



Numerical Study on the Behavior of the Foundations Resting on Geocell-Reinforced Slopes

Pourya Khadem¹, Sadegh Ghavami², Mehrdad Emami Tabrizi³

1- M.Sc. Graduate, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ghavamijamal@sut.ac.ir

Abstract

Foundations located adjacent to slopes typically experience a reduction in bearing capacity and an increased risk of instability caused by slope failure or landslides. The application of geocells as a three-dimensional reinforcement system can enhance the performance of shallow foundations near slopes by providing lateral confinement, facilitating wider stress distribution, and restraining soil deformations. In this study, the behavior of a foundation resting on a clayey sand slope was investigated for both unreinforced and geocell-reinforced conditions using the finite element software PLAXIS 3D. Following the validation of the numerical model against physical modeling results, parametric analyses were conducted for two slope angles (30° and 60°) and various foundation setback distance ratios ($U/B = 0.25, 0.5, 1, 2$, and 4, where U is the distance of a foundation of width B from the slope crest). The results indicated that increasing the foundation setback distance improves the bearing capacity in both unreinforced and reinforced states; however, this increase becomes negligible for $U/B > 2$, where the foundation behavior approaches that of level ground. Furthermore, increasing the slope angle from 30° to 60° led to a reduction in bearing capacity and an increase in the critical setback distance from the slope edge. The findings demonstrate that the inclusion of geocell reinforcement not only enhances bearing capacity but also significantly reduces the required safe setback distance; the optimal U/B ratios for the reinforced foundation on 30° and 60° slopes were determined to be 0.5 and 1.0, respectively. Additionally, the reinforcing effect of the geocell was more pronounced on steeper slopes, and the difference in bearing capacity between the geocell-reinforced and unreinforced conditions increased as the slope inclination increased.

Keywords: Reinforced Soil Slope, Geocell, Shallow Foundation, Numerical Modeling.



بررسی عددی تأثیر ژئوسل بر رفتار پی مجاور شیروانی خاکی

پوریا خادم^۱، صادق قوامی جمال^۲، مهرداد امامی تبریزی^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

ghavamijamal@sut.ac.ir

چکیده

پی‌های قرار گرفته در مجاورت شیب معمولاً با کاهش ظرفیت باربری و افزایش خطر ناپایداری ناشی از گسیختگی یا زمین لغزش مواجه هستند. استفاده از ژئوسل به عنوان یک سیستم تسلیح سه بعدی، با ایجاد محصورشدگی جانبی، توزیع گسترده تر تنش و محدود کردن تغییر شکل های خاک، می تواند عملکرد پی های سطحی مجاور شیب را بهبود دهد. در این پژوهش، رفتار پی واقع بر مجاور شیروانی خاکی از جنس ماسه رس دار در حالت های غیر مسلح و مسلح شده با ژئوسل، با استفاده از نرم افزار PLAXIS 3D بررسی شده است. پس از صحت سنجی مدل عددی با نتایج مدل سازی فیزیکی، تحلیل های پارامتری برای دو زاویه شیب ۳۰ و ۶۰ درجه و نسبت های مختلف فاصله پی از لبه شیب، شامل U/B برابر ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ انجام گرفت (U فاصله پی به عرض B از شیب مجاور است). نتایج نشان داد که با افزایش فاصله پی از لبه شیب، ظرفیت باربری در هر دو حالت مسلح و غیر مسلح افزایش می یابد، اما این افزایش در مقادیر بزرگ تر از U/B برابر ۲ ناچیز شده و رفتار پی به حالتی که مستقر بر زمین افقی است نزدیک می شود. همچنین افزایش زاویه شیب از ۳۰ به ۶۰ درجه موجب کاهش ظرفیت باربری و افزایش فاصله ایمن پی از لبه شیب شد. نتایج نشان می دهد که به کارگیری ژئوسل ضمن افزایش ظرفیت باربری، موجب کاهش فاصله ایمن پی از شیب می شود؛ به طوری که مقدار بهینه U/B برای پی مسلح در شیب های ۳۰ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر ۰/۵ و ۱ به دست آمد. علاوه بر این، اثر مثبت ژئوسل در شیب تندتر محسوس تر بوده و اختلاف ظرفیت باربری حالت مسلح و غیر مسلح با افزایش زاویه شیب افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: شیروانی خاکی مسلح شده، ژئوسل، پی سطحی، مدلسازی عددی.

