

مطالعه‌ی تأثیر مشخصات هندسی ژئوسل در ظرفیت باربری پی سطحی مستقر بر خاک مارن اشباع

منصور شریعتی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهدی خداپرست* (دانشیار)

حامد بایسته (استادیار)

امیر خوش‌گفتار (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰
دردی ۲ - ۳۷، شماره ۳/۲، ص. ۱۵۷-۱۶۶، (پادداست نشی)

ساخت پی‌های سطحی روی خاک‌های مارنی مرطوب، موجب به وجود آمدن نشست‌های زیاد و گسیختگی خاک می‌شود. بنابراین استفاده از مسلح‌کننده‌ها، باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. در پژوهش حاضر، با کمک نرم‌افزار آباکوس به مطالعه‌ی تأثیر مشخصات هندسی ژئوسل در ظرفیت باربری پی سطحی مستقر بر خاک مارن اشباع پرداخته و در ادامه، رابطه‌ی جهت همگن‌سازی خاک بهسازی شده با تسلیح ژئوسل ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ژئوسل در نسبت S نشست به B قطر پی بزرگ‌تر از $1/10^\circ$ ، میزان تأثیر ارتفاع ژئوسل در افزایش ظرفیت باربری ملاحظه شده است، که میزان آن در خاک‌های سست‌تر بیشتر بوده است. همچنین با افزایش d اندازه‌ی سلول ژئوسل تا $2/10^\circ$ متر و b طول ژئوسل تا ۲ برابر قطر پی، افزایش ظرفیت باربری پی اتفاق افتاده و پس از آن، ظرفیت باربری تغییر محسوسی نکرده است. با افزایش نسبت طول لایه‌ی ژئوسل می‌توان بیان کرد که طول بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل ۲ برابر قطر پی است.

mansoorshariati71@gmail.com
khodaparast@qom.ac.ir
h.bayesteh@qom.ac.ir
khoshgofar.bl@gmail.com

واژگان کلیدی: ژئوسل، ظرفیت باربری پی سطحی، خاک مارن، همگن‌سازی خاک مسلح، مطالعه‌ی عددی، نرم‌افزار آباکوس.

۱. مقدمه

خاک‌های مارنی که در ایران و نقاط مختلف جهان به وفور یافت می‌شوند، ترکیب‌های رسی و کلسیم کربنات دارند. خاک‌مارن از جمله خاک‌های مسئله‌داری است که در حالت خشک، خصوصیات مناسبی از نظر ظرفیت باربری و مقاومت دارد. اما این خصوصیات در تماس با آب به دلیل حل شدن کربنات و از بین رفتن ذرات تشکیل‌دهنده‌ی مارن به شدت افت پیدا می‌کنند. بنابراین اجرای پی‌های سطحی روی خاک‌های مارنی، موجب بروز مشکلاتی از لحاظ ظرفیت باربری و نشست و در نهایت، باعث آسیب دیدن و یا تخریب سازه می‌شود. مهندسان برای احداث سازه‌های جدید بر بستر خاک‌های مارنی در مواردی از روش‌های جایگزینی خاک مارن با خاک مناسب و متراکم استفاده می‌کنند، که در بسیاری از پروژه‌ها صرفه‌ی اقتصادی ندارد. بنابراین از روش‌هایی چون بهسازی با ستون سنگی و همچنین مسلح‌سازی خاک با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها، که عمدتاً شامل ژئوگریدها و ژئوسل‌هاست، بهره می‌برند. در روند تسلیح خاک با ژئوگریدها، قرار گرفتن دانه‌های خاک در بین شبکه‌های ژئوگرید، باعث درگیری دانه‌های خاک و ژئوگرید می‌شود و با

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۹/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱/۱۴، پذیرش ۱۴۰۰/۲/۲۴

DOI:10.24200/J30.2021.57067.2892

مهم‌ترین آنها اشاره شده است.^[۵] مندل و گوپتا^۱ (۱۹۹۴)، اثر اندازه و ارتفاع سلول ژئوسل را در یک سیستم خاک

دولایه، که شامل یک لایه ماسه روی بستری از جنس رس دریایی واقع شده است، با مطالعه‌ی آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند با افزایش اندازه‌ی سلول ژئوسل، میزان نشست بیشتر می‌شود؛ اما با افزایش ارتفاع سلول، میزان نشست کاهش می‌یابد.^[۶] دس ۲ و همکاران (۲۰۰۱)، نیز با مطالعه‌ی آزمایشگاهی نشان دادند عرض بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل حدود ۴ برابر عرض پی است و برای رسیدن به بهترین بهسازی، قسمت بالای لایه‌ی ژئوسل باید در فاصله‌ی ۱/۰ عرض پی از زیر پی قرار گیرد.^[۷]

همچنین چن^۳ و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهش خود ملاحظه کردند که چسبندگی به وجود آمده ناشی از تسلیح نمونه‌ها با ژئوسل، با تغییر اندازه، تعداد و شکل سلول‌های ژئوسل تغییر می‌کند و این تغییر در چسبندگی نسبت به اندازه‌ی سلول حساسیت بیشتری دارد. از میان شکل‌های مختلف سلول‌های ژئوسل، سلول‌های دایره‌ی بیشتین و سلول‌های شش‌گوشه کمترین چسبندگی را در نمونه ایجاد می‌کنند. همچنین با تسلیح ژئوسل، تغییر محسوسی در مقدار زاویه‌ی اصطکاک نمونه‌ها ایجاد نشده است. فقط در نمونه‌های مسلح شده با سلول‌های شش‌گوشه، زاویه‌ی اصطکاک اندکی افزایش یافته است، که ایشان علت آن را وجود تعداد زیاد گوشه در سلول‌ها عنوان کردند. و نیز دریافتند که با افزایش تنش همه‌جانبه‌ی اعمال شده در آزمایش‌های سه‌محوری، میزان اثرگذاری ژئوسل کاهش می‌یابد.^[۸]

هگد و سیتارام^۴ (۲۰۱۳)، با مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی، تأثیر افزودن یک لایه‌ی ژئوگرید زیر لایه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری و نشست پی را بررسی کردند و دریافتند که با تسلیح بستر پی با ژئوسل، ظرفیت باربری برای بستر ماسه‌ی ۲/۴ برابر و برای بستر رسی، ۳/۸ برابر افزایش می‌یابد. همچنین با افزودن یک لایه‌ی ژئوگرید زیر لایه‌ی ژئوسل، ظرفیت باربری در بستر ماسه‌ی ۳/۲ برابر و در بستر رسی، ۶/۲ برابر نسبت به حالت غیرمسلح افزایش می‌یابد.^[۹] همچنین ایشان نشان دادند که ظرفیت باربری با پارامترهایی، نظیر: ارتفاع لایه‌ی ژئوسل، مدول کشسانی ژئوسل و زاویه‌ی اصطکاک بین سطح ژئوسل و خاک، ارتباط مستقیم و با اندازه‌ی سلول ژئوسل، ارتباط معکوس دارد.^[۱۰]

مهدی پورو و همکاران (۲۰۱۳)، نیز یک شیروانی خاکی مسلح شده با ژئوسل با شبیه‌سازی عددی را از نظر پایداری تحلیل کردند و دریافتند که تسلیح شیروانی خاکی با ژئوسل باعث افزایش ضریب اطمینان و کاهش تغییرشکل‌های جانبی می‌شود و لایه‌ی ژئوسل مثل یک دال عمل می‌کند، که می‌تواند از گسترش سطح گسیختگی جلوگیری و بار را در سطح بسیار وسیع‌تری توزیع کند.^[۱۱]

