

Application of geogrid to improve and strengthen soil stability in desert and arid areas (case study, increasing the bearing capacity of foundation beds)

Younes Fakhari¹, Ahad Baghrzadeh Khalkhali², Ali Derakhshani³, Javad Nazari Afshar⁴

1. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email:

younes.fakhari@gmail.com

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email: a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahed University, Tehran, Iran. Email:

adera@shahed.ac.ir

4. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahar-e-Qods Branch, Islamic Azad University,

Iran. Email: nazariafshar@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:

Received 5 August 2026

Received in revised form 12 August 2026

Accepted 21 September 2026

Published online 23 September 2026

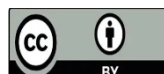
Keywords:

Desert arid regions semi-arid regions

Abstract

The soil type of desert and desert areas is mainly uniform, poorly grained sand with low density, and in areas where its formation is sedimentary, the presence of a weak thin layer deep in the ground is likely. In order to design a suitable foundation and safely transfer the load of the superstructure to the ground, in addition to determining the physical and strength characteristics of the soil and understanding the underlying geological condition of the soil layers, it is necessary to identify small inhomogeneities within the soil mass, such as weak thin layers, shear bands, and slip surfaces, which can have negative effects on the failure mechanism, ultimate bearing capacity of foundations, and safety factors of geotechnical systems. According to the results of previous work, the negative effect of a weak thin layer on the ultimate bearing capacity of the foundation is evident, but very limited research has been conducted to improve the ultimate bearing capacity of the foundation in the face of this inhomogeneity in the soil mass. In this study, the effect of using geosynthetic geogrid reinforcement to improve the bearing capacity of individual foundations on sand bed and to find the best reinforcement depth was investigated by constructing a physical soil-foundation model on a laboratory scale of 65×70×100 cm under static vertical load.

How to cite: Fakhari, Y., Baghrzadeh Khalkhali, A., Derakhshani, A. & Nazari Afshar, J. (2026). Application of geogrid to improve and strengthen soil stability in desert and arid areas (case study, increasing the bearing capacity of foundation beds). *Geography and Regional Planning*, 16(3), 569-590. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.595654.4522>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

DOI: <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.595654.4522>

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

Desert and arid regions frequently contain sandy soils characterized by relatively low density, poor gradation, and limited bearing capacity. These geotechnical properties can create significant challenges for foundation design, particularly when thin, weak soil layers occur beneath the foundation. Such layers may alter the soil's failure mechanism, promote the development of shear bands and slip surfaces, increase settlement, and reduce ultimate bearing capacity. Therefore, improving the mechanical behavior of these soils is essential for enhancing foundation stability and geotechnical safety. Geosynthetic reinforcement, particularly geogrids, offers a potential solution by improving soil performance and modifying stress distribution within the foundation bed. However, the influence of geogrid reinforcement on foundations resting on sandy soils containing thin weak layers requires further investigation. This study examines the effectiveness of geogrid reinforcement in improving the ultimate bearing capacity of foundations constructed on sandy soil with a thin weak layer. The research combines small-scale physical model tests with numerical analysis using Abaqus to evaluate the effects of reinforcement placement depth on bearing capacity and settlement behavior under vertical loading.

Methodology

The research employed small-scale physical model tests and numerical simulations using Abaqus to investigate geogrid reinforcement in sandy soil containing a thin weak layer. A square steel footing was subjected to static vertical loading. Silica sand and a clay weak layer were used, with the layer positioned at a depth of twice the footing width. Geogrids were installed at different depths to evaluate bearing capacity and settlement behavior.

Results and Discussion

The findings revealed that the thin weak layer positioned at a depth of twice the footing width reduced the ultimate bearing capacity of the sandy soil by approximately 22–23% and increased settlement by about 22%. Geogrid reinforcement significantly improved the foundation's bearing performance, although its effectiveness depended on the installation depth. Compared with the unreinforced soil containing the weak layer, reinforcement

increased bearing capacity by approximately 53%, 58%, and 65% at different placement depths. These improvements corresponded to increases of approximately 19.2%, 24%, and 28%, respectively, compared with the uniform sandy soil. The greatest improvement occurred when the geogrid was positioned to intersect the general failure surfaces within the soil failure wedge. Numerical simulations using Abaqus generally predicted higher bearing capacities than the physical model tests. For uniform sandy soil, the numerical result was approximately 179 kPa, compared with 157 kPa in the physical experiments, representing a difference of about 14%. The results demonstrate that geogrid reinforcement can compensate for the adverse effects of thin weak layers and improve foundation performance. However, differences between numerical and experimental outcomes indicate that settlement behavior and scale effects require careful consideration when applying these findings to practical geotechnical engineering projects.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that thin weak soil layers can significantly reduce the ultimate bearing capacity of foundations constructed on sandy soils in desert and arid regions. The presence of a weak layer at a depth of twice the footing width reduced bearing capacity by approximately 22–23% and increased settlement by about 22%. These results highlight the importance of considering subsurface soil stratification when evaluating foundation stability and designing safe geotechnical structures. Geogrid reinforcement proved effective in improving foundation performance by increasing bearing capacity by approximately 53%, 58%, and 65%, depending on the reinforcement placement depth, compared with the unreinforced soil containing the weak layer. The corresponding improvements relative to uniform sandy soil were approximately 19.2%, 24%, and 28%. The effectiveness of reinforcement was strongly influenced by its position within the soil mass, with better performance observed when the geogrid intersected the general failure surfaces within the failure wedge. Numerical simulations conducted using Abaqus also provided useful comparisons with

experimental observations, although the predicted bearing capacity was approximately 14% higher than that measured in the physical model for uniform sandy soil. These differences indicate that numerical predictions should be interpreted carefully, particularly when evaluating settlement and transferring laboratory results to field conditions. Overall, the study confirms that geogrid reinforcement can mitigate the negative effects of thin weak layers and enhance the bearing capacity of sandy foundations. Nevertheless, the

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

proposed relationships and optimal reinforcement placement should be applied cautiously because the investigation relied on small-scale experimental models and was affected by scale limitations. Further research involving larger physical models, different soil conditions, varied weak-layer depths, and additional reinforcement configurations would help validate the observed trends and improve the reliability of practical design recommendations for reinforced foundations in arid and desert environments.

Tird author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Fourth author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest

کاربرد ژئوگرید به منظور بهسازی و تقویت پایداری خاک مناطق بیابانی و کویری (مطالعه موردی، افزایش قابلیت باربری بستر فونداسیون‌ها)

یونس فخاری^۱، احد باقرزاده خلخالی^۲، علی درخشانی^۳، جواد نظری افشار^۴

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: younes.fakhari@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول. گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [a](mailto:bagherzadeh@srbiau.ac.ir)

bagherzadeh@srbiau.ac.ir

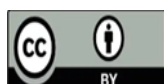
^۳ گروه مهندسی عمران، دانشگاه شاهد، تهران، ایران. رایانامه: adara@shahed.ac.ir

^۴ گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس دانشگاه آزاد اسلامی، شهر قدس، ایران. رایانامه: nazariafshar@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	نوع خاک مناطق بیابانی و کویری عمدتاً ماسه‌ای یکنواخت بد دانه‌بندی شده با تراکم کم بوده و در مناطقی که نحوه تشکیل آن رسوبی است وجود لایه‌نازک ضعیف در اعماق زمین محتمل است. برای طراحی پی مناسب و انتقال ایمن بار روسازه به زمین علاوه بر تعیین مشخصات فیزیکی و مقاومتی خاک و شناخت وضعیت زیرین لایه‌های خاک از نظر زمین‌شناسی، شناسایی غیریکنواختی‌های کوچک داخل توده خاک مثل لایه‌های نازک ضعیف، باندهای برشی و سطوح لغزش که می‌توانند بر مکانیزم شکست، ظرفیت باربری نهایی فونداسیون‌ها و ضرایب اطمینان سیستم‌های ژئوتکنیکی اثرات منفی بگذارند ضروری است. مطابق نتایج کارهای انجام شده قبلی، اثر منفی لایه‌نازک ضعیف بر ظرفیت باربری نهایی پی محرز است لیکن برای بهبود ظرفیت باربری نهایی پی در مواجهه با وجود این غیریکنواختی در توده خاک تحقیقات بسیار محدودی انجام شده است. در این تحقیق تأثیر استفاده از مسلح‌کننده ژئوسینتتیک ژئوگرید در جهت بهبود ظرفیت باربری پی‌های منفرد بر بستر ماسه‌ای و یافتن بهترین عمق مسلح‌کننده به‌وسیله ساخت مدل فیزیکی خاک - شالوده در مقیاس آزمایشگاهی ۱۰۰×۷۰×۶۵ سانتیمتر تحت سربار قائم استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون‌ها در سه حالت، بستر ماسه‌ای بدون لایه ضعیف، بستر ماسه‌ای با یک لایه ضعیف در عمق ۲ برابر عرض پی (B) و بستر ماسه‌ای با یک لایه ضعیف و مسلح‌کننده ژئوگرید در اعماق مختلف انجام شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	
کلیدواژه‌ها: بیابان کویر مناطق خشک مناطق نیمه‌خشک	

استناد: فخاری، یونس، باقرزاده خلخالی، احد، درخشانی، علی و نظری افشار، جواد. (۱۴۰۵). کاربرد ژئوگرید به منظور بهسازی و تقویت پایداری خاک مناطق

بیابانی و کویری (مطالعه موردی، افزایش قابلیت باربری بستر فونداسیون‌ها). *جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای*، ۱۶(۳)، ۵۶۹-۵۹۰. DOI: 10.22034/jgeoq.2026.595654.4522



۱- مقدمه

ژئوسنتتیک‌ها طی دو دهه اخیر به‌طور گسترده در حفاظت و پایدارسازی دیوارهای حائل، شیروانی‌ها و خاکریزها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱-۲]. اندرکنش میان مصالح ژئوسنتتیکی و توده خاک، اساساً بیانگر نقش تسلیحی این مصالح در بهبود رفتار مکانیکی خاک است [۳]. در سطح تماس ژئوگرید و خاک، نیروی برشی مقاوم عمدتاً ناشی از اصطکاک بین ذرات خاک و سطح ژئوگرید است. از این‌رو، ویژگی‌های فصل مشترک میان خاک و مصالح مسلح‌کننده، به‌ویژه مقاومت برشی سطح تماس خاک و مسلح‌کننده، تأثیر مستقیمی بر ایمنی، پایداری و عملکرد سازه‌های خاک مسلح دارد. بر این اساس، لحاظ کردن پارامترهای حاکم بر این اندرکنش در محاسبات و طراحی‌های مهندسی امری ضروری است.