۱- مقدمه

پایداری شیروانی ها تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی همواره یکی از چالش های اساسی و حیاتی در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می شود. این مسئله زمانی اهمیت ویژه ای پیدا می کند که سازه ها، جاده ها و زیرساخت های حیاتی در نزدیکی یا حریم شیب های خاکی واقع شده باشند. در چنین شرایطی، هرگونه ناپایداری یا گسیختگی شیروانی می تواند منجر به خسارات جانی و مالی بسیار شدید و گاهی جبران ناپذیر شود. از این رو، حفظ و بهبود پایداری شیب ها یکی از اولویت های اصلی مهندسان ژئوتکنیک است و همواره تلاش می شود تا راهکارهای مؤثر و اقتصادی برای افزایش ایمنی این سازه های خاکی ارائه گردد. در این میان، استفاده از مصالح ژئوسنتتیکی به ویژه ژئوسل به عنوان یک سیستم تسلیح سه بعدی کارآمد، به دلیل ایجاد محصورسازی جانبی خاک و افزایش مقاومت برشی، به طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱].

بر اساس مطالعات تجربی و عددی انجام شده، قرار دادن لایه های ژئوسل در زیر پی های سطحی می تواند ظرفیت باربری خاک را به طور چشمگیری افزایش و نشست پی را کاهش دهد. Raj و Vijayan نشان دادند که تسلیح خاک با ژئوگرید موجب افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت باربری و کاهش ۵۰ درصدی نشست در پی سطحی می شود [۲]. در پژوهشی دیگر، Du و همکاران با بهره گیری از تحلیل های عددی، ظرفیت باربری پی نواری روی شیروانی های چندلایه را بررسی کرده و بیان نمودند که وجود لایه های خاک با پارامترهای مقاومتی متفاوت، نقش تعیین کننده ای در تغییر الگوی تنش و مقدار ظرفیت باربری دارد [۳]. نتایج یک مطالعه تجربی و عددی نشان داد که تسلیح خاک با ژئوگرید تأثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری



و کاهش نشست پی دارد و این اثر به طور محسوس به زاویه شیب، تراکم نسبی ماسه، طول و آرایش لایه های تسلیح و مقاومت کششی مسلح کننده وابسته است [۴]. Khalvati Fahliani و همکاران با مدل سازی فیزیکی پی های نواری واقع بر شیروانی های ماسه ای مسلح شده با ژئوسل، افزایش قابل توجه ظرفیت باربری در حضور ژئوسل را گزارش کردند [۵]. Maleki Vasegh و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی، ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیب ماسه ای اشباع شده مسلح به ژئوسل را بررسی کردند [۶]. نتایج نشان داد که استفاده از ژئوسل می تواند باربری پی را به طور قابل توجهی افزایش دهد و با بهینه سازی ابعاد و آرایش ژئوسل، ظرفیت باربری پی می تواند به مقدار نزدیک به حالت پی واقع بر زمین افقی برسد. براساس بررسی های آزمایشگاهی Mazouz و همکاران، ظرفیت باربری نهایی پی نواری مجاور شیب به طور مستقیم تحت تأثیر نسبت خروج از مرکزیت بار، فاصله پی از لبه شیب و زاویه شیب قرار دارد [۷]. از منظر رفتار دینامیکی، Jalili و همکاران با استفاده از تحلیل اجزای محدود دو بعدی نشان دادند که مجاورت پی با شیب ماسه ای، به ویژه در شرایط لرزه ای، موجب کاهش ظرفیت باربری می شود و پارامترهایی مانند فرکانس بارگذاری و دامنه شتاب تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سیستم دارند [۸].