حسینی و همکاران (۲۰۱۶)، با مدل‌سازی یک لایه خاک دانه‌ی متراکم بر روی یک لایه خاک سست در نرم‌افزار فلک^۵ دوبعدی نشان دادند که بهینه‌ترین بهسازی برای خاک سست، استفاده از ژئوگرید با عرض کافی در مرز دو لایه و عمق بهسازی ۷۵/۰ عرض پی است. همچنین ایشان عنوان کردند استفاده از لایه‌ی مسلح‌کننده با عرض کمتر از ۵ برابر عرض پی، تأثیر زیادی در ظرفیت باربری خاک ندارد.^[۵] فاضلی دهکردی و عبدالکریم نیز با ساخت مدل فیزیکی در مقیاس بزرگ و کوچک، به بررسی تسلیح یک لایه ماسه‌ی سست با استفاده از ژئوسل پرداختند و تغییرشکل لایه‌ی زیرین ماسه‌ی سست و تنش و کرنش به وجود آمده میان ژئوسل و خاک را ارزیابی کردند و دریافتند که افزایش قابل ملاحظه‌ی ظرفیت باربری معادل ۲۲۵٪ و کاهش نشست برابر ۶۶٪ است. ایشان همچنین با همکاری قضای، مطالعات خود را در زمینه‌ی تسلیح خاک‌های ماسه‌ی با استفاده از ژئوسل ادامه دادند و تأثیر مقادیر مختلف چگالی نسبی ماسه (D_r) در میزان بهسازی ماسه ناشی از تسلیح با ژئوسل را مطالعه کردند و بر اساس نتایج به دست آمده، به یک مدل تحلیل ساده شده جهت محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی

دایره‌ی مستقر بر ماسه‌ی مسلح شده با ژئوسل با در نظر گرفتن چگالی نسبی ماسه رسیدند.^[۱۲] دس ۱۲

استرکی و همکاران (۲۰۲۰)، هم به بررسی تأثیر تسلیح بستر ماسه‌ی ریل راه‌آهن با استفاده از ژئوسل، در ظرفیت باربری و نشست بستر ماسه‌ی پرداختند. برای این منظور، جهت مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌هایی با مقیاس ۱ به ۲۰ در دو حالت مسلح و غیرمسلح ساختند و در مدل‌های مسلح از ۱ تا ۵ لایه‌ی ژئوسل استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش تعداد لایه‌ی ژئوسل تا ۴ لایه، ظرفیت باربری افزایش و نشست کاسته شده است، ولی با اضافه کردن لایه‌ی پنجم، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست، مشابه تسلیح با ۴ لایه است.^[۱۳]

گدلا و کارپورابو^۶ (۲۰۲۱)، با طراحی یک سری آزمایش‌های بارگذاری صفحه در مقیاس بزرگ، تسلیح خاک‌های نرم با استفاده از ژئوسل را مطالعه کردند و با در دست داشتن نتایج مطالعات آزمایش‌ها، مدل عددی طراحی شده‌ی خود را در نرم‌افزار فلک سه‌بعدی کالیبره کردند و پارامترهایی، از قبیل: اندازه‌ی سلول ژئوسل، ارتفاع ژئوسل و قطر پی را ارزیابی و برای شبیه‌سازی لایه‌ی خاک نرم، از بلوک‌های ژئوفوم از جنس پلی استایرن منبسط شده (EPC) استفاده کردند. بر اساس نتایج با تسلیح ژئوسل، بار پی در سطح گسترده‌تری توزیع شده بود، که باعث جلوگیری از گسیختگی خاک و کاهش نشست پی شده است. همچنین کاهش اندازه‌ی سلول‌های ژئوسل، نقش اساسی در بهبود ظرفیت باربری داشته و با کاهش اندازه‌ی سلول از ۴۴۵ میلی‌متر به ۳۳۰ میلی‌متر، افزایش ۵۷ درصدی در ظرفیت باربری مشاهده شده است. علاوه بر آن، افزایش ارتفاع ژئوسل باعث افزایش زاویه‌ی توزیع بار شده است.^[۱۴] در حالت مسلح در مطالعات دیگری هم از جمله مطالعات آزمایشگاهی قطبی و همکاران (۲۰۲۰)، جهت شبیه‌سازی بستر روسازی راه از جنس خاک نرم از بلوک‌های ژئوفوم استفاده شده است، که با استفاده از لایه‌ی ژئوسل مسلح شده است.^[۱۵]

در ادامه، به بیان مطالعاتی که در زمینه‌ی بهسازی خاک مارن بوده است، پرداخته شده است. با توجه به این‌که هدف از ارائه‌ی مطالعات انجام شده در این زمینه، فقط بیان روش استفاده شده جهت بهسازی خاک مارن است، بنابراین فقط به بیان روش بهسازی مارن اکتفا شده است.

العمودی^۷ و همکاران (۲۰۲۰)، استفاده از آهک هیدراته و سیمان پرتلند برای تثبیت خاک مارن عربستان را بررسی کرده‌اند.^[۱۷] قبادی^۸ و همکاران (۲۰۱۴)، نیز برای بهسازی خاک مارن منطقه‌ی همدان و قم از روش تثبیت با آهک استفاده کرده و تأثیر تغییرات PH در پارامترهای مقاومت برشی خاک مارن را بررسی کرده‌اند.^[۱۸] ابراهیم‌نژاد صدیق و مرادی (۲۰۱۷)، به بررسی بهسازی خاک مارن تبریز با استفاده از آهک پرداختند و با استفاده از آزمایش تک‌محوری، شاخص خمیری و پتانسیل تورم خاک مارن را ارزیابی کردند.^[۱۹] خوشبخت و همکاران (۲۰۱۹)، نیز بهسازی خاک مارن با روش الکترواسمزی را بررسی و مقاومت خاک در طول چرخه‌ی انجماد و ذوب شدن مطالعه کردند.^[۲۰]

مرور نتایج به دست آمده از مطالعات مختلف، که عمدتاً بر روی خاک‌های ماسه‌ی بوده است، نشان می‌دهد با مسلح‌سازی خاک توسط ژئوسل، ظرفیت باربری خاک افزایش می‌یابد و با تغییر مشخصات هندسی و رفتاری ژئوسل و نوع خاک، ظرفیت باربری تغییر می‌کند. از سوی دیگر، با وجود فراوانی لایه‌های خاک مارنی در ایران و سایر نقاط جهان، لزوم بهسازی خاک مارن افزایش می‌یابد. با بررسی مطالعات انجام شده در مورد خاک مارن قم، که به صورت مستند در دسترس است، مشاهده می‌شود که علاوه بر مواردی که بیان شد، مطالعات مختلف زمین‌شناسی نیز در مورد خاک مارن صورت گرفته است، که به بررسی لایه‌های تشکیل‌دهنده

است. شرایط مرزی برای دو صفحه‌ی قائم دیگر، که روی محور تقارن نبودند، به این شکل بوده است که درجه‌های آزادی جابه‌جایی فقط در دو راستای افقی بسته شده و درجه‌ی آزادی در راستای قائم باز بوده است. درجه‌های آزادی جابه‌جایی در صفحه‌ی بی که در کف مدل قرار داشت، در هر سه راستا مقید شده‌اند. بارگذاری نیز به صورت جابه‌جایی محل استقرار پی در جهت نیروی گرانش انجام شده است، که در مدل آزمایشگاهی که مبنای صحت‌سنجی مدل عددی است، این مقدار برابر ۲۵٪ قطر پی انتخاب شده است.^{[۲۲] و [۲۳]}

همچنین در مدل مسلح، از المان با روش انتگرال‌گیری کامل و در مدل غیرمسلح، از المان با روش انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده شده است. بنابراین، برای المان‌های خاک در نرم‌افزار آباکوس، برای حالت مسلح و حالت غیرمسلح به ترتیب المان‌های C3D4R و C3D4P انتخاب شده‌اند. از سوی دیگر، با توجه به این که در مدل انتخابی برای صحت‌سنجی مدل عددی، ژئوسل با المان سه‌ضلعی مش‌بندی شده است، بنابراین در مطالعه‌ی حاضر نیز برای مش‌بندی لایه‌ی ژئوسل، از المان مثلثی سه‌نقطه‌ی استفاده شده است، که در نرم‌افزار آباکوس با نام S3 شناخته می‌شود.^[۲۴] برای تعریف شرایط تنش اولیه در خاک، مقادیر تنش قائم اولیه برای دو تراز لایه‌ی خاک، یکی سطح خاک و دیگری پایین‌ترین قسمت لایه‌ی خاک، با توجه به وزن مخصوص مؤثر خاک تعریف شده است. همچنین برای محاسبه‌ی ضریب فشار افقی خاک، با توجه به این که خاک در حالت اشباع قرار داشت و در این حالت زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک برابر صفر است، از رابطه‌ی تجربی ارائه شده‌ی ماساراش رابطه‌ی ۱ استفاده شده است، که بر اساس شاخص حالت خمیری تعریف شده است:^[۲۵]