اثر غیریکنواختی‌های داخل توده‌های خاک‌های ماسه‌ای کویری مثل باندهای برشی و سطوح لغزش و لایه‌های ضعیف نازک بر رفتار پی‌ها را ممکن است در خیلی از موارد نادیده گرفت لیکن لایه‌های ضعیف مزبور می‌توانند بر مکانیزم شکست، ظرفیت باربری نهایی فونداسیون‌ها و ضرایب اطمینان سیستم‌های ژئوتکنیکی اثرات منفی بگذارند [۴-۵].

مرور و بررسی تحقیقات انجام شده طی دهه‌های اخیر چه به‌صورت آزمایشگاهی و چه به‌صورت عددی و تحلیلی نشان می‌دهد اکثر مطالعات در این زمینه، به بررسی تغییرات ظرفیت باربری خاک قوی یکنواخت روی خاک ضعیف یکنواخت با ضخامت لایه زیاد متمرکز بوده و روی مسئله اثر لایه نازک ضعیف بر ظرفیت باربری نهایی پی‌ها مطالعات محدودی انجام شده و نیز در خصوص روش‌های بهبود ظرفیت باربری و کاهش اثرات منفی در مواجهه با لایه‌های نازک ضعیف مطالعات و تحقیقات به‌مراتب کمتری صورت گرفته است [۶-۱۰].

مایرهوف و هانا [۱۱] ظرفیت باربری فونداسیون واقع بر لایه قوی بر نهشته ضعیف و لایه ضعیف بر نهشته قوی را بررسی کردند. در مورد لایه قوی بر نهشته ضعیف، با در نظر گرفتن گسیختگی به‌عنوان یک مسئله برکنش وارونه، یک نظریه تقریبی از ظرفیت باربری نهایی توسعه می‌یابد. در لحظه گسیختگی، یک توده خاک، تقریباً به شکل هرم ناقص از لایه بالایی در جهت اعمال بار در نهشته زیرین نفوذ می‌کند. تحلیل‌های پی نواری، به پی‌های دایره‌ای و مستطیلی توسعه یافت و فرمول‌هایی برای آنها در حالت بارگذاری خارج از مرکز و مایل برای خاک دو لایه‌ای رس و ماسه ارائه گردید.

اودا و وین [۱۲] رفتار پی نواری مستقر بر بستر ماسه‌ای حاوی لایه‌نازک رسی را بررسی نمودند. در این تحقیق که به روش آزمایشگاهی صورت پذیرفته از توده خاک ماسه توپورا ۱۱ به‌عنوان بستر و یک لایه‌نازک خاک از نوع رس کائولینیت به‌عنوان لایه ضعیف استفاده گردیده است. نتایج نشان دادند که لایه رسی در عمقی معادل ۵ برابر عرض پی B، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش ظرفیت باربری نهایی پی داشته باشد و بعد از آن اثر لایه رسی ضعیف بر ظرفیت باربری پی ناچیز خواهد بود.

جینش و ورما [۱۳] بر روی رفتار فونداسیون نواری بر بستر ماسه‌ای با لایه‌نازک ضعیف مطالعات مختلفی انجام دادند. هدف از این مطالعه بررسی پتانسیل اثرات سودمند مسلح‌سازی خاک جهت بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست فونداسیون نواری مستقر بر بستر ماسه‌ای دارای یک لایه ضعیف است. بر اساس بررسی انجام شده مشخص گردیده که لایه ضعیف زیر پی نواری نه تنها بر ظرفیت باربری بلکه بر نشست فونداسیون هم تأثیرگذار است. همچنین معلوم گردیده چنانچه لایه ضعیف در عمق کمتر از ۱/۵ برابر عرض فونداسیون واقع شود ظرفیت باربری و نشست پی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت و چنانچه در عمق بیش از ۱/۵ برابر عرض فونداسیون قرار داشته باشد در عملکرد فونداسیون تأثیری نخواهد داشت.

زیکارلی و همکاران [۱۴] آزمایش‌های ساترپیوژ بر روی پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای، حاوی لایه ضعیف را بررسی نمودند. مطابق این تحقیق، در صورتی که عمق قرارگیری لایه ضعیف نازک از مقدار بحرانی 4B (عرض فونداسیون)، تجاوز نکند، می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی مکانیزم گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی شالوده مؤثر باشد (برای بستر ماسه‌ای و لایه

ضعیف ساخته شده از پودر تالک). به طور کلی این مقدار، بستگی به نسبت زوایای مقاومت برشی ماسه و مصالح تشکیل دهنده لایه ضعیف دارد. در صورتی که عمق قرارگیری لایه ضعیف کم باشد، $(Z_i \leq 0.5B)Z_i$ ، سطوح گسیختگی از میان لایه ضعیف عبور می‌کند؛ و در عمق‌های بزرگ‌تر $(0.5 \leq Z_i/B \leq 3)$ ، لایه ضعیف کنترل کننده عمق حداکثر مکانیسم‌ها بوده و باعث حرکت جزئی آن از میان لایه ضعیف قبل از حرکت به سمت لایه ماسه بالایی می‌شود. ظرفیت باربری نهایی q_{lim} ، همیشه از ظرفیت باربری نهایی پی واقع بر بستر همگن $q_{lim,0}$ کمتر است. آزمایش‌ها، برای لایه‌های ضعیف ساخته شده از پودر تالک با زاویه مقاومت برشی ۲۷ درجه، کاهش ۵۰ درصدی ظرفیت باربری نهایی را نشان می‌دهد. وجود لایه ضعیف منجر به کاهش سختی در منحنی بار - نشست، قبل از رسیدن به q_{lim} می‌شود. شبیه‌سازی عددی مدل‌های فیزیکی سانتریفیوژ کوچک مقیاس، به وسیله تحلیل FE، قادر به ارائه صحیح مکانیسم‌های گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی مدل‌ها با وجود استفاده از مدل رفتاری خیلی ساده مور - کولمب، است.

لاکسمیکانت و تریپاتی [۱۵] اثر طول مسلح‌کننده‌های ژئوگرید در نسبت ظرفیت بار پی مستقر در بستر خاک نرم را براساس مدل‌های آزمایشگاهی مطالعه کردند. در این تحقیق در بالای خاک نرم از سرباره کوره بلند آهن گذاری به‌عنوان مصالح پرکننده همراه با مسلح‌کننده‌های ژئوگرید استفاده کردند. نتایج مطالعات نشان داد ظرفیت باربری دولایه خاک وقتی که یک لایه ژئوگرید در فصل مشترک آن (بین ماسه و خاک رس سیلتی) و در عمق $u/B=0.667$ قرار گرفت. به طور متوسط ۱۶٪ افزایش یافت و وقتی که مسلح‌کننده ژئوگرید در عمق $u/B=0.33$ در وسط لایه ماسه قرار داده شده ظرفیت باربری به طور متوسط ۳۳٪ افزایش یافت.

عسگری و همکاران [۱۶] در مورد اثر لایه‌نازک ضعیف و قوی بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای با ساخت مدل فیزیکی کوچک مقیاس مطالعاتی انجام دادند. بر اساس نتایج ارائه شده لایه‌نازک ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک - فونداسیون می‌شود و لایه‌نازک قوی باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک - فونداسیون می‌شود. نتایج نشان می‌دادند لایه ضعیف در عمق بحرانی بیشترین کاهش ظرفیت باربری نهایی را به میزان ۴۰٪ داشته و در عمق $3.6B$ تأثیری نداشته است. لایه قوی نیز برای حالتی که این لایه دقیقاً زیر فونداسیون قرار دارد، بیشترین افزایش ظرفیت باربری نهایی به میزان ۷۶٪ داشته است. لایه قوی نیز در عمق تقریباً $2.4B$ بدون تأثیر بوده است.

حسینی و همکاران [۱۷] در مورد رفتار پی نواری بر بستر ماسه‌ای دارای لایه‌نازک ضعیف با ضخامت متغیر و با سربار خارج از مرکز مطالعات متعدد آزمایشگاهی و عددی انجام دادند. بر اساس نتایج ارائه شده ظرفیت باربری نهایی پی با وجود سربار خارج از مرکز افزایش پیدا کرده در حالی که تحلیل عددی انجام شده به روش المان محدود اثر مثبتی بر ظرفیت باربری نهایی پی با سربار خارج از مرکز نشان نمی‌دهد. لذا بهتر است در جهت محافظه کارانه اثر مثبت سربار خارج از مرکز در ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته نشود.

صادقی و همکاران [۱۸] در مورد اثر لایه‌نازک بر ظرفیت باربری پی نواری با بار خارج از مرکز مستقر بر بستر ماسه‌ای دارای لایه‌نازک با ساخت مدل فیزیکی کوچک مقیاس مطالعاتی انجام دادند. بر اساس نتایج ارائه شده بیشترین کاهش ظرفیت باربری نهایی زمانی رخ می‌دهد که لایه‌نازک در عمق بحرانی $1B$ و خروج از مرکزیت بار $e/B=0.083$ باشد. این مقدار کاهش برابر ۴۳٪ به دست آمده است.

رقیه الخافجی و همکاران [۱۹] در مورد پاسخ لرزه‌ای خاک ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید روی یک فونداسیون سطحی مربعی مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج نشان دادند پی کم عمق مربعی تحت بارهای لرزه‌ای، نشست، جابجایی افقی و چرخش قابل توجهی را تجربه می‌کند که با بکارگیری ژئوگرید مشکلات مرتبط با زلزله قابل کنترل گردیده و تقویت بهینه زمانی رخ می‌دهد که ژئوگرید در لایه‌های زیرین خاک قرار گیرد.

ریم سهام توفیق و همکاران [۲۰] در مورد افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی مربعی مستقر بر خاک دانه‌ای ضعیف مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده به کارگیری چند لایه ژئوگرید در این نوع خاک‌ها ظرفیت باربری نهایی پی را تا ۶۰٪ افزایش و نشست را تا ۵۰٪ کاهش داد. همچنین پیشنهاد دادند استفاده از ژئوگرید عایق چند لایه باعث جلوگیری از ورود آب و رطوبت به زیر پی و کنترل نشست‌های طولانی مدت منجر می‌گردد.