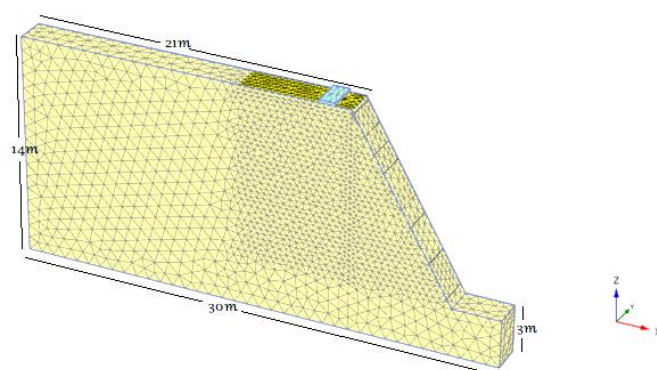
مروار ادبیات فنی نشان می دهد که زاویه شیب، فاصله پی از لبه شیروانی، پارامترهای مقاومتی خاک و شرایط بارگذاری از عوامل کلیدی مؤثر بر ظرفیت باربری پی های نواری مجاور شیب بوده و به کارگیری سیستم های مسلح کننده نظیر ژئوسل می تواند به عنوان راهکاری مؤثر در بهبود عملکرد باربری و کاهش نشست مورد توجه قرار گیرد. از آنجا که بخش عمده ای از تحقیقات بر شیروانی هایی با شیب کم و عمدتاً خاک های ماسه ای متمرکز بوده و بررسی عملکرد این سیستم در شیب های تندتر کمتر مورد توجه قرار گرفته است، در این تحقیق، رفتار پی نواری واقع بر شیروانی خاکی از جنس ماسه رس دار با زوایای شیب مختلف و همچنین تأثیر وجود و عدم وجود ژئوسل مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- مدل سازی عددی

در این تحقیق، به دلیل نتایج قابل قبول PLAXIS براساس مطالعات پیشین [۹، ۱۰]، تحلیل های عددی با استفاده از نرم افزار PLAXIS 3D انجام شد. مدل هندسی خاک با ابعاد کلی ۱۴ متر ارتفاع، ۲ متر عرض و ۳۰ متر طول، و با زوایای شیب ۳۰ و ۶۰ درجه شبیه سازی شد (شکل ۱) که خصوصیات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات خاک در مدل عددی

زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kPa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	دانسیته خاک (kN/m^3)	مدل رفتاری
35	15	0.25	30	18	موهر-کولمب



شکل ۱- خصوصیات هندسی و مش بندی مدل در این تحقیق

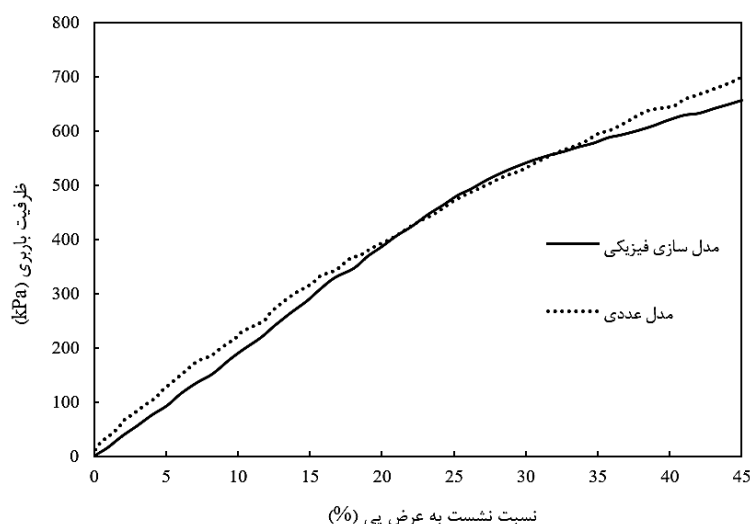
یک پی صلب با رفتار الاستیک خطی با ابعاد هندسی 2×1 متر تحت بارگذاری قرار گرفت. ژئوسل به طول ۶ متر و ضخامت ۲۵ سانتی متر و عرض ۲ متر با سختی محوری ۳۰۰ کیلو نیوتن بر متر در عمق ۵۰ سانتی متری زیر پی در نظر گرفته شد. در این مدل سازی، فاصله پی تا لبه شیب با نسبت بی بُعد U/B تعریف شد که در آن B نشان دهنده عرض پی (به اندازه یک متر) و U معرف فاصله آن از لبه شیب است. شرایط مرزی مدل به صورت بستن جابجایی های جانبی در جهت های x و y ، و مقید سازی کامل جابجایی کف مدل در هر سه راستا اعمال گردید. بارگذاری روی پی به صورت قائم اعمال



