



بررسی عددی تاثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی سطحی تحت بار مایل و تعیین پارامترهای بهینه لایه تقویت کننده پی با استفاده از روش المان محدود سه بعدی

میثم قاسمی زاده، منصور پرویزی*، مسعود رابطی مقدم

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:

تقویت پی
ابعاد بهینه
مسلح کننده ژئوسنتتیک
مدل سازی عددی
PLAXIS 3D

خلاصه: امروزه مشکل کمبود زمین در مناطق شهری ضرورت استفاده از زمین‌هایی با خاک‌های سست را مطرح ساخته است. حل مشکلات پی‌سازی در زمین‌های سست از دغدغه‌های اصلی مهندسين ژئوتکنیک می‌باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از مسلح کننده‌های پلیمری مانند ژئوسل در مهندسی ژئوتکنیک به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در مطالعه حاضر به بررسی اثر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی سطحی قرار گرفته روی خاک ماسه‌ای، تحت بار مایل با استفاده از نرم‌افزار المان محدود 3D PLAXIS پرداخته شده است. بدین طریق که پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تاثیر پارامترهایی مانند وجود نیروی برشی و همچنین چیدمان بهینه لایه مسلح کننده بر ظرفیت باربری پی مطالعه شده است. نتایج حاصل از آنالیز در قالب نمودار ترسیم و بر اساس آن ابعاد بهینه و همچنین عمق جایگذاری لایه تقویت کننده ژئوسل تعیین شده است. نتایج تحلیل‌ها بیان می‌کند که افزودن لایه ژئوسل باعث افزایش ۵۰٪ ظرفیت باربری در حالت بار مایل و ۲۱۰٪ ظرفیت باربری در حالت بار قائم شده است. میزان این اثرگذاری تابع چیدمان لایه مسلح کننده می‌باشد. همچنین عمق جایگذاری، عرض و ارتفاع بهینه لایه مسلح کننده برای حصول بیشترین ظرفیت در حالت بار مایل در مطالعه حاضر به ترتیب برابر با 0,025B، 4B و 0,6B تعیین گردید.

۱- مقدمه

دش و همکاران در سال ۲۰۰۴ به بررسی یک مدل آزمایشگاهی با عنوان مطالعاتی روی پی‌های دایره‌ای قرار گرفته روی ماسه تقویت شده ژئوسلی پرداختند. خاک بستر تحت بارگذاری یکنواخت پی دایره‌ای قرار داشته و باربری و نشست پی و تغییر شکل خاک در طول آزمایش اندازه‌گیری شده است. تاثیر عرض و ارتفاع لایه ژئوسل و همچنین یک لایه ژئوگرید در زیر لایه ژئوسل بر عملکرد کلی سیستم، به صورت سیستماتیک از طریق یک سری آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد استفاده از ژئوسل باعث افزایش ظرفیت باربری و همچنین کاهش نشست می‌شود. آن‌ها همچنین عرض بهینه لایه ژئوسل را ۵ برابر قطر و ارتفاع بهینه را ۲ برابر قطر پی به دست آوردند [۱]. پوخارل و همکاران در سال ۲۰۱۰ خاک تقویت شده با ژئوسل را مورد بررسی قرار دادند و در پایان دریافتند ژئوسل با شکل چشمه دایره‌ای دارای ظرفیت تحمل بیشتری نسبت به ژئوسل با شکل چشمه‌های بیضی می‌باشد [۲]. دش و همکاران در سال ۲۰۱۲ مطالعه‌ای با عنوان اثر نوع ژئوسل بر مکانیزم باربری فونداسیون‌های تقویت شده ژئوسلی ارائه دادند و برای ساخت ژئوسل از ژئوگریدهای مختلف

در چند دهه گذشته به دلیل شهرنشینی و صنعتی شدن و به دنبال آن افزایش در ساخت‌وساز زیرساخت‌ها، تقاضا برای داشتن زمین به شدت افزایش یافته است. به همین دلیل، مهندسين به فکر راه‌حلی به منظور استفاده از زمین‌هایی که قبلاً قابل استفاده نبود افتادند. عواملی همچون تراکم‌پذیری بالا و ظرفیت باربری پایین خطر استفاده از چنین زمین‌هایی را افزایش می‌داد. تقویت خاک با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها از جمله ژئوسل با هدف بهبود ظرفیت باربری آن از مسائل حائز اهمیت در حیطه مهندسی ژئوتکنیک است. هر چند در سال‌های گذشته مطالعات متعددی به منظور افزایش ظرفیت باربری پی روی خاک‌های مسلح صورت گرفته، لیکن اغلب مطالعات مذکور تنها بار قائم را مدنظر قرار داده‌اند و در زمینه بارگذاری ترکیبی مانند بار مایل مطالعات اندکی صورت گرفته است. به همین دلیل مطالعه‌ی حاضر به بررسی تاثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی سطحی تحت بارگذاری بار قائم توأم با نیروی برشی پرداخته است.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: parvizi@yu.ac.ir



کاهش می‌یابد و برای u/B های داده شده، پی‌های کوچک‌تر بهبود بهتری را نسبت به پی‌های بزرگ‌تر نشان می‌دهند [۸].

کاتور و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۹ گام دیگری را در ادامه آشنایی با خاک‌های تقویت شده ژئوسلی برداشته و مطالعه‌ای را تحت عنوان بهبود ظرفیت تحمل با استفاده از ماسه تقویت شده ژئوسلی آغاز نمودند. محققان فوق تعدادی آزمایش را روی ماسه تقویت شده و تقویت نشده انجام دادند. در این مطالعه از نرم‌افزار PLAXIS 3D برای تصدیق نتایج کار جاسوال^۱ ۲۰۱۷ [۱۰] استفاده شده و چنین نتیجه شد که ژئوسل با موفقیت برای افزایش ظرفیت باربری ماسه بدانه‌بندی شده استفاده می‌شود. عمق مطلوب قرارگیری تشک ژئوسل $B_{0.5}$ می‌باشد. با افزایش ارتفاع تشک ژئوسلی ظرفیت باربری افزایش می‌یابد، اما این افزایش نسبی کم است. زمانی که ارتفاع ژئوسل از ۱۰ به ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد، ظرفیت باربری به ترتیب $16/2\%$ و $25/2\%$ افزایش می‌یابد.

ساکي و مهرنهاد نیز در سال ۱۳۹۳ با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D بررسی عددی تاثیر ژئوسل روی ظرفیت باربری پی‌های نواری در خاک ماسه‌ای را انجام دادند که دریافتهند بیشترین ظرفیت باربری و کمترین نشست در حالت عمق مدفون $B_{0.05}$ اتفاق می‌افتد. افزایش ظرفیت باربری با افزایش در عرض لایه تقویت کننده تا $4B$ روند مطلوبی دارد اما بعد از آن افزایش محسوسی مشاهده نمی‌شود [۱۱]. در پژوهش بیگی و آروین [۱۲] با روش کامپوزیتی معادل رفتار پی دایره‌ای قرار گرفته روی خاک مسلح شده با ژئوسل بررسی شد. زاویه اصطکاک داخلی در مدل کامپوزیتی برای لایه خاک معادل ژئوسل ثابت در نظر گرفته شده و چسبندگی ظاهری آن معادل چسبندگی ناشی از حضور ژئوسل در نظر گرفته شده است. چنین نتیجه شد که با افزایش عرض لایه تقویت کننده مقدار ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و در عرضی معادل با ۲۴ برابر قطر پی دایره‌ای این مقدار افزایش ثابت می‌شود. هر چه میزان عرض ژئوسل کمتر باشد خاک زیر پی در نشست کمتری به گسیختگی می‌رسد و هر چه عرض بیشتر باشد خاک در میزان نشست بیشتری به گسیختگی می‌رسد. بیشترین ظرفیت باربری زمانی است که لایه تقویت کننده زیر پی می‌باشد. فاضلی دهکردی و عبدالکریم (۲۰۲۰) [۱۳] ظرفیت باربری یک پی کم عمق تحت تأثیر مرز صلب پایینی را بررسی کردند. بر این اساس، پی صلب و تقویت کننده ژئوسل به طور جداگانه و به صورت ترکیبی مورد بررسی قرار گرفتند تا تأثیر آن‌ها بر رفتار و ظرفیت باربری پی‌های دایره‌ای کم عمق در بستر ماسه خشک بررسی شود.

استفاده نمودند که در نتیجه آن دریافتهند با کاهش اندازه دهانه ژئوسل، محصور شدگی بالاتر و به ترتیب قدرت فشردگی بالاتری به خاک محافظت شده وارد شده و به این ترتیب عملکرد بهبود بیشتری می‌یابد [۳]. هگد و سیتارام نیز در سال ۲۰۱۴ تاثیر نوع ماده پرکننده ژئوسل بر عملکرد آن را بررسی کردند و دریافتهند ظرفیت باربری پی‌های تقویت شده ژئوسلی در مقایسه با یک پی تقویت نشده ژئوسلی در مجموع ۱۳ برابر، برای ماسه ۱۱ برابر و برای خاک قرمز محلی ۱۰ برابر افزایش یافت و به همین ترتیب میزان کاهش نشست در مجموع و در ماسه و در خاک قرمز محلی به ترتیب برابر با 78% ، 73% و 70% می‌باشد [۴]. سواراج و شاکتی در سال ۲۰۱۵ یک مقاله مروری در رابطه با مطالعات انجام شده روی پی‌های مسلح شده با ژئوسل انجام دادند که این مقاله به بررسی عملکرد ژئوسل به عنوان یک ماده تقویت کننده پی و یکی از ابزارهای مهم بهسازی خاک پرداخته است [۵]. سانجی و سیلوا در سال ۲۰۱۶ میلادی یک مطالعه عددی سه بعدی برای شبیه‌سازی رفتار ماسه تقویت شده ژئوسلی را با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D انجام دادند. مدل‌سازی عددی ژئوسل به دلیل شکل منحنی آن بسیار دشوار می‌باشد و بیشتر محققان از روش کامپوزیتی معادل برای مدل‌سازی استفاده می‌کنند. خاکی که در مدل آزمایشگاهی استفاده شده خاک ماسه یکنواخت بود. حداکثر ظرفیت باربری در نسبت u/B بین $0/5$ و $0/1$ مشاهده شد [۶]. اولیائی و کوزه‌گران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D تاثیر ژئوسل بر پی‌های تقویت شده را مورد بررسی قرار دادند تا عمق، عرض و ارتفاع بهینه لایه مسلح را تعیین کنند و در پایان دریافتهند ارتفاع بهینه لایه در خاک رس 30% تا 50% عرض فونداسیون و در ماسه 30% تا 40% می‌باشد و در زمان استفاده از ژئوسل عمق قرارگیری مورد نیاز $0/55$ عرض فونداسیون در خاک رس و $0/45$ عرض فونداسیون در خاک ماسه‌ای می‌باشد و همچنین با افزایش ارتفاع ژئوسل ظرفیت باربری افزایش می‌یابد اما این میزان افزایش با بیشتر شدن ارتفاع کاهش می‌یابد [۷]. شادمند و همکاران (۲۰۱۸) در یک مطالعه مشخصه بار-نشست در زیر پی‌های مربعی را با انجام آزمایش بارگذاری در مقیاس بزرگ روی خاک‌های تقویت شده و تقویت نشده ژئوسلی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ۵ سری آزمایش روی پی ماسه‌ای تقویت شده و تقویت نشده انجام گرفته است. آن‌ها چنین نتیجه گرفتند که رفتار بار-نشست پی بستگی به تأثیر مقیاس در خاک تقویت شده ژئوسلی دارد و تعمیم نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس با آزمایش‌های بزرگ مقیاس منجر به تخمین‌های غیرمحافظ کارانه می‌گردد. هم چنین با افزایش عرض پی مقدار ضریب ظرفیت باربری N_{γ}

