

1. Bearing Capacity of Pile Groups Adjacent to a Geogrid-Reinforced Sandy Slope

Sajad Daneshvar¹, Reza Mohammad ali nejad^{2*}, Kheirollah Masihpour³

1- M.Sc. Student, Faculty of Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

3- Instructor, Faculty of Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

ABSTRACT

Pile groups are widely utilized as foundations for various onshore and offshore structures. When positioned adjacent to or directly on a slope, the axial bearing capacity and tilting of cap of both single piles and pile groups decreases. Reinforcing the underlying soil with geogrids is an effective strategy for enhancing axial and lateral bearing capacity; however, the influence of geogrid-reinforced slopes on pile group performance has not been comprehensively examined. This study employs physical model tests to assess the impact of geogrid reinforcement on the bearing capacity of pile groups located at the crest of a sandy slope. In this research, a 2×2 pile group with steel piles of 18 mm diameter and 400 mm embed length was modeled on the crest of a medium-density sandy slope reinforced with geogrid, and the effects of factors such as the number of geogrid layers, the distance of the first geogrid from the horizontal surface, the spacing between geogrid layers, and geogrid dimensions on axial bearing capacity, tilting, and horizontal displacement of cap were investigated. The experimental results indicate that the optimum placement of the first geogrid layer from the horizontal surface and optimum distance between geogrid layers is 0.66 times the pile cap width, with three geogrid layers providing the most effective reinforcement. Additionally, geogrid reinforcement significantly reduces horizontal displacement and tilting and with increasing geogrid dimensions, the bearing capacity of the pile group increases.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 June 2025

Revise Date: 30 July 2025

Accept Date: 20 August 2025

Keywords:

Slope

Pile Group

Geogrid

Sand

Bearing Capacity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.504668.3653

*Corresponding author: Reza Mohammadalinejad

Email address: Reza@iau.ac.ir

ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید

سجاد دانشور^۱، رضا محمد علی نژاد^{۲*}، خیرالله مسیح پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳- مربی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

از گروه شمع به عنوان پی بسیاری از سازه‌های مستقر در دریا و خشکی استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی قرار می‌گیرند. قرارگیری شمع‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری محوری گروه شمع و دوران سرشمع می‌گردد. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری قائم و جانبی گروه شمع، مسلح کردن خاک زیر پی بوسیله ژئوگرید می‌باشد. در این تحقیق به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر مسلح سازی شیروانی ماسه‌ای با ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری گروه‌های شمع مستقر بر راس شیروانی پرداخته می‌شود. در این تحقیق گروه شمع ۲×۲ با شمع‌های فولادی با قطر ۱۸ میلی‌متر و طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر بر روی راس شیروانی ماسه‌ای با تراکم متوسط و مسلح شده با ژئوگرید، مدل گردید و اثر عواملی همانند تعداد لایه‌های ژئوگرید، فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی، فاصله بین لایه‌های ژئوگرید و ابعاد ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری محوری، چرخش سرشمع و جابجایی افقی سرشمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد فاصله بهینه اولین ژئوگرید از سطح افقی و فاصله بهینه بین لایه‌های ژئوگریدها برابر با ۶۶/۰٪ عرض سرشمع و تعداد بهینه ژئوگریدها ۳ لایه می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها همچنین نشان داد که مسلح کردن شیروانی با ژئوگرید باعث کاهش جابجایی افقی و چرخش سرشمع می‌گردد و با افزایش ابعاد ژئوگرید ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: شیروانی، گروه شمع، ژئوگرید، ماسه، ظرفیت باربری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.504668.3653	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۴/۰۵/۲۹	۱۴۰۴/۰۵/۲۹	۱۴۰۴/۰۵/۰۸	۱۴۰۴/۰۳/۲۵
10.22065/jsce.2025.504668.3653	نویسنده مسئول: رضا محمد علی نژاد Reza@iau.ac.ir پست الکترونیکی:				

۱- مقدمه

از گروه شمع به عنوان پی ساختمان‌های بلند و پل‌ها استفاده می‌گردد [۱]. این سازه‌ها اغلب در کنار و یا روی شیب‌های طبیعی و یا خاکریزهای احداث شده، مستقر می‌گردند. [۲-۶]. استقرار گروه شمع در مجاورت شیروانی علاوه بر کاهش ظرفیت باربری گروه شمع، ممکن است باعث القا گسیختگی در شیب‌ها (به خصوص در لایه‌های سطحی‌تر) گردد. روش‌های مختلفی برای افزایش پایداری شیب‌ها و به دنبال آن بهبود رفتار سازه‌ها و پی‌های واقع بر شیب‌ها استفاده شده است. افزایش پایداری شیب‌ها را می‌توان به کمک روش‌هایی همانند تزریق شیمیایی، اصلاح هندسه شیروانی، میخ‌کوبی خاک، تسلیح با ژئوگرید و نصب شمع‌ها و سپرها انجام داد [۷-۱۰].

در خصوص ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید تحقیقات مختلفی انجام شده است. ال‌ساواف^۱ [۷] به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد در مجاورت شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که تسلیح شیروانی با ژئوگرید تاثیر زیادی بر روی افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع مستقر بر روی راس شیروانی دارد. فاصله شمع از راس شیروانی و طول مدفون شمع بیشترین تاثیر را بر روی میزان افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید را دارد. زمردیان و صادقی^۲ [۸] با استفاده از آزمایش‌های مدل فیزیکی، اثر تسلیح شیروانی با ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که در یک نسبت ثابت طول به قطر شمع، ظرفیت باربری جانبی شمع به عمق دفن شدن اولین لایه ژئوگرید، تعداد لایه‌های ژئوگرید، فاصله قائم ژئوگریدها و ابعاد ژئوگریدها بستگی دارد. همچنین نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تعداد بهینه لایه‌های ژئوگرید، ۶ لایه بوده و در صورت تسلیح شیروانی ماسه‌ای با ۶ لایه ژئوگرید، ظرفیت باربری جانبی شمع مستقر بر راس شیروانی تا ۳۳۰٪ افزایش می‌یابد. داتراک و باگات^۳ [۹] به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع منفرد در مجاورت شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که اثر تسلیح شیروانی با ژئوگرید بر روی افزایش ظرفیت باربری در ماسه متراکم از ماسه سست و ماسه با تراکم متوسط بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری جانبی شمع کوتاه مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید تا ۱۰۴٪ نسبت به ظرفیت باربری جانبی شمع مستقر بر راس شیروانی ماسه‌ای مسلح نشده افزایش پیدا می‌کند. ال‌ساواف^۱ [۱۰] به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری جانبی گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ در مجاورت شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که در صورت تسلیح نمودن شیروانی ماسه‌ای با ۴ لایه ژئوگرید، ظرفیت باربری جانبی گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ واقع بر روی راس شیروانی مسلح شده به ترتیب ۷۰٪ و ۹۰٪ افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله گروه شمع از راس شیروانی، اثر مسلح سازی شیروانی با ژئوگرید بر روی افزایش ظرفیت باربری جانبی گروه شمع کاهش می‌یابد.

در خصوص ظرفیت باربری پی مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید تحقیقات مختلفی انجام شده است [۱۱-۱۸]. حمیدی و آبیج^۴ [۱۹] به کمک روش المان محدود به بررسی ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید پرداختند. نتایج تحقیق بررسی آن‌ها نشان داد که تاثیر مسلح کننده ژئوگرید بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع با افزایش زاویه شیروانی و زاویه اصطکاک، بیشتر می‌گردد. آن‌ها به منظور بررسی اثر زاویه اصطکاک خاک بر روی ضریب BCR (نسبت ظرفیت باربری پی مستقر بر روی خاک مسلح به ظرفیت باربری پی مستقر بر روی خاک غیر مسلح) خاک ماسه‌ای را در ۳ حالت سست، با تراکم متوسط و متراکم مدل نمودند. زاویه اصطکاک خاک ماسه‌ای در حالت سست، با تراکم متوسط و متراکم به ترتیب ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه در نظر گرفته شد. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش زاویه اصطکاک از ۳۰ به ۳۵ و ۴۵ درجه، ضریب BCR از ۲/۳۳ به ۳/۲۷ و ۴/۱۶ افزایش یافت. چادوری و همکاران^۵ [۲۰] به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی رفتار پی نواری مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که تاثیر مسلح کننده ژئوگرید بر روی افزایش ظرفیت باربری پی نواری با افزایش فاصله پی از راس شیروانی، کاهش می‌یابد. السواوات^۶

¹ El Sawwaf

² Zomorodian and Sadeghi

³ Dhatrik and Bhagat

⁴ Hamidi and Abbeche

⁵ Choudhary at el

⁶ EL Sawwaf

[۲۱] به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی رفتار پی نواری مجاور شیروانی رسی نرم مسلح شده با ژئوگرید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که در صورتیکه ارتفاعی از شیروانی که مسلح کننده در آن مستقر می‌گردند، خاک رس نرم با خاک ماسه‌ای تعویض گردد، ظرفیت باربری گروه شمع به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. یو^۷ [۲۲] به بررسی اثر مسلح سازی شیروانی با ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری پی نواری پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که مسلح کردن شیروانی با ژئوگرید، ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر راس شیروانی ماسه‌ای را تا ۴ برابر افزایش داده و تعداد بهینه لایه‌های ژئوگرید ۳ لایه می‌باشد.