شده و برای تعیین دقیق ظرفیت باربری نهایی، مقدار جابجایی اعمالی به پی تا زمان وقوع شکست در توده خاک ادامه یافت. جزئیات هندسه و مش بندی مدل در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- صحت سنجی مدل سازی عددی

به منظور صحت سنجی و ارزیابی دقت مدل عددی در نرم افزار PLAXIS 3D، نتایج آزمایش های فیزیکی Khalvati Fahliani و همکاران [۵] بر پی های نواری مسلح به ژئوسل مستقر بر شیروانی های ماسه ای با زاویه شیب ۳۵ درجه انتخاب شد. در این مدل سازی، با بهره گیری از مشخصات هندسی و مکانیکی گزارش شده در مطالعه مذکور، تحلیل های عددی انجام و نمودارهای بار-نشست با داده های آزمایشگاهی مقایسه گردید. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود اختلاف ظرفیت باربری به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۷ درصد است که نشان دهنده تطابق قابل قبول نتایج عددی با مدل فیزیکی است. این نتایج ضمن تأیید کفایت مدل عددی، اطمینان لازم برای استفاده از مدل های سه بُعدی در تحلیل های پارامتری آتی را فراهم آورد.

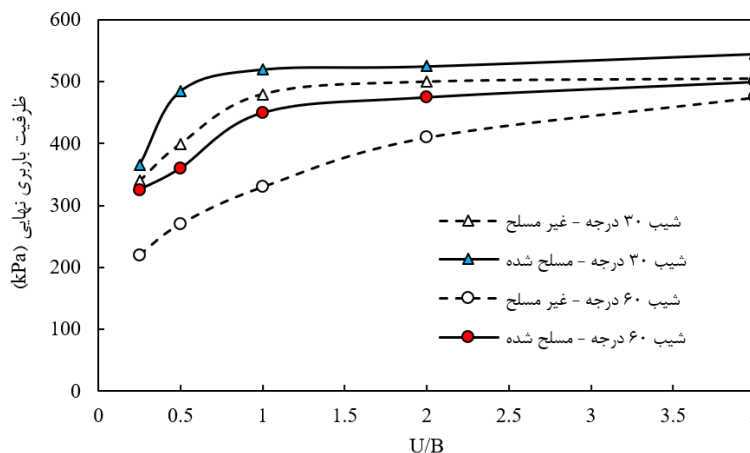


شکل ۲- مقایسه نتایج عددی با مدل سازی فیزیکی انجام شده توسط Khalvati Fahliani و همکاران [۵] برای پی به عرض ۱۰ سانتی متر که به فاصله ۲۰ سانتی متر از شیب با زاویه ۳۵ درجه قرار گرفته است (ژئوسل به طول ۷۰ سانتی متر در عمق ۲ سانتی متری قرار داده شده است).

