت بارگذاری قرار گرفته است. در مرحله‌ی چهارم، جهت تعیین عرض بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل، این پارامتر متغیر و پارامترهای عمق مدفون و ارتفاع لایه‌ی ژئوسل ثابت در نظر گرفته شده‌اند (خاطر نشان می‌شود که مقادیر ثابت در هر مرحله، براساس تحلیل حساسیت‌های انجام‌شده در دیگر مراحل انتخاب شده است).

۱.۱.۳. تعیین عمق مدفون بهینه‌ی قرارگیری ژئوسل

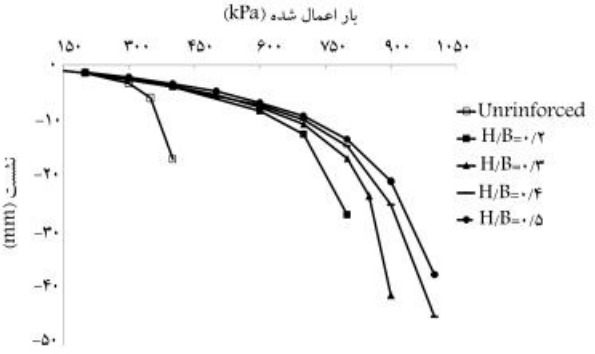
جهت تعیین عمق بهینه‌ی قرارگیری ژئوسل برای بستر ماسه‌یی، پارامترهای $b/B = ۶$ و $H/B = ۰/۳$ ثابت در نظر گرفته شده و مدل برای u/Bهای متغیر تا مرحله‌ی گسیختگی تحت بارگذاری قرار گرفته است. نتایج نشست خاک تحت بارگذاری برای عمق‌های مدفون مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. در شکل ۱۱ نیز تغییرات

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۱. نمودار تغییرات BCR نسبت به افزایش عمق مدفون ژئوسل در بستر ماسه‌یی ($b/B = ۶$ و $H/B = ۰/۳$).



شکل ۱۲. بررسی تأثیر ارتفاع لایه‌ی ژئوسل در عملکرد خاک ماسه‌ی مسلح ($b/B = ۶$ و $u/B = ۰/۰۵$).

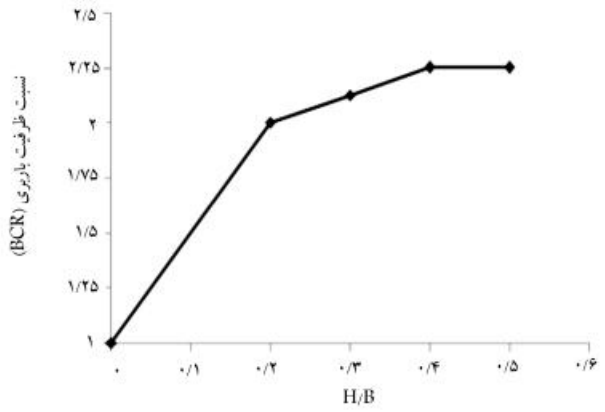
پارامتر بی‌بُعد BCR در برابر تغییرات پارامتر بی‌بُعد u/B نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان استنتاج کرد، بیشینه‌ی ظرفیت باربری و کمترین میزان نشست‌ها و تورم‌ها در حالت $u/B = ۰/۰۵$ اتفاق می‌افتد.

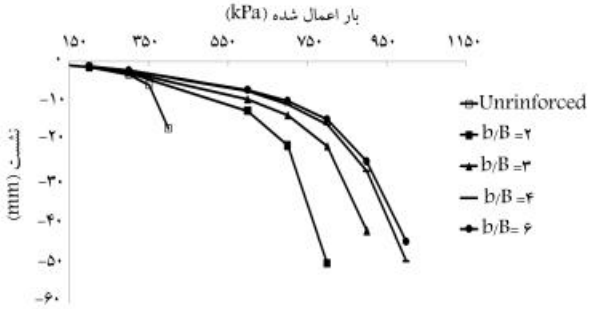
نکته‌ی قابل توجه در این نمودارها آن است که با کاهش عمق مدفون ژئوسل، ظرفیت باربری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. این بدان معناست که قراردادن ژئوسل در فواصل نزدیک به سطح بهتر است، ولی این فاصله نباید از حدی کمتر باشد. دلیل این رفتار را می‌توان این‌گونه بیان کرد که وجود مقداری پوشش خاک بر روی لایه‌ی ژئوسل مانع از بالازدگی ژئوسل و خارج شدن دو طرف لایه‌ی ژئوسل از خاک 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 زیادشدن عمق قرارگرفتن ژئوسل، نتایج به‌تدریج به سمت نتایج بستر غیرمسلح پیش می‌رود. از نمودارهای ارائه‌شده می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که عمق دفن بهینه‌ی ژئوسل در بستر خاک ماسه‌یی زیر پی بین $۰ < u/B < ۰/۱$ (ترجیحاً $u/B = ۰/۰۵$) است.