هالدر و چاکرابورتی^۸ [۲۳] به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر راس شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که عمق بهینه قرارگیری ژئوگرید به زاویه شیروانی، فاصله پی از راس شیروانی و زاویه اصطکاک بستگی دارد. ساواتی و همکاران^۹ [۲۴] به کمک آزمایش مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که عمق بهینه قرارگیری اولین ژئوگرید ۰/۷۵ عرض پی می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان فاصله بحرانی (فاصله‌ای از راس شیروانی که ظرفیت باربری پی مستقر بر روی زمین مسطح برابر می‌شود) برای پی نواری مستقر بر روی شیروانی مسلح شده با ژئوگرید، ۱/۵ برابر عرض پی می‌باشد. دیویدی و همکاران^{۱۰} [۲۵] به کمک روش المان محدود رفتار پی نواری مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که عمق بهینه قرارگیری اولین ژئوگرید، ۰/۷۵ - ۰/۵ برابر عرض پی می‌باشد و در این عمق ظرفیت باربری پی نواری ۱/۸ برابر ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی غیر مسلح می‌باشد. لی و همکاران^{۱۱} [۲۶] به کمک آزمایش مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با یک لایه ژئوگرید نسبت به ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی مسلح نشده تا ۱/۸۵ برابر افزایش می‌یابد.

از گروه شمع به عنوان پی ساختمان‌های بلندمرتبه، پایه پل‌ها و سازه‌های انتقال نیرو استفاده می‌گردد. برخی این سازه‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی قرار می‌گیرند. قرارگیری شمع‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری محوری گروه شمع می‌گردد. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری پی، مسلح سازی خاک زیر پی با ژئوگرید می‌باشد. در چند دهه اخیر در خصوص ظرفیت باربری پی سطحی مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید تحقیقات زیادی شده است، ولی در خصوص رفتار گروه‌های شمع در مجاورت شیروانی مسلح شده با ژئوگرید تاکنون تحقیقاتی صورت نپذیرفته است. لذا بررسی رفتار گروه‌های شمع در مجاورت شیروانی مسلح شده با ژئوگرید، حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع ۲×۲ مستقر بر راس شیروانی ماسه‌ای با تراکم متوسط مسلح شده با ژئوگرید پرداخته می‌شود و اثر عواملی همانند تعداد ژئوگریدها، فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی، فاصله بین ژئوگریدها و ابعاد ژئوگریدها، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح و روش انجام کار

۲-۱-۱- خاک

در این تحقیق از ماسه ریزدانه خشک شهرستان رامهرمز واقع در جنوب غرب کشور استفاده گردید. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در شکل شماره ۱ و ویژگی‌های این ماسه در جدول شماره ۱ ارائه شده است. دانه بندی خاک به کمک آزمایش دانه‌بندی به روش

⁷ Yoo

⁸ Halder and Chakraborty

⁹ Satvati et al

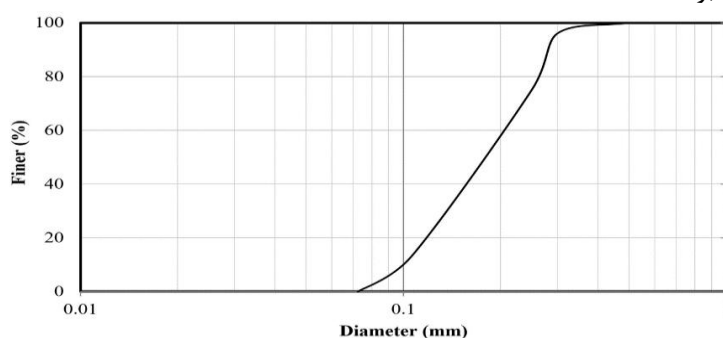
¹⁰ Dwivedi et al

¹¹ Lee et al

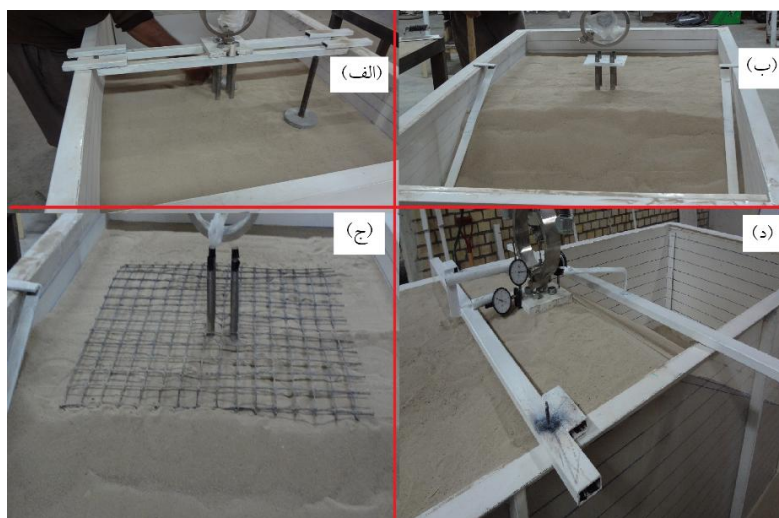
خشک تعیین گردید. ماسه بر اساس روش طبقه‌بندی متحد از نوع SP بوده و از آزمایش برش مستقیم جهت تعیین زاویه اصطکاک ماسه استفاده گردید. ژئوگرید استفاده شده در این تحقیق از نوع دوسویه و از جنس پلی اتیلن می‌باشد و مقاومت کششی ۴۰ کیلونیوتن بر متر می‌باشد. ابعاد شبکه ژئوگرید ۳۰×۳۰ میلی‌متر و عرض و ضخامت رشته‌های آن به ترتیب ۲ و ۳ میلی‌متر بود.

۲-۱-۲- روش انجام آزمایش

در این مطالعه از شمع‌های فولادی توپر به قطر ۱۸ میلی‌متر، فاصله شمع‌ها ۳ برابر قطر شمع و طول مدفون ۴۰ سانتیمتر و از سرشمع فولادی به ابعاد ۱۵×۱۵ سانتیمتر و ضخامت ۲ سانتیمتر استفاده گردید. زاویه شیروانی ۳۳/۷ درجه و ارتفاع شیروانی ۵۰ سانتی‌متر و تراکم خاک ۶۰٪ در نظر گرفته شده بود.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۲: الف) نحوه قرار گیری گروه شمع در محل مد نظر ب) نحوه مهار شمع‌ها در ۱۵ سانتی‌متر انتهایی اجرای شیروانی ج) قرار گیری ژئوگرید در محل مدنظر د) نحوه قرار گیری نیروسنج و گیج‌ها

در این تحقیق از امکانات انجام آزمایش مدل فیزیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامهرمز استفاده گردید. از یک جعبه با ابعاد داخلی ۱۸۰×۹۰×۹۰ سانتیمتر در این تحقیق استفاده شده است. ابعاد باکس به گونه‌ای تعیین گردد تا مرزهای جانبی اثری بر روی نتایج آزمایش‌ها نداشته باشد. عدم تاثیرپذیری نتایج از مرزهای جانبی به کمک آنالیز حساسیت و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D کنترل گردید. در مدل‌سازی انجام شده از مدل رفتاری موهر کلمب برای مدل‌سازی رفتار شیروانی ماسه‌ای و از مدل رفتاری الاستیک خطی برای مدل‌سازی شمع و سرشمع استفاده گردید [۲۷]. مدول الاستیسیته ماسه و شمع به ترتیب ۱۳ مگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد [۲۷]. ژئوگریدها به کمک المان ژئوگرید و با سختی محوری ۶۰۰ کیلونیوتن بر متر (مطابق مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده) مدل