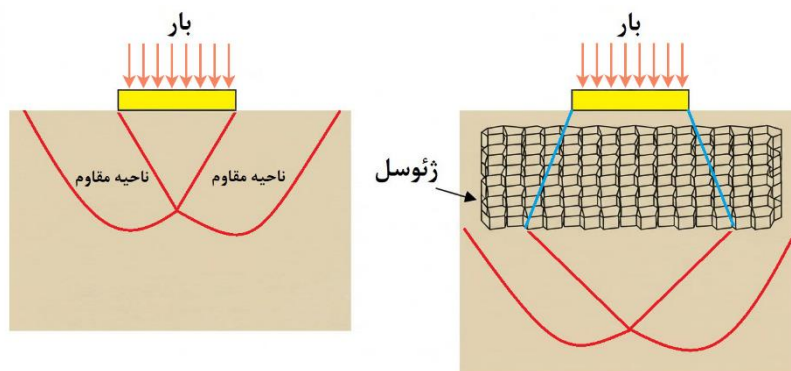
۴- نتایج و تحلیل

فاصله پی از شیب (U) یکی از پارامترهای مهم بر ظرفیت باربری پی در نزدیکی سطح شیب دار است. در این مطالعه، برای بررسی تأثیر فاصله پی از لبه سطح شیب دار مقادیر U/B برابر با ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ در نظر گرفته شد. تأثیر U/B بر رفتار پی های غیرمسلح و مسلح شده با یک لایه ژئوسل بر ظرفیت باربری پی واقع در مجاورت شیب با زاویه های ۳۰ و ۶۰ درجه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود به طور کلی، ظرفیت باربری پی در هر دو حالت غیرمسلح و مسلح با افزایش U/B، افزایش می یابد. اما نرخ افزایش برای مقادیر بزرگ تر U/B، به طور قابل توجهی کمتر است. زیرا با دور شدن پی از شیب، ناحیه مقاوم ایجاد شده (شکل ۴) در سمتی که شیب قرار دارد به راحتی گسترش می یابد و اثر نامطلوب شیب کاهش می یابد که منجر به افزایش ظرفیت باربری پی می گردد. در حالاتی که مقدار U/B بیشتر از ۲ است، پی مشابه حالتی عمل می کند که روی زمین مسطح قرار دارد و دیگر تحت تأثیر شیب مجاور نیست.

با مقایسه ظرفیت باربری پی برای شیب با زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه مشاهده می شود که ظرفیت باربری پی در هر دو حالت غیرمسلح و مسلح با افزایش زاویه شیب کاهش می یابد. با افزایش زاویه شیب، ناحیه مقاوم در سمت شیب نمی تواند گسترش بیابد و منجر به ظرفیت باربری کمتر می شود (مقایسه شکل های ۵ و ۶).



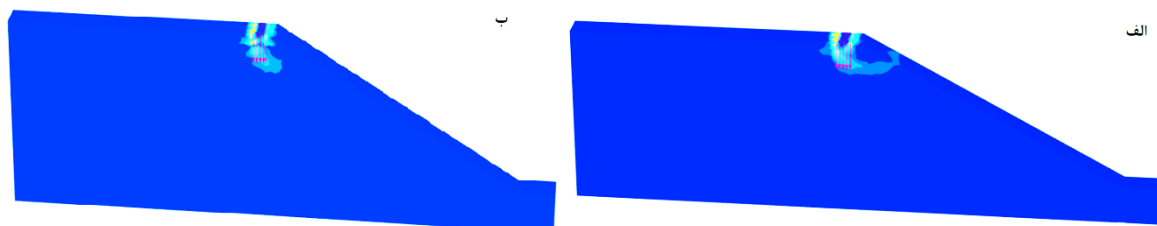
شکل ۳- تأثیر زاویه شیب و فاصله پی از لبه شیب (U) بر ظرفیت باربری نهایی در حالت بدون ژئوسل و مسلح شده با ژئوسل