۲- مدل‌سازی عددی

به منظور ساخت مدل مطالعه حاضر و بررسی تاثیر ژئوسل با هندسه سه بعدی بر ظرفیت باربری پی سطحی تحت بارگذاری قائم توام با نیروی برشی از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 3D استفاده شد. بدین منظور مدل با ارتفاع ۸ متر و طول و عرض ۳۰ متر و پی سطحی از جنس بتن با ارتفاع ۰/۲۵ متر روی سطح زمین در مرکز مدل، ایجاد شد. شبکه‌بندی از نوع ریز برای مدل انتخاب شد. همچنین به منظور مدل‌سازی رفتار خاک از معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شد. مشخصات خاک ماسه‌ای از جدول موجود در هندبوک لوک انتخاب شده است [۱۶]. از المان PLATE به منظور مدل‌سازی و تخصیص مصالح پی استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز جهت تعریف المان PLATE، ضخامت پی (d)، وزن مخصوص مصالح پی (γ)، مدول الاستیک مصالح پی (E)، ضریب پواسون (ν) و مدول برشی (G) می‌باشد. به منظور مدل‌سازی لایه مسلح کننده ژئوسل در نرم‌افزار از المان ژئوگرید استفاده شد. برای در نظر گرفتن سطح اشتراک بین ژئوسل و خاک از المان Interface استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات کلی از مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی بیان شده است.

هندسه مدل شده از مسئله مورد مطالعه در نرم‌افزار در شکل ۱ با طول ۳۰m، عرض ۳۰m و ارتفاع ۸m قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مدل سه بعدی ژئوسل در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، طول و عرض ژئوسل با پارامتر b و ارتفاع آن با h نشان داده شده است که مقدار آن برای بارگذاری‌های مختلف متفاوت می‌باشد که مقادیر آن‌ها در بخش مطالعه پارامتری آمده است. چشمه‌های ژئوسل به شکل لوزی به قطر 25 cm می‌باشند.

برای ساخت لایه تقویت کننده ژئوسل نیز از مشخصات ژئوگرید Miragrid® 22XT استفاده شده که تولید شرکت میرافی^۱ می‌باشد که سختی الاستیک آن برابر با 2100 kN/m در نظر گرفته شده است.

۳- راستی‌آزمایی مدل‌سازی عددی

به منظور حصول اطمینان از نحوه مدل‌سازی و همچنین نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی در فضای بارگذاری بار قائم توام با نیروی برشی، نتایج حاصل از تحلیل در نرم‌افزار PLAXIS 3D با نتایج مطالعه اولیایی و کوزه‌گران (۲۰۱۶) [۷] در حالت مسلح بررسی شده است. اولیایی

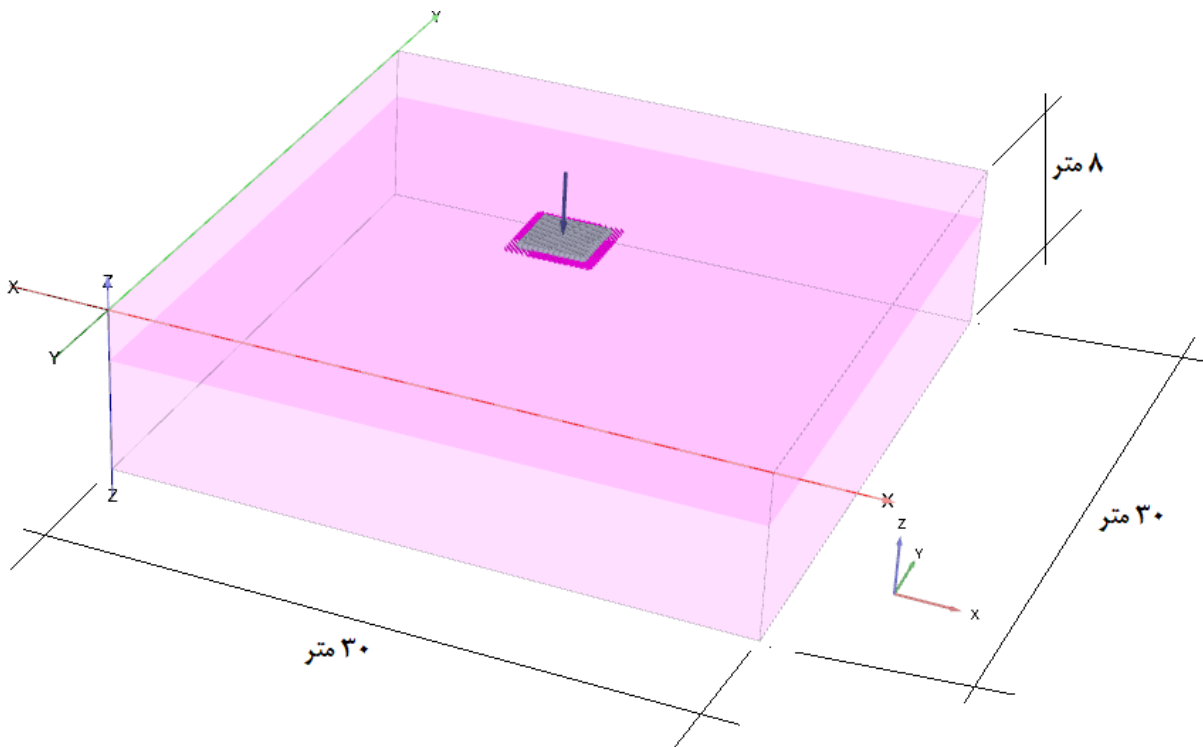
آستاراکی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۰ بیان کردند که با وجود استفاده ژئوسل برای بسیاری از اهداف ژئوتکنیکی، کاربرد ژئوسل در رفتار مکانیکی خاکریزهای راه آهن در ادبیات فنی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، این مقاله با هدف بررسی تأثیر لایه‌های ژئوسل بر ظرفیت باربری و نشست خاکریزهای راه‌آهن می‌باشد. در این راستا، شش خاکریز راه آهن با مقیاس ۱:۲۰ در محیط آزمایشگاه احداث شد. خاکریزها شامل یک خاکریز تقویت نشده و چهار خاکریز تقویت شده ژئوسل شامل ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لایه ژئوسل است که در آن لایه‌های ژئوسل بدون فاصله در بدنه خاکریز از تاج به پایین قرار گرفته‌اند. پس از نصب ترانسفورماتورهای دیفرانسیل متغیر خطی (LVDT) و لودسل‌ها، هر خاکریز تا زمان وقوع خرابی تحت یک بار یکنواخت تدریجی بر روی تاج قرار گرفت و همزمان داده‌ها ثبت شد. نتایج نشان داد که افزودن لایه‌های ژئوسل تا ۴ لایه منجر به بهبود ظرفیت باربری و نشست خاکریزها می‌شود در حالی که افزودن لایه ژئوسل پنجم عملکردی تقریباً مانند خاکریزهای تقویت شده با ۴ لایه را نشان می‌دهد. با این حال، خاکریزی تقویت شده با استفاده از چهار لایه ژئوسل، حداکثر ظرفیت باربری و کمترین نشست را به ترتیب به میزان ۳۸/۶ و ۳۷ درصد در مقایسه با مدل تقویت نشده نشان داد. فاضلی دهکردی و همکاران (۲۰۲۱) مجموعه‌ای از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در مقیاس بزرگ برای شن و ماسه تقویت شده ژئوسلی (GRS) انجام دادند. با آزمایش‌های گسترده، یک روش تحلیلی ساده برای پیش‌بینی ظرفیت باربری پایه‌های دایره‌ای بر روی GRS پیشنهاد گردید [۱۵].

نتایج مطالعات گذشته بیانگر این است که چیدمان لایه مسلح کننده ژئوسل شامل فاصل لایه مسلح کننده از کف پی (u)، عرض لایه مسلح کننده (b) و ارتفاع لایه مسلح کننده (h) نقش به‌سزایی در افزایش ظرفیت باربری پی قرار گرفته روی خاک مسلح تحت بارگذاری را دارد. با آگاهی نسبت به اهمیت استفاده از ژئوسل در افزایش ظرفیت باربری پی‌ها، تا به حال مطالعه‌ای در مورد چیدمان بهینه لایه ژئوسل و تاثیر آن بر ظرفیت باربری پی تحت بارهای مایل صورت نگرفته است. از این رو، در این مطالعه سعی شده است تا تاثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی تحت بارهای مایل انجام پذیرد. در مطالعه حاضر بار مایل به مرکز پی وارد شده و ظرفیت باربری پی به منظور تعیین ابعاد بهینه لایه تقویت کننده ژئوسل در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی‌ها در مطالعه حاضر به صورت سه بعدی و با نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 3D انجام گرفته است.