۲.۱.۳. تعیین ارتفاع بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل

جهت تعیین ارتفاع بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل در خاک، پارامترهای $b/B = ۶$ و $u/B = ۰/۰۵$ ثابت در نظر گرفته شده‌اند (پارامتر u/B برابر مقدار بهینه‌ی به‌دست‌آمده از مرحله‌ی قبل لحاظ شده است) و مدل برای H/Bهای متغیر تا مرحله‌ی گسیختگی تحت بارگذاری قرار گرفته است. نتایج بار- نشست خاک در این حالت در شکل ۱۲ ارائه شده است. مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل مذکور، با افزایش ارتفاع ژئوسل، ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد؛ اما روند افزایش ظرفیت باربری با افزایش ارتفاع



شکل ۱۳. نمودار تغییرات BCR نسبت به افزایش ارتفاع لایه‌ی ژئوسل در بستر ماسه‌یی ($b/B = ۶$ و $u/B = ۰/۰۵$).



شکل ۱۴. بررسی تأثیر عرض لایه‌ی مسلح به ژئوسل در عملکرد خاک ماسه‌ی مسلح ($H/B = ۰/۴$ و $u/B = ۰/۰۵$).

ژئوسل کُند شده و برای $H/B > ۰/۴$، میزان افزایش ظرفیت باربری اندک است.

در شکل ۱۳ نیز که تغییرات پارامتر بدون بُعد BCR را نسبت به افزایش ارتفاع ژئوسل نشان می‌دهد، این روند کاملاً مشهود است. از طرف دیگر، اجرای لایه‌ی ژئوسل به ارتفاع زیاد می‌تواند با محدودیت‌هایی حین اجرا مواجه باشد. لذا این‌گونه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ارتفاع بهینه برای ژئوسل در بستر ماسه‌یی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد عرض پی‌است ($۰/۳ < H/B < ۰/۴$).

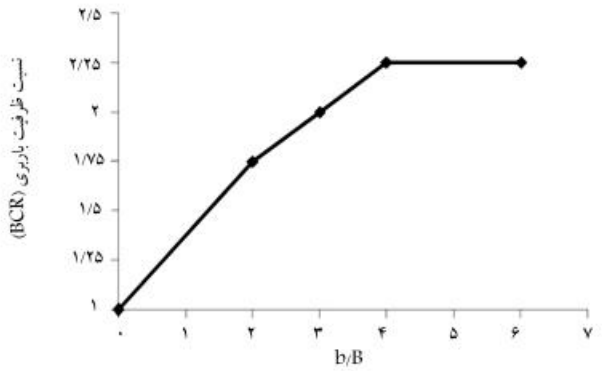
۳.۱.۳. تعیین عرض بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل

جهت تعیین عرض بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل در خاک ماسه‌یی، با توجه به نتایج مراحل قبل، مقادیر بهینه برای پارامترهای ثابت $H/B = ۰/۴$ و $u/B = ۰/۰۵$ در نظر گرفته شده و مدل برای b/Bهای متغیر تا مرحله‌ی گسیختگی تحت بارگذاری قرار گرفته است. نتایج بار- نشست خاک برای این حالت در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. مطابق شکل مذکور، با افزایش عرض لایه‌ی ژئوسل، ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد؛ اما روند افزایش ظرفیت باربری در بستر ماسه‌یی، با افزایش عرض لایه‌ی ژئوسل کُند شده و برای $b/B > ۴$، نرخ افزایش ظرفیت باربری کم است.

