



Research Article

Three-dimensional modeling of geocell effects on the enhancement of raft foundations in the weak soils of Ahvaz.

Amin Khorshidpansah¹, Ali Salighe Zadeh^{2*}

1- M.Sc. in Civil Engineering – Geotechnical Engineerin, Jahad University Khuzestan, Ahvaz, Iran.

*2- Department of Civil Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

Received: 22 May 2026; Revised: 23 June 2026; Accepted: 29 June 2026; Published: 23 September 2026

Abstract

In this study, the effect of using geocell as an innovative and effective method for improving loose soils and enhancing the bearing capacity of shallow foundations was investigated. Given the weak geotechnical conditions in Ahvaz and the need to replace costly methods such as pile driving, the objective of the research was to evaluate the performance of geocell and determine its optimal dimensions. Three-dimensional numerical modeling was conducted using PLAXIS 3D software on a concrete foundation with a width of 10 meters and a thickness of 0.8 meters. In this model, the Mohr–Coulomb behavioral model was used for the soil, and geogrid elements with interface properties were applied to simulate the geocell. The analyses were performed in three parametric stages, including variations in installation depth (u/B), layer height (h), and layer width (b/B). The results showed that the use of geocell significantly increased the bearing capacity and noticeably reduced settlement. The best performance was achieved when the geocell was placed at a depth of $0.05B$ below the foundation base. Increasing the height up to 20 cm and the width up to $1.5B$ also improved the load–settlement behavior, but further increases were not economically justified. Comparison between the optimized model and the unreinforced model revealed that the bearing capacity more than doubled, and settlement under operational loads was significantly reduced. Ultimately, this research confirms the importance of precise design and the use of geocell as an effective, sustainable, and economical solution in civil engineering projects in regions with weak soils, such as Ahvaz.

Keywords: *Geocell, Bearing capacity, Allowable settlement, PLAXIS 3D*

Cite this article as Khorshidpanah, A and Salighehzadeh, A. (2026). Three-dimensional modeling of geocell effects on the enhancement of raft foundations in the weak soils of Ahvaz. (e246459). Civil and Project, 8(7), e246459 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.588096.1455>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: aminkhorshidpanah@gmail.com



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

مدلسازی سه بعدی تأثیر ژئوسل بر بهسازی پی های گسترده در خاک های ضعیف اهواز

امین خورشیدپناه^۱، علی سلیقه زاده^{۲*}

۱- کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک، جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

۲* - مربی گروه عمران، گروه مهندسی عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

تاریخ دریافت: ۰۱ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۰۲ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۰۸ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مهر ۱۴۰۵

چکیده

در این پژوهش، اثر استفاده از ژئوسل به عنوان روشی نوین و مؤثر در بهسازی خاک های سست و افزایش ظرفیت باربری پی های سطحی بررسی شده است. با توجه به شرایط ژئوتکنیکی ضعیف در شهر اهواز و نیاز به جایگزینی روش های پرهزینه ای مانند شمع کوبی، هدف تحقیق ارزیابی عملکرد ژئوسل و تعیین ابعاد بهینه آن بود. مدلسازی عددی سه بعدی با نرم افزار PLAXIS 3D بر روی پی بتنی به عرض ۱۰ متر و ضخامت ۰/۸ متر انجام شد. در این مدل، از مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک و المان ژئوگرید همراه با Interface برای ژئوسل استفاده گردید. تحلیل ها در سه مرحله پارامتریک شامل تغییر عمق نصب ژئوسل (u/B)، ارتفاع لایه (h)، و عرض آن (b/B) انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از ژئوسل باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و کاهش محسوس نشست می شود. بهترین عملکرد زمانی حاصل شد که ژئوسل در عمق $B/0.05$ از کف پی قرار گرفت. افزایش ارتفاع تا ۲۰ سانتی متر و عرض تا $B/1.5$ نیز موجب بهبود رفتار بار-نشست شد. مقایسه مدل بهینه با مدل غیرمسلح نشان داد که ظرفیت باربری بیش از دو برابر افزایش یافته و نشست در بارهای بهره برداری به طور چشمگیری کاهش یافته است. در نهایت، این تحقیق اهمیت طراحی دقیق و استفاده از ژئوسل را به عنوان راهکاری مؤثر، پایدار و اقتصادی در پروژه های عمرانی مناطق دارای خاک های ضعیف مانند اهواز تأیید می کند.

کلمات کلیدی: ژئوسل، ظرفیت باربری، نشست مجاز، PLAXIS 3D

* پست الکترونیک نویسنده مسئول : a.salighehzadeh@iaau.ac.ir

۱- مقدمه

فونداسیون یا شالوده به عنوان یک رابط بین سازه و خاک می باشد که نیروهای وارد شده بر سازه را به خاک منتقل می کند. خاک زیر فونداسیون نقش بسیار مهم و حساسی در طراحی فونداسیون بازی می کند و عدم توجه به آن می تواند عواقب بعضاً جبران ناپذیری داشته باشد. ظرفیت باربری خاک زیر فونداسیون یکی از مسائل مهم و حیاتی قبل از احداث سازه و تصمیم گیری جهت انتخاب نوع و خصوصیات فونداسیون می باشد. وقتی وزن سازه، قابل توجه و ظرفیت باربری خاک سطحی خیلی کم باشد، باید به گونه ای ظرفیت باربری خاک را افزایش داد.

یکی از جدیدترین روش های افزایش ظرفیت باربری خاک، استفاده از مسلح کننده هاست. استفاده از مسلح کننده های پلیمری به خصوص مسلح کننده های سلولی مانند ژئوسل جهت تسلیح خاک های کم تراکم و به منظور بهبود رفتار شالوده های سطحی در دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. ژئوسل امروزه به عنوان روشی پیشرفته جهت تثبیت خاک، با تکیه بر محصور کردن خاک می تواند راهگشای بسیاری از مسائل چالش برانگیز تثبیت خاک باشد. ژئوسل محصول پلیمری سه بعدی و نفوذپذیر است که دارای ساختار شبکه ای بصورت لانه زنبوری است. این سلول ها در میان خود دارای فضایی خالی می باشند که این فضا می تواند توسط مصالح طبیعی مانند خاک، سنگ و یا مواد پلیمری مانند فوم پر شوند. هنگامی که این مصالح با خاک پر می شوند یک سیستم محصور را شکل می دهند. در کلیه پروژه های عمرانی به علت مقاومت پایین خاک خصوصاً در بسترهای سست و مرطوب، امکان نشست و ترک خوردگی، اجتناب ناپذیر است. با توجه به مکانیزم انتقال بار در ژئوسل، این شبکه سبک یک راه حل مطمئن جهت کنترل ترک خوردگی، نشست و فرسایش خاک در کاربردهای صنعت راه و ساختمان، صنعت راه آهن، ساختمان های سبز، صنعت نفت و گاز، آب و فاضلاب، صنعت و معدن و نیروگاه های انرژی بادی می باشد.

در اغلب نقاط شهر اهواز، خاک ضعیف بوده و در بسیاری از پروژه های ساخت و ساز طبقاتی، نیاز به شمع وجود دارد. این تحقیق با هدف بهسازی خاک جهت عدم نیاز به استفاده از شمع و کمک به اقتصاد پروژه های ساخت و ساز در شهر اهواز انجام شد. به عنوان جمع بندی نهایی می توان بیان نمود که در این پژوهش به بررسی تاثیر استفاده از ژئوسل در خاک زیر فونداسیون گسترده واقع بر روی خاک های سست و ضعیف شهر اهواز پرداخته و تاثیر استفاده از آن بر نشست ها و تنش های ایجاد شده در خاک زیر فونداسیون بررسی و ابعاد بهینه لایه تقویت کننده با استفاده از مطالعه عددی سه بعدی توسط نرم افزار Plaxis 3D بدست آمده است.

۲- مرور ادبیات

در پژوهش شریعتی و همکاران (۱۴۰۰)، با کمک نرم افزار آباکوس به مطالعه ای تأثیر مشخصات هندسی ژئوسل در ظرفیت باربری پی سطحی مستقر بر خاک مارن اشباع پرداخته شده و در ادامه، رابطه ای جهت همگن سازی خاک بهسازی شده با تسلیح ژئوسل ارائه شده است. در این مطالعه، از نرم افزار آباکوس در طی دو گام تحلیلی استفاده شده است. عملیات تحلیل مدل، با گام ژئواستاتیک آغاز شد، که هدف آن اعمال وزن لایه های خاک، برقراری تعادل تنش میان لایه های خاک در حالت سکون و ناشی از وزن لایه های خاک و همچنین محاسبه تنش و تغییر مکان 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. نتایج نشان می دهد که با افزایش ارتفاع ژئوسل در نسبت نشست به قطر پی بزرگتر از ۰/۱، میزان تأثیر ارتفاع ژئوسل در افزایش ظرفیت باربری ملاحظه شده است، که میزان آن در خاک های سست تر بیشتر بوده است. همچنین با افزایش اندازه ی سلول ژئوسل تا ۰/۲ متر و 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 لایه ی ژئوسل می توان بیان کرد که طول بهینه ی لایه ی ژئوسل ۲ برابر قطر پی است.

در مطالعه دهکردی (۱۴۰۱) تاثیر همجواری دو شالوده دایروی متقارن واقع بر ماسه نیمه متراکم تسلیح شده با ژئوسل مورد ارزیابی قرار گرفته است. با حفظ هندسه و موقعیت بهینه ثابت برای ژئوسل در خاک بستر، اثر تغییر فاصله بین شالوده ها بر میزان باربری و نشست

آنها مطالعه شده است. نتایج حاکی از آن است که وجود مسلح کننده سه بعدی در ترکیب با اثر همجواری شالوده‌ها می‌تواند باربری را بیش از ۳۰٪ و نشست را تا بیش از ۶۰٪ نسبت به یک شالوده منفرد مشابه واقع بر بستر غیرمسلح بهبود دهد. حداکثر باربری در حالتی به دست آمد که دو شالوده کاملاً در مجاورت یکدیگر واقع شده باشند. زمانی که فاصله بین شالوده‌ها از سه برابر قطر شالوده بیشتر می‌شود اثر همجواری کاهش قابل توجهی داشته و هر کدام از شالوده‌ها تقریباً رفتاری مشابه یک شالوده منفرد را خواهند داشت.