جدول ۱. مشخصات مصالح به کار رفته در مدل عددی

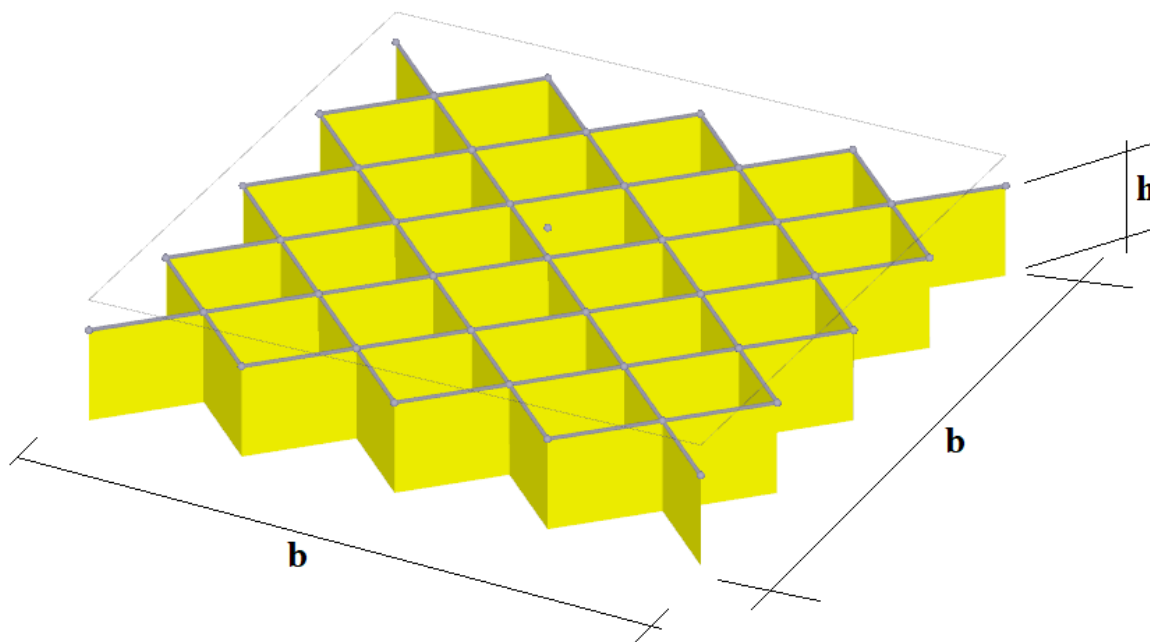
Table 1. Properties of materials used in the numerical model

مقدار	واحد	نماد	پارامتر	مصالح
ماسه	-	-	نوع خاک	
۳۰۰۰۰	kN/m^2	E	مدول الاستیسیته	
۳۰	درجه	ϕ	زاویه اصطکاک داخلی	
۰	kN/m^2	C	چسبندگی	
۰/۳	-	ν	ضریب پواسن	
۱۶	kN/m^3	γ	وزن مخصوص	خاک
۰	°	ψ	زاویه اتساع	
۱	-	R_{inter}	ضریب اینترفیس	
۱	m	B	ابعاد	
۰/۲۵	m	d	ضخامت	
۲۴۰۰	kN/m^3	γ	وزن مخصوص	
۲۰۰۰۰۰۰۰	kN/m^2	E	مدول الاستیک	پی مربعی
۰/۲	-	ν	ضریب پواسن	
۲۱۰۰	kN/m	EA	سختی الاستیک	ژئوسل
لوزی به قطر ۲۵ cm	-	-	هندسه چشمه‌ها	



شکل ۱. هندسه کلی مسئله مورد مطالعه با طول و عرض ۳۰ متر و ارتفاع ۸ متر

Fig. 1. Geometry of the studied problem, with length and width of 30 meters and a height of 8 meters



شکل ۲. هندسه سه بعدی ژئوسل در 3D PLAXIS

Fig. 2. 3D geometry of geocell in PLAXIS 3D

۴- تحلیل عددی، نتایج و بحث

شکل ۴ پارامترهای به کار رفته در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. هدف تعیین مقادیر بهینه پارامترهای ژئوسل (h : عمق از کف پی، h : ارتفاع لایه ژئوسل و b : عرض ژئوسل) به منظور حصول بیشترین ظرفیت باربری در شرایط بارگذاری قائم توام با بار افقی (بار مایل) می‌باشد. مرزبندی‌ها در نرم‌افزار 3D PLAXIS به صورت اتوماتیک صورت می‌گیرد. اما به صورت کلی شرایط مرزی بدین صورت است که مرزهای جانبی به صورت عمود بر صفحه قابلیت تغییر شکل ندارند و کف مدل نیز کاملاً مقید می‌باشد. برای بارگذاری مطالعه بدین صورت عمل شده که در مرحله اول بارگذاری، بار به صورت قائم و به مقدار کسری از مقدار بار قائم نهایی منجر به گسیختگی مدل تقویت نشده (V_{max}) به پی اعمال می‌شود. با این روش از گسیختگی پی تحت بارگذاری قائم جلوگیری می‌شود. در مرحله دوم بارگذاری نیروی برشی به صورت تدریجی به پی اعمال می‌گردد تا پی گسیخته شود. به این روش نیروی برشی منجر به گسیختگی پی در آن سطح بار قائم اعمالی تعیین می‌گردد.

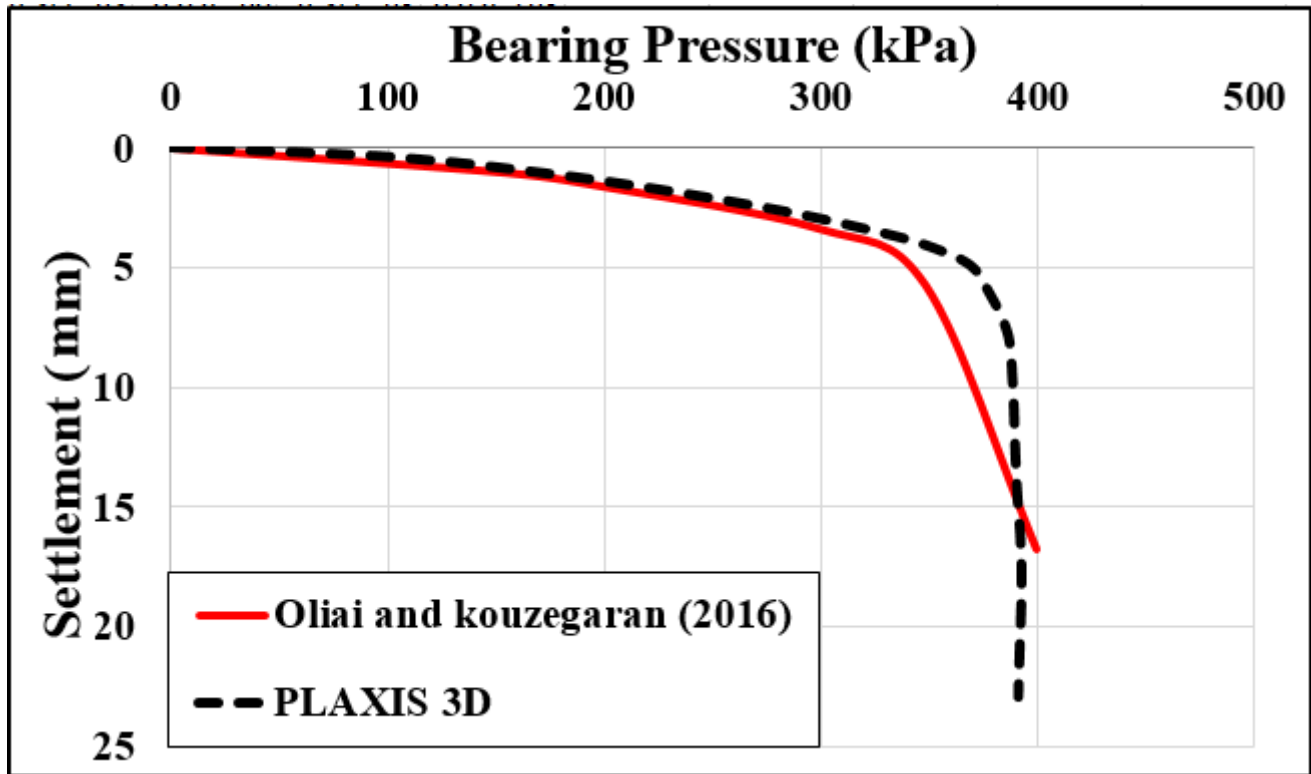
و کوزه‌گران در سال ۲۰۱۶ به بررسی عددی کاربرد ژئوسنتتیک‌های سلولی برای تقویت پی‌ها با روش اختلاف محدود پرداختند. در این مطالعه رفتار خاک به صورت الاستوپلاستیک و بر اساس مدل موهر-کولمب فرض شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل عددی مطابق با جدول ۲ می‌باشد.

شکل ۳ نمودار بار-جابجایی حاصل از تحلیل مربوط به پی قرار گرفته بر خاک مسلح در فضای بارگذاری قائم (V) در حالت عدم وجود نیروی برشی و همچنین منحنی بار-جابجایی حاصل از مطالعه اولیایی و کوزه‌گران (۲۰۱۶) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشهود است، نمودار بار-جابجایی حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار مطابقت مناسبی با نتایج مطالعه اولیایی و کوزه‌گران (۲۰۱۶) هم از لحاظ روند کلی نمودار و هم از لحاظ مقدار باربری نهایی در حالت عدم وجود نیروی برشی دارد. مقدار نهایی ظرفیت باربری (V_{max}) در مطالعه اولیایی و کوزه‌گران (۲۰۱۶) برابر با 400 kPa و مقدار نهایی باربری (V_{max}) در مدل‌سازی مطالعه حاضر برابر با 391 kPa به دست آمده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل صحت سنجی [۷]

Table 2. Specifications of materials used in the validation model [7]

Friction angle (Degree)	Cohesion (kPa)	Density (kg/m ³)	Poisson ratio	Elastic modulus (MPa)
۳۵	۵	۲۱۰۰	۰/۳۵	۷۰



شکل ۳. مقایسه منحنی بار-جابجایی پی تحت بارگذاری قائم و بدون نیروی برشی حاصل از مطالعه اولیایی و کوزه‌گران (۲۰۱۶) و مدل‌سازی عددی مطالعه حاضر

Fig. 3. Comparison of foundation load-displacement curve under vertical load, obtained from the present study and the study of Oliaei and Kouzegaran (2016)

می‌شود. با این روش از گسیختگی پی تحت بارگذاری قائم جلوگیری می‌شود.