گردیدند. ضریب R_{inter} برای اندرکنش بین خاک با شمع و ژئوگرید به ترتیب ۰/۶ و ۱ در نظر گرفته شد [۱۹]. برای انجام آنالیز حساسیت، ظرفیت باربری محوری گروه شمع برای آرایش‌های مختلف لایه‌های ژئوگرید برای باکس با عرض ۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۹۵ سانتی‌متر محاسبه گردید و مناسب بودن عرض باکس موجود کنترل گردید. به عنوان نمونه برای گروه شمع با ۳ لایه ژئوگرید و فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید برابر با ۱۰ سانتی‌متر ظرفیت باربری گروه شمع برای باکس با عرض ۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۹۵ سانتی‌متر به ترتیب ۶۷۲۶، ۶۸۴۳، ۶۸۵۲ و ۶۸۵۲ نیوتن بدست آمد که نشان دهنده مناسب بودن عرض ۹۰ سانتی‌متری باکس مورد استفاده می‌باشد و همچنین نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی ظرفیت باربری گروه شمع را ۴/۴٪ بیشتر از مدل فیزیکی (۶۵۶۳ نیوتن) تخمین زده است. ظرفیت باربری گروه شمع مدل شده در نرم افزار PLAXI3D برای گروه شمع با ۳ لایه ژئوگرید و فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید برابر با ۱۰ سانتی‌متر و ابعاد ژئوگرید با ابعاد ۵ و ۳ برابر ابعاد سرشمع به ترتیب ۵۳۷۸ و ۵۸۳۰ نیوتن بدست آمد که به ترتیب ۵٪ و ۶٪ بیشتر از نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی تخمین زده شد. مطابق پیشنهاد محققین مختلف عرض باکس می‌بایست ۶ برابر عرض سرشمع باشد که در این تحقیق این نسبت رعایت شده است [۲۸-۲۹]. اگرچه ابعاد باکس در این تحقیق مناسب می‌باشد ولی برای اطمینان از عدم تاثیرگذاری دیواره‌های باکس بر روی نتایج، قبل از هر آزمایش جهت کاهش اصطکاک بین خاک و دیواره باکس، یک لایه نازک روغن بر روی دیواره‌های باکس اجرا گردید [۳۰]. به منظور مشاهده و کنترل اجرای شیروانی، در وجه جلویی باکس از ورق پلکسی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شده بود. شیروانی ماسه‌ای خشک در ۱۸ لایه به ضخامت ۵ سانتی‌متر تا رسیدن به تراکم موردنظر تراکم گردید. به منظور دستیابی به یک تراکم یکسان در تمامی لایه‌ها، از روش تراکم کاهش‌یافته جهت تراکم شیروانی استفاده گردید [۳۱]. تراکم نهایی موردنظر برای لایه‌ها ۶۰٪ در نظر گرفته شد. تراکم نسبی خاک در هر لایه به کمک حجم و وزن خاک مورد نیاز هر لایه کنترل گردید. با توجه به این‌که خاک بین شمع‌ها و خاک اطراف شمع همانند سایر نقاط شیروانی باید تا تراکم مورد نظر تراکم گردند، لذا از کوبه‌هایی با سایز مختلف جهت تراکم نمودن خاک بین شمع‌ها و اطراف شمع‌ها استفاده گردید. در زمان اجرای شیروانی، به هنگام رسیدن شیروانی به تراز نوک شمع، گروه شمع در محل موردنظر مستقر می‌گردید به این منظور از دو میله استفاده گردید که از زیر سرشمع در جهت عرضی جعبه آزمایش عبور کرده و انتهای آن‌ها توسط ۴ گیره به لبه‌های جعبه محکم می‌گردیدند (شکل ۲-الف) و سپس اجرای سایر لایه‌های خاک و قرار دادن ژئوگریدها در موقعیت مدنظر تا تراز نهایی ادامه پیدا می‌کند. لازم به ذکر است برای اجرای ۳ لایه پایانی شیروانی، به منظور دستیابی به تراکم مدنظر خاک ماسه‌ای در زیر سرشمع، سرشمع برداشته می‌شد و شمع‌ها به کمک یک اشل فولادی در محل خود ثابت می‌شدند (شکل ۲-ب) و در انتهای پروسه اجرای شیروانی مجدداً سرشمع به گروه شمع متصل می‌گردید. بارگذاری از طریق جک اسکرو برقی متصل شده به قاب بارگذاری، بر روی مرکز سرشمع اعمال گردید. در تمامی آزمایش‌ها، بارگذاری به صورت جابجایی با سرعت ثابت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه بر مرکز سرشمع اعمال گردید و نیرو اعمال شده به وسیله یک رینگ نیروسنج که مابین سرشمع و قاب فولادی قرار داده شده بود، اندازه‌گیری می‌گردید. جابجایی قائم سرشمع توسط دو گیج ۳۰ میلی‌متری با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر که در دو لبه سرشمع قرار داشتند، اندازه‌گیری گردید (شکل ۲-د) و متوسط جابجایی قائم اندازه‌گیری شده توسط این دو گیج، به عنوان جابجایی قائم گروه شمع در نظر گرفته شد. جابجایی جانبی سرشمع توسط یک گیج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. در تمامی آزمایش‌ها، بارگذاری تا جابجایی قائم ۲۵ میلی‌متر اعمال گردید. برنامه آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۲ ارائه شده است. در این تحقیق از گروه‌های شمع ۲×۲ استفاده گردید. در این آزمایش‌ها فاصله شمع‌ها در گروه شمع‌ها 3dp در نظر گرفته شد (dp قطر شمع).

۳- نتایج

در این تحقیق در مجموع ۱۱ آزمایش بر روی گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی مسطح ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید انجام داده شد. برای بیان اثر تسلیح شیروانی با ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی از ضریب BCR که به صورت نسبت ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی مسلح شده به ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی غیر مسلح تعریف می‌گردد، استفاده می‌گردد.

$$BCR = \frac{q_{u, reinforced}}{q_{u, unreinforced}} \quad (1)$$

به ترتیب ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی غیر مسلح و ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی مسلح شده با ژئوگرید می باشد.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی ماسه مورد استفاده در تحقیق

مقدار	ویژگی
۱۶/۹۰	$(\gamma_d)_{\max} (kN / m^3)$
۱۳/۸۸	$(\gamma_d)_{\min} (kN / m^3)$
۲/۶۵	G_s
۳۵	$\Phi (^{\circ})$
۰/۰۱	D_{10}
۰/۱۸	D_{50}
۲/۰۵	C_u
۰/۸۲	C_c
.	Passing 200 sieve (%)
SP	Soil type: USCS

جدول ۲: برنامه آزمایش‌های مدل فیزیکی

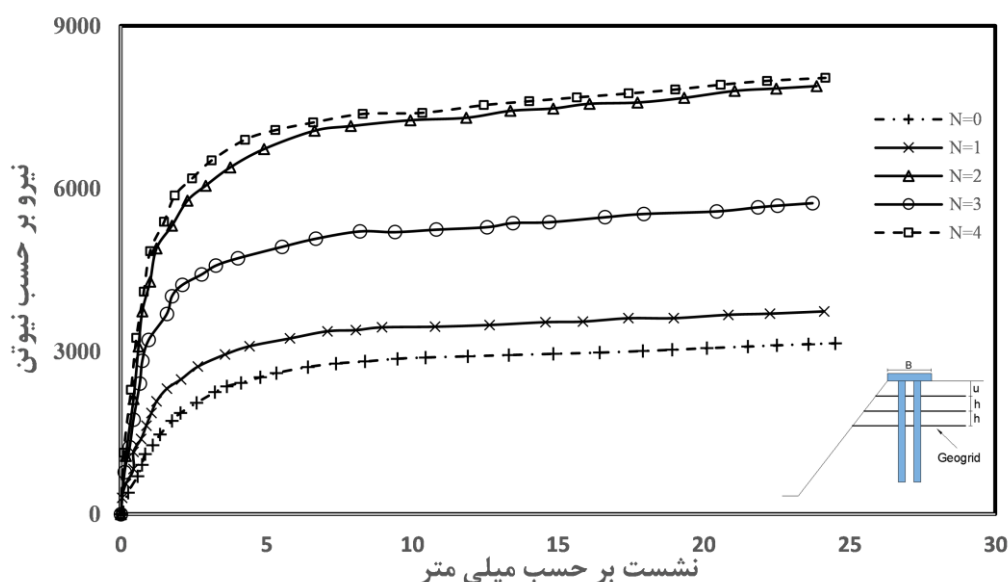
فاصله شمع‌ها	تعداد آزمایش‌ها	هدف
3dp	۵	بررسی اثر تعداد لایه‌های ژئوگرید
3dp	۲	بررسی اثر فاصله اولین لایه ژئوگرید
3dp	۲	بررسی اثر فاصله بین ژئوگریدها
3dp	۲	بررسی اثر ابعاد ژئوگریدها

۳-۱- اثر تعداد ژئوگریدها

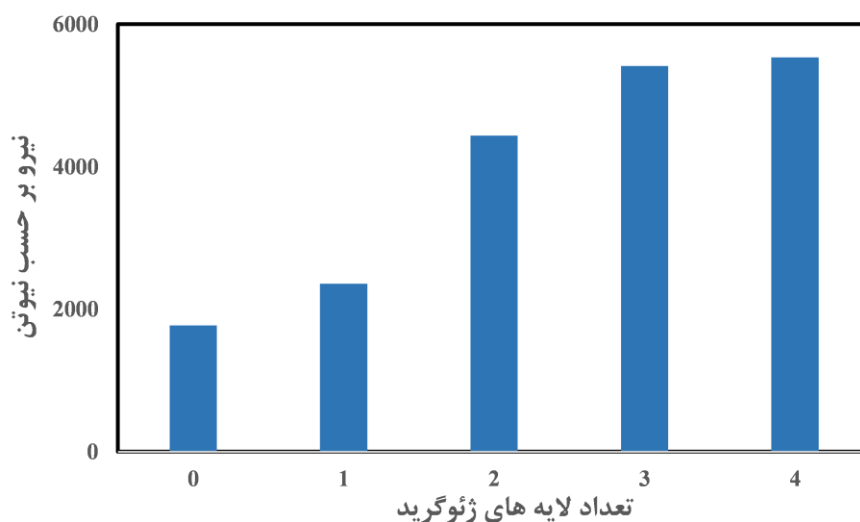
در این بخش، اثر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری و جابجایی افقی گروه شمع مورد بررسی واقع شده است. در این گروه از آزمایش‌ها از یک گروه شمع ۲×۲ با شمع‌هایی با قطر ۱۸ میلی‌متر و طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر و فاصله مرکز به مرکز ۳ برابر قطر شمع، استفاده شده است. شیب شیروانی ۱/۵ (H_s:V_s) در نظر گرفته شد. در این بخش تعداد لایه‌های ژئوگرید ۰ (شیروانی غیر مسلح)، ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه و ابعاد ژئوگریدها ۴ برابر سرشمع (۶۰×۶۰ سانتیمتر) در نظر گرفته شد. فاصله اولین ژئوگرید از سطح بالایی شیروانی (u) ۵ سانتیمتر (u/B=۱/۳) عرض سرشمع) و فاصله بین لایه‌های ژئوگریدها (h) ۵ سانتیمتر (h/B=۱/۳) در نظر گرفته شد. برای تعیین ظرفیت باربری گروه شمع از روش ٪ قطر (نیروی اعمالی جهت نشست) معادل ۱۰٪ قطر شمع که در این تحقیق نیرو معادل نشست ۱/۸ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود) استفاده گردید [۳-۶]. منحنی بار-نشست و ظرفیت باربری گروه شمع بدست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی در شکل ۳ و ۴ ارائه شده است. نتایج شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد. ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای مسلح با تعداد لایه‌های ژئوگرید ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه به ترتیب ۳۳٪، ۱۵۰٪، ۲۰۵٪ و ۲۱۰٪ از ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای غیر مسلح بیشتر می‌باشد. نتایج شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که تعداد لایه‌های بهینه ژئوگرید ۳ لایه می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایشات مدل فیزیکی پی نواری مستقر بر راس شیروانی مسلح شده با ژئوگرید توسط یو [۲۲] و چادوری و همکاران [۲۰] نیز نشان می‌دهد تعداد بهینه ژئوگریدها برای پی نواری نیز ۳ لایه می‌باشد.