$$k_0 = 0.44 + 0.0042PI \quad (1)$$

به منظور بررسی اثر مش‌بندی در مدل، هندسه‌ی مدل عددی با دو وضعیت مش‌بندی عادی و مش‌بندی ریزتر مدل شده است. بخش خاک، در مدل با مش‌بندی عادی و در مدل با مش ریزتر، به ترتیب ۵۴° و ۱۵۳° المان داشته است. همچنین قطعه‌ی ژئوسل، در مدل عددی عادی و مدل با مش ریزتر، به ترتیب ۳۴۵۶° و ۶۶۳° المان داشت. در شکل ۱، تصویر مش‌بندی عادی مشاهده می‌شود. با بررسی نتایج به دست آمده ملاحظه شد که با کوچک شدن اندازه‌ی مش، در نسبت نشست معادل $S/B = 0.25$ ، که در آن S نشست پی و B قطر پی است، مدل با مش ریزتر، حدود ۵/۵٪ از نتایج مدل عادی دقت کمتری دارد. بر این اساس می‌توان گفت که کوچک شدن اندازه‌ی المان‌های مش‌بندی، باعث تغییر دقت چندانی در نتایج نشده است. به همین منظور در مدل‌سازی‌های استفاده شده در پژوهش حاضر از مدل با مش عادی با مدل رفتاری خاک موهر - کلمب و همچنین مدل رفتاری ژئوسل به صورت کشسان خطی استفاده شده است، که مشخصات خاک مارن و ژئوسل مدل سازی شده در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات خاک مارن از نتایج مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌هایی از خاک مارن قم^[۲۶] و مشخصات هندسی و مکانیکی ژئوسل بر اساس کاتالوگ‌های ارائه شده توسط شرکت‌های تولیدکننده‌ی ژئوسل انتخاب شده است.^[۲۷]

۲.۲. صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی مدل عددی از لحاظ مناسب بودن نوع المان انتخاب شده برای خاک و ژئوسل، اندرکنش بین خاک و ژئوسل، شرایط مرزی و بارگذاری، یک مدل آزمایشگاهی مبنای مدل‌سازی قرار گرفت تا نتایج مدل عددی بر اساس نتایج یک آزمایش آزمایشگاهی محک زده شود. به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی

از لحاظ دوره‌ی تاریخی تشکیل لایه‌ها، کانی‌شناسی، ضخامت لایه‌ها، فسیل‌های موجود در لایه‌ها و غیره پرداخته‌اند.^{[۲۱] و [۲۲]} بنابراین با توجه به آنچه ارائه شد، می‌توان بیان کرد که تاکنون جهت بهسازی خاک مارن، به خصوص خاک مارن شهر قم، با استفاده از روش تسلیخ خاک با ژئوسنتتیک‌ها مانند ژئوگرید و ژئوسل، مطالعات قابل اعتمادی انجام نشده است. همچنین در خصوص همگن‌سازی محیط خاک مسلح شده با ژئوسل و ارائه‌ی روابط مربوط به همگن‌سازی و تخمین پارامترهای مقاومتی محیط همگن شده، تاکنون مطالعات کافی صورت نگرفته است. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر، توسعه‌ی روش‌های عددی در مدل‌سازی خاک‌های مارنی با استفاده از نرم‌افزار توانمند آباکوس^۹ برای بررسی تأثیر مشخصات هندسی ژئوسل در ظرفیت باربری بستر از جنس خاک مارن اشباع است. لذا با مدل‌سازی ژئوسل با مقادیر متفاوت طول، قطر و ارتفاع سلول، مقادیر ظرفیت باربری پی سطحی بحث و بررسی شده است. در انتها، نیز رابطه‌ی جهت تخمین مقاومت برشی معادل خاک بستر پی مسلح شده با ژئوسل ارائه شده است.

۲. روش پژوهش

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بررسی تأثیر مشخصات هندسی ژئوسل در افزایش ظرفیت باربری پی سطحی مستقر بر خاک مارن اشباع و با بهره‌گیری از ماشین محاسباتی مرکز انفورماتیک دانشگاه قم، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس در طی دو گام تحلیلی استفاده شده است. عملیات تحلیل مدل، با گام ژئواستاتیک آغاز شد، که هدف آن اعمال وزن لایه‌های خاک، برقراری تعادل تنش میان لایه‌های خاک در حالت سکون و ناشی از وزن لایه‌های خاک و همچنین محاسبه‌ی تنش و تغییرمکان در این شرایط بوده است. پس از پایان گام اول، در گام دوم با استفاده از حل‌گر استاتیک - جنرال، بارگذاری ناشی از اعمال اثر پی بر بستر پی انجام شده است.

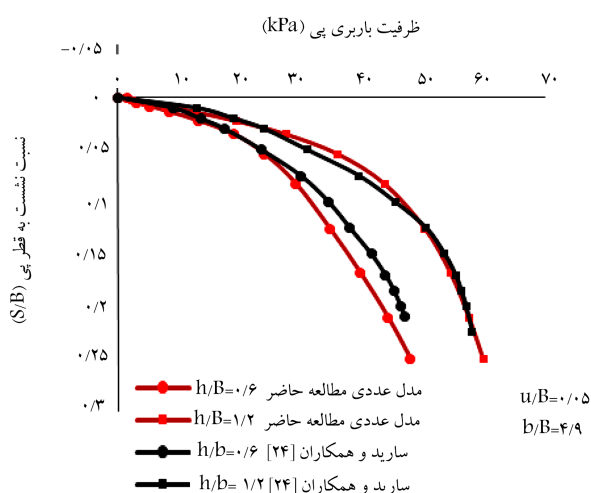
۲.۱. مشخصات مدل المان محدود

در عملیات مدل‌سازی، با توجه به این که تنش‌ها و تغییرشکل‌های قطعه‌ی پی مد نظر نبوده است، پی به صورت قطعه‌ی بتنی مدل‌سازی نشده و فقط آثار آن در سایر اجزاء مدل در نظر گرفته شده است. برای این منظور به تمامی گره‌های محل استقرار پی، نشست یکسانی اعمال شده است. روند تحلیل مدل طی دو گام صورت گرفته و عملیات تحلیل آن، با گام ژئواستاتیک آغاز شده است. پس از پایان گام اول، عملیات تحلیل با وارد شدن در گام دوم ادامه پیدا کرده است، در این گام با استفاده از حل‌گر استاتیک - جنرال^{۱۰}، بارگذاری ناشی از اعمال اثر پی در بستر پی انجام شده است. این بارگذاری به صورت تغییرمکان بستر پی در جهت نیروی گرانش بوده است.

بنابر مطالعه‌ی تفرشی و همکاران (۲۰۱۷)، در زمینه‌ی تسلیخ خاک با ژئوسل، برای تعریف اندرکنش میان ذرات خاک و ژئوسل، از قید Embedded region استفاده شده است.^[۲۳] همچنین به منظور کاهش هزینه‌ی محاسباتی، با توجه به تقارن هندسه‌ی مدل مشابه پژوهش حسینی و همکاران (۲۰۱۶)، فقط یک چهارم از محیط خاک و شالوده‌ی دایروی شکل مدل‌سازی شده است.^[۲۵] برای تعریف شرایط مرزی دو صفحه‌ی بی، که روی محور تقارن قرار گرفته‌اند، درجه‌های آزادی جابه‌جایی فقط در جهت عمود بر محور تقارن مقید شده‌اند، به این گونه که درجه‌ی آزادی جابه‌جایی برای صفحه‌ی بی که روی محور تقارن X قرار گرفته بود، فقط در جهت عمود بر محور X مقید شده است. همچنین برای صفحه‌ی بی که روی محور تقارن Y قرار داشت، درجه‌ی آزادی جابه‌جایی فقط در جهت عمود بر محور Y مقید شده

جدول ۱. مشخصات خاک مارن اشباع و ژئوسل مدل‌سازی شده در پژوهش حاضر.

شماره	پارامتر	واحد	خاک مارن	ژئوسل
۱	وزن مخصوص (γ)	kN/m^3	۱۹ / ۴۱	۹ / ۵
۲	مدول یانگ (E)	MPa	۱۵	۲۰۰
۳	چسبندگی (C)	kPa	۵۰	-
۴	ضریب پواسون (ν)	-	۰ / ۴۹	۰ / ۳



شکل ۲. مقایسه‌ی ظرفیت باربری، حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی در مطالعه‌ی حاضر و نتایج آزمایش سارید و همکاران، [۲۴] (S: نشست پی، B: قطر پی، h: ارتفاع ژئوسل، u: عمق مدفون ژئوسل و b: طول ژئوسل).