احمد ربه و همکاران [۲۱] در مورد تقویت و پایداری شیب‌های دارای لایه نازک ضعیف هم راستا با شیب با استفاده از ژئوگرید مطالعه عددی انجام دادند. بر اساس نتایج ارائه شده با کارگذاری ۳ الی ۶ ژئوگرید در امتداد شیب تغییر مکان جانبی شیب ۹۶٪ و کرنش برشی به کمتر از ۰.۰۲٪ و تنش برشی ایجاد شده ۶۷٪ کاهش نشان داد.

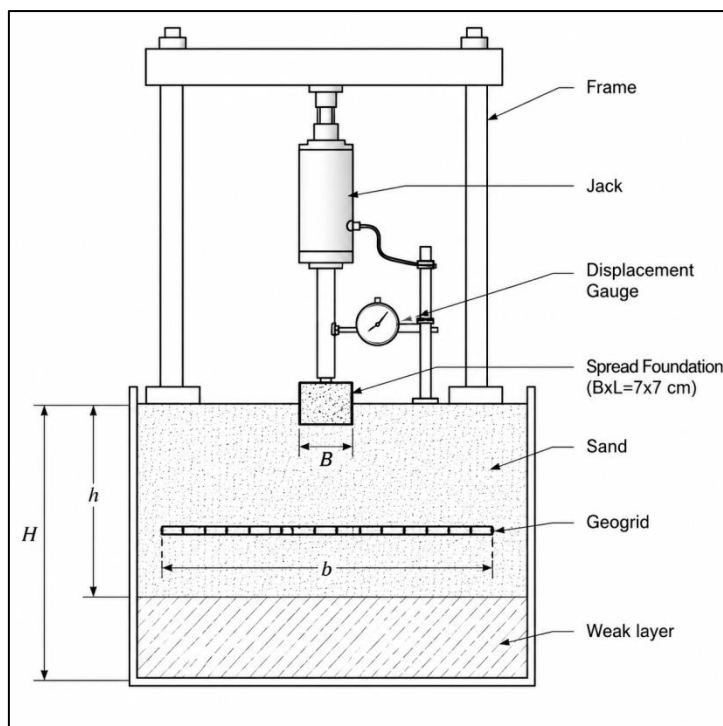
مطالعات نشان داده‌اند که طراحی موفق سامانه‌های تسلیح ژئوستنتیکی، به‌ویژه در سازه‌های ژئوتکنیکی، مستلزم شناخت دقیق اندرکنش سطح مشترک خاک و مسلح‌کننده است. پژوهش‌های آزمایشگاهی علاوه بر آنکه امکان بازسازی و تحلیل سازوکارهای واقعی رفتار خاک مسلح را فراهم می‌کنند، می‌توانند مبنای مناسبی برای توسعه مدل‌های عددی، اعتبارسنجی آن‌ها و نیز ارائه پارامترهای طراحی قابل اتکا در کاربردهای مهندسی باشند. از این رو، مطالعه رفتار سطح مشترک ژئوگرید و خاک را می‌توان یکی از ارکان اصلی در تحلیل ویژگی‌های عملکردی، نوع گسیختگی و سازوکار تسلیح در سازه‌های خاک مسلح دانست.

عوامل مؤثر بر ویژگی‌های سطح مشترک ژئوگرید و خاک از جمله پارامترهای بنیادی در طراحی ژئوتکنیکی به شمار می‌روند و به همین دلیل همواره مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند. در این میان، اثر شکل ذرات، دانه‌بندی خاک، اندازه چشمه ژئوگرید، سرعت بارگذاری یا بیرون کشیدگی، میزان رطوبت و تنش نرمال از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر رفتار اندرکنشی ژئوگرید و خاک محسوب می‌شوند. مرور پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که مطالعات محدودی در خصوص اثر لایه نازک بر ظرفیت باربری نهایی پی صورت گرفته به‌ویژه در خصوص راه‌های مقابله با اثرات نامطلوب آن و روش‌های بهبود ظرفیت باربری مطالعات و تحقیقات به مراتب کمتر است؛ لذا در این تحقیق اثر استفاده از مسلح‌کننده ژئوگرید در بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف در جهت بهبود ظرفیت باربری نهایی پی نواری و مربعی با استفاده از ساخت مدل کوچک مقیاس آزمایشگاهی و مقایسه رفتار دو نوع پی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش آزمایش

در این تحقیق تأثیر وجود لایه نازک خاک ضعیف بر ظرفیت باربری نهایی پی مربعی منفرد بر بستر ماسه‌ای و روش بهبود آن با مسلح‌کننده ژئوگرید به وسیله ساخت مدل فیزیکی کوچک مقیاس سیستم خاک - شالوده تحت سربار قائم استاتیکی (شکل ۱) و روش تحلیل عددی بررسی شده است. پی به صورت صلب بوده و بر روی سطح بستر قرار می‌گیرد، (عمق مدفون صفر). خاک بستر شامل دو نوع مصالح است: یک توده ماسه و یک لایه نازک ضعیف با ضخامت t_0 در عمق H . ماسه مورد استفاده از نوع سیلیسی شکسته با دانه‌بندی SP و برای لایه نازک از خاک رس در دسترس از نوع CL با خصوصیات مقاومتی ضعیف نسبت به خاک بستر استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، دستگاه بارگذاری کوچک مقیاس که دارای یک مخزن به طول ۱۰۰، عرض ۷۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر است، طراحی شده و برای پی مربعی، از ورق ضخیم فولادی به ابعاد 7×7 سانتی‌متر استفاده شده است. ابعاد مخزن طوری طراحی و ساخته شده است که مطابق تئوری بوسینسک، مرزهای مخزن هیچ‌گونه تأثیری بر پاسخ مدل فیزیکی ندارد. برای مدل‌سازی بستر ماسه‌ای و رسیدن به دانسته موردنظر، ماسه سیلیسی مورد آزمایش بروش بارش از ارتفاع ۶۵ سانتیمتری و در لایه‌های ۵ سانتیمتری و به صورت یکنواخت تخلیه شده و مدل‌سازی لایه نازک خاک رس خشک نیز با همان روش از ارتفاع ۳۵ سانتیمتری در عمق موردنظر تخلیه گردیده و برای مسلح‌کننده از یک نوع توری پلیمری در عمق مورد استفاده گردیده است. برای مشاهده مکانیزم شکست و تغییر شکل خاک به صورت کیفی در مجاورت قسمت جلویی مخزن که از شیشه نشکن به ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است از ماسه رنگی استفاده شده است.

پس از ساخت بستر ماسه‌ای و لایه‌نازک ضعیف، پی مربعی صلب کوچک مقیاس به آرامی روی ماسه قرار گرفته سپس بار به وسیله جک هیدرولیک دستی با سرعتی حدود 1 mm/min به پی اعمال می‌شود. بار اعمال شده به کمک یک لودسل نصب شده به پیستون جک و با ظرفیت 50 KN ثبت و برای ثبت نشست‌های متناظر بار اعمالی از یک گیج عقربه‌ای با دقت 0.01 mm استفاده گردیده است.

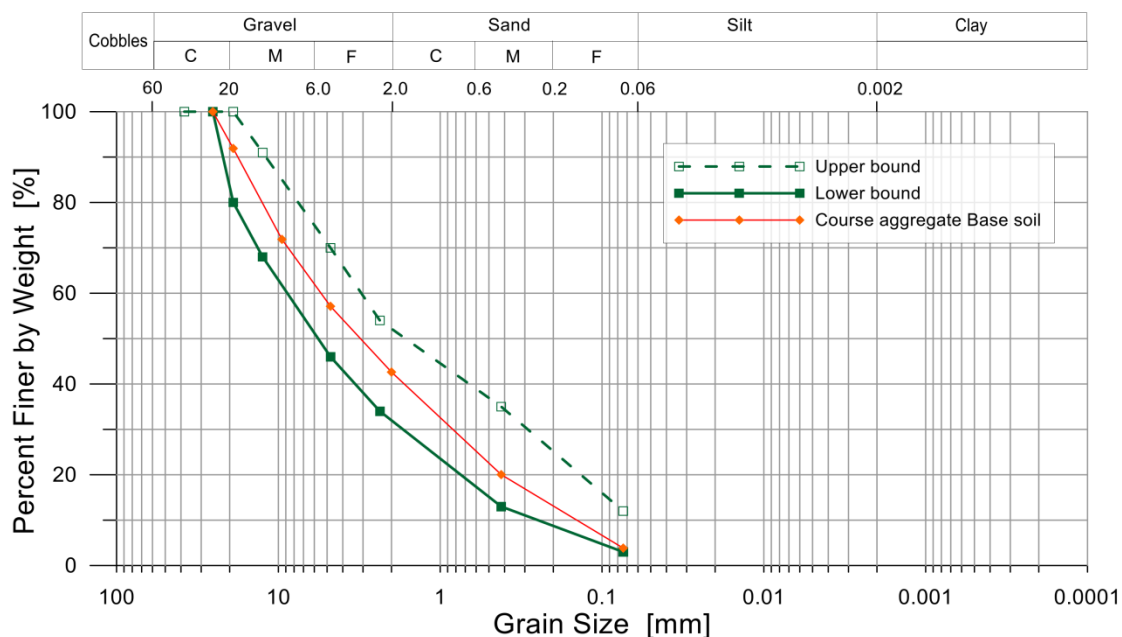


شکل ۱- شکل شماتیک دستگاه بارگذاری پی مربعی مستقر بر خاک دارای لایه نازک ضعیف.

مشخصات مواد و مصالح

ماسه بستر از کارخانه‌های تولیدی شهرستان فیروزکوه استان تهران با سیلیس حدود $(96-98)\%$ تهیه شده است رطوبت آن حین آزمایش 0% و دانسیته نسبی آن D_r مطابق استانداردهای شماره ASTM D 4253-00 و ASTM, 2004a, (ASTM, 2004b) D 4254-00 تعیین شده است. از آنجاییکه نسبت $B/d_{50} > 50$ است لذا مطابق توصیه بسیاری از محققان (Bolton. M, Lau. C., 1989) و (Taylor. R., 2018) اثر اندازه ذرات را می‌توان نادیده گرفت.

برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی ماسه از روش آزمایش برش مستقیم با جعبه برشی $3 \times 6 \times 6$ استفاده گردیده است. برای ساخت لایه‌نازک ضعیف، از خاک رس در دسترس که از الک نمره ۱۶ گذرانده شده استفاده گردیده است. در جدول ۱ پارامترهای فیزیکی و مقاومتی مواد و مصالح و در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه ارائه شده است.

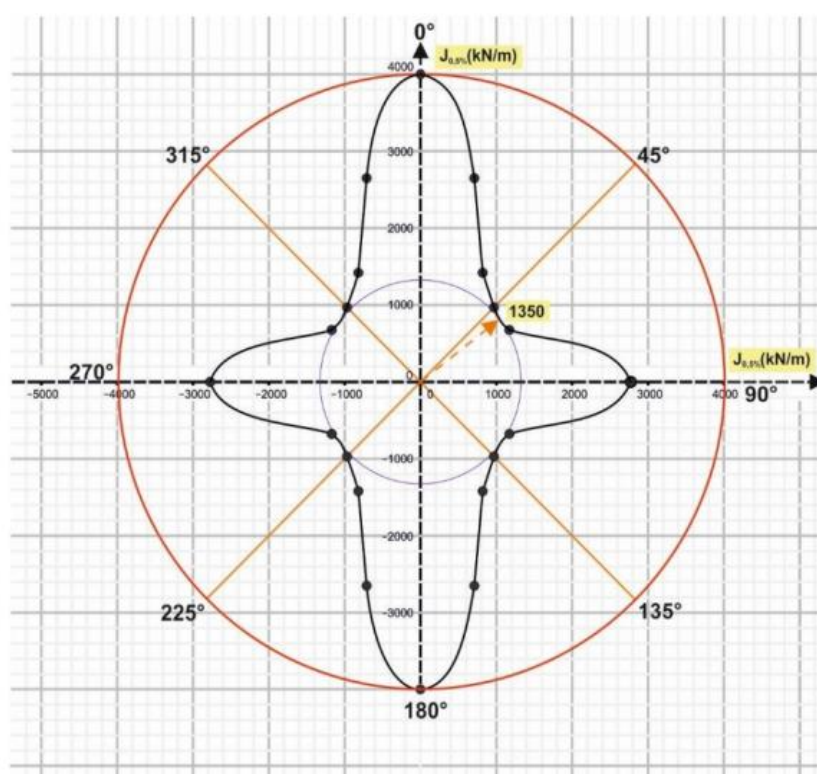


شکل ۲: منحنی دانه‌بندی ماسه.

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی مواد.

Material Type	Description	Value
Sand	Effective grain size D ₁₀ (mm)	0.75
	D ₃₀ (mm)	1.8
	D ₆₀ (mm)	3
	Moisture content (%)	0
	Specific gravity, G	2.65
	Relative density, Dr(%)	41
	Friction Angle, ϕ	35
Clay	Plasticity Index (Ip)	11
	Moisture content (%)	1.6
	Unit weight, γ (KN/m ³)	12.50
	Classification(USCS)	CL
	Cohesion(c'), (γ (Kp)	9.81
	Friction Angle, ϕ	23
Geogrid	Aperture size (mm)	9×9
	Thickness of rib (mm)	1.7
	Tensile strength (KN/m)	4.97
	Yield strength (KN/m)	4.51

برای مدل‌سازی ژئوگرید در مدل فیزیکی کوچک مقیاس از یک نوع توری پلیمری استفاده گردیده است. حداقل عرض مؤثر نمونه آزمون باید بزرگ‌تر از مقدار الزامی در استاندارد EN ISO 10319 باشد. عرض مؤثر باید حداقل ۳۰۰ میلی‌متر باشد. نتایج سختی‌های سکانت کششی باید مطابق با آنچه در شکل ۳ نشان داده شده است، در ETA (ارزیابی فنی اروپا) ذکر گردند.



شکل ۳ نمونه‌ای برای توصیف سختی سکانت شعاعی (حداقل $J_{0.5\%}-J_{0\%}=1350 \text{ kN/m}^2$)

روند انجام آزمایش‌ها

برای شروع ساخت مدل بستر، ماسه در جعبه دستگاه بارش که از یک توری و سینی زیر آن تشکیل شده و در ارتفاع ۶۵ سانتیمتری از کف مخزن استقرار یافته است ریخته شده سپس به آرامی سینی کشویی را بیرون کشیده حین بیرون کشیدن سینی، ماسه به صورت بارشی در کف مخزن به ضخامت تقریبی ۵ سانتیمتر ریخته می‌شود. لایه‌های بعدی ماسه با همان روش تا رسیدن به ارتفاع موردنظر اجرا می‌شود. برای آشکارسازی بصری تغییر مکان زیر پی و مکانیزم شکست به صورت کیفی در هر لایه، از ماسه رنگی در تماس با جدار شیشه استفاده شده است.

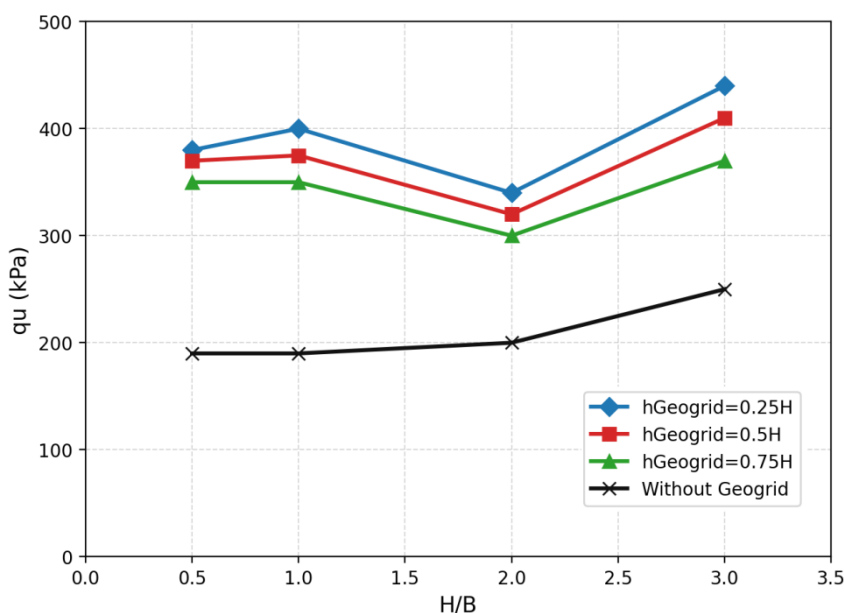
برای ساخت مدل لایه ضعیف، خاک رس از ارتفاع ۳۵ سانتیمتری و به همان روش بارشی در عمق مورد نظر به ضخامت حدود ۱/۵ سانتیمتر ریخته شد. پس از مدل‌سازی لایه ضعیف مجدداً لایه‌های بعدی ماسه تا ارتفاعی که مسلح‌کننده باید مستقر شود ریخته شده و توری موردنظر در سطح ماسه به آرامی قرار گرفته و در ادامه لایه‌های باقیمانده ماسه نیز ریخته می‌شود.

مدل کوچک مقیاس فونداسیون مربعی از یک ورق فولادی که برای تأمین صلبیت کافی با ضخامت زیاد ۲/۵ سانتیمتر ساخته شده است را به آرامی روی ماسه قرار داده و در نهایت پس از آماده نمودن ابزارهای اندازه‌گیری جانبی و گیج اندازه‌گیری نشست پی، بار به وسیله جک هیدرولیکی با سرعت 1 mm/min به فونداسیون اعمال می‌گردد. اعمال بار تازمانی که خاک گسیخته شود ادامه می‌یابد.

پارامترها و جدول برنامه آزمایش

در این مطالعه، بارگذاری‌ها با شرایط مختلف برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی مربعی به شرح ذیل انجام گردیده است. بستر ماسه‌ای یکنواخت بدون لایه‌نازک ضعیف.

بستر ماسه‌ای با یک لایه نازک ضعیف به ضخامت $t=1.5\text{cm}$ در عمق ثابت $H=2B$ و بدون ژئوگرید. بستر ماسه‌ای با یک لایه نازک ضعیف به ضخامت $t=1.5\text{cm}$ در عمق ثابت $H=2B$ با ژئوگرید در عمق‌های مختلف. بر اساس مطالعات رتالیا و ورما^۱ که عرض بهینه برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی مربعی و دایره‌ای معادل $b_e=3B$ به دست آمده است، در تمامی آزمون‌ها از ژئوگرید با عرض $b=3B$ استفاده شده است. همچنین باتوجه به تعریف عمق بحرانی برای لایه نازک برابر $H_c=2B$ در مطالعات قبلی (Masanobu, Oda., and Soe, Win., 1990) در این تحقیق در تمامی آزمون‌ها لایه نازک در عمق $H=2B$ قرار داده شده است (شکل ۴).