در مطالعه نمایی و همکاران (۱۴۰۱) به منظور بررسی رفتار بیرون‌کششی استاتیکی و چندمرحله‌ای ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه‌ای، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به وسیله‌ی دستگاه بیرون‌کشش بزرگ‌مقیاس انجام شده است. آزمایش‌های بیرون‌کششی سرعت ثابت و چندمرحله‌ای به ترتیب برای بررسی رفتار استاتیکی، تناوبی و پستانوبی ژئوسل مدفون در خاک‌های دانه‌ای ترتیب داده شده است. مقاومت بیرون‌کشش نهایی به‌دست آمده از آزمایش بیرون‌کشش، شامل: مؤلفه‌های متفاوتی است که هر یک از آنها توسط یک روش تئوری محاسبه شده است. نتایج نشان داد که رفتار بار بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل‌ها به صورت سخت‌شونده بوده است که مقدار آن وابسته به مؤلفه‌ی مقاومت پاسیو و اصطکاکی بسیج شده است. همچنین مقاومت بیرون‌کشش نهایی پساسیکلی به‌دلیل شکسته یا ضعیف شدن برخی از قفل و بست‌ها بین دانه‌های مصالح پُرکننده و خاک اطراف در هنگام حرکت رفت و برگشتی فاز سیکلی، کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی بوده است.

گوپتا و همکاران^۱ (۲۰۱۸) رفتار شالوده‌های مربعی همجوار واقع بر بسترهای رسی مسلح شده با ژئوسل را با مطالعه آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند و نتایج این تحقیق نشان داد که ژئوسل می‌تواند باعث تغییر نه چندان زیادی در رفتار شالوده‌های مربعی همجوار متکی بر بسترهای رسی شود. در این مطالعه با استفاده از آزمایش و مدل‌سازی عددی سه‌بعدی (با استفاده از نرم افزار FLAC 3D)، تأثیر تداخل بر پی‌های مربعی با فاصله نزدیک در بسترهای رسی تقویت‌شده با ژئوسل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش فاصله پی‌ها، اندرکنش کاهش می‌یابد و پس از فاصله 2B بین پی‌ها، اثرات تداخل تقریباً صفر می‌شود (B عرض پی مربعی می‌باشد). اثر تداخل به عنوان ضریب تداخل، IF تعیین می‌شود و به عنوان نسبت فشار باربری نهایی یک پی تداخلی (همجوار) به یک پی تک تعریف می‌شود. حداکثر ضریب تداخل حدود ۱٫۵ مشاهده شد. در حالی که در مورد خاک رس تقویت نشده و در مورد خاک رس تقویت شده با ژئوسل، فشار باربری نهایی حدود ۴ برابر بیشتر از پی تک غیر تقویت شده بود. به دلیل تنش اعمالی، فشار محصور در زیر پی‌های همجوار در اعماق کم افزایش می‌یابد که به دلیل برهم کنش بین مناطق شکست پی‌های همجوار است که ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد.

فاضلی دهکردی و همکاران (۲۰۱۹) رفتار شالوده‌های همجوار متکی بر ماسه با ضخامت نازک و تسلیح شده با مسلح کننده‌های سلولی واقع بر یک بستر صلب را مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که ضخامت بستر ماسه‌ای و لایه صلب واقع در زیر آن می‌تواند کارایی ژئوسل و همچنین بزرگای اثر متقابل شالوده‌ها را کاملاً تغییر دهد. در این تحقیق ظرفیت باربری و نشست پی‌های دایره‌ای دوقلو در مقیاس بزرگ بر روی لایه‌های ماسه‌ای تقویت نشده و ژئوسل تقویت شده با ضخامت‌های مختلف بررسی شده است. نقش ضخامت لایه، فاصله بین دو پی مجاور و قطر پی نشان می‌دهد که بستر صلب به طور قابل توجهی بر فشار، نشست و شیب تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر ظرفیت باربری زمانی حاصل می‌شود که دو پی در تماس باشند و بستر صلب در عمق کم باشد. با کاهش عمق بستر صلب و تقویت شن و ماسه با ژئوسل، تأثیر تداخل پی بر نشست و کج شدن پی‌های نزدیک در یک بار مشخص کاهش می‌یابد. این برای بسترهای صلبی که در کمتر از 2B قرار دارند مشاهده می‌شود، جایی که B قطر پی است.

در مطالعه بیسواس و سارکار^۲ (۲۰۲۰)، به بررسی تأثیر استفاده از ژئوسل بر روسازی‌های انعطاف‌پذیر با استفاده از نرم‌افزار Plaxis-3D، یک نرم‌افزار مبتنی بر اجزای محدود برای مسائل ژئوتکنیکی پرداخته شده است. در این مطالعه اثربخشی و بهینه‌سازی عملکرد سازه‌های روسازی با یک و چند لایه ژئوسل مقایسه شده است. نتیجه بهبود قابل توجهی را با توجه به کاهش تغییرشکل، افزایش ظرفیت

1 Gupta et al.
2 Bwas and Sarkar

باربری و بهبود مصرف مواد به تصویر کشیده است. هدف پیش‌بینی شده روشی مناسب برای کاهش کمبود زیرساخت‌های مناسب برای ساخت شبکه جاده‌ای خواهد بود که تقاضای شهرنشینی روزافزون را برآورده می‌کند.

فاضلی دهکردی و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیق خود بر مدل‌سازی دو فونداسیون منفرد همجوار و غیر یکسان در شیب‌های شن و ماسه تقویت‌نشده و تقویت‌شده با ژئوسل متمرکز شدند. این فونداسیون‌ها تحت بارهای ثقلی مختلف از ساختمان‌های با وزن‌های مختلف قرار گرفتند. برای این منظور، یک سری آزمایش در مقیاس بزرگ انجام شد. با در نظر گرفتن مقادیر بهینه برای عمق تعبیه و هندسه ژئوسل، اثرات ترکیبی عدم تقارن فونداسیون، خواص مواد، شدت بار و تقویت ژئوسل بر ظرفیت باربری فونداسیون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر نسبت فاصله بین فونداسیون‌ها و فاصله آنها از لبه شیب بر عملکرد کلی و کارایی سیستم نیز مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها به طور قطعی نشان داد که گنجاندن تقویت‌کننده ژئوسل، همراه با اثر تداخل بین فونداسیون‌ها، به طور قابل‌توجهی ظرفیت باربری فونداسیون را در سطوح شیب‌دار افزایش می‌دهد و منجر به بهبود قابل‌توجه بیش از ۳۰۰ درصدی می‌شود.

سان جی و همکاران (۲۰۲۴) متوجه شدند، ژئوسل‌ها در بسیاری از کشورهای آسیایی به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد برای تقویت خاک‌های نرم مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به دلیل سرعت اجرا، کارایی بالا و سازگاری با محیط‌زیست، توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند. با وجود این، در سریلانکا استفاده از ژئوسل هنوز به‌عنوان یک فناوری بهسازی خاک رایج و شناخته‌شده مطرح نیست. این پژوهش با هدف بررسی امکان‌سنجی به‌کارگیری ژئوسل در صنعت ساخت‌وساز سریلانکا، یک مدل عددی سه‌بعدی برای تحلیل رفتار ماسه مسلح‌شده با ژئوسل در نرم‌افزار PLAXIS 3D توسعه می‌دهد. در این مطالعه، هندسه سه‌بعدی ژئوسل در محیط CAD ایجاد و سپس به PLAXIS 3D وارد شد و با استفاده از المان سازه‌ای ژئوگرید مدل‌سازی گردید. سه حالت مختلف شامل خاک بدون تقویت، خاک با یک لایه ژئوسل و خاک با دو لایه ژئوسل برای یک پی نمونه با ابعاد 3×3 متر مورد تحلیل قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی اقتصادی، نسبت بهینه ظرفیت باربری به هزینه (B/C) با تغییر ابعاد پی و بر اساس روش آزمون و خطا تعیین شد. تحلیل‌ها برای بار محوری ۱۲۰۰ کیلونیوتن انجام گرفت و نتایج نشان داد که پی با ابعاد 1.6×1.6 متر بر روی خاک مسلح‌شده با دو لایه ژئوسل، بهترین عملکرد سازه‌ای و اقتصادی را ارائه می‌دهد. در ادامه، یک مطالعه امکان‌سنجی پایدار نیز برای ارزیابی مناسب بودن ژئوسل در شرایط بومی سریلانکا انجام شد. یافته‌ها بیانگر آن است که هنگام استفاده از ژئوسل به‌عنوان تقویت‌کننده خاک، شاخص‌های عملکرد اقتصادی و اجتماعی نقش پررنگ‌تری نسبت به شاخص‌های زیست‌محیطی دارند و می‌توانند توجیه‌پذیری این فناوری را در پروژه‌های عمرانی افزایش دهند.

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از ژئوسل به‌عنوان یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک، نقش مهمی در بهبود رفتار مکانیکی لایه‌های خاکی دارد، به‌ویژه زمانی که لایه ماسه‌ای بر روی زیرلایه‌ای از رس نرم قرار گرفته باشد. در این زمینه، Sharma و Juneja (۲۰۲۳) یک تحلیل عددی جامع انجام دادند تا اثر ژئوسل بر عملکرد سیستم ماسه-رس را بررسی کنند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که حضور ژئوسل موجب افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری و کاهش نشست قائم در مقایسه با حالت بدون تقویت می‌شود. این بهبود عملکرد عمدتاً ناشی از ایجاد محصورشدگی سه‌بعدی در لایه ماسه‌ای و محدود شدن تغییرشکل جانبی خاک است. همچنین نتایج تحلیل‌ها بیانگر آن بود که ژئوسل باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در لایه رس نرم شده و از تمرکز تنش در ناحیه مرکزی جلوگیری می‌کند. مطالعه مذکور همچنین نشان داد که افزایش ارتفاع سلول ژئوسل و استفاده از چندین لایه تقویتی می‌تواند عملکرد سیستم را بهبود دهد، هرچند این افزایش اثر تا حدی محدود بوده و پس از یک مقدار مشخص، بازده افزایشی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که ژئوسل می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مؤثر برای بهسازی خاک در شرایطی که لایه‌های فوقانی و زیرین دارای رفتار مکانیکی متفاوت هستند، مورد استفاده قرار گیرد.

۴- روش انجام تحقیق

نرم افزار PLAXIS3D جهت مدل سازی پی

با گسترش روزافزون نرم افزارهای رایانه‌ای، دقت تحلیل‌های مهندسی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در حوزه مهندسی ژئوتکنیک، نرم افزار PLAXIS3D به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند تحلیل عددی شناخته می‌شود. این نرم افزار مبتنی بر روش اجزای محدود بوده و برای بررسی پایداری و تغییر شکل در مسائل ژئوتکنیکی کاربرد دارد. توسعه آن از سال ۱۹۸۷ در دانشگاه دلفت آغاز شده و با همکاری متخصصان اروپایی همچنان در حال تکامل است.