نحوه تغییرات BCR با افزایش تعداد لایه‌های شمع در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج شکل‌های ۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید ضریب BCR افزایش می‌یابد. ضریب BCR گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای مسلح با تعداد لایه‌های ژئوگرید ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه به ترتیب ۱/۳۳، ۲/۵، ۳/۰۵ و ۳/۱۲ می‌باشد. نتایج شکل‌های ۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید از ۳ به ۴ لایه اثر

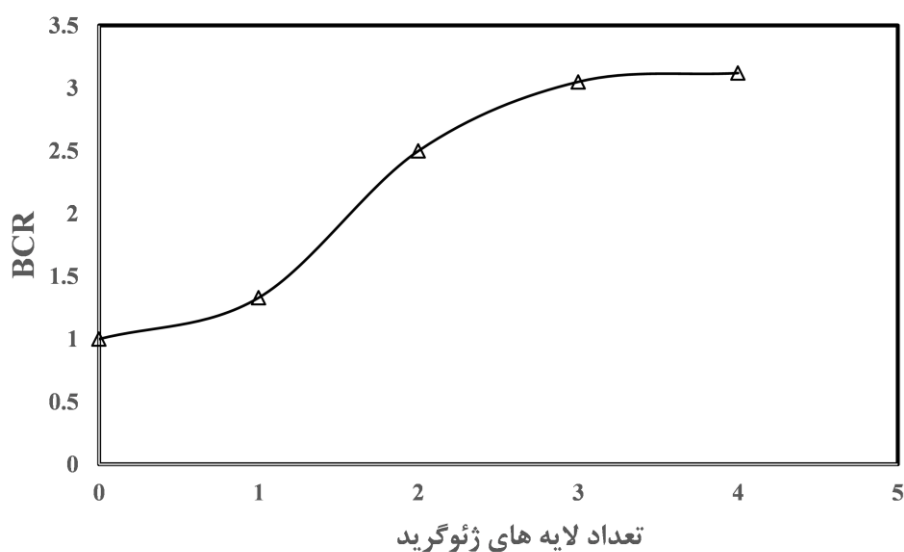
کمی بر روی افزایش ضریب BCR دارد. ضریب BCR نتایج حاصل از آزمایشات مدل فیزیکی پی نواری مستقر بر راس شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ۳ لایه ژئوگرید توسط یو [۲۲] و چادوری و همکاران [۲۰]، به ترتیب ۲/۶ و ۲/۷ بدست آمده بود. روند افزایش ضریب BCR با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید را می‌توان به گسترش بلوک تسلیح شده دانست که به واسطه آن ضمن افزایش بیشتر سختی خاک زیر سرشمع و اطراف شمع، مساله انتقال تنش‌های ایجاد شده در زیر سرشمع و اطراف شمع به نواحی غیرمسلح بهتر صورت می‌گیرد. با این حال اثرات مفید افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید تا حد مشخصی قابل توجه می‌باشد، زیرا به کار بردن لایه‌های ژئوگرید در اعماق زیادتر خاک که دارای جابجایی‌های کمتر و فشار محصورکننده اطراف بیشتر می‌باشد، چندان مفید و مناسب نمی‌باشد.



شکل ۳: منحنی بار-نشست گروه شمع برای تعداد لایه‌های مختلف ژئوگرید



شکل ۴: اثر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی

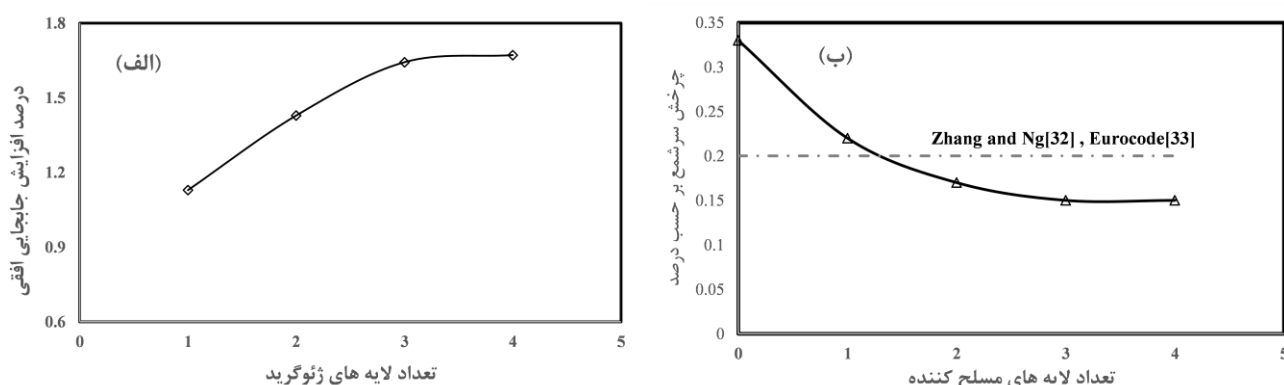


شکل ۵: اثر تعداد لایه های ژئوگرید بر روی ضریب BCR

میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ در قطر شمع در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید میزان جابجایی افقی سرشمع افزایش یافت که این امر به دلیل افزایش ظرفیت باربری با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید و در نتیجه افزایش نیرو اعمالی به سرشمع می‌باشد. نتایج شکل ۶-الف نشان می‌دهد که جابجایی افقی سرشمع در شیروانی مسلح شده با تعداد ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه مسلح کننده به ترتیب ۰.۱۳٪، ۰.۴۳٪، ۰.۶۴٪ و ۰.۶۹٪ بیشتر از جابجایی افقی سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی مسلح نشده می‌باشد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که مسلح کردن خاک باعث کاهش دوران سرشمع (نسبت اختلاف نشست قائم دو لبه سرشمع به عرض سرشمع) می‌گردد و با افزایش تعداد ژئوگریدها دوران سرشمع کاهش می‌یابد. دلیل این امر افزایش سختی خاک در محدوده گوه گسیختگی زیر سرشمع با افزایش تعداد ژئوگریدها می‌باشد. برای درک بهتر اثر تعداد ژئوگریدها بر روی دوران سرشمع، تغییرات دوران سرشمع با تعداد لایه‌های مسلح کننده در شکل ۶-ب ارائه شده است. نتایج شماره ۶-ب نشان می‌دهد که در حالت شیروانی مسلح نشده میزان دوران سرشمع از مقدار توصیه شده بیشتر می‌باشد که با نتایج محمد علی نژاد و همکاران همخوانی دارد. با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید به ۲ لایه میزان دوران سرشمع از حداکثر میزان توصیه شده کمتر می‌گردد. میزان دوران سرشمع در شیروانی مسلح شده با تعداد ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه مسلح کننده به ترتیب ۰.۳۳٪، ۰.۴۹٪، ۰.۵۵٪ و ۰.۵۵٪ کمتر از دوران سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی مسلح نشده می‌باشد.