در شکل ۲، نتایج صحت‌سنجی منحنی ظرفیت باربری پی، در حالت استفاده از ژئوسل به طول $4/9$ برابر قطر پی و با نسبت عمق مدفون $u/B=0/5$ و نسبت ارتفاع $h/B=0/6$ ، $1/2$ ، مشاهده می‌شود. بر اساس مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در پژوهش حاضر با نتایج مطالعات سارید و همکاران می‌توان عنوان کرد که مدل‌سازی عددی دقت مناسبی دارد و نتایج حاصل، قابل اطمینان است. عدم تطابق کامل در قسمت‌هایی از دو نمودار ارائه شده است، که می‌تواند ناشی از تفاوت در اندازه و تعداد المان‌های مش‌بندی خاک و ژئوسل و همچنین تفاوت در اندرکنش تعریف شده بین خاک و ژئوسل باشد.

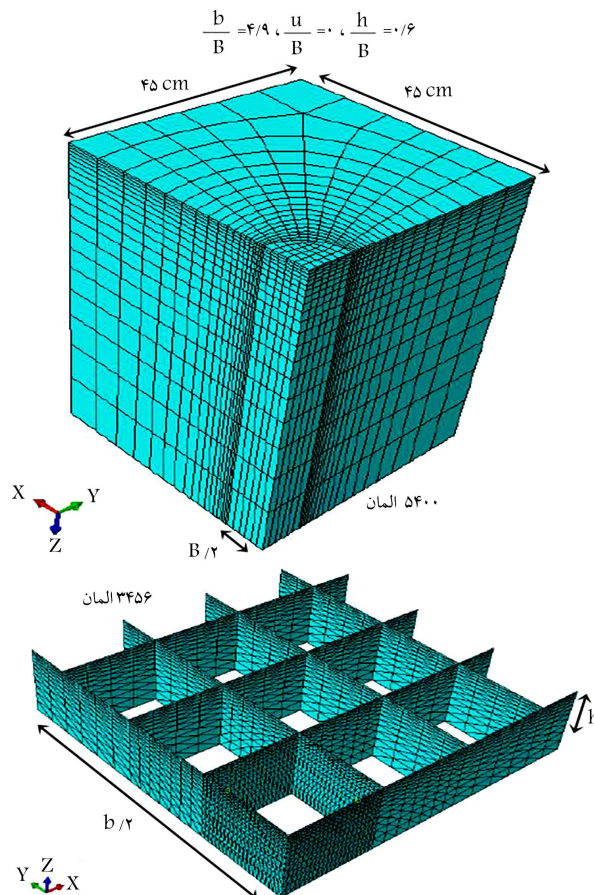
۳. نتایج تحلیل عددی و تحلیل پارامتری

با بررسی نتایج مطالعات انجام شده در خصوص تسلیح خاک با ژئوسل می‌توان بیان کرد که در اثر تسلیح خاک، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. حال با تغییر مشخصات هندسی ژئوسل، میزان افزایش ظرفیت باربری تغییر می‌کند.

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی تأثیر مشخصات هندسی ژئوسل، از جمله: ارتفاع، اندازه و طول ژئوسل در افزایش ظرفیت باربری پی سطحی مستقر بر خاک مارن اشباع پرداخته شده است. به همین منظور همان‌طور که در جدول ۳ ارائه شده است، مدل‌های مختلفی ساخته شده است، که در آنها بعضی از پارامترها به عنوان پارامتر ثابت و بقیه به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در انتهای مطالعه‌ی حاضر، یک رابطه جهت تخمین ظرفیت باربری پی سطحی بر بستر خاک مارن اشباع ارائه شده است.

۱.۳. بررسی اثر ارتفاع ژئوسل در ظرفیت باربری پی سطحی

ژئوسل‌هایی که در زمینه‌ی بهسازی خاک استفاده می‌شوند، معمولاً ارتفاعی برابر $75/0$ ، $1/0$ ، $15/0$ و $2/0$ متر دارند، که هرکدام به فراخور میزان بهسازی مورد انتظار از ژئوسل و شرایط پروژه استفاده می‌شوند. به همین منظور برای بررسی تأثیر ارتفاع ژئوسل در ظرفیت باربری پی، ارتفاع ژئوسل‌های مدل‌سازی شده برابر مقادیر ذکر شده انتخاب شد. با توجه به این‌که قطر پی برابر $15/0$ متر بوده است، اگر ارتفاع



شکل ۱. قطعات مش‌بندی شده‌ی خاک و ژئوسل در تحلیل مش‌بندی عادی (B) قطر پی، h ارتفاع ژئوسل، u عمق مدفون ژئوسل و b طول ژئوسل است).

جدول ۲. مشخصات خاک رس و ژئوسل استفاده شده در پژوهش سارید و همکاران. [۲۴]

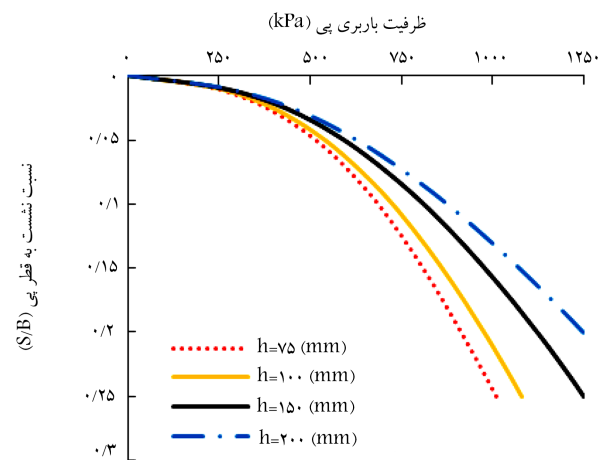
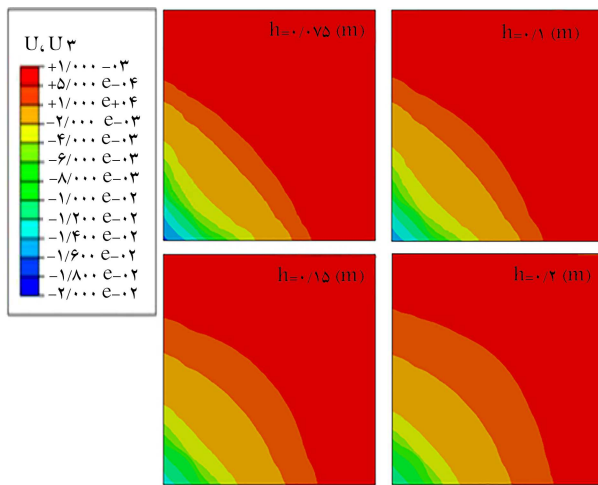
شماره	پارامتر	واحد	خاک مارن	ژئوسل
۱	وزن مخصوص (γ)	kN/m^3	۱۸ / ۹۵	۹ / ۵
۲	مدول یانگ (E)	MPa	۰ / ۵	۱۸۳
۳	چسبندگی (C)	kPa	۵ / ۶	-
۴	ضریب پواسون (ν)	-	۰ / ۵	۰ / ۳

عددی نیز از مطالعات آزمایشگاهی سارید^{۱۱} و همکاران استفاده شده است. ایشان برای انجام آزمایش از خاک رس اشباع با ارتفاعی برابر 600 میلی‌متر و سطح مقطعی به شکل مربع با اضلاع 900 میلی‌متر و برای بارگذاری از یک صفحه‌ی فولادی دایره‌یی به قطر 150 میلی‌متر و ضخامت 30 میلی‌متر استفاده کرده‌اند. مشخصات هندسی ژئوسل و خاک بستر مسلح‌شده‌ی پی در جدول ۲ ارائه شده است. [۱۲]

جدول ۳. جدول مشخصات مدل‌های عددی ساخته شده در پژوهش حاضر (B: قطر پی، h: ارتفاع ژئوسل، u: عمق مدفون ژئوسل، d: اندازه‌ی سلول ژئوسل و b: طول ژئوسل است).