PLAXIS3D قابلیت مدل سازی در حالت کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری را داراست و امکان شبیه سازی مرحله‌ای فرآیند ساخت و حفاری را فراهم می‌سازد. نسخه ۲۰۲۴ این نرم افزار در مطالعه حاضر برای تحلیل کرنش‌های کوچک مورد استفاده قرار گرفته است. خروجی‌های اصلی شامل تغییر مکان گره‌ها، تنش‌های مؤثر، فشار آب حفره‌ای و نیروهای سازه‌ای می‌باشد.

این نرم افزار از مدل‌های رفتاری متنوعی مانند مدل الاستیک خطی، موهر-کلمب، خاک سخت شده و خزش خاک نرم پشتیبانی می‌کند و شامل عناصر دو بعدی و سه بعدی با گره‌های مختلف است. مراحل کاری آن شامل چهار بخش اصلی است: مدل سازی هندسی و مصالح، تعریف مراحل محاسباتی، استخراج نتایج عددی و رسم منحنی‌های بار-جابجایی و مسیرهای تنش.

کلیاتی در مورد PLAXIS3D

نرم افزار PLAXIS3D دارای چهار زیر برنامه ورودی، محاسبات، خروجی و منحنی می‌باشد که در ادامه به طور مختصر در مورد آنها توضیح داده می‌شود.

معرفی داده‌های ورودی

اطلاعات ورودی در برنامه PLAXIS3D به چهار نوع متمایز زیر تقسیم می‌شود:

اطلاعات ورودی مربوط به اجزاء هندسه مدل (مانند ترسیم لایه خاک)

اطلاعات ورودی متنی مانند (تخصیص نام پروژه)

اطلاعات ورودی مربوط به مقادیر (تخصیص پارامترهای مدل)

اطلاعات ورودی مربوط به انتخاب‌ها (مانند انتخاب مدل خاک)

به طور کلی زیر برنامه ورودی شامل تمام قابلیت‌های مربوط به رسم و تغییر مدل هندسی مش بندی عناصر محدود متناظر آن و ایجاد شرایط اولیه می‌باشد.

انتخاب نوع مدل

در تحلیل عددی پروژه‌های ژئوتکنیکی، ایجاد یک مدل هندسی دقیق نخستین گام اساسی محسوب می‌شود. این مدل باید نمایانگر شرایط واقعی سبدهی نمونه شامل لایه‌های خاک، اجزای سازه‌ای، مراحل ساخت و نوع بارگذاری باشد و ابعاد آن به گونه‌ای انتخاب شود که اثر مرزها بر نتایج کاهش یابد.

در نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند PLAXIS3D، مدل‌سازی می‌تواند به صورت کرنش صفحه‌ای یا تقارن محوری انجام شود. مدل کرنش صفحه‌ای برای سازه‌هایی با سطح مقطع یکنواخت و بارگذاری ثابت در امتداد عمود بر مقطع مناسب است. در مقابل، مدل تقارن محوری برای سازه‌های دایره‌ای یا مستطیلی با بارگذاری یکنواخت حول محور مرکزی کاربرد دارد. در این تحقیق، با توجه به شرایط هندسی و بارگذاری، مدل تقارن محوری انتخاب شده است.

مدل‌سازی هندسی

برای ایجاد مدل عناصر محدود باید ابتدا مدل هندسی رسم شود. مدل هندسی شامل نقاط، خطوط و توده‌ها می‌باشد. خطوط و نقاط توسط کاربر وارد می‌شوند در حالیکه توده‌ها توسط برنامه ترسیم می‌شوند. هندسه مدل فقط شامل موقعیت اولیه نمی‌شود بلکه شامل موقعیت‌های مختلفی که در مراحل محاسباتی اتفاق می‌افتد نیز می‌شود.

در تحقیق حاضر مدل‌سازی برای محاسبات ظرفیت باربری در حالت کلی و استفاده از مسلح‌کننده ژئوگرید صورت گرفت. همچنین برای از بین بردن اثر مرزها روی پی فاصله مرزها از مرکز پی در نظر گرفته شد. به دلیل تقارن فقط نیمی از هندسه در مدل‌سازی استفاده شد.

مش‌بندی

پس از ایجاد مدل هندسی، مرحله شبکه‌بندی اجزای محدود آغاز می‌شود که شامل تقسیم هندسه به عناصر کوچک برای انجام محاسبات عددی است. در نرم‌افزار PLAXIS، این فرآیند به صورت خودکار و بر اساس اصل چندضلعی‌های پایدار انجام می‌گیرد و منجر به تولید شبکه‌ای نامنظم اما با کارایی عددی بالا می‌شود. اندازه عناصر شبکه در این نرم‌افزار در پنج سطح از خیلی درشت تا خیلی ریز قابل تنظیم است. با توجه به زمان‌بر بودن محاسبات در شبکه‌های بسیار ریز، استفاده از آن‌ها تنها در نواحی با تمرکز تنش یا تغییر شکل بالا توصیه می‌شود. در این پژوهش، برای افزایش دقت تحلیل، از مش ریز استفاده شده است.

محاسبه بر اساس شبکه‌بندی به هنگام شده

در تحلیل‌های عددی با احتمال تغییر شکل‌های بزرگ، از محاسبات پیشرفته‌ای استفاده می‌شود که تأثیر تغییرات هندسی مدل را در نظر می‌گیرند. این نوع آنالیز به دلیل زمان‌بر بودن و دقت کمتر نسبت به روش‌های معمول، تنها در شرایط خاص به کار گرفته می‌شود. در این پژوهش، از محاسبات پلاستیک و تحکیم بهره گرفته شده است.

بارگذاری در نرم‌افزار مورد استفاده به سه روش انجام می‌شود: ساخت مرحله‌ای، ضرایب کل و ضرایب افزایشی. در هر فاز محاسبه، تنها یکی از این روش‌ها فعال است. روش ساخت مرحله‌ای امکان تغییر پیکربندی هندسه، مصالح و فشار آب را فراهم می‌سازد و شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تر فرآیند ساخت و حفاری را ممکن می‌سازد. در این حالت، نیروهای خارج از تعادل به صورت تدریجی اعمال می‌شوند. در روش ضرایب کل، کاربر می‌تواند ضرایب بارگذاری را تعیین کند و بار نهایی حاصل ضرب مقدار ورودی در ضریب متناظر است. در روش ضرایب افزایشی نیز بارگذاری به صورت نموی انجام شده و در هر مرحله، بار اعمال‌شده از ترکیب مقدار اولیه و ضریب رشد حاصل می‌شود.

داده‌های خروجی

در این بخش از برنامه، امکانات زیادی برای نمایش و فهرست تمام داده‌های ورودی (ایجاد شده به هنگام ساخت مدل) و محاسباتی (حاصل از انجام محاسبات) وجود دارند.

فهرست داده‌های ورودی برنامه شامل اطلاعات مربوط به تحلیل عناصر محدود، مشخصات مصالح، سطح آب زیرزمینی بارهای خارجی اعمالی، شرایط مرزی، عناصرها و گره‌ها و ... می‌باشد.

فهرست داده‌های خروجی شامل هندسه تغییر شکل یافته مدل، تغییر مکان‌ها در نقاط گرهی، تنش‌ها (کلی و مؤثر)، کرنش‌ها در نقاط تنش، نقاط، پلاستیک، فشار آب حفره‌ای کلی، اضافه فشار آب حفره‌ای، پتانسیل هیدرولیکی آب زیرزمینی میدان جریان آب زیرزمینی و بالاخره نیروهای ایجاد شده در عناصرهای سازه‌ای (تیر، ژئوگرید و مهار) می‌باشد.

مشخصات مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق

مدل‌های پی گسترده مورد بررسی از جنس بتن با ابعاد 10×10 متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر روی سطح زمین ایجاد شد. به منظور مدلسازی رفتار خاک از معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شد. از المان PLATE به منظور مدلسازی و تخصیص مصالح پی استفاده شد. به منظور مدلسازی لایه مسلح کننده ژئوسل نیز از المان ژئوگرید استفاده شد. برای در نظر گرفتن سطح اشتراک بین ژئوسل و خاک از المان Interface استفاده شد. چشمه‌های لایه ژئوسل نیز به صورت لوزی شکل به قطر ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مشخصات لایه‌های خاک نیز به صورت واقعی و با استفاده از اطلاعات موجود در یک دفترچه ژئوتکنیک مربوط به یک سازه طراحی شده (به همراه شمع) در شهر اهواز در منطقه کیانپارس برداشت شده است. مشخصات لایه‌های خاک به شرح جدول (۱) می‌باشد. ضمناً جدول سختی و کششی ژئوسل به ترتیب ۸۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. دلیل استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب، ساده بودن برای خاک‌های کم داده و ضعیف، همگرایی عددی بسیار خوب، مناسب بودن برای تحلیل‌های اولیه و پایداری و نشست و اما محدودیت آن برای خاک ضعیف اهواز عدم نمایش رفتار غیر خطی می‌باشد.

عناصر Interface

این عناصر برای در نظر گرفتن اندرکنش بین سازه‌ها و خاک استفاده می‌شود. این عناصر دارای ۱۶ گره می‌باشد. این عناصرها مرکب از ۸ جفت گره بوده که هر ۸ تا به گره‌های عناصرهای خاک متصل می‌شوند. ضخامت این عناصرها خیلی ناچیز نشان داده شده اما در روابط عناصر محدود این ضخامت صفر در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. مشخصات لایه‌های خاک

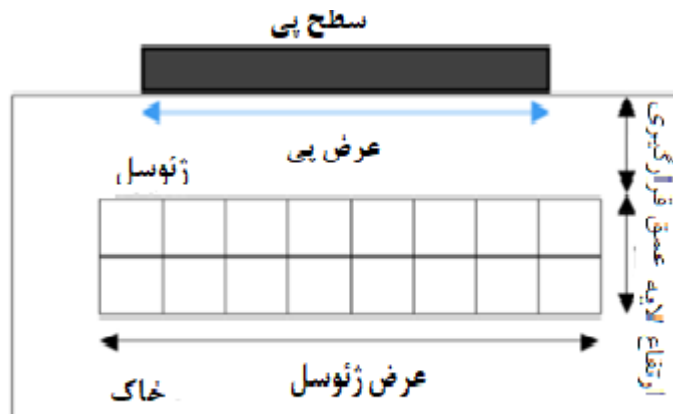
شماره لایه	ضخامت لایه (سانتی‌متر)	نوع خاک	چسبندگی (C) (kg/cm^2)	زاویه اصطکاک داخلی (Φ)	وزن مخصوص (γ_d) (kg/cm^3)
لایه اول	۲۸۰	CL	۰/۳۹	۴	۱/۶۲
لایه دوم	۴۰۰	CL	۰/۴۳	۷	۱/۶۳
لایه سوم	۱۲۰	SM	۰/۰۶	۳۰	۱/۶۴
لایه چهارم	۱۹۰	ماسه سنگ	-	-	۱/۹۸

بررسی پارامتریک مدل‌های ساخته شده. متغیرهای مورد بررسی در این پایان‌نامه شامل موارد زیر خواهند بود:

- (۱) عمق قرارگیری لایه ژئوسل ($u=0, 0.025B, 0.05B, 0.075B, 0.1B$) که B برابر عرض فونداسیون و برابر ۱۰ متر می‌باشد.
- (۲) ارتفاع لایه ژئوسل ($h=10\text{cm}, 15\text{cm}, 20\text{cm}$)

(۳) ابعاد لایه ژئوسل ($b=0.5B, 1B, 1.5B$)

پی‌های گسترده بدون مسلح کننده نیز مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در شکل (۱) پارامترهای مربوط به لایه ژئوسل معرفی شده‌اند.