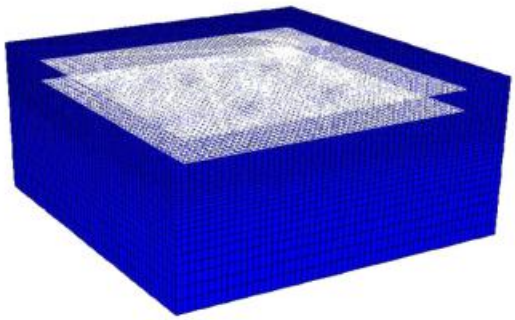
در این مرحله نیز تغییرات پارامتر بدون بُعد BCR نسبت به افزایش عرض لایه‌ی ژئوسل نشان داده شده است (شکل ۱۵). روندی که در قبل اشاره شده است، در شکل مذکور نیز به وضوح ملاحظه می‌شود. لذا می‌توان این‌گونه استنتاج کرد که عرض بهینه برای لایه‌ی ژئوسل در بستر ماسه‌یی، بین ۳ تا ۴ برابر عرض پی‌است ($۳ < b/B < ۴$).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۵. نمودار تغییرات BCR نسبت به افزایش عرض لایه‌ی ژئوسل در بستر ماسه‌یی ($H/B = ۰/۴$ و $u/B = ۰/۰۵$).



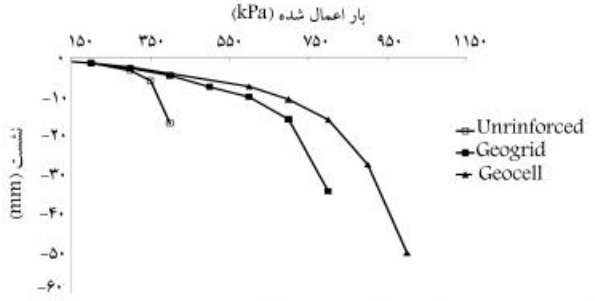
شکل ۱۶. مدل مربوط به خاک مسلح به ژئوسینتتیک صفحه‌یی.

۲.۳. مقایسه‌ی عملکرد ژئوسل و ژئوسینتتیک‌های صفحه‌یی در تسلیح خاک زیر پی

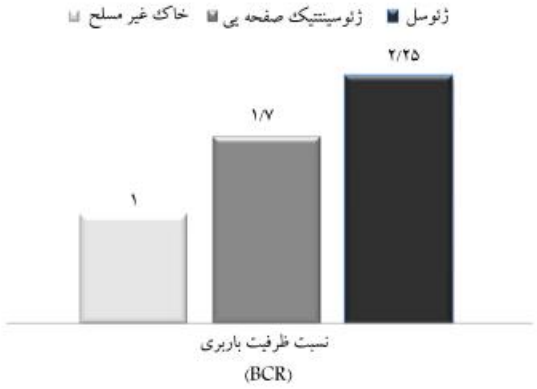
به منظور انجام مقایسه‌ی مناسب بین عملکرد ژئوسل و ژئوسینتتیک صفحه‌یی، جنس ژئوسینتتیک صفحه‌یی کاملاً مشابه ژئوسل‌ها انتخاب و برای رسیدن به مقایسه‌ی معنادار سعی شده است حجم مقادیر مسلح‌کننده در دو حالت تسلیح یکسان باشد (مساحت یکسانی از دو نوع مسلح‌کننده استفاده شده است)، در نتیجه لایه‌ی ژئوسل با دو لایه‌ی ژئوسینتتیک صفحه‌یی معادل شده است.