۴- در مرحله دوم بارگذاری نیروی برشی به صورت تدریجی به مدل مسئله اعمال می‌گردد تا پی گسیخته شود، بدین روش نیروی برشی منجر به گسیختگی پی در آن سطح بار قائم اعمالی تعیین می‌گردد.

۵- در گام بعدی نتایج به صورت نمودار ترسیم می‌شود.

۶- بر اساس نمودارهای حاصل از نتایج بررسی می‌شود که عمق مدفونی که بیشترین افزایش در ظرفیت باربری برشی در آن حاصل شده است به عنوان عمق بهینه جایگذاری لایه مسلح کننده انتخاب می‌شود.

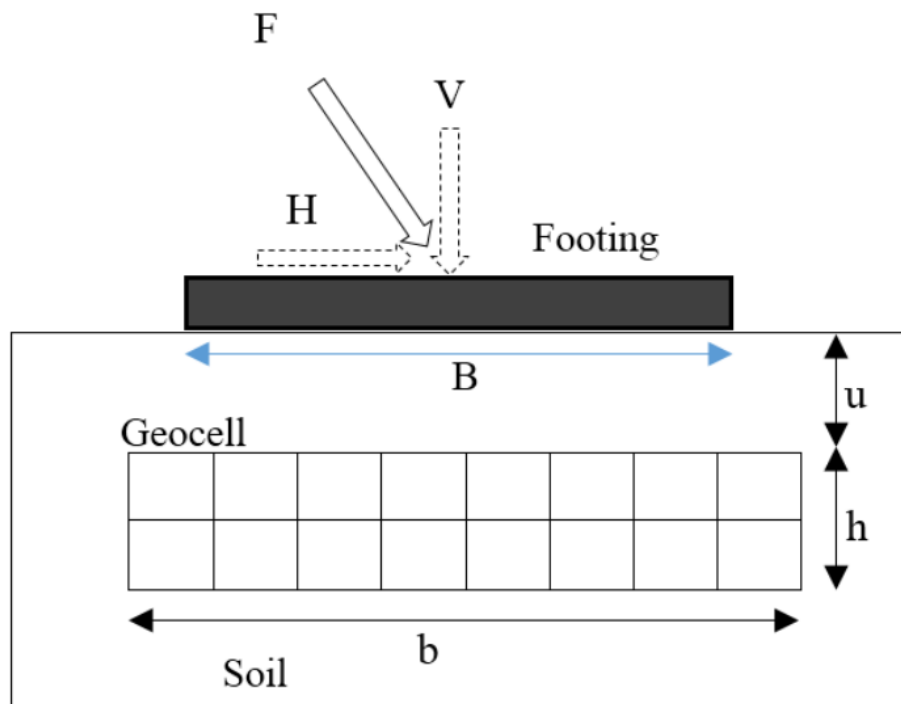
به منظور تعیین ابعاد بهینه لایه مسلح کننده ژئوسل در فضای

بارگذاری توأم بار قائم همراه با نیروی برشی مراحل زیر به ترتیب انجام می‌شود:

۱- مسئله در حالت مسلح و غیرمسلح با ابعاد بهینه مدل شده و ظرفیت باربری تعیین می‌شود.

۲- مسئله با همان وضعیت و مشخصات چیدمان مرحله قبل مدل‌سازی شده و طی دو مرحله بارگذاری می‌شود.

۳- در مرحله اول بارگذاری، بار به صورت قائم و به مقدار کسری از مقدار بار قائم نهایی منجر به گسیختگی حاصل از گام اول به پی اعمال



شکل ۴. پارامترهای به کار رفته در مدل‌سازی عددی

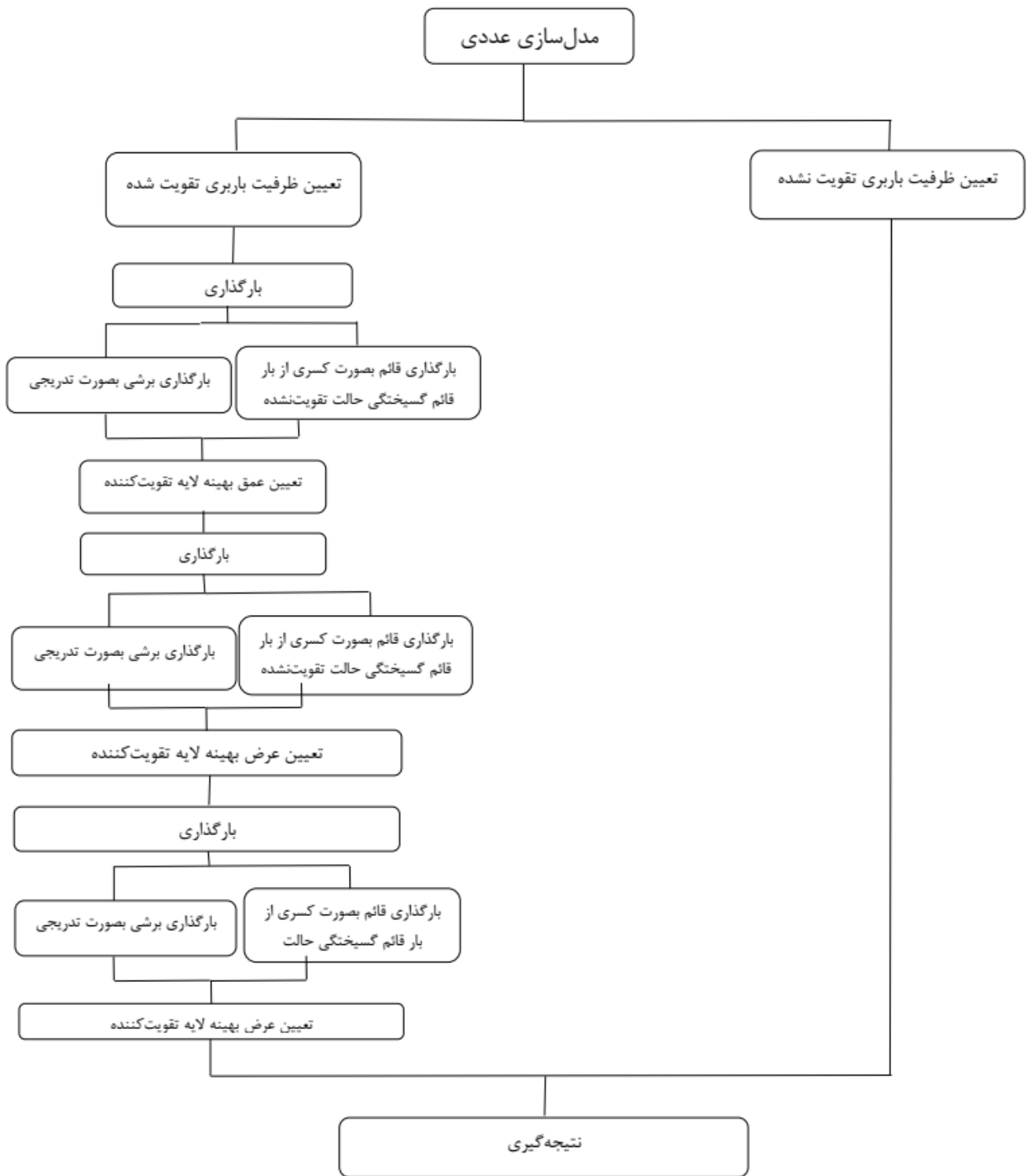
Fig. 4. Parameters used in the numerical model

مطابق با این بار قائم برابر با $39/2 \text{ kN}$ می‌باشد و بدین ترتیب نسبت‌های V/V_{\max} و H/V_{\max} به ترتیب برابر $0/86$ و $0/18$ می‌باشد که یک نقطه از نمودار را در فضای VH ایجاد می‌کند. به همین ترتیب در مقادیر مختلف بار قائم و اعمال آن در مرحله نخست بارگذاری نیروی گسیختگی برشی برای پی در آن مقدار بار قائم در مرحله دوم بارگذاری تعیین می‌شود و نسبت‌های V/V_{\max} و H/V_{\max} مربوط به هر حالت به دست می‌آید. با داشتن چند نقطه برای مقادیر مختلف بار قائم و نیروی برشی متناظر با آن و تعیین نسبت‌های آن‌ها و از اتصال این نقاط، نمودارهای بدون بعد در فضای بارگذاری VH حاصل می‌شود. در ادامه مانند آنچه گفته شد، برای ابعاد مختلف لایه مسلح کننده مراحل ذکر شده انجام می‌شود و نمودارهای بی‌بعد در فضای VH ترسیم شده و با مقایسه همین نمودارها ابعاد بهینه لایه مسلح کننده تعیین می‌شود. در مطالعه حاضر منظور از H نیروی افقی یا نیروی برشی می‌باشد که به صورت تدریجی و متغیر در هر مرحله از بارگذاری به پی وارد می‌شود، همچنین V_{\max} ظرفیت باربری پی در حالت تقویت نشده می‌باشد که در اینجا برابر با 231 kN می‌باشد.

۷- پس از تعیین عمق جایگذاری بهینه لایه مسلح کننده باید عرض بهینه لایه تعیین شود، به این منظور لایه تقویت کننده را در عمق بهینه که از مرحله قبل به دست آمده قرار داده و برای هر عرض بار قائم به صورت کسری از بار قائم گسیختگی به دست آمده در مرحله قبل به پی وارد می‌شود. سپس در مرحله بعد نیروی برشی به پی وارد شده تا ظرفیت برشی برای هر عرض تعیین شود و سپس عرضی که بیشترین ظرفیت باربری را داشته به عنوان عرض بهینه تعیین می‌شود.

۸- پس از تعیین عمق و عرض بهینه لایه مسلح کننده باید طبق روال قبل ارتفاع بهینه لایه نیز تعیین شود که همانند دو مورد قبل ظرفیت برشی برای هر ارتفاع را تعیین نموده و سپس ارتفاع با بیشترین ظرفیت تحمل نیروی برشی به عنوان ارتفاع بهینه لایه مسلح کننده مدنظر قرار می‌گیرد. شکل ۵ به صورت خلاصه مراحل انجام پژوهش با روندنا نشان داده شده است.