تعداد مدل	مشخصات	پارامتر مورد بررسی
۴	$h = 0/075, 0/1, 0/15, 0/2(m)$ $d = 0/22(m), b = 0/66(m), u/B = 0$	ارتفاع ژئوسل * م ** ث
۹	$h = 0/1, 0/15, 0/2(m) C_u = 10, 25, 50 (kPa)$ $d = 0/22(m), b = 0/66(m), u/B = 0$	ارتفاع ژئوسل و چسبندگی م ث
۶	$d = 0/1, 0/15, 0/2, 0/22, 0/24, 0/3(m)$ $b = 0/66(m), h = 0/1(m), u/B = 0/5$	اندازه‌ی سلول ژئوسل م ث
۵	$b = 0/2, 0/3, 0/4, 0/5, 0/6(m)$ $d = 0/1(m), h = 0/2(m), u/B = 0$	طول ژئوسل م ث
۲۰	$b = 0/2, 0/3, 0/4, 0/5(m), h = 0/75, 0/1, 0/15, 0/2(m)$ $d = 0/22(m), u/B = 0$	ارائه‌ی رابطه م ث

* م پارامتر متغیر، ** ث پارامترهای ثابت.



شکل ۴. کانتورهای تغییرشکل قائم خاک در مدل مسلح شده با ژئوسل با ارتفاع برابر ۰/۰۷۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲ متر.

شکل ۳. تغییرات ظرفیت باربری پی در برابر نسبت نشست به قطر پی به ازاء ارتفاع‌های متفاوت ژئوسل (S: برابر نشست پی، B: قطر پی و h: ارتفاع ژئوسل).

ارتفاع ژئوسل می‌توان گفت که تغییرات جزئی ارتفاع ژئوسل در ظرفیت باربری تأثیر چندانی ندارد. سایر پژوهشگران چون مندال و همکاران (۱۹۹۴)،^[۶] نیز افزایش ظرفیت باربری با افزایش ارتفاع ژئوسل را گزارش کرده‌اند. علاوه بر آن، گدلا و کارپورایو (۲۰۱۲)،^[۱۷] نیز تأثیر افزایش ارتفاع ژئوسل در ظرفیت باربری پی را مطالعه کرده و نشان داده‌اند که افزایش ارتفاع ژئوسل با افزایش زاویه‌ی توزیع بار، از ۲۴ درجه برای حالت غیرمسلح به ۵۳ درجه برای حالت مسلح، سبب بهبود ظرفیت باربری و جلوگیری از گسیختگی خاک می‌شود.

ژئوسل‌ها بر اساس عدد بدون بُعد h/B ، که h ارتفاع ژئوسل و B قطر پی است، بیان شود، برای ارتفاع ژئوسل‌ها با مقادیر ۰/۰۷۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲ متر، نسبت h/B به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۶۷، ۱ و ۱/۳۳ خواهد بود.

در شکل ۳، نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی سطحی مسلح شده با ژئوسل بر حسب مقدار نسبت نشست به قطر پی، برای ۴ ارتفاع مختلف ژئوسل مشاهده می‌شود، که مطابق آن برای مقدار مشخصی از S/B ، با افزایش ارتفاع ژئوسل، ظرفیت باربری پی افزایش یافته است. البته برای مقادیر S/B کوچک‌تر از ۰/۲، افزایش ارتفاع ژئوسل تأثیری در ظرفیت باربری نداشته است، اما با افزایش مقدار S/B ، به خصوص در محدوده‌ی مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۱، میزان تأثیر ارتفاع ژئوسل در ظرفیت باربری قابل ملاحظه شده است.

۲.۳. بررسی اثر اندازه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری پی سطحی

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بررسی میزان تأثیر اندازه‌ی سلول‌های ژئوسل در ظرفیت باربری پی، مقادیر انتخابی برای اندازه‌ی سلول ژئوسل، برابر مقادیر کوچک‌تر، برابر و بزرگ‌تر از قطر پی در نظر گرفته شدند. اندازه‌ی سلول کوچک‌تر از قطر پی، برابر ۰/۱ متر انتخاب شد، زیرا در بسیاری از مطالعات انجام شده در حوزه‌ی تسلیح بستر پی با ژئوسل اندازه‌ی سلول ژئوسل، برابر ۲/۳ اندازه‌ی قطر پی است.^{[۱۳] و [۲۸]}

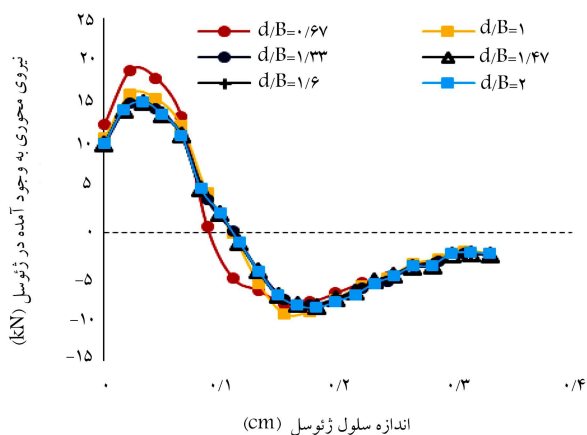
با افزایش ارتفاع ژئوسل، میزان تغییرشکل قائم خاک در تراز خاصی از زیر پی کاهش یافته است. با توجه به این‌که کاهش میزان تغییرشکل قائم خاک در یک تراز مشخصی از خاک، نشان‌دهنده‌ی افزایش ظرفیت باربری خاک است، بنابراین می‌توان بیان کرد که افزایش ارتفاع ژئوسل موجب بهبود ظرفیت باربری خاک می‌شود. مطابق شکل ۴، با توجه به کاهش اندک تغییرشکل قائم خاک ناشی از افزایش

متفاوت مشاهده می‌شود، که مطابق آن می‌توان گفت اندازه‌ی سلول ژئوسل با نیروی محوری به وجود آمده در ژئوسل رابطه‌ی معکوس دارد. یعنی هر چه اندازه‌ی سلول ژئوسل کاهش یابد، نیروی محوری بیشتری در ژئوسل بسیج می‌شود و صلبیت خاک در ناحیه‌ی که با ژئوسل مسلح شده افزایش پیدا می‌کند، باعث کنترل نشست پی و افزایش ظرفیت باربری پی می‌شود.

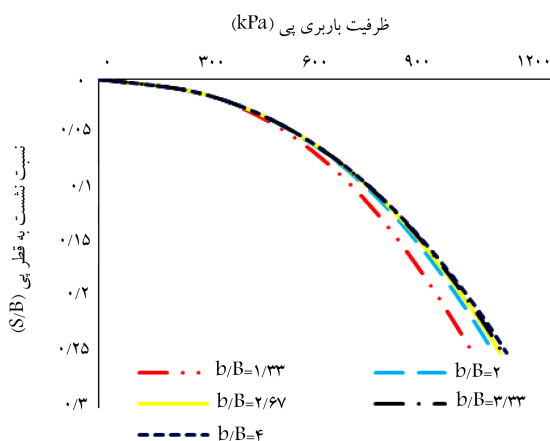
۳.۳. بررسی اثر طول ژئوسل در ظرفیت باربری پی سطحی

برای بررسی میزان و نحوه‌ی تأثیر تغییرات طول لایه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری پی، تعدادی مدل عددی با ژئوسل‌هایی با طول‌های متفاوت ساخته شدند، که در آنها، ارتفاع و اندازه‌ی سلول ژئوسل برابر 1° متر و مدول کشسانی و مقاومت کششی ژئوسل به ترتیب برابر 2° و 1° مگاپاسکال در نظر گرفته شدند. در نهایت، یگانه متغیر مسئله، طول لایه‌ی ژئوسل بوده است. در پژوهش حاضر، برای بیان طول لایه‌ی ژئوسل‌ها از عدد بدون بُعد b/B که در آن b طول لایه‌ی ژئوسل و B قطر پی است، استفاده شده است. بر این اساس، مقادیر b/B انتخاب شده برای لایه‌ی ژئوسل به ترتیب برابر $1/33$ ، $2/67$ ، $3/33$ ، 4 و 2 بوده است.

در شکل ۸، نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی مسلح شده با ژئوسل بر اساس



شکل ۷. تغییرات مقدار نیروی به وجود آمده در طول ژئوسل با اندازه‌ی سلول‌های متفاوت (B: قطر پی و d: اندازه‌ی سلول ژئوسل است).



شکل ۸. تغییرات ظرفیت باربری پی در برابر نسبت نشست به قطر پی به ازاء اندازه‌ی b/B متفاوت لایه‌ی ژئوسل (S: برابر نشست پی، b طول لایه‌ی ژئوسل و B قطر پی است).