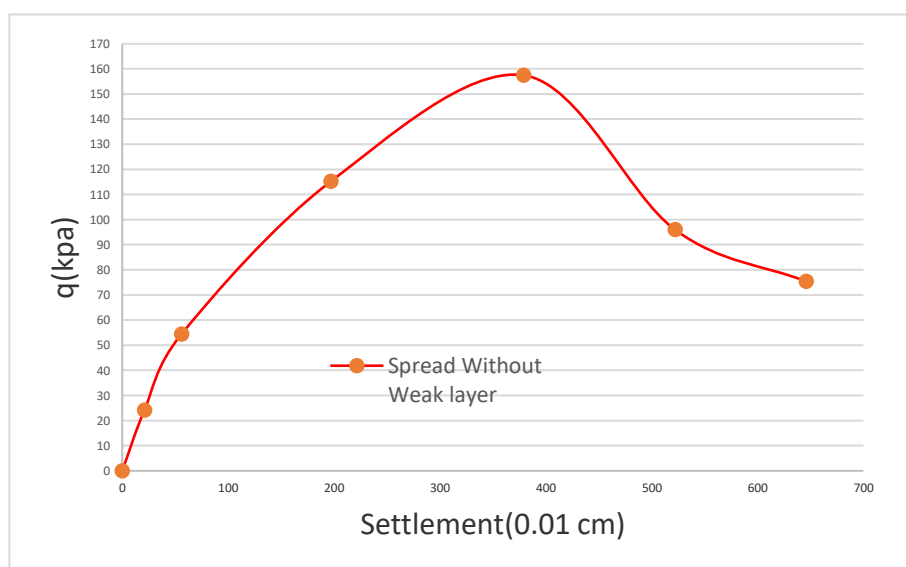


شکل ۴- نمودار تغییرات بهبود ظرفیت باربری نهایی پی برای لایه نازک در اعماق $H=0.5B, 1B, 2B, 3B$ (رساله فخاری)

۳- نتایج و بحث مدل‌های فیزیکی

۳-۱- نتایج رفتار پی بر بستر ماسه‌ای یکنواخت بدون لایه نازک

در شکل ۵ منحنی فشار - نشست پی مربعی مستقر بر بستر ماسه‌ای بدون لایه نازک ضعیف نشان داده شده است. باتوجه به وجود نقطه بیشینه در نمودار، گسیختگی خاک زیر هر پی از نوع کلی است. مقدار ظرفیت باربری نهایی $q_u = 157\text{ KN}$ به دست آمده است. میزان نشست پی متناظر با ظرفیت باربری نهایی برای پی 3.79 mm و میزان نشست نسبی آن (S/B) برابر 5.41% به دست آمده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات بار- نشست مربعی روی بستر ماسه ای یکنواخت بدون لایه نازک ضعیف

برای صحت سنجی دقت آزمایش، ظرفیت باربری نهایی به دست آمده از آزمایش مدل فیزیکی برای پی را با روابط تحلیلی تعیین ظرفیت باربری نهایی محققین مختلف (روابط ۱ تا ۶) برای ضریب زاویه اصطکاک داخلی بستر ماسه‌ای $\phi = 35^\circ$ به شرح جدول شماره ۲ مقایسه شده است.

$$q_u = 5\gamma BN\gamma \quad (1)$$

$$Nq = \tan^2 \phi (45 + \phi/2) e^{\pi \tan \phi} \quad (2)$$

$$\text{Terzaghi. 1943} \quad N\gamma = 0.5 \tan \phi \left(\frac{Kpy}{\cos^2 \phi} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\text{Mayerhof. 1963} \quad N\gamma = (Nq - 1) \tan 1.4\phi \quad (4)$$

$$\text{Vesic. 1973} \quad N\gamma = 2(Nq + 1) \tan \phi \quad (5)$$

$$\text{Martin. 2005} \quad N\gamma = (Nq - 1) \tan 1.32\phi \quad (6)$$

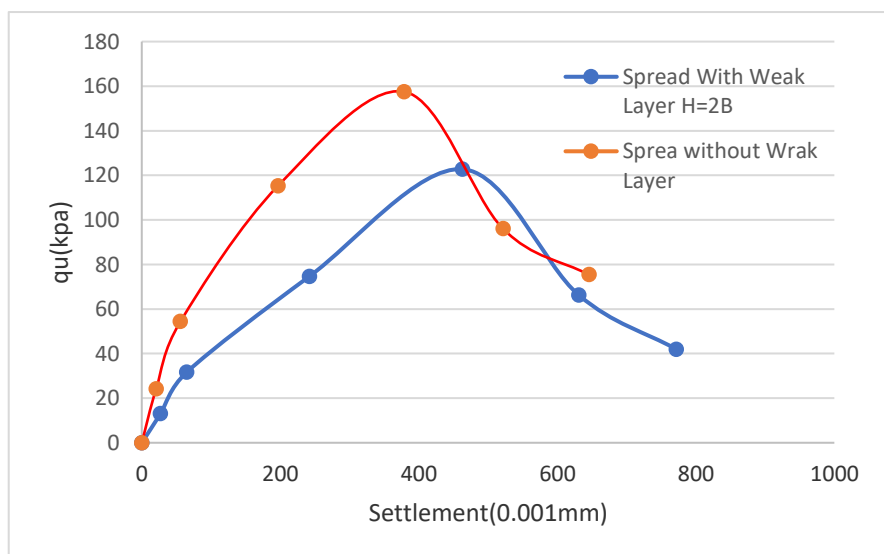
جدول ۲: مقایسه ظرفیت باربری نهایی پی‌های نواری و پی‌های گسترده بر اساس معادلات پژوهشگران مختلف

Type of Foundation	Terzagi	Mayerhof	Vesic	Martin	Model Test
	$\phi = 35^\circ, c' = 0 \text{ Kpa}$				
$N\gamma$	42.43	33.3	48.03	33.68	-----
$q_u \text{ (kpa)}$	183	120	155	108	157

با مقایسه ظرفیت باربری نهایی به دست آمده از روابط تحلیلی محققین یادشده ملاحظه می‌شود نتایج آزمایشگاهی با روابط ترزاقی و وسیک تطابق بیشتری دارد.

۳-۲- تأثیر لایه نازک ضعیف بر ظرفیت باربری پی مربعی

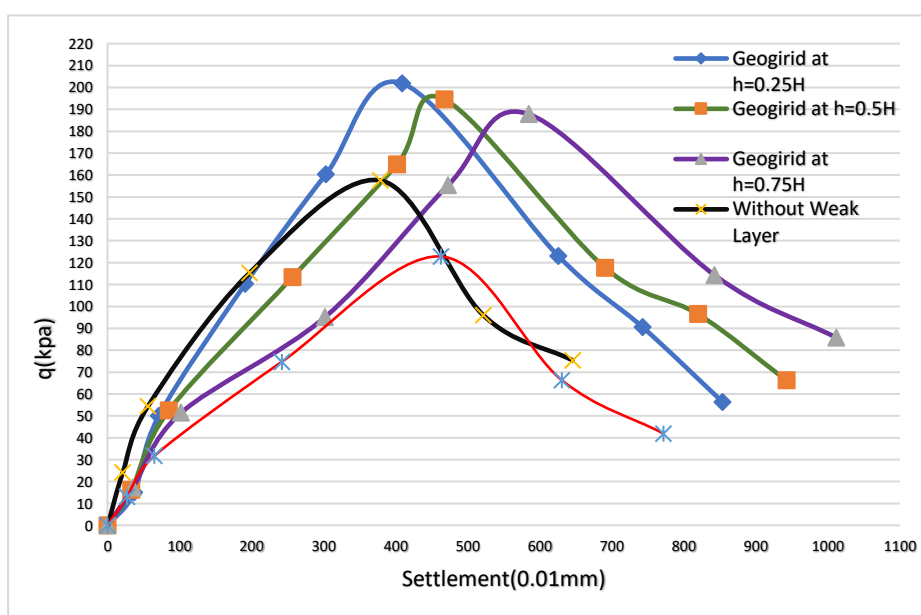
شکل ۶ منحنی‌های فشار - نشست برای پی مربعی مستقر بر بستر ماسه‌ای بدن لایه نازک و با یک لایه نازک ضعیف به ضخامت $t = 0.2B$ در عمق $H = 2B$ نشان داده شده است. باتوجه به وجود نقطه بیشینه در هر دو نمودارهای فشار - نشست، گسیختگی خاک زیر پی از نوع کلی است.



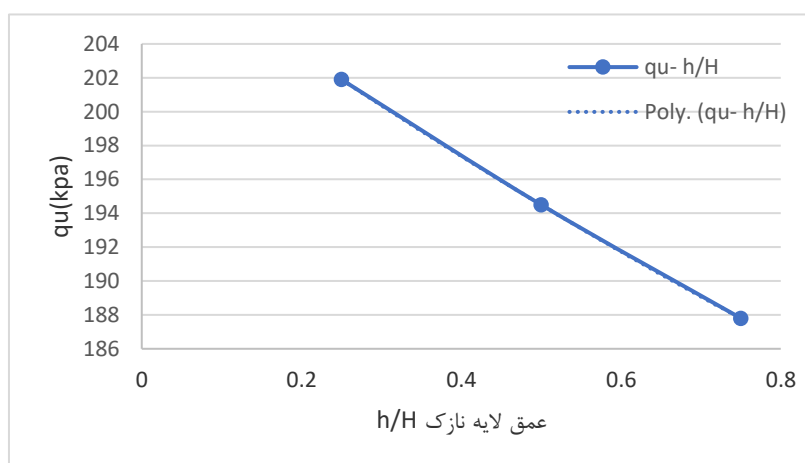
شکل ۶- نمودار بار- نشست پی مربعی برای بستر ماسه‌ای بدون لایه نازک و با لایه نازک در عمق $H=2B$.

۳-۳- تأثیر ژئوگرید بر ظرفیت باربری نهایی پی مربعی

نتایج رفتار پی مربعی مستقر بر بستر ماسه‌ای یکنواخت با یک لایه نازک در اعماق عمق $H=2B$ و ژئوگرید در موقعیت‌های مختلف $h=0.25H, 0.5H, 0.75H$ در نمودارهای شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۷- نمودار بار - نشست پی مربعی در موقعیت‌های مختلف.



شکل ۸- نمودار تاثیر پذیری ظرفیت باربری نهایی پی مربعی برای اعماق مختلف قرارگیری ژئوگرید.

بررسی نمودار شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد: افزایش ظرفیت باربری نهایی پی با موقعیت لایه نازک در $H=2B$ به موقعیت قرارگیری ژئوگرید با یک رابطه سهمی بستگی دارد. به طوری که ظرفیت باربری پی نسبت به حالت بدون ژئوگرید در $h=0.25$ برابر 64٪، در $h=0.5H$ 58٪ و در $h=0.75H$ معادل 53٪ افزایش نشان می‌دهد.

با بررسی نمودارهای بار - نشست پی، ملاحظه می‌شود روند بهبود ظرفیت باربری نهایی پی با نزدیک‌تر شدن ژئوگرید به سطح زیر پی در هر مرحله از آزمایش افزایش پیدا کرده است.

زمانی که موقعیت ژئوگرید از اعماق پائین‌تر به سمت بالا تغییر می‌کند، به دلیل نزدیک شده به سطوح گسیختگی کلی پی (ناحیه محرک I- نواحی انتقالی I و نواحی مقاوم III) اثر بهبودی آن در ظرفیت باربری نهایی پی افزایشی بوده و این افزایش ظرفیت باربری وقتی که ژئوگرید در داخل نواحی گسیختگی قرار می‌گیرد به دلیل قطع سطوح گسیختگی، بیشتر می‌شود. این روند با نزدیک‌تر شدن ژئوگرید به زیر پی و درگیری بیشتر با سطوح گسیختگی، چشمگیرتر می‌شود.