جدول ۳: میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ درصد قطر شمع

	تعداد لایه‌های ژئوگرید				
	۰	۱	۲	۳	۴
جابجایی افقی سرشمع (میلیمتر)	۰/۷	۰/۷۹	۱	۱/۱۵	۱/۱۸
دوران سرشمع (درصد)	۰/۳۳	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۱۵



شکل ۶: الف) تغییرات جابجایی افقی سرشمع در مقابل تعداد لایه ها ژئوگرید ب) تغییرات چرخش سرشمع با افزایش تعداد لایه های ژئوگرید

۳-۲- اثر فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی

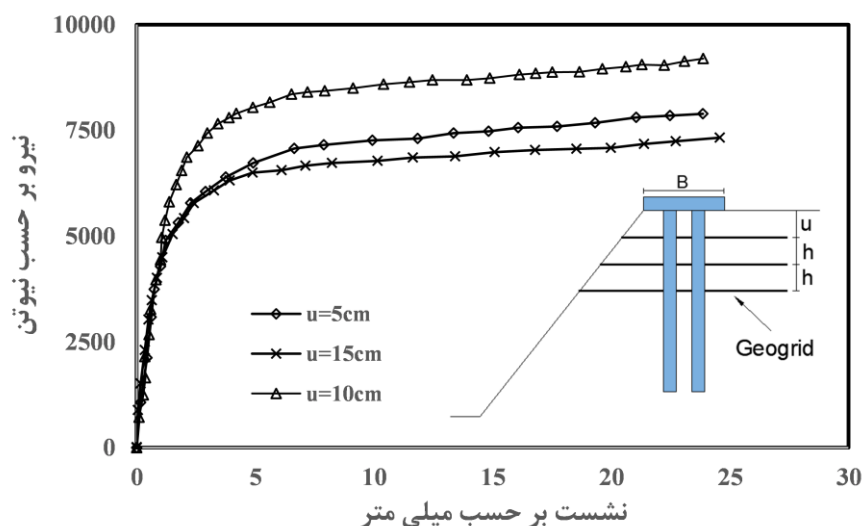
در این بخش اثر فاصله اولین مسلح کننده از سطح افقی مورد بررسی قرار گرفت. در این گروه از آزمایش‌ها از یک گروه شمع 2×2 با شمع‌هایی با قطر ۱۸ میلی‌متر و طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. شیب شیروانی ۱:۱/۵ ($H_s:V_s$) در نظر گرفته شد. در این بخش تعداد لایه‌های ژئوگرید ۳ لایه و ابعاد ژئوگریدها ۴ برابر سرشمع در نظر گرفته شد. فاصله اولین ژئوگرید از سطح بالایی شیروانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر (۱/۳، ۲/۳، ۱) و فاصله بین لایه‌های ژئوگرید ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد ($h/B=1/3$). نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی در شکل‌های ۷ الی ۹ ارائه شده است. منحنی بار-نشست و ظرفیت باربری گروه شمع بدست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است. نتایج شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله ژئوگریدها از سطح افقی از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به ترتیب ۲۱٪ و ۵٪ افزایش یافت و فاصله بهینه ژئوگرید از سطح افقی ۱۰ سانتیمتر ($u/b=0.66$) می‌باشد که با نتایج یو^{۱۲} [۲۲] و دیویدی و همکاران^{۱۳} [۲۵] برای پی‌های نواری همخوانی دارد. نتایج شکل‌های ۹ نشان می‌دهد که ضریب BCR با افزایش فاصله ژئوگریدها از سطح افقی از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر به ترتیب از ۳/۷ به ۳/۲ و ۳/۲ افزایش یافت که نتایج نشان دهنده این مطلب می‌باشد که نسبت بهینه u/B برابر با ۰/۶۶ می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان اظهار داشت، زمانی که اولین لایه ژئوگرید خیلی نزدیک به سطح زمین باشد، اثرات تسلیح‌کنندگی به دلیل عدم شرایط محصورشدگی کافی نمی‌تواند کامل بسیج گردد و فشار سربار خاکی بر لایه ژئوگرید برای بسیج شدن تمام مقاومت مهاری لایه تسلیح در مقابل نیروهای برون‌کشی، ناکافی و نامناسب است. از طرفی اگر اولین لایه ژئوگرید در فاصله زیادی از سطح افقی قرار گیرد، امکان ایجاد سطح گسیختگی برشی در ناحیه بزرگ مسلح نشده بالای اولین لایه ژئوگرید وجود دارد. بنابراین یک عمق بهینه برای فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی وجود دارد که بیشترین راندمان را برای استفاده از تسلیح‌کننده به دنبال داشته و بیشترین بهبود را در ظرفیت باربری محوری گروه شمع داشته باشد. میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ در قطر شمع برای فواصل مختلف اولین ژئوگرید از سطح افقی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که میزان جابجایی افقی سرشمع با افزایش فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی، کاهش یافت. با افزایش فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر میزان جابجایی افقی سرشمع به ترتیب ۳۹٪ و ۳۰٪ کاهش یافت. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که دوران سرشمع بستگی به فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی دارد و کمترین مقدار چرخش سرشمع در نسبت $u/B=0.66$ اتفاق افتاد و میزان چرخش سرشمع در تمامی نسبت‌های u/B از حداکثر مقدار پیشنهادی (۰/۲ درصد) کمتر بود.

¹² Yoo

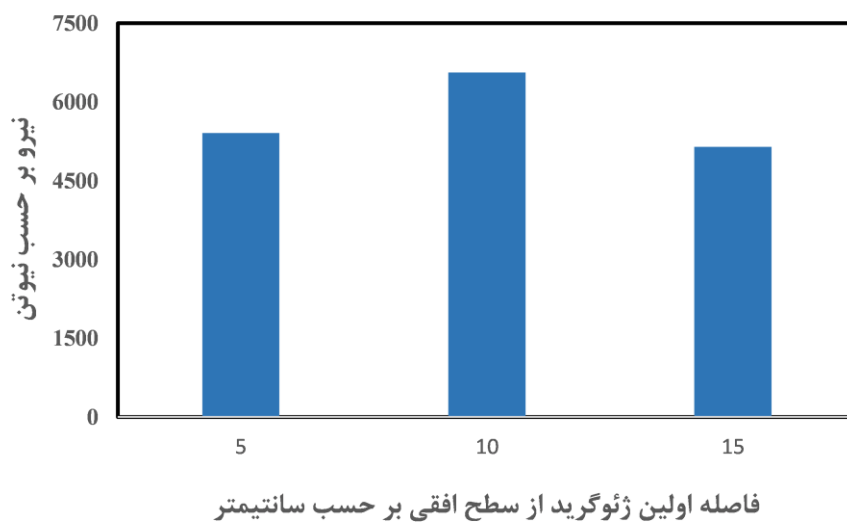
¹³ Dwivedi et al

جدول ۴: میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ درصد قطر شمع برای فواصل مختلف اولین ژئوگرید از سطح افقی

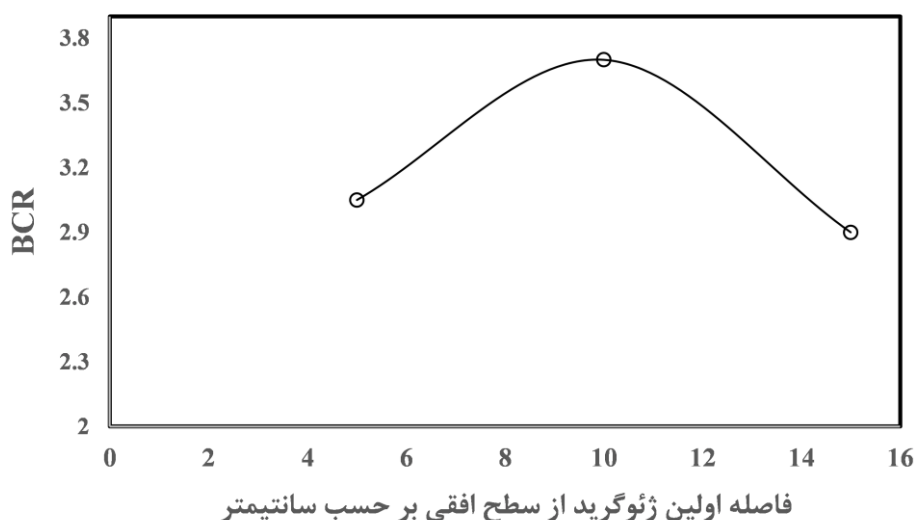
فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی (سانتی‌متر)			
	۵	۱۰	۱۵
جابجایی افقی سرشمع (میلیمتر)	۱/۱۵	۰/۷	۰/۸
دوران سرشمع (درصد)	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۹/۴



شکل ۷: منحنی بار-نشست گروه شمع مستقر بر روی شیروانی مسلح برای نسبت‌های (۱/۳، ۲/۳، ۱) (u/B=۱)



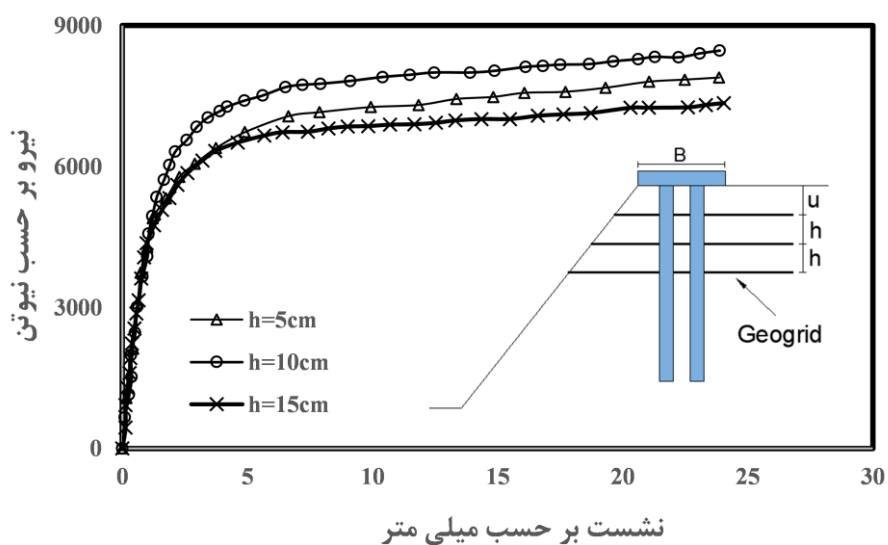
شکل ۸: اثر فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی بر روی ظرفیت باربری برای نسبت‌های (۱/۳، ۲/۳، ۱) (u/B=۱)