ابعاد مربوط به هر دو مسلح‌کننده، جهت رسیدن به بیشینه‌ی کارایی، در حالت بهینه‌ی خود انتخاب شده‌اند. ابعاد مورد استفاده در تسلیح با ژئوسل براساس مقادیر بهینه‌ی به‌دست‌آمده در نتایج مراحل قبل لحاظ شده است ($H/B=۰/۴$، $u/B=۰/۰۵$ و $b/B = ۴$) و عمق قرارگیری، عرض، و فاصله‌ی لایه‌های ژئوسینتتیک صفحه‌یی نیز براساس محدوده‌های بهینه‌ی پیشنهادی در متون فنی به ترتیب برابر $u_p/B = ۰/۳$، $b_p/B = ۵$ و $S_v/B = ۰/۴$ انتخاب شده است.[۱۲-۱۴] به‌علاوه پژوهشگران دیگری نیز بازه‌های نزدیک به این مقادیر را پیشنهاد داده‌اند.[۱۵-۱۷] شکل ۱۶، مدل مربوط به خاک مسلح به ژئوسینتتیک صفحه‌یی را نشان می‌دهد.

نتایج مقایسه‌ی عملکرد ژئوسل و ژئوسینتتیک‌های صفحه‌یی در تسلیح خاک زیر پی نیز در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همچنین برای درک بهتر نحوه‌ی عملکرد دو سیستم تسلیح در بستر ماسه‌یی، پارامتر بی‌بُعد BCR برای این دو سیستم، در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای میزان و جنس مصالح مصرفی یکسان ژئوسینتتیک و ژئوسل، عملکرد ژئوسل هم



شکل ۱۷. مقایسه‌ی عملکرد ژئوسل و ژئوسینتتیک صفحه‌یی در تسلیح بستر ماسه‌یی.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی پارامتر بدون بُعد BCR در بسترماسه‌یی مسلح به ژئوسل و ژئوسینتتیک صفحه‌یی.

در کاهش میزان نشست (تحت باریکسان) و هم در افزایش ظرفیت باربری به طرز قابل ملاحظه‌یی بهتر است.

نکته‌ی دیگری که در بهسازی بستر پی‌ها حائز اهمیت است، حجم خاک‌برداری لازم جهت تسلیح بستر است. در حالت استفاده از ژئوسل، با توجه به ابعاد بهینه، عمق خاک‌برداری برای بستر ماسه برابر $۰/۴۵B$ است، ولی این مقدار برای ژئوسینتتیک صفحه‌یی برابر $۰/۷B$ است. مشاهده می‌شود که عمق خاک‌برداری نیز برای خاک مسلح به ژئوسل کمتر است.

۴. نتیجه‌گیری

ژئوسل‌ها یکی از انواع ژئوسینتتیک‌ها هستند، که با توجه به مزایای متعدد، استفاده از آن‌ها در حال توسعه بوده و امروزه مطالعات وسیعی روی آن‌ها در حال شکل‌گیری است. مکانیزم رفتاری ژئوسل‌ها با ژئوسینتتیک‌های صفحه‌یی کاملاً متفاوت است. ژئوسل‌ها با توجه به هندسه‌ی سه‌بُعدی و منحصر به‌فردی که دارند، قادرند محصورشدگی جانبی قابل توجهی را برای خاکی که درون آن‌ها قرار می‌گیرد، ایجاد کنند، خواص مقاومتی و سختی خاک موجود را به طرز چشم‌گیری ارتقاء دهند و در نتیجه باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک شوند.

علی‌رغم ویژگی‌های منحصر به‌فرد، این سیستم تسلیح هم‌چنان نتوانسته است جایگاه واقعی خود را در پروژه‌های بهسازی خاک بیابد و 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 است. در این میان، علی‌رغم وجود مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً وسیع، مدل‌سازی عددی رفتار

www.SID.ir

Archive of SID

آن‌ها بندرت انجام شده و 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 (که براساس رفتار خاک مسلح در آزمون‌های آزمایشگاهی صورت‌گرفته بر روی آن تعیین می‌شوند) جایگزین شده است. این در حالی است که با توجه به هندسه‌ی منحصر به فرد سه‌بُعدی ژئوسل، مکانیزم رفتاری واقعی آن کاملاً در این روش قابل شبیه‌سازی نیست.