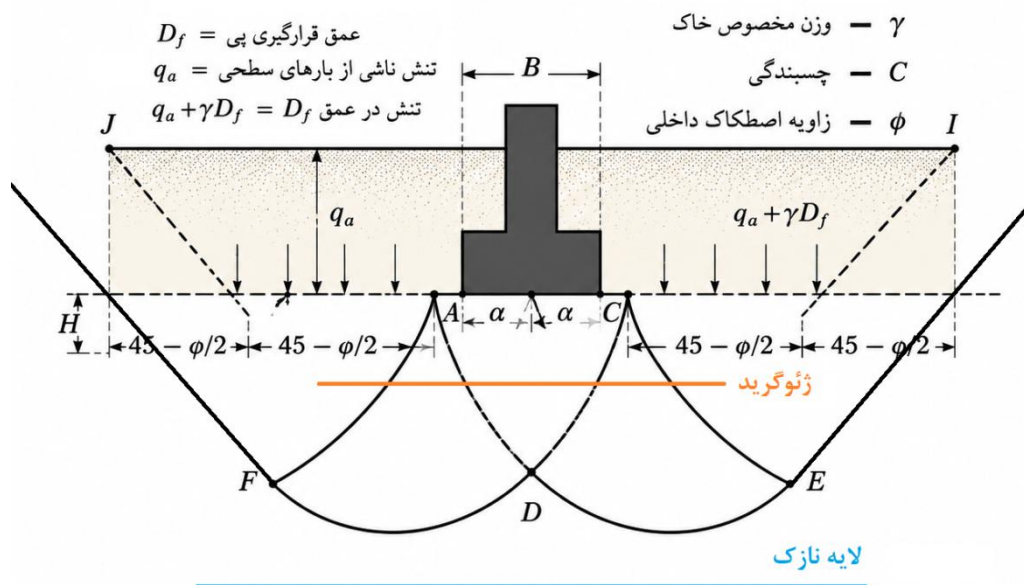
فرمول پیشنهادی برای اثرپذیری ظرفیت باربری نهایی پی به ازاء عمق‌های مختلف ژئوگرید در یک شالوده مربعی به قرار رابطه ۷ ذیل قابل ارائه است.

$$qu = 5.6(h/H)^2 - 33.8(h/H) + 210 \quad (7)$$

به عنوان یک نتیجه تجربی بر اساس نتایج آزمایشگاهی، با نزدیک‌تر شدن ژئوگرید به سطح زیر پی درصد افزایش ظرفیت باربری پی بیشتر می‌شود و بالعکس. با جمع‌بندی توضیحات داده شده و بررسی نمودارها و روند تغییرات ظرفیت باربری نهایی می‌توان چنین بیان کرد: برای دستیابی به عمق بهینه، ژئوگرید باید در محدوده داخل گوه گسیختگی کلی قرار داده شود یعنی

$$h < 0.5B \times \tan(45 + \phi/2)$$

موقعیت بهینه مسلح‌کننده ژئوگرید در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل بیشترین اثر ژئوگرید زمانی است سطوح گسیختگی کلی در نواحی محرک و انتقالی قطع شده باشد.



شکل ۹: شمایک گسیختگی خاک و عمق بهینه ژئوگرید.

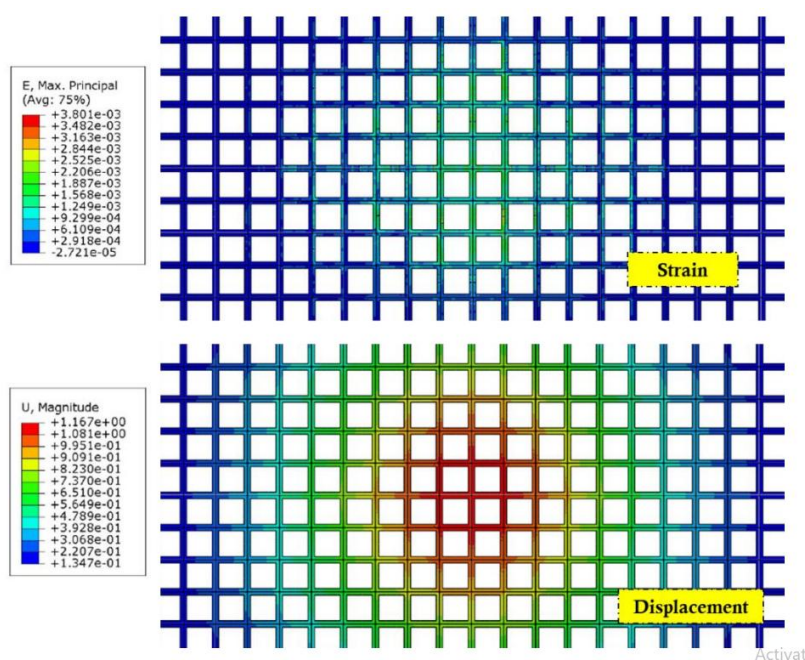
۳-۴- شبیه‌سازی عددی

برای مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی، تمامی ۵ آزمایش مدل فیزیکی با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی و تحلیل گردید. برای شروع مدل‌سازی، ابتدا هندسه مدل شامل بستر ماسه‌ای، لایه نازک رس، ژئوگرید و پی مربعی ساخته شده سپس در بخش متریال مشخصات فیزیکی و مکانیکی هر کدام اختصاص یافته و در بخش Assembly بخش‌های مختلف مدل مونتاژ گردید. برای تحلیل و تعیین ظرفیت باربری نهایی پی از مدل رفتاری موهر - کولمب استفاده گردید. مدل رفتاری موهر - کولمب قادر است شکست برشی توده خاک را به طور دقیق پیش‌بینی کند. با توجه به اینکه هدف از تحلیل، به دست آوردن منحنی نیرو - جابه‌جایی است، در تمامی مدل‌سازی‌ها نشست اجباری ۲۵ میلی‌متر برای پی اعمال شده و در پایان تحلیل، نیروی عکس‌العمل به صورت برآیند نیروهای عکس‌العمل وارده بروی سطح بالای پی و میزان نشست (U) به صورت برآیند نشست سطح بالای پی به عنوان خروجی از تحلیل مدل‌سازی برداشت گردید.

۴-۱- نتایج تحلیل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

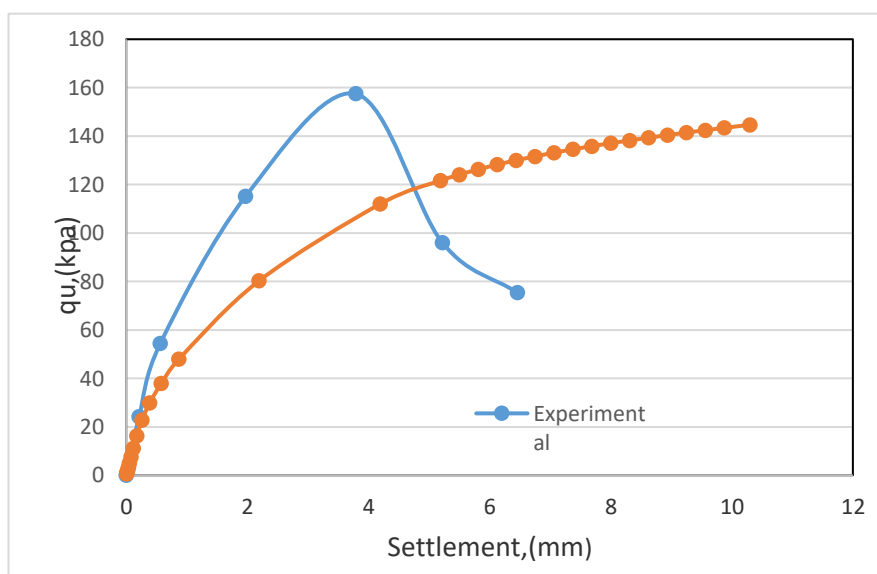
مقایسه ظرفیت باربری نهایی به دست آمده مدل‌های فیزیکی با نتایج حاصل از مدل‌های عددی نشان داد که نتایج به هم نزدیک بوده و لذا می‌توان با اطمینان قابل‌قبولی برای بررسی تغییرات ظرفیت باربری نهایی فونداسیون‌های مستقر بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک و شبکه ژئوگرید برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه از مدل‌سازی عددی که امکان ساخت مدل با هندسه و مشخصات مکانیکی و فیزیکی مختلف و در تعداد زیاد را فراهم می‌کند و از نظر اقتصادی هزینه و وقت صرف شده آن بسیار کمتر از انجام آزمایش‌ها فیزیکی کوچک مقیاس است بهره برد. در شکل ۱۰ تصویر کرنش و تغییر مکانی ایجاد شده در ژئوگرید برای نمونه آزمایش شماره دو پی مربعی مستقر بر بستر ماسه‌ای با لایه نازک ضعیف نشان داده شده است.

چنانچه نشست متناظر معادل ظرفیت باربری نهایی مدل فیزیکی را برای مدل عددی در نظر بگیریم این افزایش حدود ۳۰٪ است. این اختلاف نتایج بین مدل فیزیکی و عددی می‌تواند ناشی از مدل رفتاری در نظر گرفته شده در تحلیل عددی و همچنین مقادیر پارامترهای فیزیکی و مقاومتی خاک به‌ویژه (E و ν) فرض شده در مدل عددی باشد؛ لذا برای نزدیکی نتایج به واقعیت لازم است در مدل عددی کالیبراسیون انجام شود.



شکل ۱۰- تصویر کرنش و تغییرمکانی ایجاد شده در ژئوگرید.

در شکل ۱۱ نتیجه ظرفیت باربری نهایی پی بر بستر ماسه‌ای بدون لایه‌نازک برای دو روش مدل فیزیکی و المان محدود با یکدیگر مقایسه شده است.