جدول ۳ نتایج تحلیل عددی برای حالت غیرمسلح را نشان می‌دهد، مثلاً با اعمال نیروی قائم برابر با 200 kN حداکثر نیروی برشی قابل تحمل



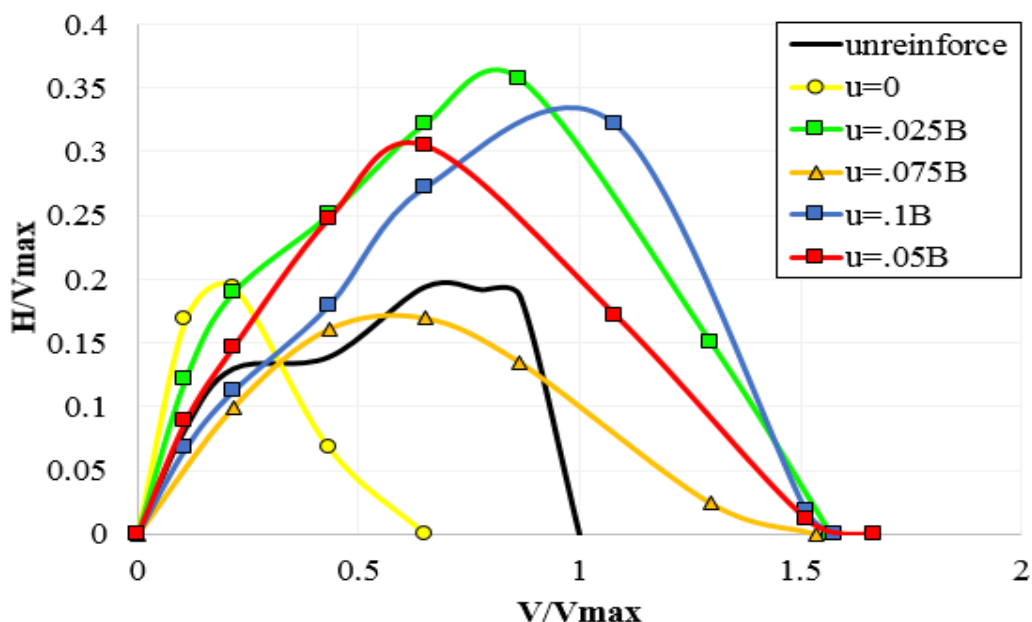
شکل ۵. روندنمای مراحل انجام پژوهش

Fig. 5. Flowchart of the research steps

جدول ۳. نتایج حاصل از آنالیز عددی در فضای بارگذاری VH در حالت غیر مسلح

Table 3. Results of the numerical analysis in VH loading space for unreinforced model

مدل غیر مسلح $V_{max}=231kN$			
V	H	V/V _{max}	H/V _{max}
۲۳۱	۰	۱	۰
۲۰۰	۴۲/۹	۰/۸۶۵	۰/۱۸۵
۱۸۰	۴۴/۱	۰/۷۷۹	۰/۱۹۰
۱۵۰	۴۴/۶	۰/۶۴۹	۰/۱۹۳
۱۰۰	۳۲	۰/۴۳۲	۰/۱۳۸
۵۰	۲۹/۹	۰/۲۱۶	۰/۱۲۹
۲۵	۱۹/۲	۰/۱۰۸	۰/۰۸۳
۰	۰	۰	۰



شکل ۶. نمودار بدون بعد در فضای بارگذاری VH برای عمق‌های مدفون مختلف (u)

Fig. 6. Dimensional diagram in VH loading space for different buried depths

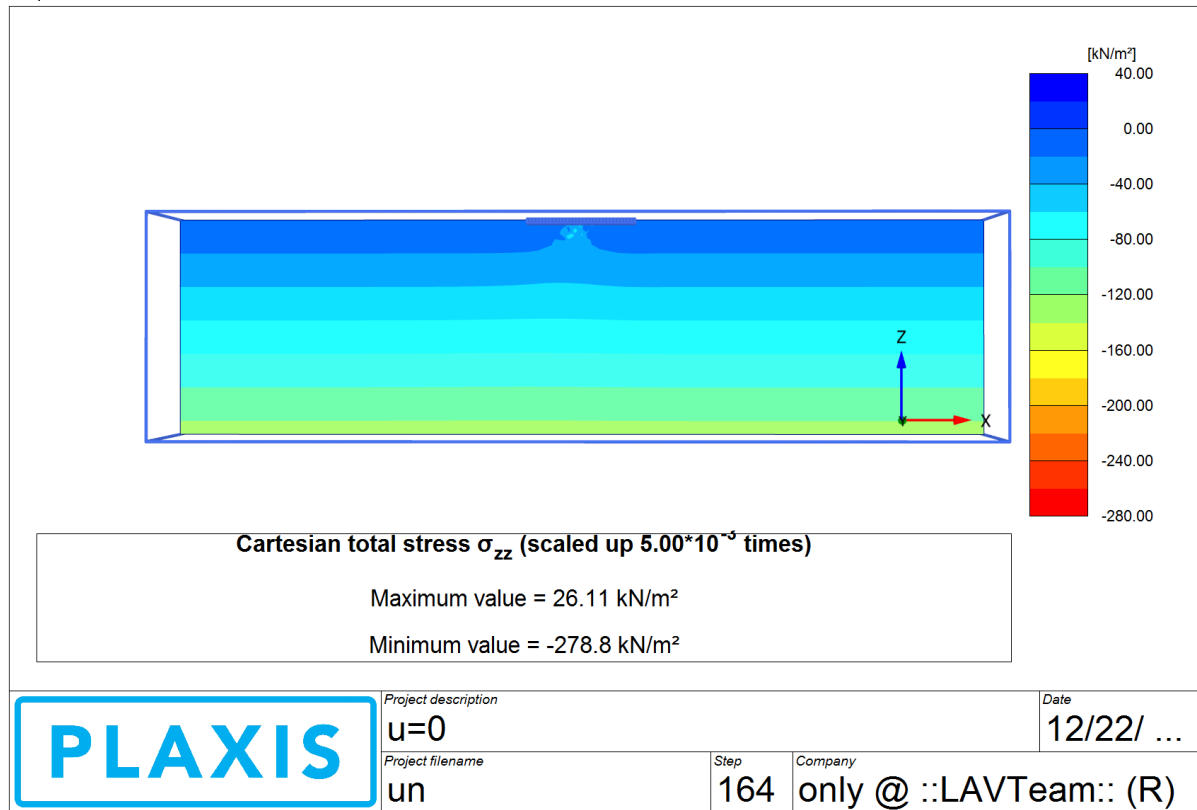
حاصل از تحلیل عددی برای عمق‌های مختلف لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VH را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل می‌توان دریافت با قرار دادن لایه مسلح کننده در در فاصله صفر از کف پی در بازه $V=(0\sim 0.21)V_{max}$ از بار قائم، هم ظرفیت باربری و هم ظرفیت باربری برشی نسبت به حالت تقویت نشده پی افزایش داشته‌اند، ولی پس از آن هر دو کاهش یافته‌اند. در مرحله بعد

۴-۱ تاثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی در فضای بارگذاری VH و تعیین عمق بهینه لایه مسلح کننده

برای تعیین عمق بهینه جایگذاری لایه مسلح کننده ژئوسل تحت بارگذاری قائم توام با نیروی برشی، ابتدا لایه ژئوسل در فاصله‌های مختلف نسبت به کف پی قرار گرفته و مقدار ظرفیت باربری آن در هر عمق تعیین شده است و سپس نمودار آن در فضای VH ترسیم شده است. شکل ۶ نتایج

Output Version 20.0.0.119



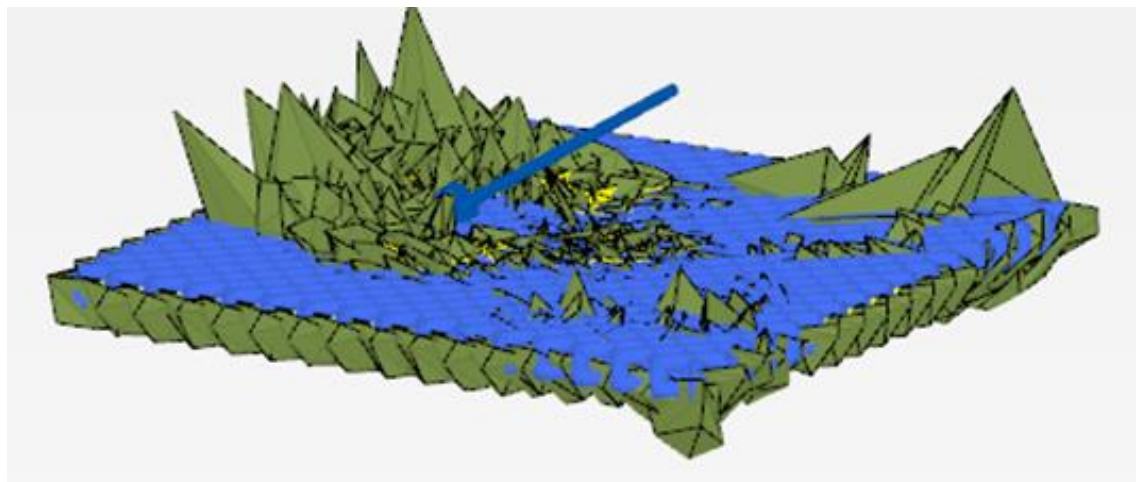
شکل ۷. نمودار توزیع تنش قائم برای عمق مدفون $u=0B$

Fig. 7. Diagram of vertical stress distribution for buried depth of $u=0B$

کاهش یافته و در مقایسه با عمق مدفون پیشین کاهش ۱۰٪ مشاهده شده است. طبق نمودار عمق جایگذاری $u=0.1B$ مقدار ظرفیت باربری را نسبت به حالت تقویت نشده ۵۰٪ افزایش داده اما در مقایسه با $u=0.025B$ کاهش یافته است. به همین دلیل عمق جایگذاری $u=0.025B$ به عنوان عمق مدفون بهینه لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VH مشخص شده است.