شکل ۱. معرفی پارامترهای لایه ژئوسل

صحت سنجی

صحت سنجی مقاله با عنوان

Three-dimensional numerical analysis of geocell reinforced shell foundations

به بررسی عملکرد فونداسیون‌های پوسته‌ای تقویت‌شده با ژئوسل در بستر ماسه‌ای پرداخته است.

در صحت سنجی بعمل آمده مقایسه منحنی‌های ظرفیت باربری برای فونداسیون‌های پوسته‌ای (مخروطی و هرمی)، در حالت تقویت نشده و تقویت‌شده با ژئوسل مورد بررسی قرار داده شده‌اند.

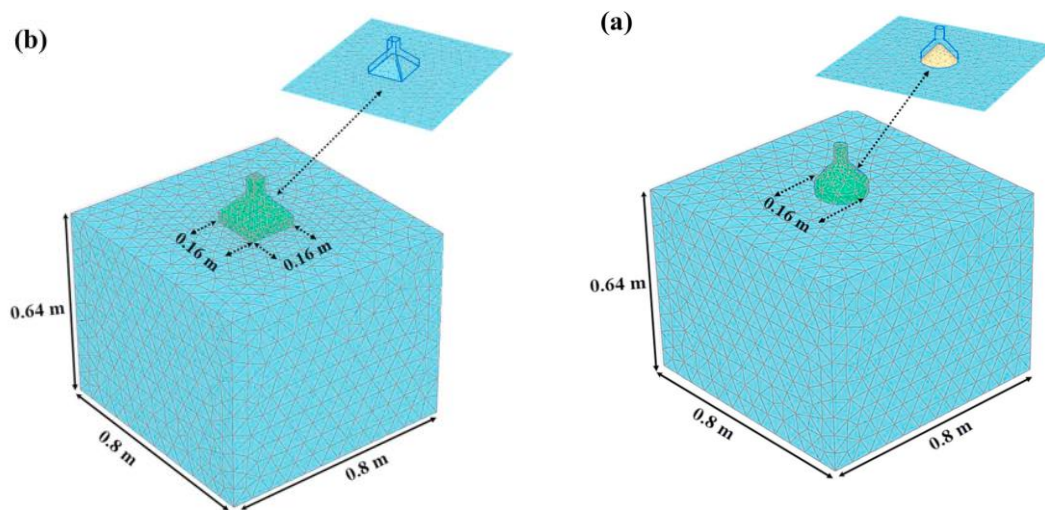
هدف: تحلیل عملکرد هندسه‌های فونداسیون با شکل هرمی و مخروطی (Conical, pyramidal) در شرایط تقویت‌شده و غیرتقویت‌شده

- فونداسیون‌ها به صورت جسم صلب (Rigid Body) مدل‌سازی شده‌اند.
- رفتار ماسه با مدل Mohr-Coulomb تعریف شده.

در نمودارهای شماره ۱- بار-نشست حاصل از تحلیل عددی برای پی‌های پوسته‌ای (مخروطی، هرمی)، در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. به وضوح مشخص است که پی‌های پوسته‌ای (مخروطی) ظرفیت باربری بالاتری نسبت به پی‌های (هرمی) دارند. نوع گسیختگی در پی‌های مخروطی با پی‌های هرمی متفاوت است؛ به طوری که پی‌های هرمی دچار گسیختگی واضحی همراه با تغییر شدید در شیب منحنی بار-نشست می‌شوند. این رفتار به وضوح مطابق با مدل گسیختگی خطی-الاستیک و کاملاً پلاستیک است. در مقابل، پی‌های مخروطی از یک خط گسیختگی کندتر و منحنی‌تر پیروی می‌کنند، بدون آنکه در نشست مشابه دچار گسیختگی مشخصی شوند. سطح پی‌های مخروطی موجب محصورسازی ماسه در حین نشست پی شده و در نتیجه ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.

جدول ۲. مشخصات فنداسیون و خاک

واحد	pyramidal هرمی	Conical مخروطی	پارامتر	دست هیندی
-	Linear Elastic	Linear Elastic	مدل رفتاری پی	شالوده
kN/m ²	1.61×10^{10}	1.61×10^{10}	مدول یانگ پی (E)	
-	0.25	0.25	ضریب پواسون ^۱ - مون پی	
mm	160	160	عرض/قطر پی (B/D)	
-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	مدل رفتاری خاک	خاک بستر
kPa	11,000	11,000	مدول یانگ (E)	
N/cm ² /c m	40	40	افزایش سختی با عمق (Einc)	
-	0.30	0.30	نسبت پواسون (ν)	
kPa	0.35	0.35	چسبندگی (c)	
°	37	37	زاویه اصطکاک داخلی (φ)	
°	7	7	زاویه اتساع (ψ)	
kN/m ³	17.6	17.6	وزن مخصوص (γ)	
-	0.9	0.9	ضریب کاهش سطح تماس با پی (Rint)	



شکل ۲. هندسه مدل سه بعدی PLAXIS برای تحلیل های اعتبارسنجی پی های پوسته ای. الف) مخروطی (ب) هرمی

تحلیل عددی سه بعدی پی های هرمی و مخروطی غیر مسلح و مسلح شده با ژئوسل

در این بخش، عملکرد پی های مخروطی مسلح شده با ژئوسل با پی های هرمی مقایسه شد. ژئوسل با شکل واقعی لانه زنبوری و ابعاد تجاری (۲۴×۲۰×۱۵ سانتی متر) مدل سازی شد. نتایج نشان داد که با افزودن ژئوسل، و استفاده از هندسه شکل پی مخروطی و با افزایش سطح مقطع که باعث توزیع بهتر تنش ها و کاهش تمرکز تنش در نوک پی می شود و در نهایت موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست شد.

بررسی نتایج مدل عددی صحت سنجی شده با نتایج مقاله

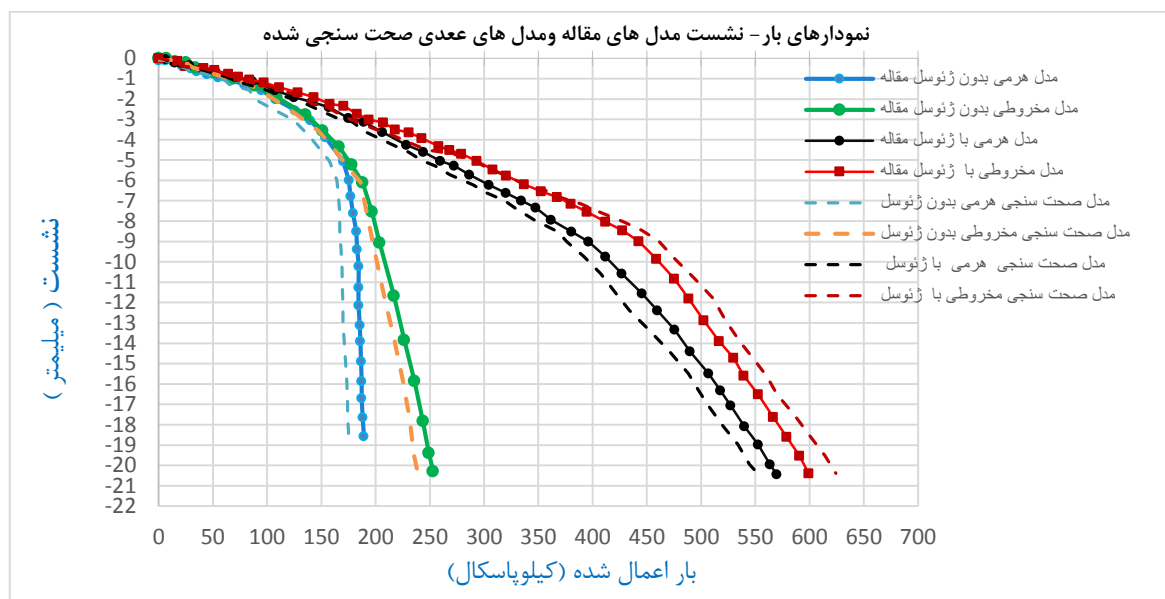
جهت صحت سنجی ظرفیت باربری پی ها از مدل های شکل ۱ و ۲ عملکرد پی های با ساختار پوسته ای (مخروطی و هرمی) که با ژئوسل تقویت شده اند، در مقایسه با پی های با ساختار پوسته ای (مخروطی و هرمی) بدون ژئوسل مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه، ژئوسل با فرم واقعی لانه زنبوری و ابعاد استاندارد تجاری (۲۴×۲۰×۱۵ سانتی متر) مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت و نتایج و مقایسه با مقاله اصلی در جدول ۴-۱ ارائه گردیده است.

جدول ۳. بررسی نتایج مدل عددی صحت سنجی با نتایج مقاله ظرفیت باربری پی ها بر حسب کیلو پاسکال

مدل مخروطی بدون ژئوسل صحت سنجی شده	مدل مخروطی بدون ژئوسل مقاله	مدل بدون ژئوسل صحت سنجی شده	مدل بدون ژئوسل مقاله	مدل مخروطی با ژئوسل صحت سنجی شده	مدل مخروطی با ژئوسل مقاله	مدل هرمی با ژئوسل صحت سنجی شده	مدل هرمی با ژئوسل مقاله
ظرفیت باربری	ظرفیت باربری	ظرفیت باربری	ظرفیت باربری	ظرفیت باربری	ظرفیت باربری	ظرفیت باربری	ظرفیت باربری
(KP)	(KP)	(KP)	(KP)	(KP)	(KP)	(KP)	(KP)
250	240	180	188	625	600	553	570
4%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	درصد اختلاف

نمودار زیر مقایسه نتایج مثل های صحت سنجی شده با مدل های مقاله اصلی (نویسنده: عبدالمطلب آری) را نشان می دهد.