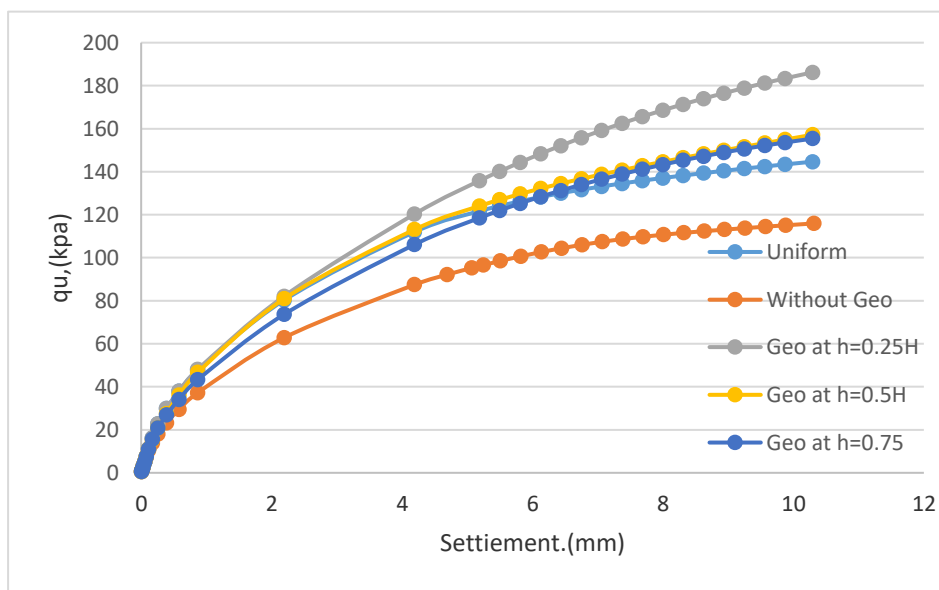


شکل ۱۱- مقایسه بار- جابجایی پی مربعی بر بستر ماسه‌ای بدون لایه نازک طبق مدل فیزیکی و مدل عددی با Abaqus.

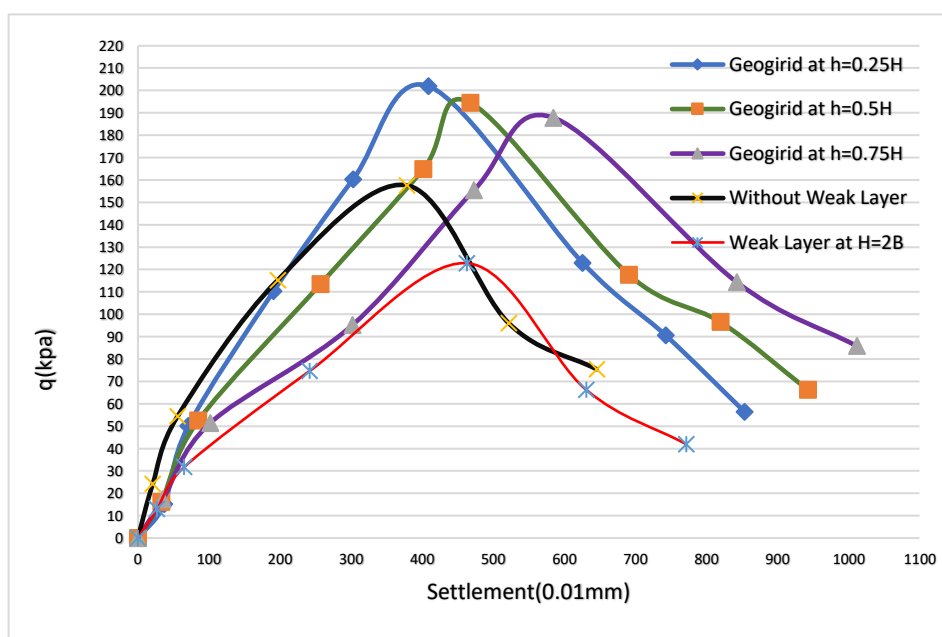
مطابق نمودارهای شکل ۱۱، ظرفیت باربری نهایی پی در مدل فیزیکی برابر $q_u = 157 \text{ Kpa}$ و نشست متناظر ۴ میلیمتر و در مدل عددی ظرفیت باربری نهایی $q_u = 179 \text{ Kpa}$ و نشست متناظر آن ۲۵ میلیمتر است. به عبارتی ظرفیت باربری حاصل از مدل عددی حدود ۱۴٪ نسبت به مدل فیزیکی افزایش داشته است. همچنین نشست متناظر ظرفیت باربری نهایی در مدل عددی حدود ۶۲۵٪ بیشتر از نشست مدل فیزیکی است.

مشابه نتایج به دست آمده برای پی مستقر بر بستر ماسه‌ای یکنواخت بدون لایه‌نازک ضعیف، در اشکال ۱۲ و ۱۳ نتایج آزمایش‌ها مدل فیزیکی با نتایج تحلیل عددی با نرم‌افزار Abaqus برای حالتی که لایه‌نازک در عمق $H=2B$ و ژئوگرید در اعماق

فیزیکی نزدیک است. لیکن میزان نشست پی در یک بار ثابت برای دو روش مطالعه متفاوت است به طوری که میزان نشست پی در حالت عددی بیشتر از نشست مدل فیزیکی است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات بار- جابجایی پی مربعی مستقر بر بستر ماسه ای یکنواخت، دارای لایه نازک و حضور ژئوگرید در اعماق مختلف مدل عددی با Abaqus



شکل ۱۳- نمودار تغییرات بار- جابجایی پی مربعی مستقر بر بستر ماسه ای یکنواخت، دارای لایه نازک و حضور ژئوگرید در اعماق مختلف مدل فیزیکی.

۴-۲-۶- تعیین روابط همبستگی ظرفیت باربری نهایی پی مربعی

چنانچه اثر کاهش ظرفیت باربری نهایی پی ناشی از لایه نازک ضعیف و اثر افزایشی ناشی از مقاومت کششی ژئوگرید با روابط ظرفیت باربری نهایی محققین ترکیب شود، به ازای سناریوهای مختلف روابط همبستگی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی قابل حصول است. به دست آورد. در این تحقیق ۴ سناریوی مختلف به قرار روابط ۸ تا ۱۱ در نظر گرفته شده و همه سناریوها

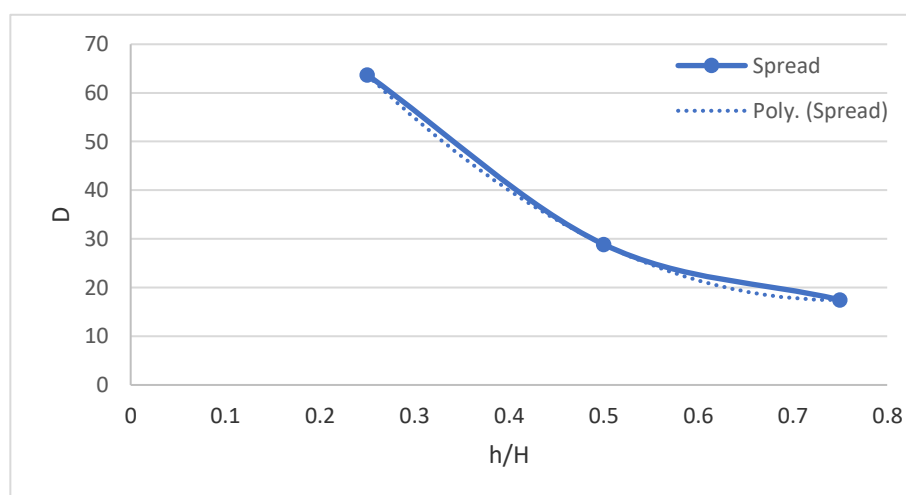
مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً نتیجه مطلوب از سناریوی شماره ۴ (رابطه ۱۱) به دست آمد. برای این منظور پارامتر مجهول D (اثر افزایشی و بهبود ظرفیت باربری ناشی از مقاومت کشش ژئوگرید) تعریف و برای تعیین مقادیر آن می‌توان از نمودار شکل ۱۴ و یا روابط ریاضی ۱۲ ارائه شده استفاده کرد.

$$qult1 = 0.5\gamma BN\gamma - 1.77 \frac{H}{B} \cdot c \cdot C + \left(\frac{h}{H} \cdot Rg \right) D \quad (8)$$

$$qult2 = 0.5\gamma BN\gamma - \frac{H}{B} (c + \sigma \tan \varphi) 1.77 + \left(\frac{h}{H} \cdot Rg \right) D \quad (9)$$

$$qult3 = 0.5\gamma BN\gamma - \frac{H}{B} (\sigma \tan \varphi) 1.77 + \left(\frac{h}{H} \cdot Rg \right) D \quad (10)$$

$$qult4 = 0.5\gamma BN\gamma - \frac{H}{B} (c + \sigma \tan \varphi) 1.77 + \left(\frac{10h - hB}{H} \right) Rg \cdot D \quad (11)$$

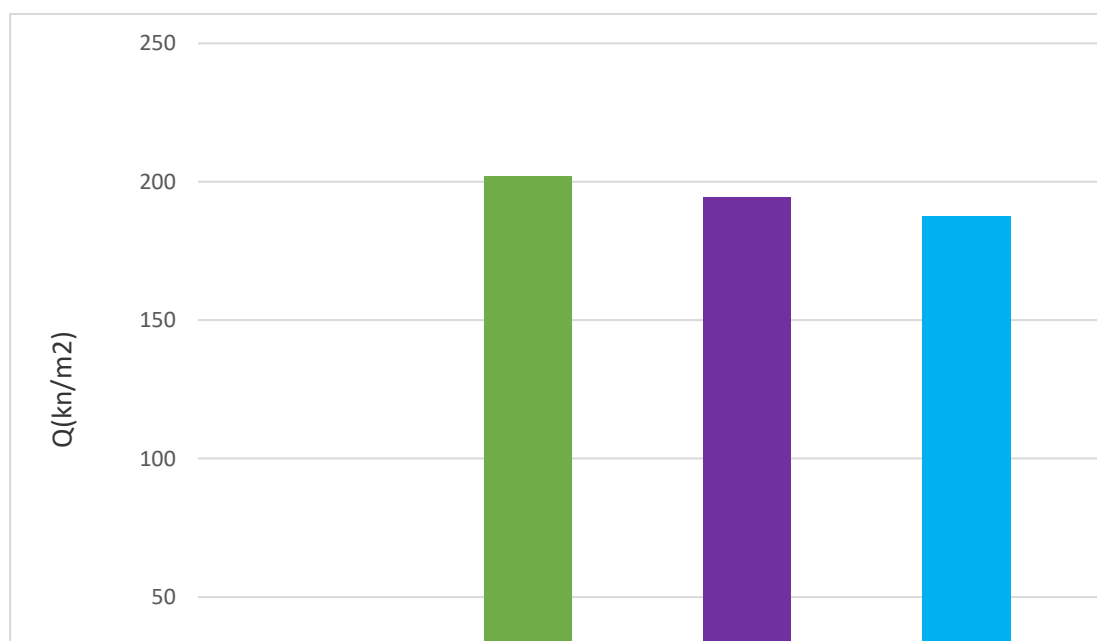


شکل ۱۴- داده‌های تعیین پارامتر D برای سناریوی چهارم (رابطه ۱۱) براساس موقعیت ژئوگرید.