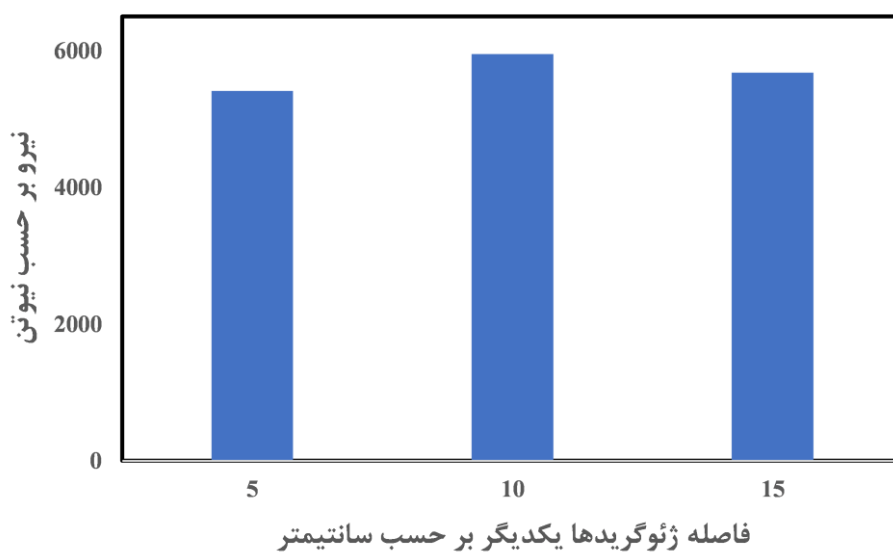
شکل ۹: اثر فاصله اولین لایه ژئوگرید از سطح افقی بر روی ضریب BCR برای نسبت‌های (u/B=۱، ۲/۳، ۱/۳)

۳-۳- اثر فاصله قائم ژئوگریدها از یکدیگر

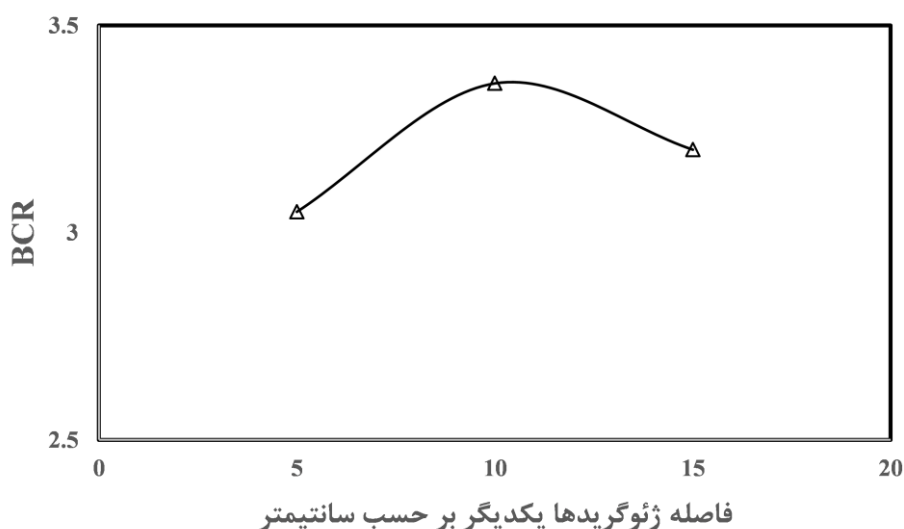
در این بخش اثر فاصله قائم ژئوگریدها (h/B) بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. در این گروه از آزمایش‌ها از یک گروه شمع 2×2 حاوی شمع‌هایی با قطر ۱۸ میلی‌متر و طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. شیب شیروانی ۱: ۱/۵ ($H_s:V_s$) در نظر گرفته شد. در این بخش تعداد لایه‌های ژئوگرید ۳ لایه و ابعاد ژئوگریدها ۴ برابر سرشمع در نظر گرفته شد. فاصله ژئوگرید از سطح افقی ۵ سانتیمتر و فاصله بین لایه‌های ژئوگرید ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد ($h/B=1, 2/3, 1/3$). نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ ارائه شده است. منحنی بار-نشست و ظرفیت باربری گروه شمع بدست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی در شکل ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نتایج شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به فاصله قائم بین لایه‌های مسلح کننده بستگی دارد. با افزایش فاصله ژئوگریدها از یکدیگر از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به ترتیب ۱۰٪ و ۵٪ افزایش یافت. نتایج شکل‌های ۱۲ نشان می‌دهد که ضریب BCR با افزایش فاصله ژئوگریدها از سطح افقی از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر به ترتیب از ۳/۰۵ به ۳/۷ و ۳/۲ افزایش یافت. به عبارت دیگر ضریب BCR با افزایش نسبت u/b از ۰/۳۳ به ۰/۶۶ و ۱ به ترتیب ۲۱٪ و ۵٪ افزایش یافت. که این مطلب بیانگر این موضوع می‌باشد که نسبت بهینه h/B برابر با ۰/۶۶ می‌باشد. ضریب BCR حاصل از نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی پی نواری مستقر بر راس شیروانی مسلح شده با ۳ لایه ژئوگرید توسط یو [۲۲] با افزایش نسبت u/b به ۰/۳۳ به ۰/۶۶، ۲۰٪ افزایش پیدا کرد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که نزدیک شدن بیش از حد ژئوگریدها به یکدیگر به دلیل عدم رعایت محدوده لازم که شرایط محصورشدگی را فراهم می‌کند، مناسب به نظر نمی‌رسد. از طرفی دور شدن لایه ژئوگرید از یکدیگر باعث می‌شود که نواحی غیرمسلح بزرگی که مستعد وقوع گسیختگی هستند بین لایه‌های ژئوگرید بوجود آید و راندمان تسلیح کاهش یابد. میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ در قطر شمع در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله ژئوگریدها از یکدیگر جابجایی افقی سرشمع کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله بین ژئوگریدها از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر میزان جابجایی به ترتیب ۴۷٪ و ۵۴٪ کاهش یافت. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله ژئوگریدها از یکدیگر چرخش سرشمع افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله بین ژئوگریدها از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر چرخش سرشمع به ترتیب ۳۰٪ و ۳۵٪ افزایش یافت.



شکل ۱۰: منحنی بار-نشست گروه شمع مستقر بر روی شیروانی مسلح برای نسبت‌های ($h/B=1, 2/3, 1/3$)



شکل ۱۱: اثر فاصله ژئوگریدها از یکدیگر بر روی ظرفیت باربری برای نسبت‌های ($h/B=1, 2/3, 1/3$)



شکل ۱۲: اثر فاصله لایه‌های ژئوگرید از یکدیگر بر روی ضریب BCR برای نسبت‌های (۱/۳، ۲/۳، ۱) (h/B=)

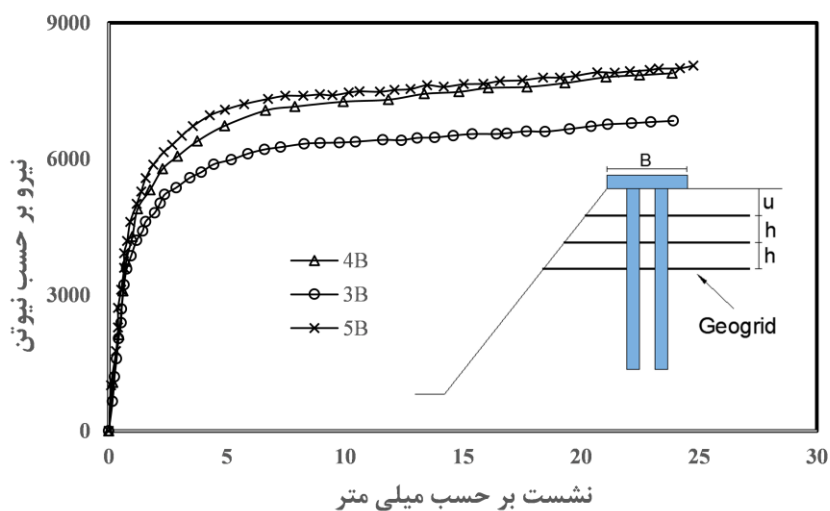
جدول ۵: میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ درصد قطر شمع برای فواصل مختلف ژئوگریدها از یکدیگر

فاصله ژئوگریدها از یکدیگر (سانتی متر)			
	۵	۱۰	۱۵
جابجایی افقی سرشمع (میلیمتر)	۱/۱۵	۰/۶۱	۰/۵۳
دوران سرشمع (درصد)	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۹۷