شکل ۷ بیان کننده توزیع تنش برای زمانی است که لایه مسلح کننده دقیقاً در زیر پی قرار دارد، همچنین در شکل ۸ می‌توان تغییر شکل لایه تقویت کننده را در همان عمق و در زمان اعمال نیروی مایل مشاهده نمود. شکل ۹ نیز توزیع تنش قائم در مدل برای زمانی که لایه مسلح کننده در عمق $0.25B$ قرار پی قرار دارد را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ تغییر شکل لایه تقویت کننده در عمق فوق را آورده که از شکل نیز مشخص است که لایه مسلح کننده بیشترین مقاومت را از خود نشان داده است.

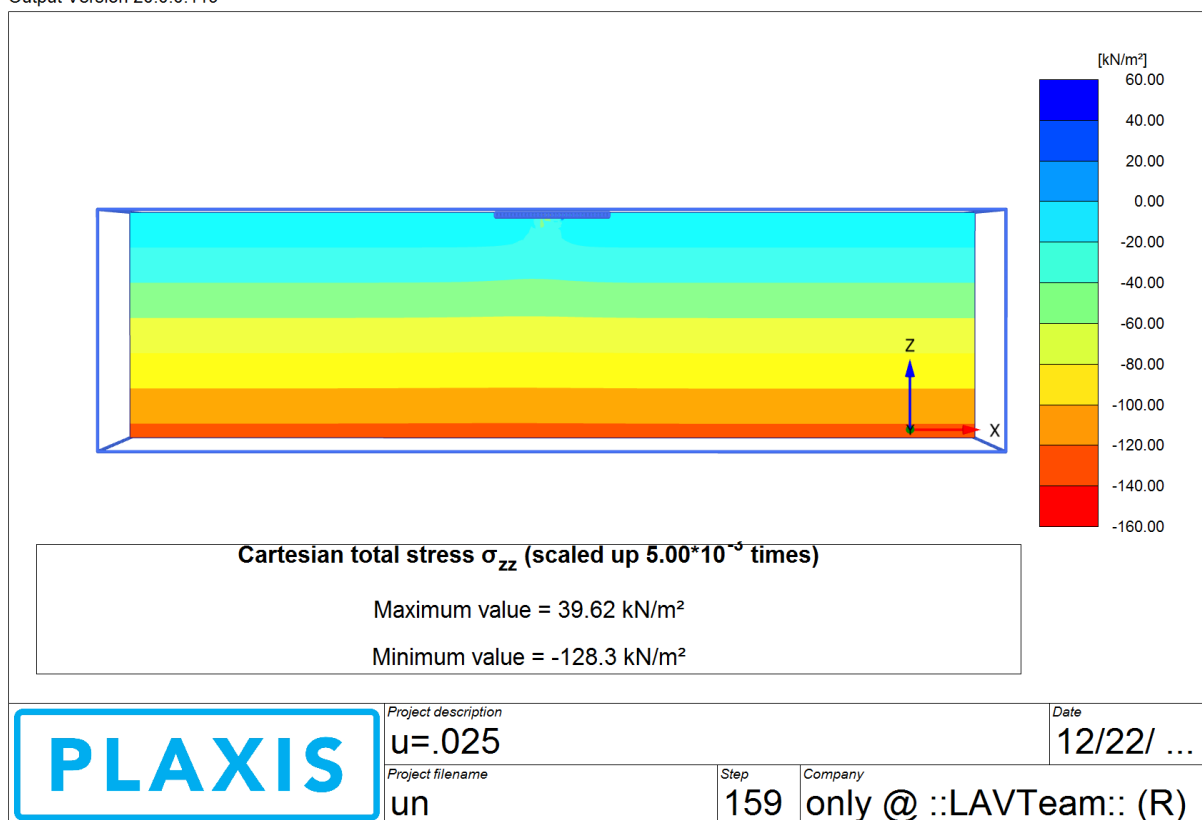
لایه مسلح کننده در عمق $u=0.025B$ قرار گرفته و مطابق با روال بیان شده ابتدا کسری از بار قائم منجر به گسیختگی و سپس نیروی برشی به پی اعمال می‌شود تا تاثیر لایه تقویت کننده در این عمق نیز مورد بررسی قرار گیرد. مطابق با نمودار این عمق در بازه اعمالی بار قائم $V=(0 \sim 1.58)V_{max}$ باعث افزایش هم در ظرفیت باربری قائم و هم در ظرفیت باربری برشی نسبت به حالت تقویت نشده شده است. چون با افزایش عمق مدفون ظرفیت باربری افزایش یافته پس باید عمق‌های مدفون بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. در گام بعد عمق $u=0.05B$ مورد تحلیل قرار گرفته که این عمق نسبت به عمق قبل ظرفیت باربری را ۱۵٪ کاهش داده است. برای حصول اطمینان بیشتر از نتیجه عمق‌های $u=0.075B$ و همچنین $u=0.1B$ نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که با توجه به نمودار در عمق $u=0.075B$ ، به جز در بازه اعمالی بار قائم $V=(0.21 \sim 0.43)V_{max}$ در مابقی بازه‌ها ظرفیت باربری قائم و به تبع آن ظرفیت باربری برشی



شکل ۸. تغییر شکل ژئوسل در عمق مدفون $u=0B$

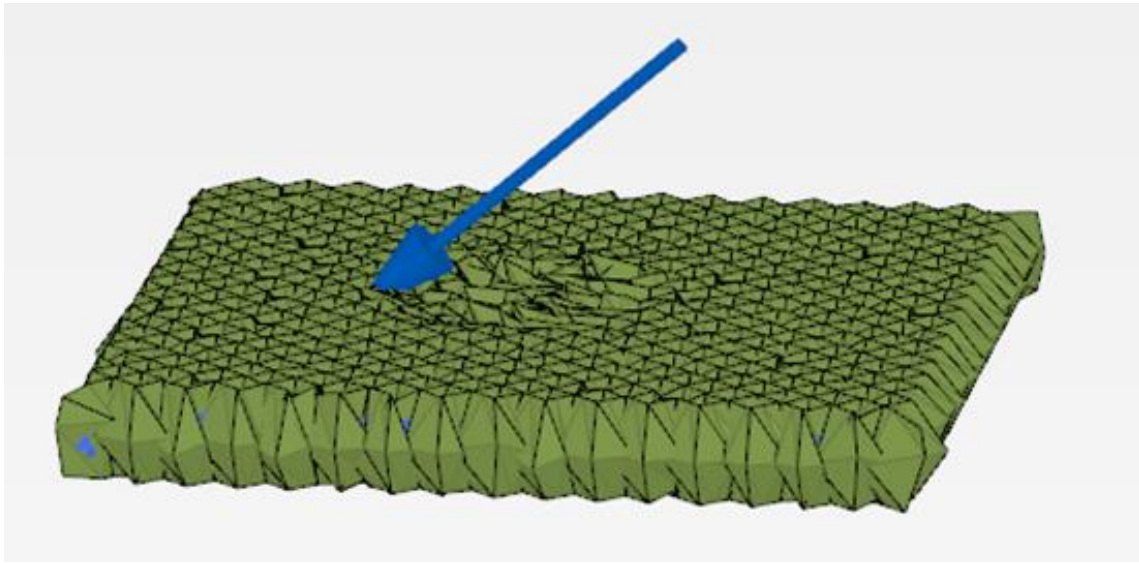
Fig. 8. Geocell deformation at buried depth of $u=0B$

Output Version 20.0.0.119



شکل ۹. نمودار توزیع تنش قائم در عمق مدفون $u=0.025B$

Fig. 9. Diagram of vertical stress distribution at buried depth of $u=0.025B$



شکل ۱۰. تغییر شکل ژئوسل در عمق مدفون $u=0.025B$

Fig. 10. Geocell deformation at buried depth of $u=0.025B$

شکل ۱۱ نیز توزیع تنش قائم در مدل برای زمانی که لایه مسلح کننده در عمق $0.5 / 0$ عرض پی قرار دارد را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ تغییر شکل لایه تقویت کننده در عمق فوق را نشان می‌دهد.

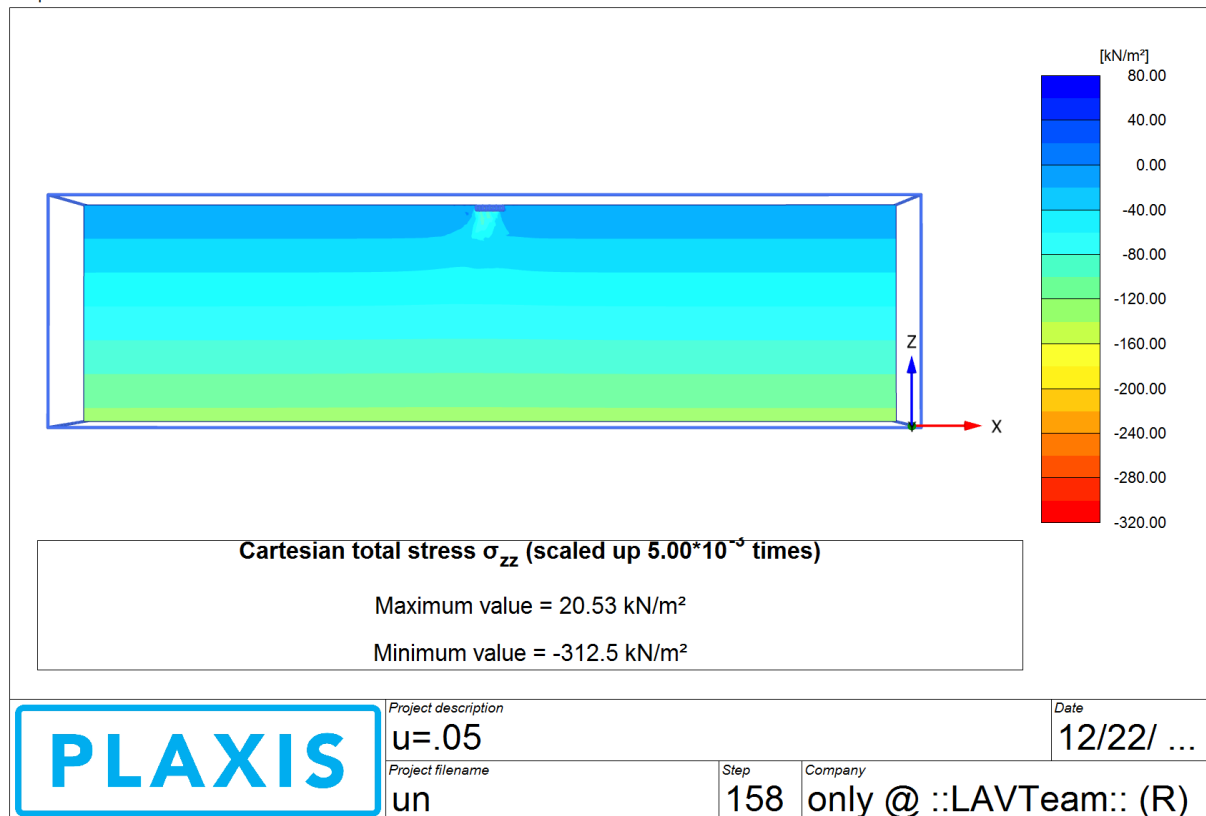
۴-۲- تاثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی در فضای بارگذاری VH و تعیین عرض بهینه لایه مسلح کننده