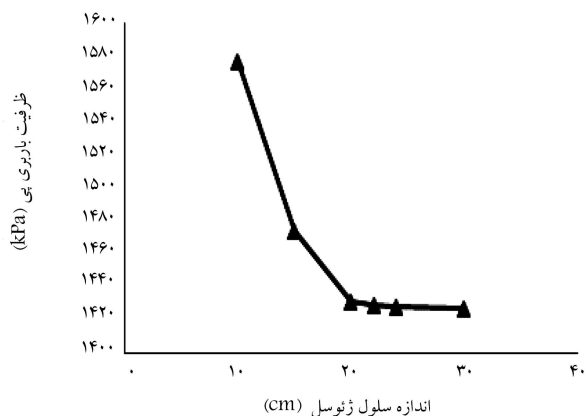
ژئوسل با سلول‌های بزرگ‌تر از قطر پی نیز مقادیر $2^\circ/22$ ، $24^\circ/24$ ، $3^\circ/3$ متر برای اندازه‌ی سلول انتخاب شدند، چون ژئوسل‌های رایج استفاده شده در پروژه‌های عمرانی اغلب با ابعاد مذکور تولید می‌شوند.

همچنین جهت جلوگیری از تأثیرگذاری تغییر اندازه‌ی مش در نتایج مدل‌سازی، برای مش‌بندی ژئوسل در تمام حالت‌ها، اندازه‌ی مش ثابت بوده و با کوچک شدن اندازه‌ی سلول، اندازه‌ی مش ریزتر نشده است.

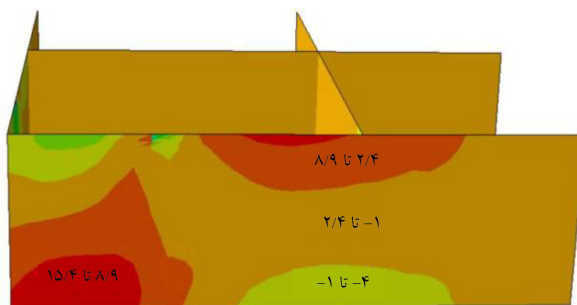
در شکل ۵، نمودار ظرفیت باربری پی نسبت به اندازه‌ی سلول ژئوسل مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش اندازه‌ی سلول ژئوسل تا 2° سانتی‌متر (d/B برابر $33/1$)، ظرفیت باربری پی کاهش یافته است، اما در ژئوسل‌های با اندازه‌ی سلول بزرگ‌تر از 2° سانتی‌متر، افزایش اندازه‌ی سلول ژئوسل تأثیر چندانی در ظرفیت باربری پی نداشته است.

مندال و گوپتا نیز برخلاف هگد سیتارام عنوان کردند که با افزایش اندازه‌ی سلول ژئوسل، ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد. [۶ و ۱۰] نتایج مطالعات گدلا و کارپورابو نیز نشان داده است که کاهش اندازه‌ی سلول‌های ژئوسل، نقش اساسی در بهبود ظرفیت باربری دارد و با کاهش اندازه‌ی سلول از 445 میلی‌متر به 330 میلی‌متر، افزایش 57 درصدی در ظرفیت باربری مشاهده می‌شود و لذا پژوهش مذکور نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر را تأیید می‌کند. [۱۷]

نمونه‌ی از توزیع نیروی محوری به وجود آمده در ژئوسل در راستای محور X، برای ژئوسل با اندازه‌ی سلول 2° متر در شکل ۶ مشاهده می‌شود، که مطابق آن بیشترین نیروی محوری به وجود آمده در ژئوسل در ناحیه‌ی زیر پی بسیج شده است، زیرا بیشترین کرنش در ژئوسل در ناحیه‌ی مذکور از مدل رخ داده است. در شکل ۷، نیز تغییرات مقدار نیروی به وجود آمده در طول ژئوسل با اندازه‌ی سلول‌های



شکل ۵. تغییرات ظرفیت باربری پی نسبت به اندازه‌ی سلول ژئوسل.



شکل ۶. کانتورهای نیروی محوری به وجود آمده در ژئوسل در راستای محور X برحسب کیلونیتون.

۴.۳. ارائه‌ی رابطه‌ی تخمین ظرفیت باربری پی سطحی با بستر

مارن اشباع مسلح شده با ژئوسل

با توجه به سیستم لایه‌ی خاک مسلح رفتار خاک را می‌توان به دو روش بررسی کرد: (۱) عناصر تشکیل‌دهنده‌ی توده‌ی مسلح به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود و ویژگی‌ها و رفتار هر یک در بررسی رفتار مجموعه لحاظ می‌شود. (۲) روش همگن‌سازی که در آن کل توده به صورت یک محیط همگن یک‌پارچه در نظر گرفته می‌شود. [۲۹] و در مطالعه‌ی حاضر به منظور کاهش هزینه‌ی تحلیل، از روش همگن‌سازی که تحلیلی ساده‌تر و سریع‌تر برای محیط‌های چندلایه دارد، استفاده شده است.

برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی سطحی در شرایطی که خاک در حالت اشباع قرار گرفته باشد، یعنی زاویه‌ی اصطکاک داخلی برابر صفر و همچنین عمق مدفون پی نیز برابر صفر باشد، از رابطه‌ی ۲ که توسط وسیک ارائه شده است، استفاده می‌شود: [۳۱]

$$q_{ult} = 5,14 S_u (1 + s'_c + d'_c - i'_c - g'_c - b'_c) \quad (2)$$

که در آن، S_u مقاومت برشی زهکشی‌نشده‌ی خاک است و علامت پریم (i) مربوط به حالت $\phi = 0$ است.

با توجه به شرایط پی و بارگذاری در پژوهش حاضر، مقادیر پارامترهای i'_c ، d'_c ، g'_c و b'_c برابر صفر است. همچنین مقدار پارامتر s'_c با توجه به هندسه‌ی پی استفاده شده در پژوهش حاضر، برابر $0,2$ است. بنابراین، بر اساس مقادیر مذکور، مقاومت برشی معادل محیط خاک مسلح به صورت رابطه‌ی ارائه می‌شود:

$$S_{uRC} = \frac{q_{ultR}}{5,14 \times 1,2} \quad (3)$$

که در آن، q_{ultR} ظرفیت باربری پی مسلح شده با ژئوسل و S_{uRC} مقاومت برشی معادل با محیط خاک مسلح است. به منظور تولید رابطه‌ی پیشنهادی جهت تخمین مقاومت برشی معادل محیط خاک مسلح شده با ژئوسل بر اساس پارامترهای هندسی ژئوسل، تعدادی مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس طراحی شده است. با توجه به این‌که، ارتفاع ژئوسل و طول لایه‌ی ژئوسل به عنوان دو پارامتر مستقل رابطه‌ی پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین سایر مشخصات هندسی و همچنین مشخصات مکانیکی ژئوسل در تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

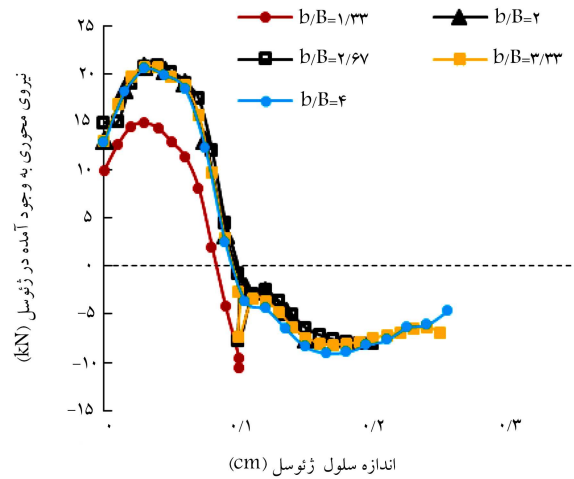
با به دست آمدن مقادیر ظرفیت باربری حاصل از تحلیل ۲۰ مدل عددی طراحی شده برای حالت‌های مختلف تسلیح ژئوسل از لحاظ ارتفاع و طول و بر اساس رابطه‌ی ۳، مقاومت برشی معادل حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی محاسبه شدند. در نهایت با در اختیار داشتن مقادیر ارتفاع و طول لایه‌ی ژئوسل به عنوان دو متغیر مستقل و مقاومت برشی معادل به عنوان متغیر وابسته، با استفاده از تحلیل رگرسیون دومتغیره در نرم‌افزار آماری SPSS، رابطه‌ی پیشنهادی مورد نظر به صورت رابطه‌ی ۴ حاصل شد:

$$S_{uRP} = 65,054b + 584,361h + 99,47 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,9397$$

با جای‌گذاری مقاومت برشی پیش‌بینی شده حاصل از رابطه‌ی ۴ به جای مقاومت برشی معادل با محیط خاک مسلح موجود در رابطه‌ی ۳، می‌توان ظرفیت باربری پی مسلح شده با ژئوسل را تخمین زد، که به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$q_{ultR} = 5,14 \times 1,2 \times (65,054b + 584,361h + 99,47) \quad (5)$$



شکل ۹. تغییرات مقدار نیروی محوری به وجود آمده در لایه‌ی ژئوسل با طول‌های متفاوت (b طول لایه‌ی ژئوسل و B قطر پی است).