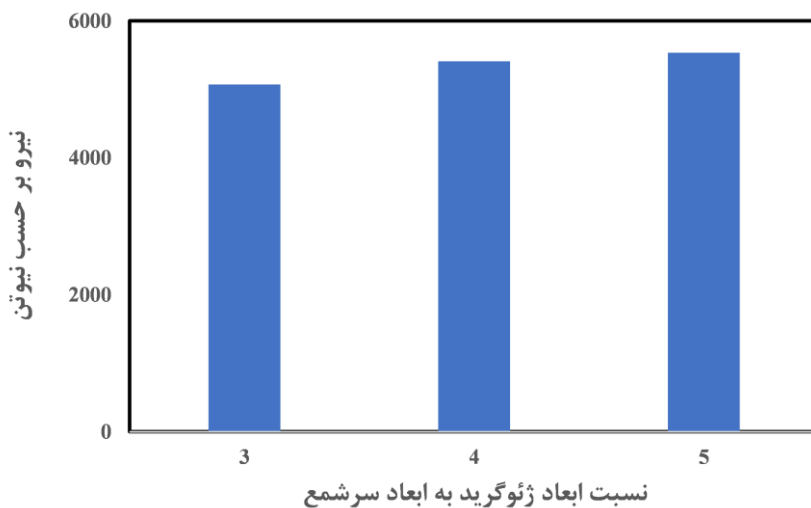
۳-۳- اثر ابعاد ژئوگرید

در این بخش اثر ابعاد ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش در این گروه از آزمایش‌ها از یک گروه شمع ۲×۲ حاوی شمع‌هایی با قطر ۱۸ میلیمتر و طول مدفون ۴۰۰ میلیمتر استفاده شده است. شیب شیروانی ۱: ۱/۵ ($H_s:V_s$) در نظر گرفته شد. در این بخش تعداد لایه‌های ژئوگرید ۳ لایه در نظر گرفته شد. فاصله اولین ژئوگرید از سطح بالایی شیروانی ۵ سانتیمتر و فاصله بین لایه‌های ژئوگرید ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. ابعاد ژئوگریدها ۳، ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع (به ترتیب ۴۵×۴۵، ۶۰×۶۰ و ۷۵×۷۵ سانتی متر) در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در شکل ۱۳ الی ۱۵ ارائه شده است. منحنی بار-نشست و ظرفیت باربری گروه شمع بدست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی در شکل ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. نتایج شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد ژئوگرید ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی مسلح شده افزایش یافت. با افزایش ابعاد ژئوگرید از ۳ به ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع، ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به ترتیب ۶/۶٪ و ۹/۱٪ افزایش یافت. نتایج شکل ۱۵ نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد ژئوگرید ضریب BCR، افزایش می‌یابد. با افزایش ابعاد ژئوگرید از ۳ به ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع ضریب BCR به ترتیب از ۲/۸۶ به ۳/۰۵ و ۳/۱۲ افزایش یافت. ضریب BCR حاصل از نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی پی‌نواری مستقر بر راس شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ۳ لایه ژئوگرید توسط یو [۲۲] با افزایش ابعاد ژئوگرید از ۳ به ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع به ترتیب ۲۶٪ و ۴۸٪ افزایش پیدا کرد. میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ درصد قطر شمع در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد ژئوگریدها میزان جابجایی افقی سرشمع کاهش یافت. با افزایش ابعاد ژئوگریدها از ۳ به ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع، میزان جابجایی افقی سرشمع به ترتیب ۳۰٪ و ۴۲٪ کاهش یافت. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد ژئوگریدها میزان چرخش سرشمع کاهش یافت. با افزایش ابعاد ژئوگریدها

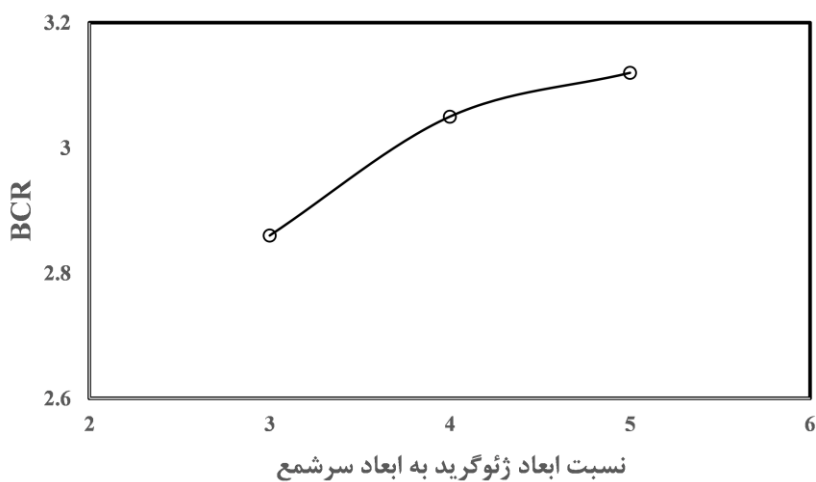
از ۳ به ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع، چرخش سرشمع به ترتیب ۱۳٪ و ۲۵٪ کاهش یافت.



شکل ۱۳: منحنی بار-نشست گروه شمع مستقر بر روی شیروانی مسلح برای ژئوگرید با ابعاد ۳، ۴ و ۵ برابر بعد سرشمع



شکل ۱۴: اثر ابعاد ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری، برای ژئوگرید با ابعاد ۳، ۴ و ۵ برابر بعد سرشمع



شکل ۱۵: اثر ابعاد لایه‌های ژئوگرید از یکدیگر بر روی ضریب BCR، برای ژئوگرید با ابعاد ۳، ۴ و ۵ برابر بعد سرشمع

جدول ۶: میزان جابجایی افقی و چرخش سرشمع در نشست معادل ۱۰ درصد قطر شمع برای ابعاد مختلف ژئوگریدها

نسبت عرض ژئوگرید به عرض سرشمع			
	۳	۴	۵
جابجایی افقی سرشمع (میلیمتر)	۱/۶۵	۱/۱۵	۰/۹۷
دوران سرشمع (درصد)	۱۷/۲	۰/۱۵	۰/۱۳

۴- اثر مقیاس و محدودیت‌ها

با توجه به زمانبر و گران بودن آزمایش‌های با مقیاس واقعی بر روی شمع‌ها، آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس کوچک مورد اقبال محققین مختلف قرار گرفته است. در این تحقیق از شمع با ابعاد کوچک‌تر از شمع‌های واقعی استفاده شده است، در حالی که ماسه و ژئوگرید استفاده شده دارای ابعاد واقعی می‌باشند. بنابراین شمع مدل شده و خاک، ممکن است عملکردی همانند نمونه واقعی نداشته باشند که این امر می‌تواند اثراتی بر روی نتایج آزمایش‌ها داشته باشد که به این موضوع اثر مقیاس گفته می‌شود [۱۰ و ۳۴ و ۳۵]. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از اختلاف سطح تنش بین آزمایش‌های مدل و آزمایش‌های مقیاس واقعی است. فرانک و موت^{۱۴} [۳۶] تاثیر اندازه ذرات ماسه را بر پاسخ مدل فیزیکی مقیاس کوچک را بررسی کردند و نشان دادند که اگر نسبت قطر شمع به اندازه متوسط ذرات بیشتر از ۳۰ گردد، می‌توان اثر اندازه دانه‌های ماسه را بر روی پاسخ مدل را نادیده گرفت. این نتیجه بر اساس پژوهش‌های اوزن^{۱۵} [۳۵] بود که نسبت محیط شمع به اندازه ذرات را بیش از ۱۵ تا ۳۰ توصیه کرد تا از اثرات مقیاس جلوگیری شود. در این تحقیق، قطر شمع مورد استفاده ۱۰۵ برابر اندازه متوسط دانه‌های ماسه بود که بیشتر از نسبت توصیه شده می‌باشد. در این پژوهش از ژئوگرید با ابعاد واقعی استفاده گردید که نسبت به مدل فیزیکی کوچک مقیاس بسیار صلب محسوب می‌شود. در نتیجه این ژئوگرید رفتار مسلح کننده‌های بسیار سخت را بیان می‌کند. در این تحقیق ترجیح داده شد که از ژئوگرید با تنش مجاز کم، بجای ژئوگرید دست‌ساز جهت مدل کردن تسلیح خاک استفاده گردد (به دلیل نامشخص بودن و عدم اطمینان از مشخصات ژئوگرید دست‌ساز). رفتار گروه شمع قرار گرفته در راس شیروانی مسلح شده با ژئوگرید، حاصل اندرکنش پیچیده‌ای بین ژئوگرید، خاک اطراف و شمع می‌باشد که در برگیرنده پارامترهای متعددی می‌باشد که درک کامل آن در قالب یک مطالعه واحد امکان‌پذیر نمی‌باشد. بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر مسلح سازی شیروانی ماسه‌ای بر رفتار گروه شمع بوده است. اگرچه اثرات مقیاس ناشی از استفاده از ژئوگرید واقعی در آزمایش‌های مدل سازی فیزیکی مقیاس کوچک اجتناب‌ناپذیر است و نمی‌توان از این آزمایش‌ها برای پیش‌بینی دقیق رفتار نمونه واقعی استفاده کرد. اما این مطالعه نشان داد که، مسلح سازی شیروانی ماسه‌ای با ژئوگرید باعث بهبود قابل توجه ظرفیت باربری محوری گروه شمع و کاهش میزان دوران سرشمع می‌گردد. این تحقیق می‌تواند مبنای مفیدی برای تحقیقات بیشتر با استفاده از آزمایش‌های در مقیاس واقعی یا آزمایش‌های سانتریفیوژی و مطالعات عددی را فراهم نماید که منجر به درک بیشتر از رفتار واقعی و طراحی دقیق شیروانی مسلح شده با ژئوگرید گردد.