در گام دوم و پس از تعیین عمق بهینه لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VH ، باید عرض بهینه لایه مسلح کننده تعیین شود. به همین منظور لایه مسلح کننده ابتدا در عمق بهینه تعیین شده قرار گرفته، سپس آنالیز برای عرض‌های مختلف لایه تقویت کننده انجام شده و نتایج در قالب نمودار در فضای VH ارائه می‌گردد. بدین منظور ابتدا لایه تقویت کننده در عرضی برابر با عرض پی مدل شده و سپس در گام بعد بار قائم با مقدار کسری از بار قائم منجر به گسیختگی به مدل اعمال می‌شود، پس از آن نیروی برشی به پی اعمال می‌شود تا پی گسیخته شود و ظرفیت باربری برشی آن تعیین شود. همین مراحل برای عرض‌های مختلف اجرا شده و نتایج آنالیز در شکل ۱۳ آورده شده تا عرض بهینه لایه تقویت کننده نیز تعیین شود.

با توجه به نمودار می‌توان دریافت با قرار دادن لایه مسلح کننده با عرضی برابر با عرض پی در محل عمق بهینه، ظرفیت باربری قائم و ظرفیت باربری برشی هر دو کاهش می‌یابد ولی بعد از آن و با ارتقاء عرض لایه به

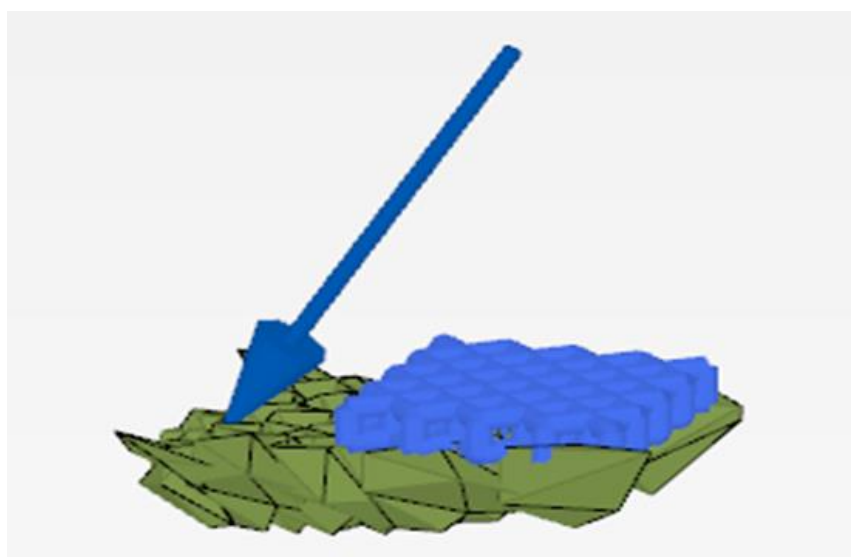
۲B، ظرفیت باربری قائم و در پی آن ظرفیت برشی پی در بازه اعمالی نیروی قائم $V=(0\sim 0.2)V_{max}$ افزایش یافته است. در گام بعد عرض لایه به 3B افزایش یافته تا میزان افزایش در ظرفیت باربری پی نسبت به حالت تقویت نشده بررسی شود. لازم به ذکر است که روش اعمال بار در تمامی عرض‌ها یکسان می‌باشد. در عرض کنونی در بازه اعمالی $V=(0\sim 0.43)V_{max}$ افزایش در ظرفیت باربری قائم و برشی می‌باشد. در مراحل قبل با افزایش عرض لایه مسلح کننده ظرفیت باربری افزایش یافته، به همین دلیل باید تحلیل در عرض‌های بیشتر نیز صورت گیرد. در مرحله بعد باید عرض 4B تحت تحلیل قرار گیرد و تاثیر آن در ظرفیت باربری بررسی شود. همانطور که از نمودار مشخص است این عرض بیشترین تاثیر در افزایش ظرفیت باربری را در بازه اعمالی $V=(0\sim 1.66)V_{max}$ داشته است. چون تاکنون با افزایش عرض لایه تقویت کننده ظرفیت باربری افزایش یافته، باید عرض‌های بیشتر مورد بررسی قرار گیرند که به همین دلیل عرض 5B نیز باید مورد بررسی قرار گیرد تا عرض بهینه لایه تقویت کننده تعیین شود. روال تحلیل در این عرض نیز همانند عرض‌های قبل می‌باشد. این عرض در بازه اعمال بار قائم $V=(0.1\sim 0.64)V_{max}$ منجر به افزایش در ظرفیت باربری قائم و برشی، و در بازه اعمالی $V=(0.1\sim 0.64)V_{max}$ منجر به کاهش آن‌ها شده است. با توجه به شکل ۱۳ می‌توان دریافت عرض 4B نسبت به سایر عرض‌ها برای مسلح‌سازی مناسب‌تر بوده و به عنوان عرض بهینه در نظر گرفته می‌شود.

Output Version 20.0.0.119



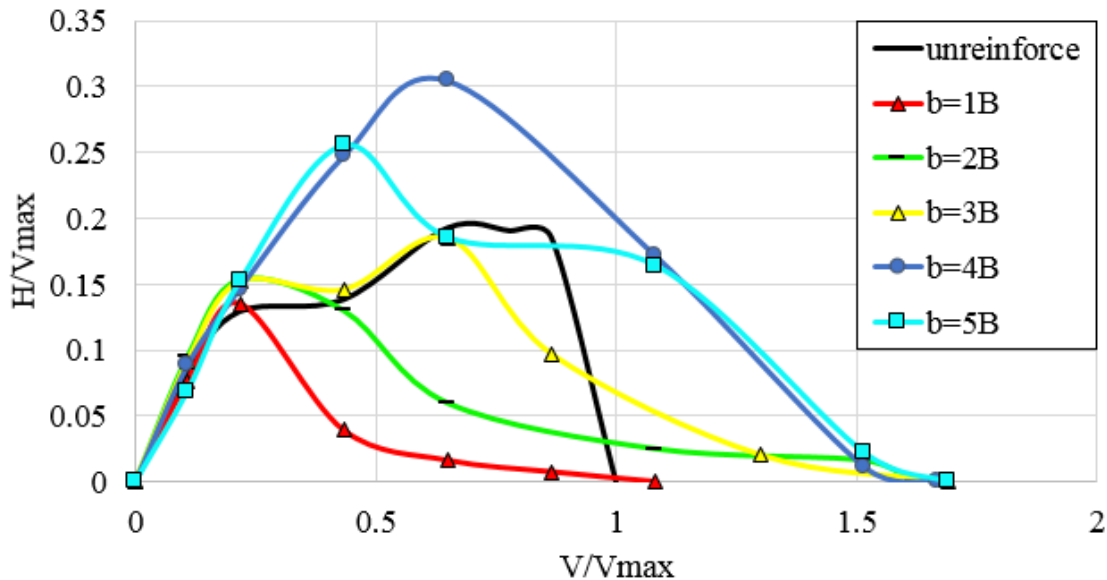
شکل ۱۱. نمودار توزیع تنش قائم برای عمق $u=0.05B$

Fig. 11. Diagram of vertical stress distribution for depth of $u=0.05B$



شکل ۱۲. تغییر شکل ژئوسل در عمق مدفون $u=0.05B$

Fig. 12. Geocell deformation at buried depth of $u=0.05B$



شکل ۱۳. نمودار بی‌بعد در فضای بارگذاری VH برای عرض‌های مختلف لایه مسلح کننده

Fig. 13. Dimensional diagram in VH loading space for different reinforcing layer widths (b)

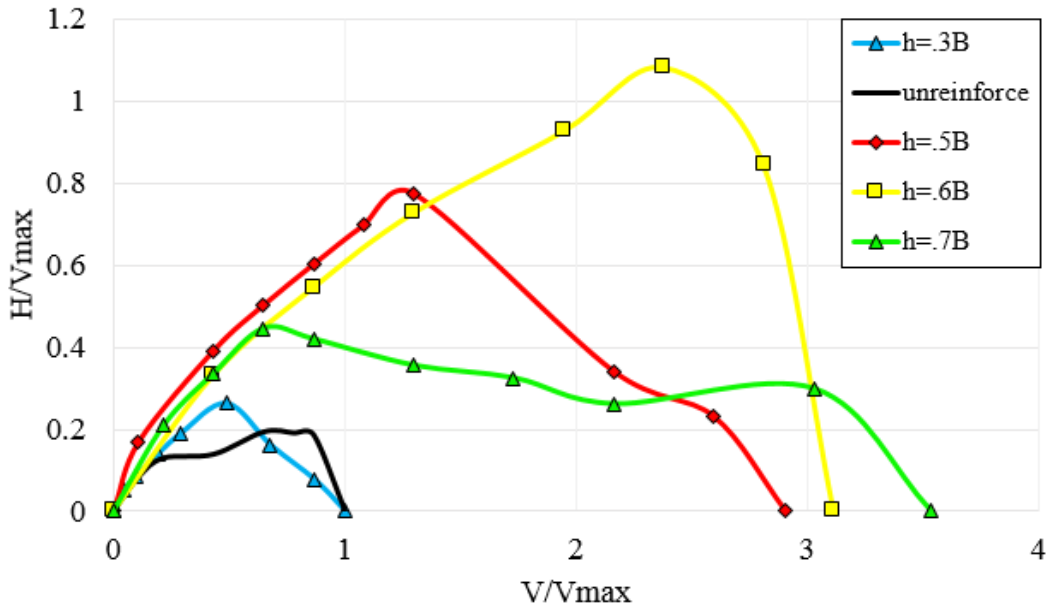
کننده، ظرفیت باربری قائم و برشی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، چون با افزایش ارتفاع ظرفیت باربری پی افزایش یافته تحلیل باید تا زمانی که ارتفاع لایه مسلح کننده منجر به کاهش ظرفیت باربری شود ادامه داشته باشد.