مقادیر متفاوت b/B لایه‌ی ژئوسل مشاهده می‌شود که مطابق آن تا نشست معادل S/B برابر $0,4$ ، ظرفیت باربری در تمام حالت‌ها یکسان بوده و افزایش طول لایه‌ی ژئوسل هیچ تأثیری در ظرفیت باربری پی نداشته است. در حالی که با ادامه‌ی روند بارگذاری و افزایش نشست پی، تأثیر تغییر طول لایه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری پی نمایان است و در S/B با مقدار $0,25$ کاملاً مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان بیان کرد، با افزایش طول لایه‌ی ژئوسل از b/B برابر $1/33$ به b/B برابر 2 ، ظرفیت باربری پی افزایش یافته است. لیکن با فراتر رفتن طول لایه‌ی ژئوسل از مقدار b/B برابر 2 ، افزایش طول لایه‌ی ژئوسل باعث بالا رفتن قابل ملاحظه‌ی ظرفیت باربری پی نشده است. بنابراین می‌توان بیان کرد که طول بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل حدوداً 2 برابر قطر پی است.

با مقایسه‌ی روند تغییرات نیروی به وجود آمده در ژئوسل در شکل ۹ با نحوه و میزان تغییرات ظرفیت باربری پی برای ژئوسل متناظر در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در حالتی که ژئوسل کمترین طول را دارد، یعنی b/B برابر $1/33$ ، در محدوده‌ی 0 تا $0,1$ متر فاصله از مرکز پی، نیروی محوری کمتری نسبت به سایر حالت‌ها در ژئوسل بسیج شده است. از طرف دیگر مطابق شکل ۷ واضح است که با همین مقدار b/B ، پی مسلح شده با ژئوسل کمترین مقدار ظرفیت باربری را دارد. در ادامه، با افزایش طول لایه‌ی ژئوسل از b/B برابر $1/33$ به b/B برابر 2 ، افزایش نیروی جذب شده در ژئوسل رخ داده است، اما با افزایش مقدار طول لایه‌ی ژئوسل به مقادیر b/B بزرگ‌تر از 2 ، مقدار نیروی جذب شده در ژئوسل بیشتر نشده است. با مقایسه‌ی مقادیر ظرفیت باربری برای b/B مختلف در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طول لایه‌ی ژئوسل از b/B برابر $1/33$ به b/B برابر 2 ، ظرفیت باربری مشابه با نیروی جذب شده در ژئوسل روند افزایشی داشته و همچنین با افزایش مقدار نسبت طول لایه‌ی ژئوسل به مقادیر b/B بزرگ‌تر از 2 ، ظرفیت باربری پی همانند نیروی جذب شده در ژئوسل دیگر افزایش پیدا نکرده است. بنابراین می‌توان بیان کرد که تغییرات نسبت طول لایه‌ی ژئوسل با روند افزایش نیروی محوری به وجود آمده در ژئوسل، ارتباط دارد و این ارتباط تا زمانی که تغییرات طول لایه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری پی تأثیر داشته باشد، به صورت ارتباط مستقیم است. به این معنی که با افزایش طول لایه‌ی ژئوسل تا حد معینی، نیروی جذب شده در ژئوسل افزایش یافته و صلابت خاک در ناحیه‌ی پی که با ژئوسل مسلح شده است، افزایش می‌یابد و باعث کنترل نشست پی و به عبارت دیگر، افزایش ظرفیت باربری پی می‌شود.

مارن اشباع و همچنین بر مبنای استفاده از ژئوسل با ابعادی که در ابتدای بخش‌های ۱.۱ و ۳.۱ ذکر شده ارائه شده است.

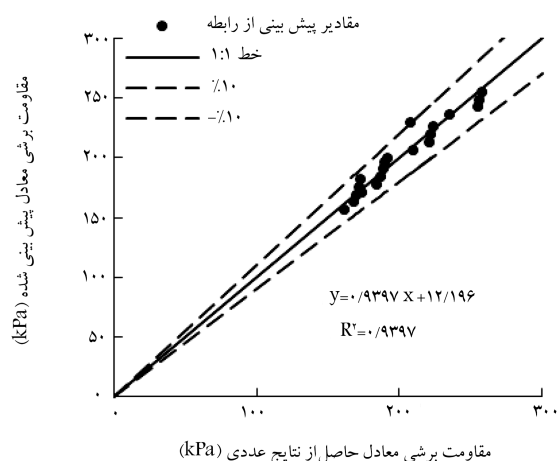
۱- برای مقادیر نسبت نشست S/B کوچک‌تر از $2/10$ ، افزایش ارتفاع ژئوسل تأثیری در ظرفیت باربری نداشته است، اما با افزایش مقدار S/B ، به خصوص در محدوده‌ی مقادیر بزرگ‌تر از $1/10$ ، میزان تأثیر ارتفاع ژئوسل در ظرفیت باربری قابل ملاحظه می‌شود.

۲- با افزایش اندازه‌ی سلول ژئوسل تا 20 سانتی‌متر (S/B برابر $1/33$)، ظرفیت باربری پی کاهش یافته است، اما در ژئوسل‌های با اندازه‌ی سلول بزرگ‌تر از 20 سانتی‌متر، افزایش اندازه‌ی سلول ژئوسل تأثیر چندانی در ظرفیت باربری پی نداشته است. اندازه‌ی سلول ژئوسل با نیروی به وجود آمده در ژئوسل رابطه‌ی معکوس دارد، یعنی هر چه اندازه‌ی سلول ژئوسل کاهش یابد، نیروی بیشتری در ژئوسل بسیج می‌شود و صلبیت خاک در ناحیه‌ی پی که با ژئوسل مسلح شده افزایش می‌یابد، باعث کنترل نشست پی و به عبارت دیگر افزایش ظرفیت باربری پی می‌شود.

۳- تا نسبت نشست معادل S/B برابر $4/10$ ، افزایش طول لایه‌ی ژئوسل هیچ تأثیری در ظرفیت باربری پی نداشته است. در حالی که با ادامه‌ی روند بارگذاری و افزایش نشست پی، تأثیر تغییر طول لایه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری پی نمایان شده و در S/B با مقدار $25/10$ کاملاً مشهود بوده است. همچنین می‌توان گفت، با افزایش نسبت طول لایه‌ی ژئوسل از b/B برابر $1/33$ تا b/B برابر 2 ، ظرفیت باربری پی افزایش یافته است، ولی با فراتر رفتن نسبت طول لایه‌ی ژئوسل از مقدار b/B برابر 2 ، افزایش طول لایه‌ی ژئوسل باعث بالا رفتن قابل ملاحظه‌ی ظرفیت باربری پی نشده است. بنابراین می‌توان گفت طول بهینه‌ی لایه‌ی ژئوسل حدوداً 2 برابر قطر پی است.

۴- تغییرات طول لایه‌ی ژئوسل با روند افزایش نیروی جذب شده در ژئوسل ارتباط داشته و این ارتباط تا زمانی که تغییرات طول لایه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری پی تأثیر دارد، به صورت ارتباط مستقیم بوده است.

۵- بر اساس رابطه‌ی ارائه شده می‌توان گفت که ارتفاع ژئوسل و طول لایه‌ی ژئوسل، با مقاومت برشی معادل محیط خاک مسلح شده با ژئوسل و یا به عبارتی با ظرفیت باربری پی مسلح شده با ژئوسل ارتباط خطی دارند. همچنین میان ارتفاع ژئوسل و طول لایه‌ی ژئوسل به طور هم‌زمان، با مقاومت برشی معادل، رابطه‌ی به شکل چندجمله‌ی درجه‌ی یک وجود دارد، با این توضیح که در رابطه‌ی مذکور تأثیر ارتفاع ژئوسل در ظرفیت باربری پی نسبت به تأثیر طول لایه‌ی ژئوسل در ظرفیت باربری پی بسیار بیشتر بوده است.