لذا برای گسترش مطالعات و تعمیم آن به شرایط واقعی و توسعه‌ی روش‌های تئوری و طراحی، نیاز به وجود مدل‌های عددی قوی و دقیق کاملاً محسوس است. جهت نیل به این هدف، در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3}D$ مطالعات بر روی سیستم تسلیح بستر پی‌ها با ژئوسل انجام شده است. در این مطالعات برای اولین بار، ژئوسل و خاک زیرپی به‌صورت جداگانه شبیه‌سازی شده‌است. این روش شبیه‌سازی درکنار مدل‌سازی سه‌بُعدی، این قابلیت را به مدل عددی داده است که علاوه بر حذف خطاهای روش کامپوزیت، کلیه‌ی مکانیزم‌های رفتاری کلیدی ژئوسل (از جمله مکانیزم محصورکنندگی ژئوسل) به‌صورت کامل در مدل عددی ایجاد شود. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به این قرار هستند:

۱. سیستم تسلیح ژئوسل می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک (نسبت به حالت غیر مسلح تحت بار مشابه) شود. از طرف دیگر، استفاده از سیستم تسلیح با ژئوسل باعث کاهش تورم در خاک در اثر بارگذاری می‌شود، که این خود نشان‌دهنده‌ی قابلیت ژئوسل در کنترل گسیختگی برشی است.

۲. برای سیستم تسلیح با ژئوسل در بستر ماسه‌یی زیر پی، بیشترین بازدهی زمانی است که ژئوسل در فاصله‌ی زیر پی تا عمق ۰/۱B (B عرض پی) قرار گیرد ($0 < u < 0/1B$). ضمناً بیشترین ظرفیت باربری و کمترین میزان نشست‌ها و تورم‌ها در حالت عمق مدفون برابر ۰/۰۵ عرض پی ($u/B = 0/05$) اتفاق می‌افتد. این تذکر لازم است که با کاهش عمق مدفون ژئوسل، ظرفیت باربری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. 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 روی آن قرار گیرد.

۳. با افزایش ارتفاع ژئوسل، ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد، اما روند افزایش ظرفیت باربری با افزایش ارتفاع ژئوسل کُند شده و برای $H/B>0/4$، میزان افزایش ظرفیت باربری اندک است. از طرف دیگر، اجرای لایه‌ی ژئوسل به ارتفاع زیاد می‌تواند با محدودیت‌هایی حین اجرا مواجه باشد. لذا این‌گونه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ارتفاع بهینه برای ژئوسل در بستر ماسه‌یی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد عرض پی‌است ($0/3 < H/B < 0/4$).

۴. با افزایش عرض لایه‌ی ژئوسل، ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد، اما روند افزایش ظرفیت باربری با افزایش عرض لایه‌ی ژئوسل کُند شده و برای $b/B>4$، مقدار افزایش ظرفیت باربری قابل صرف‌نظرکردن است. لذا عرض بهینه برای لایه‌ی ژئوسل در خاک ماسه‌یی، بین ۳ تا ۴ برابر عرض پی پیشنهاد می‌شود ($3 < b/B < 4$).

۵. برای مقادیر یکسان مصالح مسلح‌کننده‌ی مصرفی در بستر ماسه‌یی، عملکرد سیستم تسلیح با ژئوسل به شکل قابل ملاحظه‌یی بهتر از عملکرد سیستم تسلیح با ژئوسینتتیک است. این برتری هم در کاهش میزان نشست (به ازاء بار مشابه) و هم در افزایش ظرفیت باربری وجود دارد.

۶. علاوه بر عملکرد بهتر سیستم تسلیح با ژئوسل، عمق خاک‌برداری و خاکریزی لازم نیز در سیستم تسلیح با ژئوسل کمتر از سیستم تسلیح با ژئوسینتتیک است.