به همین دلیل در این مرحله ارتفاع $h=0.6B$ مورد بررسی قرار گرفته که با توجه به نمودار مشخص است که این ارتفاع نیز منجر به افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری پی شده است، اما در بازه اعمالی بار قائم $V=(0.1 \sim 1.3)V_{max}$ نسبت به ارتفاع $h=0.5B$ از نظر ظرفیت باربری قائم و برشی دارای کاهش بوده است. در مرحله بعد ارتفاع $h=0.7B$ به منظور تعیین تأثیر آن بر میزان ظرفیت باربری مورد بررسی قرار گرفته که با توجه به نمودار، روند افزایش در ظرفیت باربری پایان یافته و این ارتفاع باعث افزایش ظرفیت باربری قائم و کاهش ظرفیت باربری برشی پی شده است. در نهایت ارتفاع $h=0.6B$ به عنوان ارتفاع بهینه لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VH در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۱۴، با قرار گرفتن لایه ژئوسل در محل بهینه خود ظرفیت باربری برشی نسبت به حالت تقویت نشده حدود ۵۰٪ و ظرفیت باربری قائم ۲۱۰٪ افزایش یافته است.

۴-۳- تأثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی در فضای بارگذاری VH و تعیین ارتفاع بهینه لایه مسلح کننده

بعد از تعیین عمق و عرض بهینه لایه تقویت کننده باید ارتفاع بهینه لایه مسلح کننده نیز مشخص شود. به همین منظور در ابتدا باید لایه تقویت کننده با عرض بهینه و در عمق بهینه جایگذاری شود و سپس تحلیل عددی برای ارتفاع‌های مختلف در فضای بارگذاری VH انجام شود. بدین منظور ابتدا لایه مسلح کننده با ارتفاع $h=0.3B$ تحت بارگذاری قائم که کسری از بار قائم منجر به گسیختگی است قرار می‌گیرد و سپس در مرحله دوم تحت نیروی برشی قرار گرفته تا میزان ظرفیت باربری آن در فضای بارگذاری VH تعیین شود.

با توجه به شکل ۱۴، میزان ظرفیت باربری در بازه اعمالی بار قائم $V=(0 \sim 0.65)V_{max}$ برای باربری قائم و متعاقباً برشی، نسبت به منحنی مدل تقویت نشده ۵۰٪ افزایش یافته است، اما در بازه $V=(0.65 \sim 1)V_{max}$ ظرفیت باربری در هر دو مورد قائم و افقی کاهش یافته است. در گام بعد باید همین اعمال روی ارتفاع $h=0.5B$ انجام شود تا میزان تأثیر این ارتفاع روی ظرفیت باربری نیز بررسی شود. همان‌گونه که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، ارتفاع مذکور برای لایه مسلح



شکل ۱۴. نمودار بی‌بعد برای در فضای بارگذاری VH برای ارتفاع‌های مختلف لایه مسلح کننده

Fig. 14. Dimensional diagram in VH loading space for different heights of geocell layer (h)

۵- نتیجه‌گیری

۵- همچنین استفاده توام بار قائم و افقی (بار مایل) باعث تغییرات در مقادیر پارامترهای بهینه لایه تقویت کننده شده است. عمق مدفون لایه را از $0.5B$ در حالت قائم به $0.25B$ در حالت بار مایل کاهش داده، همچنین مقدار ارتفاع لایه بهینه را از $0.4B$ به $0.6B$ افزایش داده و در آخر نیز عرض بهینه لایه تقویت کننده را از $3/5B$ به $4B$ تغییر داده است که این مقادیر بهینه باعث افزایش ناچیزی در مقدار ظرفیت باربری قائم نسبت به حالت بار قائم شده است.

۶- در مورد عمق بهینه لایه تقویت کننده به دست آمده که هر چه لایه تقویت کننده به سطح زمین نزدیک‌تر باشد ظرفیت باربری بیشتر خواهد شد اما این نزدیک شدن اندازه مشخصی دارد. در مورد عرض بهینه لایه نیز بیان شده که تحت بارگذاری قائم بهترین عرض برای لایه تقویت کننده بین ۳ تا ۴ برابر عرض پی می‌باشد. در رابطه با ارتفاع بهینه لایه نیز بیان شده ارتفاع بهینه لایه در خاک ماسه‌ای بین ۳۰٪ تا ۴۰٪ عرض پی می‌باشد. نتایج به دست آمده در تطابق خوبی با مطالعات گذشته می‌باشد.

بر اساس نتایج این مطالعه مشخص شد که افزودن لایه ژئوسل به خاک، باعث افزایش ظرفیت باربری خاک در برابر بارهای قائم توام با نیروی برشی (بار مایل) به میزان قابل توجهی شده است. برای دستیابی به بیشترین ظرفیت باربری از لایه مسلح کننده در چیدمان بهینه استفاده شود. همچنین

در مطالعه حاضر به بررسی اثر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی سطحی قرار گرفته روی خاک ماسه‌ای تحت بار قائم توام با نیروی برشی (VH) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 3D پرداخته شد. بعد از راستی‌آزمایی نتایج مدل عددی در فضای V، تاثیر پارامترهای عمق، عرض و ارتفاع لایه تقویت کننده بر ظرفیت باربری پی بررسی شد. نتایج حاصل از آنالیز در قالب نمودارهای بدون بعد ترسیم و بر مبنای آن‌ها چیدمان بهینه لایه تقویت کننده تعیین گردیده است. از مهم‌ترین نتایج مطالعه حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- نتایج تحلیل‌های عددی بیان کننده این است که افزودن لایه ژئوسل، ظرفیت باربری پی تحت بار قائم توام با نیروی برشی را نزدیک به ۵۰٪ افزایش داده است.

۲- عمق بهینه جایگذاری لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VH برابر با $u=0.025B$ شده است.

۳- عرض بهینه لایه مسلح کننده ژئوسل در فضای بارگذاری VH برابر با $b=4B$ به دست آمده است.

۴- ارتفاع بهینه لایه تقویت کننده در این فضای بارگذاری $h=0.6B$ تعیین شده است.

mechanisms of geocell-reinforced sand foundations, International Journal of Geomechanics, 12, (2012) 537-548.

- [4] A. M. Hegde and T. G. Sitharam, Effect of infill materials on the performance of geocell reinforced soft clay beds, Geomechanics and Geoengineering, (2014) 37-41.
- [5] C. Swaraj and S. Shakti, A review of studies on geocell-reinforced foundations". Research Journal of Recent Sciences. 4, (2015) 24-30.
- [6] C. Sanjei and L. I. N. De Silva, Numerical modelling of the behaviour of model shallow foundations on geocell reinforced sand, Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), (2016) 216-221.
- [7] M. Oliaei and S. Kouzegaran, Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement, Geotextiles and Geomembranes 45, (2016) 11-22.
- [8] A. Shadmand, M. Ghazavi and N. Ganjian, Scale effects of footings on geocell reinforced sand using large-scale tests, Civil Engineering Journal 4, (2018) 497-508.
- [9] A. Kaur, G. K. Singh and P. Singh, Bearing capacity improvement using geocell reinforced sand, ICSWMD, LNCE 21, (2019) 160-169.
- [10] A. Jaswal, Bearing capacity improvement of sand using geocell reinforcement, Indian Geotechnical Conference GeoNEst. (2017). IIT Guwahati, India.
- [11] H. Saki and H. Mehrnehad, Numerical study of the effect of geocell on the bearing capacity of strip foundations in sandy soils, The Second National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, (2015) (in Persian).
- [12] Z. Beigi and M. H. Arvin, Study of the behavior of circular foundations located on soil reinforced with geocell, Second National Conference on Soil Mechanics and Pi Engineering, (1394) (in Persian).
- [13] P. Fazeli Dehkordi and U. F. Abdul Karim, Behaviour of circular footings confined by rigid base and geocell reinforcement. Arabian Journal of Geosciences 13,

باید این نکته را در نظر داشت که با توجه به این که این مطالعه برای یک هندسه خاص از پی و ژئوسل و نوع خاک خاص انجام گرفته بنابراین نتایج پژوهش حاضر متاثر از این شرایط می‌باشد.

۶- فهرست علائم

B	ابعاد پی m
b	عرض لایه تقویت کننده m
C	چسبندگی kN/m^2
d	ضخامت m
E	مدول الاستیسیته kN/m^2
EA	سختی الاستیک kN/m
h	ارتفاع لایه تقویت کننده m
u	عمق جایگذاری لایه مسلح کننده m
ϕ	زاویه اصطکاک داخلی، درجه
ν	ضریب پواسن
γ	وزن مخصوص kN/m^3
ψ	زاویه اتساع، درجه
R_{inter}	ضریب اینترفیس

منابع

- [1] S. K. Dash, K. Rajagopal and N. R. Krishnaswamy, Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations, Geosynthetics International 11 (1), (2004) 35-42.
- [2] S. K. Pokharel, J. Han, D. Leshchinsky, R. L. Parsons and I. Halahmi, Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading, Geotextiles and Geomembranes 28, (2010) 570-578.
- [3] S. K. Dash, Effect of geocell type on load-carrying

- Bearing capacity-relative density behavior of circular footings resting on geocell-reinforced sand. *European journal of environmental and civil engineering*, (2021).
- [16] B. Look, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, Second Edition, (2014) 418 Pages.
- (2020) 1-12.
- [14] F. Astaraki, M. Esmaceli and M. R. Roozbini, Influence of geocell on bearing capacity and settlement of railway embankments: an experimental study. (2020).
- [15] P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi and U. F. Abdul Karim,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ghasemi Zadeh, M. Parvizi, M. Rabeti Moghadam, Effect of Geocell on Bearing Capacity of Shallow Foundations Under Inclined Load and Determination of Optimum Layout using the Three-Dimensional Finite Element Method, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 2795-2812.

DOI: [10.22060/ceej.2022.19039.7043](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19039.7043)