شکل ۱۰. نمودار مقاومت برشی معادل پیش‌بینی شده و حاصل از نتایج عددی.

که در آن، b و h به ترتیب طول و ارتفاع ژئوسل بر حسب متر، S_{uRP} مقاومت برشی معادل پیش‌بینی شده بر حسب کیلوپاسکال و q_{ultR} ظرفیت باربری پیش‌بینی شده‌ی پی مسلح شده با ژئوسل، بر حسب کیلوپاسکال است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه‌ی پیشنهادی ضریب همبستگی بالایی دارد، که نشانگر تخمین مقاومت برشی معادل با دقت بالاست. البته باید توجه داشت که رابطه‌ی پیشنهادی در پژوهش حاضر بر اساس نتایج حاصل از مطالعات عددی در مورد یک پی سطحی دایره‌ی با عمق مدفون صفر، با بستری از جنس خاک مارن اشباع و سایر فرضیاتی که در ابتدای بخش کنونی در مورد شرایط هندسی بیان شد، ارائه شده است.

مقادیر محاسباتی مقاومت برشی معادل حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی و مقاومت برشی پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مطابق آن نظر به تجمع نقاط موجود در نمودار در نزدیکی خط $1:1$ ، مقاومت برشی معادل پیش‌بینی شده حاصل از رابطه‌ی ارائه شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی تطابق خوبی دارد. لذا می‌توان بیان کرد نتایج حاصل از پیش‌بینی رابطه‌ی ارائه شده نسبت به نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به طور واضحی کمتر از 10% اختلاف دارند.

۴. نتیجه‌گیری

باید توجه داشت که نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر حاصل از مطالعات عددی در مورد یک پی سطحی دایره‌ی با عمق مدفون صفر، با بستری از جنس خاک

پانویس‌ها

1. Mandal and Gupta
2. Dash
3. Chen
4. Hegde and Sitharam
5. FLAC

6. Ramesh Gedla and Rajagopal Karpurapu
7. Al-amoudi
8. Ghobadi
9. ABAQUS
10. static-general
11. Saride

منابع (References)

- Shariati, M. "Numerical modeling the effect of geometrical and mechanical properties of geocell on the bearing capacity of shallow foundation rested on Qom saturated marl", *M. Sc. Thesis, Qom University, Qom-Iran*, **106**, pp.15-17 (In Persian) (2019) .
- Sitharam, T. and Hegde, A. "Design and construction of geocell foundation to support the embankment on settled red mud", *Geotextiles and Geomembranes*, **41**, pp. 55-63 (2013).
- Zhao, M., Zhang, L., Zou, X. and Zhao, H. "Research progress in two-direction reinforced composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles", *China Journal of Highway and Transport*, **22**(1), pp. 1-10 (2009).
- Koerner, R. "Designing Wh geosynthetics", *PrenticeHal, EngleWood Cifs, NewJersey* (1998).
- Hoseini, S.M.M. and Salehi, M.M. "Evaluation of strip footing behavior resting on geogrid-reinforced soils", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **31.2**(4.1), pp. 83-88 , (In Persian) (2016) .
- Mandal, J. and Gupta, P. "Stability of geocell-reinforced soil", *Construction and Bbuilding Materials*, **8**(1), pp. 55-62 (1994).
- Dash, S.K., Krishnaswamy, N. and Rajagopal, K. "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(4), pp. 235-56 (2001).
- Chen, R.-H., Huang, Y.-W. and Huang, F.-C. "Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression", *Geotextiles and Geomembranes*, **37**, pp. 35-44 (2013).
- Hegde, A. and Sitharam, T. "Experimental and numerical studies on footings supported on geocell reinforced sand and clay beds", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **7**(4), pp. 346-354 (2013).
- Hegde, A. and Sitharam, T. "3-Dimensional numerical modelling of geocell reinforced sand beds", *Geotextiles and Geomembranes*, **43**(2), pp. 171-181 (2015).
- Mehdipour, I., Ghazavi, M. and Moayed, R.Z. "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect", *Geotextiles and Geomembranes*, **37**, pp. 23-34 (2013).
- Dehkordi, P.F. and Karim, U.F.A. "Behaviour of circular footings confined by rigid base and geocell reinforcement", *Arabian Journal of Geosciences*, **13**(20), pp. 1-12 (2020).
- Fazeli Dehkordi, P., Ghazavi, M. and Karim, U.F. "Bearing capacity-relative density behavior of circular footings resting on geocell-reinforced sand", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **25**, pp. 1-25 (2021).
- Astaraki, F., Esmaeili, M. and Reza Roozbini, M. "Influence of geocell on bearing capacity and settlement of railway embankments: an experimental study", *Geomechanics and Geoengineering*, **15**, pp. 1-17 (2020).
- Gedela, R. and Karpurapu, R. "Laboratory and numerical studies on the performance of geocell reinforced base layer overlying soft subgrade", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **7**(1), pp. 1-18 (2021).
- Siabil, S.G., Tafreshi, S.M. and Dawson, A. "Response of pavement foundations incorporating both geocells and expanded polystyrene (EPS) geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, **48**(1), pp. 1-23 (2020).
- Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K. and Al-Kahtani, N.S. "Stabilization of a saudi calcareous marl soil", *Construction and Building Materials*, **24**(10), pp. 1848-1854 (2010).
- Ghobadi, M., Babazadeh, R. and Abdilor, Y. "Utilization of lime for stabilizing marly soils and investigating the effect of pH variations on shear strength parameters", *Journal of Engineering Geology*, **8**(1), pp. 1939-1962 (2014).
- Ebrahimnezhad Sadigh, E.E. and Moradi, G. "Geotechnical properties improvement of disturbed tabriz marl", *Chemical Method*, **22**, pp. 3787-3796 (2017).
- Khoshbakht, E.B., Vakili, A.H., Farhadi, M.S. and et al. "Reducing the negative impact of freezing and thawing cycles on marl by means of the electrokinetical injection of calcium chloride", *Cold Regions Science and Technology*, **157**, pp. 196-205 (2019).
- Yong, R.N. and Ouhadi, V.R. "Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils", *Applied Cclay Science*, **35**(3-4), pp. 238-249 (2007).
- Mohammadi, E., Hasanzadeh-Dastgerdi, M., Ghaedi, M. and et al. "The tethyan seaway iranian plate oligo-miocene deposits (the Qom Formation): distribution of Rupelian (early oligocene) and evaporate deposits as evidences for timing and trending of opening and closure of the tethyan seaway", *Carbonates and Evaporites*, **28**(3), pp. 321-345 (2013).
- Tafreshi, S.M. and Ghotbi, S.A. "Efficiency of geocell reinforcement for using in expanded polystyrene embankments via numerical analysis", *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, **11**(9), pp. 1217-1221 (2017).
- Saride, S., Gowrisetti, S., Sitharam, T. and et al. "Numerical simulation of geocell-reinforced sand and clay", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, **162**(4), pp. 185-198 (2009).
- Ameratunga, J., Sivakugan, N. and Das, B.M. "Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering", *Springer India*, pp.80, Edition Number:1 (2016). DOI: 10.1067/978-81-322-2627-71-ISBN978-81-322-2629-1.
- Karimi, M. "Determination the suitable chemical for improvement the mechanical properties of the Qom marls", *M.Sc. Thesis, Qom University, Qom-Iran*, **132** pp. 46, (In Persian) (2019).

27. Geocells specifications, <http://www.geosakht.com/geosakht-product/geosakht-product-geocell>.
28. Biswas, A., Ansari, M.A., Dash, S.K. and et al. "Behavior of geogrid reinforced foundation systems supported on clay subgrades of different strengths", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **3**, pp.1-10 (2015).
29. Honari, S. and Seyedi Hosseininia, E. "Numerical modeling of reinforced soil walls using multiphase approach and hyperbolic constitutive model", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, **28**(1), pp. 81-98 (2016) (in Persian).
30. Hosseininia, E.S. and Ashjaee, A. "Numerical simulation of two-tier geosynthetic-reinforced-soil walls using two-phase approach", *Computers and Geotechnics*, **100**, pp. 15-29 (2018).
31. Bowles, J.E. "Foundation analysis and design", *McGraw-hill, Inc. singapore* 5th edition, pp-220 (1996).