****خطوط ممتد مربوط به اصل مقاله و خطوط چین مربوط به مدل های عددی صحت سنجی شده می باشد.****



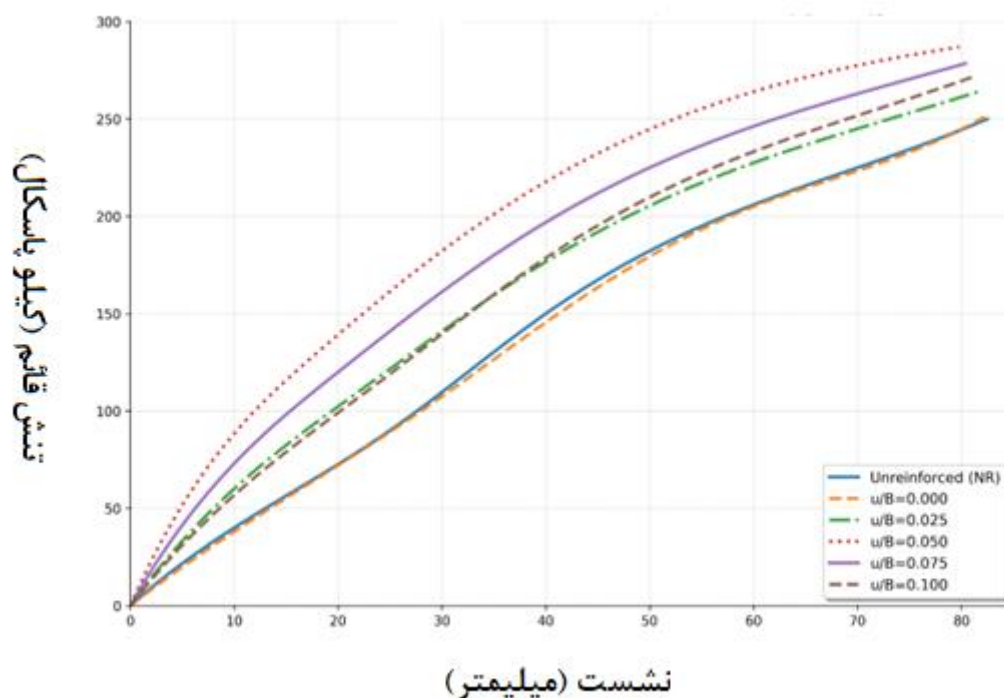
نمودار ۱. مقایسه نشست مدل های عددی نسبت به نشست مقاله صحت سنجی

تجزیه و تحلیل داده ها

بررسی اثر عمق قرارگیری ژئوسل (u/B)

نمودار (۲) تأثیر عمق قرارگیری ژئوسل بر رفتار باربری و نشست شالوده را در نسبت های مختلف u/B بررسی می کند. نتایج نشان می دهد که با افزایش عمق ژئوسل تا نسبت بهینه $u/B=0.05$ ، ظرفیت باربری نهایی به حدود ۲۸۷ کیلوپاسکال افزایش یافته و منحنی های بار-نشست به سمت بالا جابه جا می شوند. این بهبود ناشی از قرارگیری ژئوسل در ناحیه تمرکز تنش های برشی و اختلال در مکانیزم گسیختگی است.

در عمق های کمتر یا بیشتر از مقدار بهینه، عملکرد ژئوسل کاهش می یابد؛ در عمق های زیاد به دلیل خروج از ناحیه مؤثر تنش، و در عمق های کم به دلیل عدم محصور سازی کافی. در محدوده بارهای سرویس (حدود ۱۵۰ کیلوپاسکال)، اختلاف نشست ها ناچیز است و نقش ژئوسل بیشتر در افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری نمایان می شود تا در کاهش تغییر شکل های اولیه.



نمودار ۲. منحنی بار-نشست در حالات عمق قرارگیری مختلف لایه ژئوسل

نتایج نمودار (۲) نشان می‌دهد که عمق قرارگیری ژئوسل تأثیر چشمگیری بر عملکرد ژئوتکنیکی پی دارد. در حالت بدون تقویت، ظرفیت باربری نهایی ۲۵۰ کیلوپاسکال و نشست تحت بار سرویس ۲۷٫۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با افزودن ژئوسل و افزایش عمق تا نسبت بهینه $u/B = 0.05$ ، ظرفیت باربری به ۲۸۷ کیلوپاسکال (افزایش ۱۴٫۸٪) و نشست به ۲۶٫۶ میلی‌متر (کاهش ۳٫۳٪) رسید. در این عمق، ژئوسل در ناحیه تمرکز تنش‌های برشی قرار گرفته و موجب افزایش مقاومت برشی، توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها و گسترش ناحیه گسیختگی شده است. در مقابل، قرارگیری ژئوسل در عمق‌های کمتر یا بیشتر از مقدار بهینه، به دلیل عدم تعامل مؤثر با ناحیه تنش، موجب کاهش عملکرد سیستم می‌شود.

در این عمق، ژئوسل موجب دستیابی به بیشترین مقاومت نهایی، در حدود ۲۸۷ کیلوپاسکال، شده است که بیانگر بهبود عملکرد سیستم نسبت به حالت تقویت‌نشده می‌باشد. این رفتار به دلیل قرارگیری ژئوسل در ناحیه‌ای است که بیشترین تمرکز تنش‌های برشی در زیر پی رخ می‌دهد، و بدین ترتیب مکانیزم گسیختگی بالقوه را مختل کرده و منجر به افزایش مقاومت برشی مؤثر خاک و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها می‌گردد.

در مقابل، با افزایش عمق بیش از مقدار بهینه ($u/B = 0.075$ و $u/B = 0.100$)، منحنی‌ها روندی نزولی پیدا کرده و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. این پدیده به این علت است که در عمق‌های زیاد، لایه ژئوسل از ناحیه مؤثر تنش‌های زیر پی خارج شده و در فرآیند باربری نقش فعالی ایفا نمی‌کند. همچنین در عمق‌های بسیار کم ($u/B = 0.00$ و $u/B = 0.025$)، ژئوسل در محدوده تنش‌های سطحی قرار گرفته و به دلیل عدم ایجاد محصورسازی کافی، کارایی بهینه خود را نشان نمی‌دهد.

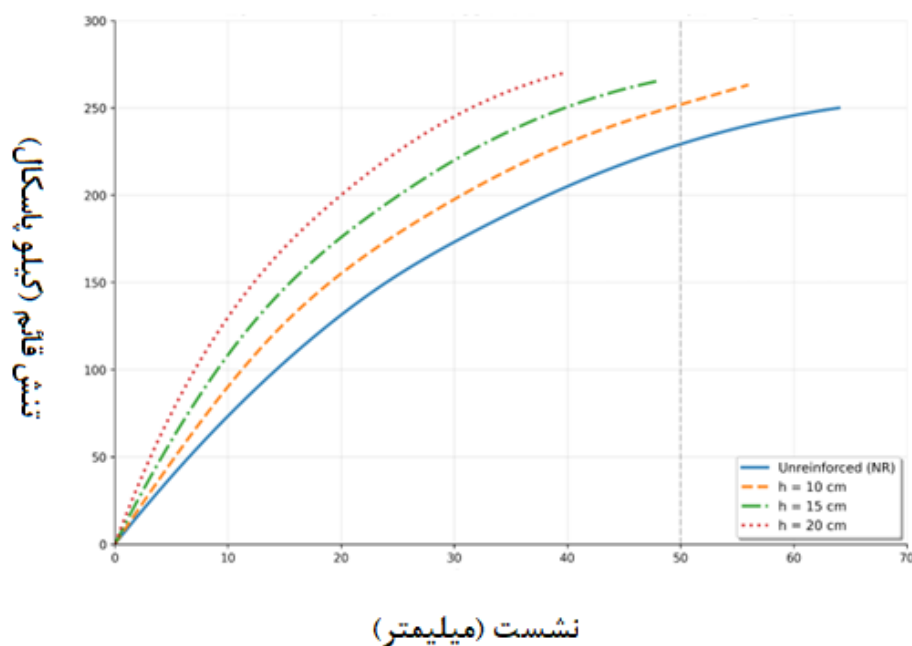
در مجموع، انتخاب دقیق عمق ژئوسل نقش کلیدی در بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست دارد و از نظر فنی و اقتصادی، استفاده از این روش برای پروژه‌های عمرانی با بارگذاری متوسط تا زیاد کاملاً مقرون‌به‌صرفه است.

جدول ۴. مقایسه مقادیر تنش و نشست در حالات عمق قرارگیری مختلف لایه ژئوسل

u/B Case	q_{ult} (kPa)	$q_a(FS=3)$ (kPa)	$q_a(s=50mm)$ (kPa)	q_a Governing (kPa)	s @150kPa (mm)
Unreinforced (NR)	250.0	83.3	~121	83.3	27.5
u/B=0.000	251.0	83.7	~122	83.7	27.4
u/B=0.025	264.0	88.0	~128	88.0	27.2
u/B=0.050	287.0	95.7	~138	95.7	26.6
u/B=0.075	278.5	92.8	~135	92.8	26.8
u/B=0.100	272.0	90.7	~132	90.7	27.1

بررسی اثر ارتفاع لایه ژئوسل (h)

نمودار (۲) تأثیر ارتفاع ژئوسل (۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر) بر رفتار بار-نشست پی را با نسبت‌های ثابت (با $u=0.05B$ و $b/B=1$ ثابت). بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع ژئوسل موجب بهبود پیوسته ظرفیت باربری و افزایش سفتی اولیه سیستم می‌شود. بیشترین عملکرد در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر مشاهده شده که ناشی از محصورسازی مؤثرتر و افزایش مقاومت برشی خاک است. در بارهای سرویس، منحنی‌های تقویت شده شیب بیشتری دارند و در نشست‌های بالاتر نیز فاصله آن‌ها از حالت بدون تقویت بیشتر می‌شود که بیانگر توسعه بهتر ناحیه پلاستیک و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌هاست. این یافته‌ها اهمیت انتخاب ارتفاع بهینه ژئوسل را در بهبود عملکرد مکانیکی سیستم خاک-ژئوسل تأیید می‌کند.



نمودار ۳. منحنی بار-نشست در حالات ارتفاع مختلف لایه ژئوسل

نتایج نمودار (۲) نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع ژئوسل از ۱۰ به ۲۰ سانتی‌متر موجب بهبود تدریجی ظرفیت باربری خاک شده و مقدار آن از ۲۶۳,۲ به ۲۷۰,۵ کیلوپاسکال (افزایش ۸,۲٪) رسیده است. این بهبود ناشی از عملکرد مؤثر ژئوسل در ایجاد محصورسازی جانبی و افزایش مقاومت برشی خاک است. با این حال، تأثیر ژئوسل بر کاهش نشست در بار سرویس ۱۵۰ کیلوپاسکال ناچیز بوده و مقدار نشست در محدوده ۲۷,۵ تا ۲۷,۸ میلی‌متر ثابت مانده است.