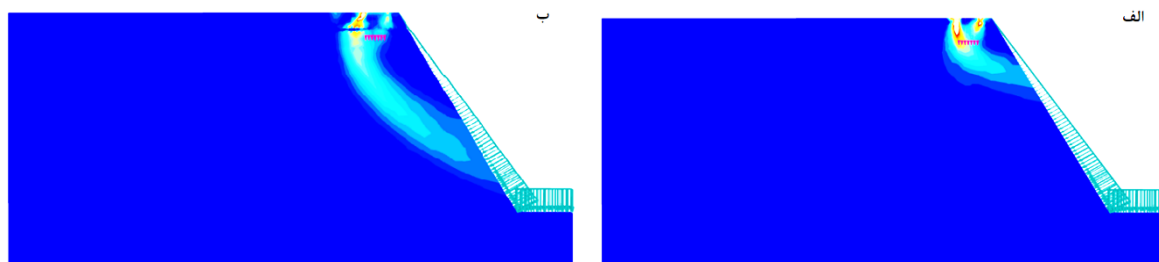
شکل ۴- نحوه شکل گیری سطح گسیختگی در زیر پی در خاک غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل

با افزایش زاویه شیب، مقدار U/B بهینه (فاصله ایمن پی از شیب) برای پی‌ها افزایش می‌یابد. به طور مثال، U/B بهینه برای پی مسلح مجاور شیب ۳۰ و ۶۰ درجه به ترتیب ۰/۵ و ۱ است. همچنین با توجه به شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که مسلح کردن پی با یک لایه ژئوسل منجر به کاهش فاصله ایمن پی از شیب می‌شود که این امر می‌تواند به عنوان یکی از مزایای اصلی استفاده از ژئوسل برای مسلح‌سازی پی‌ها روی شیارانی‌ها در نظر گرفته شود. وجود لایه ژئوسل سبب می‌شود که از یک طرف، بار در سطح وسیع‌تری پخش شود (شکل ۴) که کمک می‌کند فشار انتقال یافته به خاک زیرین کاهش یابد و از طرفی دیگر، موجب افزایش پایداری شیب می‌شود و در نتیجه این دو مکانیزم، ظرفیت باربری پی مجاور شیب را بهبود می‌بخشد. ژئوسل‌ها به عنوان یک سیستم سه بُعدی محصورکننده، به دلیل اصطکاک و قفل‌شدگی بین مصالح پُرکننده و دیواره ژئوسل، منجر به ایجاد قید جانبی بر خاک شده و در نتیجه به طور مؤثر باعث افزایش سختی و ظرفیت باربری خاک می‌شوند.

نمودارهای ارائه شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب، فاصله بین ظرفیت باربری پی در حالت مسلح و غیرمسلح بیشتر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ژئوسل برای پی‌ها روی شیب‌های تندتر تأثیر بیشتری دارد.



شکل ۵- کانتورهای کرنش برشی برای پی واقع در U/B برابر 0.5 مجاور شیب با زاویه 30° درجه: الف) بدون ژئوسل، ب) مسلح شده با ژئوسل



شکل ۶- کانتورهای کرنش برشی برای پی واقع در U/B برابر 0.5 مجاور شیب با زاویه 60° درجه: الف) بدون ژئوسل، ب) مسلح شده با ژئوسل

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار پی سطحی مجاور شیروانی خاکی از جنس ماسه رس دار در حالت های غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل، با استفاده از نرم افزار PLAXIS 3D مورد بررسی عددی قرار گرفت. نتایج صحت سنجی نشان داد که مدل عددی توانایی مناسبی در بازتولید رفتار آزمایشگاهی دارد، به طوری که اختلاف ظرفیت باربری حاصل از تحلیل عددی با نتایج مدل فیزیکی کمتر از ۷ درصد بود. این موضوع نشان می دهد که مدل سازی انجام شده برای تحلیل پارامتری و استخراج نتایج قابل اعتماد است.