۵- نتیجه گیری

از شمع به عنوان پی ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌های انتقال استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت شیروانی ساخته می‌شوند. استقرار شمع‌ها مجاور شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری و دوران شمع به سمت شیروانی در اثر بارگذاری محوری می‌گردد. مهندسين به

¹⁴ Franke and Muth

¹⁵ Ovesen

دنبال راهکارهایی برای افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها و در نتیجه کاهش هزینه‌های اجرای شمع می‌باشند. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری پی، مسلح سازی خاک زیر پی با ژئوگرید می‌باشد. در این تحقیق به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع 2×2 مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید پرداخته می‌شود و اثر عواملی همانند تعداد ژئوگریدها، فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی، فاصله بین ژئوگریدها و ابعاد ژئوگریدها، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بهبود ظرفیت باربری شمع‌های پی پل‌ها و سازه‌های مجاور شیروانی و در نتیجه کاهش تعداد شمع‌ها و کاهش هزینه اجرای پی توسط مهندسیین مورد استفاده قرار گیرد.

۱- تعداد بهینه لایه‌های مسلح کننده‌های ژئوگرید ۳ لایه می‌باشد. ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای مسلح شده با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید از ۱ به ۲، ۳ و ۴ لایه به ترتیب ۱/۸۸، ۲/۲۹ و ۲/۳۴ برابر گردید.

۲- فاصله بهینه اولین ژئوگرید از سطح افقی برابر با ۰/۶۶ عرض سرشمع می‌باشد. در صورت استفاده از ۳ لایه ژئوگرید برای مسلح سازی شیروانی، با افزایش فاصله اولین ژئوگرید از سطح افقی از ۰/۳۳ عرض سرشمع به ۰/۶۶ و ۱ برابر عرض سرشمع، ضریب BCR به ترتیب از ۳/۰۵ به ۳/۷ و ۳/۲ افزایش یافت.

۳- فاصله بهینه ژئوگریدها یکدیگر برابر با ۰/۶۶ عرض سرشمع می‌باشد. در صورت استفاده از ۳ لایه ژئوگرید برای مسلح سازی شیروانی، با افزایش فاصله ژئوگریدها از یکدیگر از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به ترتیب ۱۰٪ و ۵٪ افزایش یافت.

۴- با افزایش ابعاد ژئوگرید، ضریب BCR افزایش می‌یابد. با افزایش ابعاد ژئوگرید از ۳ به ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع ضریب BCR به ترتیب از ۲/۸۶ به ۳/۰۵ و ۳/۱۲ افزایش یافت.

۵- با افزایش ابعاد ژئوگرید، جابجایی افقی و چرخش سرشمع کاهش می‌یابد. با افزایش ابعاد ژئوگریدها از ۳ به ۴ و ۵ برابر ابعاد سرشمع، میزان جابجایی افقی سرشمع به ترتیب ۳۰٪ و ۴۲٪ و میزان چرخش سرشمع به ترتیب ۱۳٪ و ۲۵٪ کاهش یافت.

۶- با افزایش فاصله ژئوگریدها از یکدیگر جابجایی افقی سرشمع کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله بین ژئوگریدها از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر میزان جابجایی به ترتیب ۴۷٪ و ۵۴٪ کاهش یافت.

۷- افزایش فاصله ژئوگریدها از یکدیگر چرخش سرشمع افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله بین ژئوگریدها از ۵ به ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر چرخش سرشمع به ترتیب ۳۰٪ و ۳۵٪ افزایش یافت.

۶- مراجع

- [1] Ye, J. (2023). Performance of high-rise pile group adjacent slope. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 30(17), 3441-3454.
- [2] Navale, A. V., Turkane, S. D., Ladhane, K. B., Solanki, C. H., & Sawant, V. A. (2024). Analysis of Pile Group in Square Arrangement Embedded in Clayey Soil. *Indian Journal of Science and Technology*, 17(45), 4765-4777.
- [3] Mohammad Alinejad, R., Bayat, M., Nadi, B., Pakbaz, M. S. (2021). Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-12.
- [4] Alinejad, R. M., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. (2023). Experimental Study of Axially Loaded Pile Group Near a Sloping Ground. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 382-391.
- [5] Mohammad Alinejad, R., Bayat, M. (2024). Investigating the Behavior of Single Pile and Adjacent Pile Group of Sandy Slope under Uplift Loading. *Journal of Civil and Environmental Engineering*.
- [6] Mohammad Ali Nejad, R., & Bayat, M. (2025). Bearing Capacity of Post Grouted Drilled Pile Near a Sandy Slope. *Journal of Structural and Construction Engineering*.
- [7] El Sawwaf, M.E., (2006). Lateral resistance of single pile located near geosynthetic reinforced slope. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(10), pp.1336-1345.
- [8] Zomorodian, S.M. and Sadeghi, H., (2012). INVESTIGATION OF LATERAL RESISTANCE OF SINGLE PILE LOCATED NEAR GEOGRID REINFORCED SLOPE. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2(2), pp.89-98.

- [9] Dhatrak, A.I. and Bhagat, G.,(2016). Behaviour of single pile in reinforced slope subjected to inclined load. *Int J Eng Res Appl*, 6(5), pp.43-49.
- [10] El Sawwaf, M., (2008). Lateral behavior of vertical pile group embedded in stabilized earth slope. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(7), pp.1015-1020.
- [11] El-Kasaby, E. A., Roshdy, M., Awwad, M., Abo-Shark, A. A. (2025). Flexural Behavior of Strip Footing Foundations Reinforced with Uniaxial Geogrids and FGRC: Experimental Study and Empirical Correlations. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 11(4), 619781.
- [12] Anjos, R., Crescenzo, L., Calvello, M., Pinho-Lopes, M. (2023). Parametric analysis of a footing on a reinforced soil slope. In *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet* (pp. 1121-1127). CRC Press.
- [13] Moein, B., Khodaparast, M., Rajabi, A. M. (2022). Effect of footing geometry on the slope of reinforced soil during centrifuge modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 425.
- [14] Azeddine, B., Abdelghani, M. (2023). The cavity's effect on the bearing capacity of a shallow footing in reinforced slope sand. *Soils and Rocks*, 46(1), e2023003622.
- [15] Yazdani, H., Ashtiani, M. (2023). The behaviour of a strip footing resting on geosynthetics-reinforced slopes. *Geomechanics and Engineering*, 34(6), 623-636.
- [16] Mahboubi Niazmandi, M., Mirasi, S., Hashemi Jokar, M., & Momeni, M. (2023). The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(9), 1825-1844.
- [17] Turker, E., Cure, E. (2024). Experimental and numerical investigation of centric and eccentric footing in reinforced sandy soil slope. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(10), 264.
- [18] Ebid, A. M., Abdelhamid, N. M., Zaher, A. H., Ors, D. M. (2025). Improving the punching capacity of footings using geocell, geogrid and granular soil replacement. *Scientific Reports*, 15(1), 11148.
- [19] Hamidi, A., Abbeche, K. (2020). Numerical analysis of bearing capacity of strip footing built on geogrid-reinforced sand slope over soft clay layer (revised version 3). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 8269-8279.
- [20] Choudhary, A. K., Jha, J. N., Gill, K. S. (2010). Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on reinforced flyash slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(4), 393-4.
- [21] El Sawwaf, M. A. (2007). Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), 50-60.
- [22] Yoo, C. (2001). Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(5), 279-298.
- [23] Halder, K., Chakraborty, D. (2018). Bearing capacity of strip footing placed on the reinforced soil slope. *International Journal of Geomechanics*, 18(11), 06018025.
- [24] Satvati, S., Alimohammadi, H., Rowshanzamir, M., & Hejazi, S. M. (2020). Bearing capacity of shallow footings reinforced with braid and geogrid adjacent to soil slope. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6, 1-12.
- [25] Dwivedi, N., Chauhan, V. B., Kumar, A., Jaiswal, S., Singh, T. (2024). Enhancing strip footing bearing capacity on soil slopes with geogrid reinforcement: insights from finite element analysis and machine learning. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(11), 440.
- [26] Lee, K. M., Manjunath, V. R. (2000). Experimental and numerical studies of geosynthetic-reinforced sand slopes loaded with a footing. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 828-842.
- [27] Mohammad-Alinejad, R., Bayat, M., Nadi, B., Pakbaz, M. S. (2023). Effect of degree of freedom of movement on the bearing capacity and efficiency coefficient of pile group adjacent to sandy slope. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(1), 95-113.

- [28] Sharafkhah, M., & Shoshpasha, I. (2018). Physical modeling of behaviors of cast-in-place concrete piled raft compared to free-standing pile group in sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 703-716.
- [29] Sharafkhah, M., Shooshpasha, I. (2020). A laboratory study of the effect of piles asymmetric arrangement on the behavior of piled raft foundation in sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- [30] Maralapalle, V. C., Nadaf, M. B., Dutta, S., Zende, A. A., Mishra, S. S., & Charhate, S. (2023). Load-settlement and skin friction behaviour of piles in dry sand: experimental and numerical study. *Sādhanā*, 49(1), 4.
- [31] Ladd R (1978) Preparing test specimens using undercompaction. *Geotech Test J* 1:16. <https://doi.org/10.1520/gtj10364j>
- [32] Zhang LM, Ng AMY. Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state design of foundations. *Géotechnique* 2005;55:151–61. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2005.55.2.151>
- [33] Driscoll, R. and Simpson, B., 2001. EN1997 Eurocode 7: geotechnical design. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, Vol. 144, No. 6, pp. 49-54.
- [34] Vesic, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations." *J. Soil Mech. Found. Div.*, 99 1, 45–73.
- [35] Ovesen, N. K. (1979). The use of physical models in design: The scaling law relationship. *Proc., 7th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 4, 318–323.
- [36] Franke, E., and Muth, G. (1985). Scale effect in 1 g model tests on horizontally loaded piles. *Proc., 11th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol. 2, 1011–1014