بنابراین، نقش اصلی ژئوسل در این شرایط، تقویت مقاومت برشی خاک است نه کاهش تغییرشکل‌ها. ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به عنوان حالت بهینه عملکردی شناسایی شده، اما انتخاب نهایی باید با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی صورت گیرد. در پروژه‌هایی با حساسیت بالا نسبت به نشست، استفاده از روش‌های تکمیلی بهسازی توصیه می‌شود. در مجموع، بهبود ظرفیت باربری با ژئوسل می‌تواند مزیت مهمی برای پروژه‌های با بارهای طراحی بالا فراهم آورد.

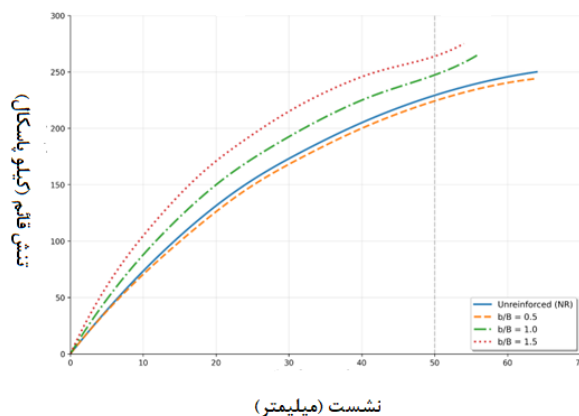
جدول ۵. مقایسه مقادیر تنش و نشست در حالات ارتفاع مختلف لایه ژئوسل

h Case	q_{ult} (kPa)	$q_a(FS=3)$ (kPa)	$q_a(s=50mm)$ (kPa)	q_a Governing (kPa)	s @150kPa (mm)
Unreinforced (NR)	250.0	83.3	121.0	83.3	27.5
h=10cm	263.2	87.7	~125	87.7	27.8
h=15cm	265.4	88.5	~128	88.5	27.7
h=20cm	270.5	90.2	~130	90.2	27.7

بررسی اثر عرض لایه ژئوسل (b/B)

نمودار (۳) تأثیر عرض لایه ژئوسل بر رفتار بار-نشست پی را بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عرض ژئوسل موجب بهبود قابل توجهی در ظرفیت باربری نهایی سیستم می‌شود. در حالی که عرض ۰,۵ برابر عرض پی تأثیر محسوسی نداشته، افزایش عرض به ۱,۰ و به‌ویژه ۱,۵ برابر عرض پی موجب جابه‌جایی صعودی منحنی‌ها و افزایش چشمگیر ظرفیت باربری شده است.

این بهبود ناشی از گسترش ناحیه محصورشده و انتقال یکنواخت‌تر تنش در توده خاک است. بیشترین کارایی در عرض ۱,۵ برابر عرض پی مشاهده شده که با تأخیر در گسیختگی و افزایش پایداری همراه بوده است. با این حال، در محدوده بارهای سرویس، اختلاف نشست بین حالت‌های مختلف محدود باقی مانده و نشان می‌دهد که تأثیر اصلی ژئوسل در افزایش ظرفیت نهایی است، نه در کاهش نشست‌های اولیه.



نمودار ۴. منحنی بار-نشست در حالات مختلف عرض لایه ژئوسل

نتایج حاصل از بررسی تأثیر عرض ژئوسل نشان می‌دهد که این پارامتر نقش مؤثری در افزایش ظرفیت باربری پی دارد، در حالی که تأثیر آن بر کاهش نشست محدود است. در حالت بدون تقویت، ظرفیت باربری نهایی ۲۵۰ کیلوپاسکال و نشست تحت بار سرویس ۲۷٫۵ میلی‌متر ثبت شد. استفاده از ژئوسل با عرض ۰٫۵ برابر عرض پی نه تنها بهبود ایجاد نکرد، بلکه ظرفیت باربری را کاهش داد. در مقابل، عرض‌های ۱٫۰ و ۱٫۵ برابر عرض پی به ترتیب موجب افزایش ظرفیت باربری به ۲۶۵٫۴ و ۲۷۵٫۱ کیلوپاسکال شدند که حاکی از بهبود ۱۰ درصدی در حالت بهینه است.

با این حال، تغییرات عرض ژئوسل تأثیر محسوسی بر نشست نداشته و مقادیر آن در بازه ۲۶٫۷ تا ۲۷٫۷ میلی‌متر باقی مانده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که عملکرد اصلی ژئوسل در بهبود مقاومت برشی و افزایش ظرفیت باربری نهفته است. از منظر طراحی، استفاده از ژئوسل با عرض حداقل ۱٫۰ B و ترجیحاً ۱٫۵ B به عنوان گزینه‌ای بهینه از نظر فنی و اقتصادی توصیه می‌شود.

جدول ۶. مقایسه مقادیر تنش و نشست در حالات مختلف عرض لایه ژئوسل

b/B Case	q_{ult} (kPa)	$q_a(FS=3)$ (kPa)	$q_a(s=50mm)$ (kPa)	q_a Governing (kPa)	s @150kPa (mm)
Unreinforced (NR)	250.0	83.3	~121	83.3	27.5
b/B=0.5	244.1	81.4	~119	81.4	27.5
b/B=1.0	265.4	88.5	~125	88.5	27.7
b/B=1.5	275.1	91.7	~128	91.7	26.7

نواوری‌ها و دستاوردهای تحقیق

نواوری‌ها و دستاوردهای این تحقیق را می‌توان در چند محور اصلی علمی و کاربردی طبقه‌بندی کرد که هر یک سهم قابل توجهی در گسترش دانش و بهبود عملکرد طراحی پی‌های سطحی مسلح‌شده با ژئوسل دارند:

۱- ارائه مدل عددی سه‌بعدی دقیق برای خاک لایه‌ای واقعی: در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته‌ی PLAXIS 3D، مدلسازی سه‌بعدی پی گسترده بر خاک لایه‌ای شهر اهواز انجام شد. در حالی که بسیاری از تحقیقات پیشین بر مدل‌های دوبعدی یا خاک‌های همگن متمرکز بودند، این تحقیق با در نظر گرفتن رفتار واقعی خاک لایه‌ای و مشخصات ژئوتکنیکی محلی، توانست رفتار واقعی‌تر سیستم را بازسازی کرده و نتایج قابل‌اعتمادتر و قابل‌تعمیم‌تری ارائه دهد.

۲- بررسی هم‌زمان سه پارامتر کلیدی هندسی ژئوسل (عمق، ارتفاع و عرض): یکی از مهم‌ترین نواوری‌های پژوهش، تحلیل هم‌زمان تأثیر سه متغیر اصلی هندسی ژئوسل یعنی عمق قرارگیری (u/B)، ارتفاع لایه (h) و عرض نسبی (b/B) است. در اغلب مطالعات پیشین، فقط یکی از این عوامل بررسی شده بود. این پژوهش با رویکرد پارامتریک جامع، اثرات متقابل این پارامترها را بر رفتار مکانیکی سیستم خاک-پی مشخص کرده و شرایط هندسی بهینه را تعیین نمود.

۳- تعیین هندسه بهینه ژئوسل برای شرایط خاک ضعیف اهواز: تحلیل نتایج نشان داد که عمق بهینه قرارگیری ژئوسل برابر با $u/B = 0.05$ ، ارتفاع بهینه ۲۰ سانتی‌متر و عرض بهینه در محدوده $b/B = 1.0 - 1.5$ است. این ترکیب هندسی موجب

افزایش ۸ تا ۱۰ درصدی ظرفیت باربری و کاهش حدود ۳ درصدی نشست گردید. تعیین این ابعاد بهینه برای شرایط واقعی خاک اهواز، یک دستاورد کاربردی ارزشمند است که می‌تواند در طراحی پروژه‌های عمرانی منطقه به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرد.

۴- تحلیل رفتار تنش، نشست و کرنش پلاستیک در سیستم ژئوسل-خاک: این تحقیق با استفاده از خروجی‌های عددی دقیق شامل کانتورهای تنش قائم (σ_z)، نشست قائم (U_z) و کرنش پلاستیک (ϵ_p) توانست مکانیزم عملکرد ژئوسل را به‌صورت بصری و کمی تبیین کند. مشخص شد که حضور ژئوسل موجب گسترش ناحیه‌ی انتقال تنش، کاهش تمرکز نشست در مرکز پی و توزیع یکنواخت‌تر کرنش پلاستیک در خاک زیرین می‌شود. این سطح از تحلیل، در مقایسه با بسیاری از تحقیقات مشابه، عمیق‌تر و دقیق‌تر است.

۵- ارائه‌ی راهکار فنی و اقتصادی برای طراحی ژئوسل در پی‌های سطحی: بر اساس نتایج عددی، پژوهش حاضر با ارائه‌ی ترکیب هندسی بهینه، راهکاری مقرون‌به‌صرفه و اجرایی برای افزایش پایداری پی‌های سطحی در خاک‌های ضعیف پیشنهاد داده است. انتخاب ژئوسل با ابعاد بهینه‌ی پیشنهادی، علاوه بر بهبود ظرفیت باربری، باعث کاهش نیاز به مصالح پرهزینه‌ی بهسازی و کاهش حجم عملیات اجرایی می‌شود.

۶- توسعه‌ی دانش کاربردی ژئوسل در خاک‌های ریزدانه و اقلیم گرم جنوب کشور: بیشتر پژوهش‌های موجود در حوزه‌ی ژئوسل بر خاک‌های ماسه‌ای خشک تمرکز داشته‌اند؛ اما این تحقیق با توجه به ویژگی‌های خاک‌های لایه‌ای و ریزدانه‌ی اهواز، داده‌های علمی جدیدی را برای این نوع خاک‌ها فراهم کرده است. نتایج آن می‌تواند مبنایی برای طراحی بهینه پی‌ها در مناطق با خاک‌های ضعیف و شرایط اقلیمی خاص باشد.

۷- اعتبارسنجی عددی و هم‌راستایی با مطالعات آزمایشگاهی معتبر: در پایان، یکی از نقاط قوت این پژوهش، تأیید نتایج عددی با مطالعات پیشین داخلی و بین‌المللی است. هم‌خوانی کامل نتایج با تحقیقات دهکردی، قاسمی‌زاده، Han و Hegde نشان می‌دهد که مدل‌سازی انجام‌شده از دقت علمی بالایی برخوردار بوده و قابل اتکا برای طراحی‌های واقعی است.