نتایج تحلیل ها نشان داد که با افزایش فاصله پی از لبه شیب، ظرفیت باربری نهایی در هر دو حالت مسلح و غیرمسلح افزایش می یابد؛ با این حال، در فواصل بزرگ تر از U/B برابر ۲، اثر شیب بر رفتار پی ناچیز شده و عملکرد پی به حالت استقرار بر زمین افقی نزدیک می شود. همچنین افزایش زاویه شیب از 30° به 60° درجه موجب کاهش ظرفیت باربری و افزایش فاصله ایمن پی از لبه شیب شد. استفاده از ژئوسل تأثیر مثبتی بر عملکرد پی داشت و موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش فاصله ایمن از شیب گردید؛ به طوری که مقدار بهینه U/B برای پی مسلح در شیب های 30° و 60° درجه به ترتیب برابر 0.5 و ۱ به دست آمد. علاوه بر این، مشاهده شد که اثر ژئوسل در شیب های تندتر محسوس تر است و اختلاف ظرفیت باربری بین حالت مسلح و غیرمسلح با افزایش زاویه شیب بیشتر می شود. بنابراین، به کارگیری ژئوسل می تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد پی های سطحی مجاور شیروانی های خاکی، به ویژه در شرایط شیب تند باشد.

عملکرد تسلیج خاک با ژئوسل به شدت تحت تأثیر پارامترهای هندسی (مانند تعداد لایه های تسلیج، عمق قرارگیری مسلح کننده، شکل و اندازه سلول های ژئوسل) و خصوصیات مصالح (مانند نوع خاک، سختی ژئوسل) قرار دارد [۱]. بنابراین لازم است که به صورت جامع تر تأثیر هر یک از این پارامترها بر ظرفیت باربری پی مجاور شیب تند در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد.

۶- مراجع

1. Priyadarshee, A., Kumar, V., Kumar, V., Kumar, M., Rahul, A. K., & Kumar, R. (2026). Influence of key parameters on geocell performance: a review of laboratory investigations. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 9(1), 132.



2. Raj, A., & Vijayan, V. (2020). A Study on Bearing Capacity of Cement Modified and Reinforced Marginal Soil. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(5).
3. Du, D.C., Tian, G.P., Gong, W.M., & Dias, D. (2024). Undrained Bearing Capacity and Failure Mechanism of Strip Footings on Slopes Considering Multilayered Soils. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 14489–14501.
4. Keskin, M.S., & Laman, M. (2014). Experimental and Numerical Studies of Strip Footings on Geogrid-Reinforced Sand Slope. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 1607–1619.
5. Khalvati Fahliani, H., Arvin, M.R., Hataf, N., & Khademhosseini, A. (2021). Experimental model studies on strip footings resting on geocell-reinforced sand slopes. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(2), 24.
6. Maleki Vasegh, M., Rostami, V., & Rabieifar, H. (2024). Enhancing Load Bearing Capacity of Footings on Saturated Sand Slopes using Geocell Reinforcement. *Advance Researches in Civil Engineering*, 6(2), 39-49.
7. Mazouz, B., Abbeche, K., Abdi, A., & Baazouzi, M. (2021). Model experiments to assess effect of eccentric loading on the ultimate bearing capacity of a strip footing near a dry sand slope. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(10), 1241-1251.
8. Jalili, S., Koupaei, H.J., Sharafi, H., & Ganjian, N. (2022). Experimental and numerical study of seismic behavior of shallow strip foundation near sandy slope. *International Journal of Civil Engineering*, 20(2), 151-168.
9. Evirgen, B., Kara, H.O., Uzun, M.S., Gültekin, A.A., Tos, M., & Öztürk, V. (2024). The effect of the geometrical properties of geocell reinforcements between a two-layered road structure under overload conditions. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02793.
10. Ahadi, A., Ghavami, S., & Khadem, P. (2026). Investigation of Monitoring Techniques Used in Soil-Nailed Excavations. *Journal of Transportation Research*, 23(3), 459-470.