۷. خاطر نشان می‌شود که اگرچه مطالعات آزمایشگاهی در زمینه‌ی سیستم‌های تسلیح سلولی (ژئوسل) به دلیل محدودیت ابعاد و هزینه‌ی زیاد و مطالعات عددی به دلیل پیچیدگی به‌صورت محدود انجام شده و پژوهش‌ها در این زمینه در ابتدای مسیر خود قرار دارد، اما در زمینه‌ی سیستم‌های تسلیح مشابه (ژئوسینتتیک صفحه‌یی) در دو دهه‌ی اخیر مطالعات عددی و آزمایشگاهی گسترده‌یی صورت گرفته است. مرور ادبیات فنی در زمینه‌ی خاک مسلح به هر دو نوع مسلح‌کننده‌ی ژئوسینتتیکی (سلولی و صفحه‌یی) آشکار می‌سازد که در کلیه‌ی مطالعات صورت‌گرفته (عددی و آزمایشگاهی) از روشی مشابه روش استفاده‌شده در این پژوهش، برای یافتن ترکیب بهینه‌ی مسلح‌کننده‌ها هم برای خاک مسلح به ژئوسل،[۷] و هم برای خاک مسلح به ژئوسینتتیک صفحه‌یی،[۱۲-۱۷] استفاده شده است.

با این وجود بدیهی است روش بهینه‌سازی چیدمان ژئوسل به شیوه‌ی ثابت نگه‌داشتن تمام متغیرها و تغییر یک متغیر برای یافتن ترکیب بهینه، لزوماً منجر به یافتن ترکیب بهینه و مقدارکمینه نمی‌شود. در شکل فعلی پژوهش، روش کاربردی و سهل‌الوصولی را نمی‌توان جایگزین کرد، هر چند استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها به شیوه‌ی تاگوچی می‌تواند به‌عنوان پیشنهادی برای ادامه‌ی پژوهش مطرح باشد.

پانوشت‌ها

1. interface
2. Kansas river sand

منابع (References)

1. Han, J., Yang, X., Leshchinsky, D. and Parsons, R.L. "Behavior of geocell-reinforced sand under a vertical load", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2045**, pp. 95-101 (2008).
2. Yongli, X., Yonghua, Y. and Xiaohua, Y. "Application study of treating differential settlement of subgrade with geocell", *China Journal of Highway and Transport*, **17**(4), pp. 7-10 (2004).
3. Mengelt, M., Edil, T. and Benson, C. "Resilient modulus and plastic deformation of soil confined in a geocell", *Geosynthetics International*, **13**(5), pp. 195-205 (2006).
4. Chang, T.-T., Chang, C.-H. and Pei, S.-W. "Investigation of the bearing capacity and dynamic-elastic behav-

www.SID.ir

Archive of SID

ior of mechanical stabilization of sandy subgrade using geocells", in Transportation Research Board 86th Annual Meeting (2007).

5. 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 (2012).
6. Tafreshi, S. and Dawson, A. "Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading–comparing use of 3D and planar geotextile", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(5), pp. 434-447 (2010).
7. 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).
8. 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).
9. Latha, G.M. 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).
10. Yuu, J., Han, J., Rosen, A., Parsons, R. and Leshchinsky, D. "Technical review of geocell-reinforced base courses over weak subgrade", *in First Pan American Geosynthetics Conference,* Cancun, Mexico (2008).
11. Itasca, F.D., *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Version 3.0, User's Manual. Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group (2005).
12. Yasrobi, S.S., Rahmaninezhad, S.M. and Farhad, S. "Large physical modeling to optimize the geometrical conditions of geotextile in reinforced loose sand", *in Characterization, Modeling and Performance of Geomaterials: Selected Papers from the 2009 Geohunan International Conference,* Changsha University of Science and Technology, China. ASCE Publications (3-6 August 2009).
13. Ghosh, A. and Bera, A.K. "Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile", *Geotextiles and Geomembranes,* **23**(2), pp. 144-173 (2005).
14. Latha, G.M. and Somwanshi, A. "Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes,* **27**(4), pp. 281-294 (2009).
15. Chung, W. and Cascante, G. "Experimental and numerical study of soil-reinforcement effects on the low-strain stiffness and bearing capacity of shallow foundations", *Geotechnical and Geological Engineering*, **25**(3), pp. 265-281 (2007).
16. Fragaszy, R.J. and Lawton, E. "Bearing capacity of reinforced sand subgrades", *Journal of Geotechnical Engineering*, **110**(10), pp. 1500-1507 (1984).
17. Shin, E., Das, B., Lee, E. and Atalar, C. "Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, **20**(2), pp. 169-180 (2002).
18. Das, B.M., *Principles of Foundation Engineering*, 7th Edition, BRAJA DAS, CengageBrain.com (2010).

www.SID.ir