ردیف	نوآوری و اقدام پژوهش حاضر	وضعیت در تحقیقات پیشین
۱	مدلسازی سه بعدی دقیق PLAXIS 3D برای خاک لایه ایی واقعی اهواز	اغلب مدل ها ۲ بعدی یا خاک همگن بودند
۲	تحلیل هم زمان سه پارامتر هندسی ژئوسل (b/B.h.u/B)	معمولاً فقط یک پارامتر بررسی می شد
۳	تعیین هندسه بهینه ژئوسل برای خاک ضعیف اهواز	اغلب نتایج برای خاک های ماسه ای خشک یا شرایط غیر محلی بود
۴	تحلیل تنش، نشست و کرنش پلاستیک یا کانتورهای دقیق	بسیاری از پژوهش ها فقط نشست یا ظرفیت باربری را بررسی می کردند
۵	ارائه راهکار فنی-اقتصادی برای طراحی ژئوسل	غلب مطالعات فقط نتایج آزمایشگاهی/عددی ارائه می کردند
۶	توسعه دانش ژئوسل در خاک های ریزدانه و اقلیم گرم جنوب	تمرکز عمده بر خاک های ماسه ای خشک بود
۷	اعتبارسنجی عددی با مطالعات معتبر داخلی و خارجی	برخی پژوهش ها فاقد اعتبارسنجی جامع بودند

جدول ۷. مقایسه نوآوری پژوهش حاضر با تحقیقات پیشین

۴- محدودیت های تحقیق

- نتایج مبتنی بر مدل عددی بوده و اعتبار آن نیازمند صحت سنجی آزمایشگاهی یا میدانی است.
- مدلسازی رفتار خاک بر اساس معیار موهر-کولمب انجام شد که رفتار غیرخطی پیشرفته تر خاک را به طور کامل بازتاب نمی دهد.
- اثر بارگذاری سیکلی و شرایط دینامیکی در این تحقیق بررسی نشد.

۵- پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

- (۱) صحت سنجی نتایج عددی با آزمایش های بارگذاری صفحه ای در مقیاس واقعی.
- (۲) بررسی رفتار ژئوسل در بارگذاری های دینامیکی (مانند زلزله و ارتعاش ماشین آلات).
- (۳) تحلیل اثر شکل سلول ها (دایره ای، لوزی، شش ضلعی) بر کارایی سیستم.
- (۴) بررسی اقتصادی طرح های مختلف از منظر هزینه-فایده برای پروژه های عمرانی در خاک های ضعیف.

۶- نتیجه گیری نهایی

اثر ژئوسل بر ظرفیت باربری

نتایج مدل سازی عددی نشان داد که استفاده از ژئوسل به عنوان لایه تقویتی در زیر پی موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری نهایی خاک می شود. بیشترین اثر تقویتی در حالتی مشاهده شد که ژئوسل در عمق بهینه ی $u/B=0.05$ قرار گرفت و در این حالت ظرفیت باربری تا حدود ۱۴٫۸ درصد نسبت به حالت بدون تقویت افزایش یافت. همچنین افزایش ارتفاع لایه ی ژئوسل از ۱۰ به ۲۰ سانتی متر و افزایش عرض آن از ۱ تا ۱٫۵ برابر عرض پی موجب بهبود بیشتر ظرفیت باربری گردید. این افزایش به علت ایجاد محصورسازی جانبی، افزایش مقاومت برشی خاک اطراف و توزیع یکنواخت تر تنش ها در ناحیه ی زیر پی است. در نهایت، حالت بهینه با ارتفاع ۲۰ سانتی متر و عرض ۱٫۰ تا ۱٫۵ برابر عرض پی، باعث افزایش ۸ تا ۱۰ درصدی در ظرفیت باربری مجاز و نهایی شد که از لحاظ فنی و اقتصادی، ترکیبی بهینه برای بهسازی خاک های ضعیف محسوب می شود.

اثر ژئوسل بر نشست پی

تحلیل رفتار نشست نشان داد که اثر ژئوسل بر کاهش نشست نسبت به اثر آن بر ظرفیت باربری محدودتر است. با قرارگیری ژئوسل در عمق بهینه، نشست در بار سرویس ۱۵۰ کیلوپاسکال از ۲۷٫۵ میلی متر به حدود ۲۶٫۶ میلی متر کاهش یافت که نشان دهنده ی کاهش حدود ۳ درصدی است. این مقدار کاهش هرچند چشمگیر نیست، اما منجر به توزیع یکنواخت تر تغییر شکل ها و جلوگیری از تمرکز نشست در مرکز پی گردید. در مجموع، مکانیزم اصلی تأثیر ژئوسل در بهبود عملکرد پی، افزایش مقاومت برشی و پایداری خاک است، در حالی که کاهش نشست به صورت ثانویه و محدود اتفاق می افتد.

تأثیر پارامترهای هندسی ژئوسل

بررسی پارامترهای هندسی ژئوسل شامل عمق قرارگیری، ارتفاع و عرض آن نشان داد که هر سه پارامتر تأثیر بسزایی در عملکرد سیستم دارند. افزایش عمق تا حد بهینه موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می شود، اما در عمق های بیش از حد بهینه، تأثیر آن کاهش می یابد. افزایش ارتفاع ژئوسل تا ۲۰ سانتی متر موجب تقویت محصورسازی و افزایش مقاومت برشی خاک شده و در عین حال

توزیع یکنواخت تر تنش ها را به همراه دارد. همچنین افزایش عرض ژئوسل تا ۱.۵ برابر عرض پی بیشترین بهبود را در ظرفیت باربری ایجاد کرده است. بنابراین، ترکیب بهینه‌ی هندسی ژئوسل با نسبت‌های $u/B=0.05$ و $h=20\text{cm}$ و $b/B=1.0-1.5$ پیشنهاد می‌شود که ضمن افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، توزیع تنش و تغییر شکل در خاک را بهبود می‌بخشد و موجب افزایش پایداری کلی پی می‌گردد.

جدول ۸. انواع مدل‌های تحلیلی و جزئیات آنها

انواع مدل‌ها	نوع مدل	طول (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)	ظرفیت بارری (kpa)	نشست (mm)
مدل ۱	بدون تقویت شده	۱۰	۱۰	۰.۸	250	27.5
مدل ۲	$(u/B = 0.00, b/B=1, h=15)$	۱۰	۱۰	۰.۸	251	27.4
مدل ۳	$(u/B = 0.025, b/B=1, h=15)$	۱۰	۱۰	۰.۸	264	27.2
مدل ۴	$(u/B = 0.05, b/B=1, h=15)$	۱۰	۱۰	۰.۸	287	26.6
مدل ۵	$(u/B = 0.075, b/B=1, h=15)$	۱۰	۱۰	۰.۸	278.5	26.8
مدل ۶	$(u/B = 0.1, b/B=1, h=15)$	۱۰	۱۰	۰.۸	272	27.1
مدل ۷	$(h=20, b/B=1, u/B=0/05)$	۱۰	۱۰	۰.۸	270	27.7
مدل ۸	$(h=10, b/B=1, u/B=0/05)$	۱۰	۱۰	۰.۸	263.2	27.8
مدل ۹	$(h=15, b/B=1, u/B=0/05)$	۱۰	۱۰	۰.۸	265.4	27.7
مدل ۱۰	$(h=20, b/B=0/5, u/B=0/05)$	۱۰	۱۰	۰.۸	244.1	27.5
مدل ۱۱	$(h=20, b/B=1, u/B=0/05)$	۱۰	۱۰	۰.۸	265.4	27.7
مدل ۱۲	$(h=20, b/B=1/5, u/B=0/05)$	۱۰	۱۰	۰.۸	275.1	26.7

این پژوهش با استفاده از مدلسازی عددی سه بعدی در نرم افزار PLAXIS 3D، عملکرد ژئوسل به عنوان لایه تقویت کننده زیر پی‌های گسترده در خاک‌های لایه‌ای شهر اهواز را بررسی کرده است. نتایج نشان دادند که ژئوسل با ایجاد محصورسازی جانبی و افزایش مقاومت برشی مؤثر، موجب بهبود ظرفیت باربری، کاهش تمرکز تنش و توزیع یکنواخت تر نشست می‌شود.

تحلیل‌های پارامتریک نشان دادند که هندسه ژئوسل نقش کلیدی در عملکرد آن دارد. حالت بهینه شامل عمق $u/B=0.05$ ، ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و عرض $b/B=1.0$ تا ۱.۵ بوده که در این شرایط، ظرفیت باربری تا ۱۰٪ افزایش و نشست تا ۳٪ کاهش یافته است. با وجود تأثیر محدود ژئوسل بر کاهش نشست، استفاده از آن در خاک‌های ضعیف به‌عنوان راهکاری اقتصادی و اجرایی توصیه می‌شود.

این تحقیق ضمن تأیید کارایی ژئوسل در بهبود عملکرد پی‌های سطحی، زمینه تدوین دستورالعمل‌های طراحی در خاک‌های لایه‌ای و توسعه مطالعات آینده در حوزه رفتار دینامیکی و بارگذاری‌های سیکلی را فراهم می‌سازد.

تقدیر و تشکر از مجموعه سازمان آب و برق خوزستان بابت حمایت بنده در تهیه و نگارش این مقاله.

مراجع

- نادری، ع، هاتف، ن، ۱۳۹۶، بررسی آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی و دایره‌ای قرار گرفته بر روی ماسه مسلح، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲، ۳۲، شماره ۱، ۱، شماره پیاپی ۱، صفحه ۷۲-۶۳.
- دهکردی، پ، غزاوی، م، گنجیان، ن، ۱۴۰۰، ارزیابی رفتار شالوده دایره‌ای مستقر بر بستر ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۵، صفحه ۱۸۲۰-۱۸۰۱.
- شریعتی، م، خداپرست، م، بایسته، ح، خوش گفتار، ا، ۱۴۰۰، مطالعه تأثیر مشخصات هندسی ژئوسل بر ظرفیت باربری پی سطحی مستقر بر خاک مارن اشباع، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲، ۳۷، شماره ۲، ۳، شماره پیاپی ۳، صفحه ۱۶۶-۱۵۷.
- قاسمی زاده، م، پرویزی، م، ۱۴۰۱، بررسی عددی تأثیر 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، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۷، صفحه ۲۸۱۲-۲۷۹۵.
- دهکردی، پ، ۱۴۰۱، ارزیابی رفتار سیستم شالوده‌های همجوار متکی بر ماسه‌های مقید شده با مسلح کننده ژئوسل: مطالعه آزمایشگاهی، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۳، صفحه ۱۰۷۶-۱۰۵۷.
- نمایی، ع، اردکانی، ع، حسنلوراد، م، ۱۴۰۱، ارزیابی استاتیکی و چندمرحله‌ای مقاومت بیرون کشش ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه یی، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲، ۳۸، شماره ۲، ۲، شماره پیاپی ۲، صفحه ۱۳۰-۱۲۱.

A. Gupta, G.K. Lakshman, T. Sitharam, Interference of square footings on geocell reinforced clay bed: experimental and numerical studies. Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18), Budapest, Hungary, ICGRE 142 (2018), 1-8.

P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi, N. Ganjian, U.F.A. Karim, Effect of geocell-reinforced sand base on bearing capacity of twin circular footings, Geosynthetics International, 26(3) (2019), 224-236.

F. Astaraki, M. Esmaeili, M. Roozbini, Influence of geocell on bearing capacity and settlement of railway embankments: an experimental study, Geomechanics and Geoengineering, 34(4) (2020), 322-335.

- O. Khalaj, S. Abedin Nejad and S. Jenicek, The Effect of Geocell Reinforced Embankment Construction on the Behaviour of Beneath Soil Layers Using Numerical Analysis, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (2020).
- A. Biswas and H. Sarkar, Numerical Study of Multi-Layered Geocell Confined Pavement Subgrade, Proceedings of Indian Geotechnical Conference, (2020).
- U. Pratap Md. Azhar, A. Kumar, Numerical Analysis of Geosell-Reinforced Embankment Using PLAXIS 3D, Advances in GeoScience and Geo-Structures, 39(2) (2022), 225-239.
- Fazeli Dehkordi, P., Mirabolghasemi Dehkordi, A., Shirani Faradonbe, A., Bearing capacity of two asymmetric differently loaded concrete footings seated on geocell-reinforced sand slopes, Case Studies in Construction Materials, 19(2023), e02299.
- Ari, A., Misir, G., Three-dimensional numerical analysis of geocell reinforced shell foundations, Geotextiles and Geomembranes, 49, (2021), 963-975.
- K. Bhushan and F. Boniadi, "Settlement of a Ring Foundation using Cone Data" Cone penetration Testing, ISOPT-I, Balkema, Rotterdam, 1988.
- S. Dasgupta and D. Sengupta, "Analysis of Ring Foundation and Circular Footing on Elastic Foundation using Curved Isoparametric Beam Element" Journal of the Institution of Engineers (India), Civil Engineering Division, 69, 252-256, 1989.
- J.I. Clark, "Evaluation and Performance of the Calgary Towter Foundation" Proceedings of the 25th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, 1972.
- A.S.Veletsos and Y. Tang, "Vertical Vibration of Ring Foundations" Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 1, 1-21, 1987.
- K.M. Kosar, D.J. Walter and W.J. Burwash, "Design of Foundations to Resist High Lateral Loads for Northumberland Strait Crossing" Proceedings of the 4th Conference on Development in Short and Medium Span Bridge Engineering '94. Halifax, Canada, 1363-1375, 1994.
- S.K. Lacasse and T.S. Olsen, "Evaluation of Foundation Stability of Platform MCP-01" Report, Norwegian Geotechnical Institute, 1988.
- H.A. Al-Sanad, N.F. Ismael and R.P. Brenner, "Settlement of Circular and Ring Plates in Very Dense Calcareous Sands" ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 119, 4, 622-638, 1993.
- R.P. Brenner, B. Kunzi, A. Jeragh and A. Gunatilaka, "Site Investigation for Tower Structure on Ring-Shaped Raft on Sand" Proceedings of the 6th International Congress of the International Association of Engineering Geology, Balkema, Rotterdam, 1813-1820, 1990.
- M. Bozozuk, "Bearing Capacity of Clays for Tower Silos" Canadian Agricultural Engineering, 16, 1, 13-17, 1974.
- K.Y. Lo and D.E. Becker, "Pore-Pressure Response beneath a Ring Foundation on Clay" Canadian Geotechnical Journal, 16, 551-566, 1979.
- J.P. Morin and M. Bozozuk, "Performance of Concrete Tower Silos on Clays in Quebec" Canadian Agricultural Engineering, 25, 1, 81-88, 1983.

- J.P. Morin and R. Gervais, "Settlement Record of Tower Silos Built on Champlain Clays" Proceedings of the 38th Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, 285-294, 1985.
- E. E. De Beer, E.E. "Analysis of Shallow Foundations" in Geotechnical Modeling and Applications, edited by Sayed M, Sayed, Gulf Publishing Company, Houston, 212-321, 1987.
- A. S. Vesic. "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations" ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 99, SM1, 45-73, 1973.
- M. D. Bolton and C. K. Lau. "Vertical Bearing Capacity Factors for Circular and Strip Footings on Mohr-Coulomb Soil" Canadian Geotechnical Journal, 30, 1024-1033, 1993.
- K.E. Egorov, "Calculation of Bed for Foundation with Ring Footing" Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 41-45, 1965.
- J. F. Bowles. Foundation Analysis and Design, 2nd ed., McGraw-Hill. New York, 1977.
- D. M. Milovic. "Stresses and Displacements Produced by Various Shapes of Foundation" Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geotechnics, Ed. by R. Dungar et al., Zurich, 121-731, 1982.
- S. Kathroli, S. K. Madhav and N.G. Iyengar. "Analysis of Rigid Ring Foundations" Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geotechnics, Edited by R. Dungar et al., Zurich, 687-692, 1982.
- J. L. Tassoulas and E. Kausel. "On the Dynamic Stiffness of Circular Ring Footing on an Elastic Stratum" International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 8, 5, 411-426, 1984.
- M. R. Madhav. "Settlement and Allowable Pressures for Ring or Annular Footings" Indian Geotechnical Journal, Vol. 10, pp. 267-271, 1980.
- M. R. Madhav and R. S. Karmarkar, R.S. "Elasto-Plastic Settlement of Rigid Footings" ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, No. GT3, 483-488, 1982.
- Ismael, N.F. (1996). "Loading Tests on Circular and Ring Plates in Very Dense Cemented Sands." ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 4, pp. 281-287.
- F. Zhu. "Centrifuge Modelling and Numerical Analysis of Bearing Capacity of Ring Foundations on Sand" Ph.D thesis, Memorial University of Newfoundland, 1998.
- A. M. Karaulov. "Experimental and theoretical research on the bearing capacity of ring foundation beds" Soil Mechanics Foundation Engineering, 43, 37-40, 2006.
- A. M. Boushehrian and N. Hataf. "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand" Geotextile Geomembrance, 21, 241-56, 2003.

- N. Hataf and M. Razavi. "Behavior of ring footings on sand" Iran Journal of Science Technology Trans B, 27, 47-56, 2003. [28] L. Zhao and J. H. Wang. "Vertical bearing capacity for ring footing" Computational Geotechnics, 35, 292-304, 2008.
- A. H. Boushehrian and N. Hataf. "Bearing capacity of foundation on reinforced clay" The 12th international conference IACMAG, 3546-3551, 2008.
- A. J. Choobbasti, S. Hesami, S. Pirzadeh, F. Farrokhzad and A. Zahmatkesh. "Numerical evaluation of bearing capacity and settlement of ring footing; case study of kazeroon cooling tower" IJRAS, 263-271, 2010.
- R. Z. Moayed, V. Rashidian and E. Izadi. "Evaluation of bearing capacity of Ring footing on two layered soil." World Academy of science Engineering and technology, 2012.
- S. Benmebarek, M. S. Remadna, N. Benmebarek and L. Belounar. "Numerical evaluation of the bearing capacity factor N_c of ring footings" Computational Geotechnics, 44, 132-138, 2012.
- E. Naderi and N. Hataf. "Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand" Geotextiles and Geomembrances, 42, 191-200, 2014.
- J. Kumar and D. Chakraborty. "Bearing Capacity Factors for Ring Foundations" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, technical note, ISSN 1090-0241/06015007(7), 1-7, 2015.
- S. Sona and J. Soumya. "Behaviour of Ring Footing on Geosynthetic Reinforced Sand" International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology, 3, 23, 63-68, 2016.
- J. A.I. Dhattrak and P. C. Mishra. "Performance of Ring Footing Resting on Reinforced Multyilayered Soil Using PLAXIS 2D" International Journal of Research in Engineering and Technology, 5, 5, 13-19, 2016.
- E. Seyedi Hosseininia. "Bearing Capacity Factors of Ring Footings" Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 40, 2, 121-132, 2017.
- A. M. Britto and M. J. Gunn. Critical State Soil Mechanics via Finite Elements, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- D. U. Griffith. "Computation of Bearing Capacity Factors Using Finite Elements" Geotechnique, 32, 3, 195-202, 1982.
- K. Terzaghi. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons. New York, 1943.
- A. S. Vesic and W. H. Johnson. "Model Study of Beams Resting on a Silt Subgrade" ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 89, SM1, 1-31, 1963.
- G. G. Meyerhof. "Influence of Roughness of Base and Groundwater Conditions on the Ultimate Bearing Capacity of Foundations" Geotechnique, 5, 227-242, 1955.
- K. H. Khing, B. M. Das, V. K. Puri, E. E. Cook and S.C. Yen. "The Bearing Capacity of a Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand" Geotextiles & Geomembranes, 12, 351-361, 1993.
- M. A. Gabr and J. H. Hart. "Elastic Modulus of Geogrid-Reinforced Sand Using Plate Load Tests" Geotechnical Testing Journal, ASTM, 23, 2, 215-220, 2000.

C. T. Gnanendran and A. P. S. Selvadurai. "Strain measurement and interpretation of stabilizing force in geogrid reinforcement" *Geotextiles and Geomembranes*, 19, 177-199, 2001.

E.C. Shin and B. M. Das. "Bearing Capacity of Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand" *Geotechnical & Geological Engineering*, 189-192, 2002.

C. R. Patra, B. M. Das and C. Atalar. "Bearing capacity of Embedded Strip Foundation on Geogrid Reinforced Sand" *Geotextiles and Geomembranes*, 23, 454-462, 2005.

C. C. Huang and F. Tatsuoka. "Bearing Capacity of Reinforced Horizontal Sandy Ground" *Geotextiles and Geomembranes*, 9, 51-82, 1990.

M. H. Wayne, J. Han and K. Akins. "The design of geosynthetic reinforced foundations" *Proceedings of ASCE's 1998 Annual Convention & Exposition, ASCE Geotechnical Special Publication*, 76, 1-18, 1998.

R. L. Michalowski. "Limit loads on reinforced foundation soils" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 130, 4, 381-390, 2004.

San jei ,c.de silva, L.I.N . "Feasibility study of shallow foundation on geocell reinforced soil in srilanka" , 2004.