مطابق شکل ۱۴ بر اساس داده‌های مدل فیزیکی می‌توان با خطای ناچیز رابطه ذیل را برای تعیین پارامتر D ارائه نمود.

$$D = 187.3(h/H)^2 - 279.7(h/H) + 122 \quad (12)$$

بررسی نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد، نرخ اثر افزایشی ظرفیت باربری نهایی پی ناشی از مسلح‌کننده ژئوگرید (پارامتر D) با نزدیک شدن موقعیت ژئوگرید به سطوح گسیختگی کلی پی بیشتر شده و وقتی ژئوگرید خطوط گسیختگی کلی نواحی I, II را قطع می‌کند این اثر چشمگیرتر است. با داشتن موقعیت لایه‌نازک (H) و مسلح‌کننده (h) و عرض پی (B) ضریب D از روی نمودار ۱۴ یا رابطه ۱۲ تعیین کرده سپس با جای‌گذاری مشخصات مقاومتی مصالح بستر، لایه ضعیف و مسلح‌کننده در رابطه ۱۱ ظرفیت باربری نهایی را تعیین و میزان تغییرات آن را نسبت به روابط تحلیلی موجود محققین می‌توان به دست آورد.



شکل ۱۵- مقایسه نرمالیزه شده میزان تاثیر لایه ضعیف و مسلح کننده بر ظرفیت باربری نهایی پی در حالت $H=2.0B$ و موقعیت ژئوگرید در اعماق $h=0.25H, 0.5H, 0.75H$

در شکل ۱۵ میزان وزنی (درصد تأثیر) وجود لایه ضعیف در کاهش ظرفیت باربری پی و میزان درصد تأثیر استفاده از ژئوگرید در بهبود و افزایش ظرفیت باربری نهایی پی باتوجه به موقعیت آنها نشان داده شده است.

در شکل ۱۵ میزان کاهش ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به بستر یکنواخت معادل ۲۲٪ است. با بهره‌گیری از مسلح‌کننده در اعماق مختلف ضمن جبران کاهش ظرفیت باربری نهایی ناشی از لایه ضعیف، با افزایشی معادل ۱۹.۲٪ و ۲۴٪ و ۲۸٪ نسبت به بستر یکنواخت (بدون لایه ضعیف) ایجاد شده است. اگر این افزایش ظرفیت باربری نهایی نسبت به حالت بستر ماسه‌ای با لایه‌نازک ضعیف در نظر گرفته شود افزایشی معادل ۵۳٪ و ۵۸٪ و ۶۵٪ ایجاد شده است. این نتایج نشان می‌دهد که میزان تأثیر استفاده از مسلح‌کننده (جمله سوم رابطه ۱۱) بیشتر از اثر کاهشی لایه ضعیف (جمله دوم رابطه ۱۱) است؛ لذا این واقعیت که استفاده از مسلح‌کننده ژئوگرید در بهبود ظرفیت باربری نهایی پی مستقر بر بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف مؤثر بوده را کاملاً توجیه می‌کند.

میزان نشست پی متناظر با ظرفیت باربری نهایی با حضور ژئوگرید در اعماق مختلف نسبت به بستر یکنواخت (بدون لایه‌نازک) معادل ۸٪ و ۲۴٪ و ۵۴٪ افزایش داشته و این نشست نسبت به بستر دارای لایه‌نازک ضعیف برای ژئوگرید در عمق $h=0.25H$ با کاهشی معادل ۱۲٪ مواجه بوده و برای ژئوگرید در اعماق $h=0.5H$ افزایشی معادل ۱٪ و برای عمق قرارگیری ژئوگرید $h=0.75H$ افزایشی حدود ۲۶٪ داشته است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار فونداسیون مربعی مستقر بستر ماسه‌ای دارای یک لایه‌نازک با موقعیت آن در اعماق مختلف زیر پی مطالعه شده است. پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی عبارتند از موقعیت قرارگیری لایه ضعیف (H)، موقعیت مسلح‌کننده (h) و عرض مسلح‌کننده (b). مطابق نتایج به دست آمده از کارهای محققین قبلی، وجود لایه‌نازک در بستر ماسه‌ای با عمق کمتر از $H < 4B$ موجب کاهش ظرفیت باربری پی گردیده است و در صورتی که لایه‌نازک در عمقی بیش از $H > 4B$ واقع شده باشد اثر کاهشی آن ناچیز است. باتوجه به تعریف عمق بحرانی برای لایه‌نازک برابر $H_c = 2B$ در مطالعات قبلی (اودا و وین ۱۹۹۰)، در این تحقیق در تمامی آزمون‌ها لایه‌نازک در عمق $H = 2B$ قرار داده شده است. بهترین عمق

مسلح‌کننده (h)، قرارگیری آن در داخل سطوح گسیختگی کلی و قطع سطوح گسیختگی و عرض مسلح‌کننده برابر $b=be=3B$ است. همچنین پارمترهای مقاومتی مصالح بستر، لایه ضعیف و مسلح‌کننده نیز از عوامل مؤثر در تغییرات ظرفیت باربری نهایی است. مطابق مطالعه (موریزو زیکارلی و مارکو روزان ۲۰۲۱) هرچه فاصله زاویه اصطکاک داخلی مصالح بستر و لایه ضعیف زیاد باشد کاهش ظرفیت باربری پی خواهد بود و بلعکس.

مطابق نتایج به دست آمده از آزمون‌ها، وجود لایه‌نازک در بستر ماسه‌ای در عمق $H=2B$ موجب کاهش ظرفیت باربری مربعی به میزان ۲۳٪ و افزایش نشست به میزان ۲۲٪ نسبت به حالت بستر ماسه‌ای یکنواخت گردیده است.

با بهره‌گیری از مسلح‌کننده در اعماق مختلف ضمن جبران کاهش ظرفیت باربری نهایی ناشی از لایه ضعیف، با افزایشی معادل ۱۹.۲٪ و ۲۴٪ و ۲۸٪ نسبت به بستر یکنواخت (بدون لایه ضعیف) ایجاد شده است. اگر این افزایش ظرفیت باربری نهایی نسبت به حالت بستر ماسه‌ای با لایه‌نازک ضعیف در نظر گرفته شود افزایشی معادل ۵۳٪ و ۵۸٪ و ۶۵٪ ایجاد شده است.

میزان نشست پی متناظر با ظرفیت باربری نهایی با حضور ژئوگرید در اعماق مختلف نسبت به بستر یکنواخت (بدون لایه‌نازک) معادل ۸٪ و ۲۴٪ و ۵۴٪ افزایش داشته و این نشست نسبت به بستر دارای لایه‌نازک ضعیف برای ژئوگرید در عمق $h=0.25H$ با کاهشی معادل ۱۲٪ مواجه بوده و برای ژئوگرید در اعماق $h=0.5H$ افزایشی معادل ۱٪ و برای عمق قرارگیری ژئوگرید $h=0.75H$ افزایشی حدود ۲۶٪ داشته است.

در تمامی حالات موقعیت عمق لایه‌نازک (H)، با نزدیک‌تر شدن ژئوگرید به سطوح گسیختگی کلی پی، اثر بهبودی مسلح‌کننده بیشتر شده و اوج افزایش ظرفیت باربری نهایی زمانی است که ژئوگرید در داخل گوه گسیختگی ناحیه I قرار گرفته و سطوح گسیختگی کلی را قطع کند.

برای دستیابی به بیشترین اثر ژئوگرید در افزایش ظرفیت باربری نهایی پی، ژئوگرید باید در داخل گوه گسیختگی کلی قرار گیرد که می‌توان برای رسیدن به این هدف رابطه $\text{hop} < 0.5B \times \tan(45 + \phi/2)$ به‌عنوان عمق بهینه ژئوگرید پیشنهاد داد. این رابطه برای تمامی حالات قرارگیری عمق لایه‌نازک صادق است.

برای تعیین ظرفیت باربری پی مستقر بر بستر ماسه‌ای دارای لایه‌نازک با مسلح‌کننده ژئوگرید می‌توان از روابط همبستگی ارائه شده بهره برد. لازم به ذکر است به دلیل وجود اثر مقیاس بجهت انجام آزمایش‌ها در سطوح پایین تنش، نمی‌توان از روابط فوق برای مقاصد عملی استفاده کرد و در این تحقیق صرفاً به بررسی و مطالعه رفتار پی مربعی در اثر بکارگیری مسلح‌کننده در اعماق مختلف پرداخته شده است.

نتایج نشان داد در تمامی حالات، میزان تأثیر استفاده از مسلح‌کننده (جمله سوم رابطه همبستگی ۱۱) بیشتر از اثر کاهشی لایه ضعیف (جمله دوم رابطه ۱۱) است؛ لذا این واقعیت استفاده از مسلح‌کننده در بهبود ظرفیت باربری نهایی پی مستقر بر بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف را کاملاً توجیه می‌کند.

نزدیکی نتایج ظرفیت باربری نهایی به دست آمده از آزمایش‌ها مدل فیزیکی با نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با نرم‌افزار Abaqus با اختلاف حدود ۱۴٪ نشان می‌دهد که پارامترهای فیزیکی و مقاومتی بکار رفته در مدل فیزیکی به طور صحیح انتخاب شده است لذا می‌توان با صرف هزینه و وقت به‌مراتب کمتر، مدل‌ها و حالت‌های مختلفی از پی نواری مستقر بر بستر ماسه‌ای با عمق‌های متفاوت لایه‌نازک و ژئوگرید و با مشخصات فیزیکی و مقاومتی متنوع بستر ماسه‌ای و لایه‌نازک و مسلح‌کننده ژئوگرید در نرم‌افزار Abaqus ساخته و تحلیل کرد.

میزان نشست پی در یک‌بار ثابت در مدل عددی حدود ۳۰۰٪ نسبت به مدل فیزیکی بیشتر گردیده است. این اختلاف رفتار پی در نتایج بین مدل فیزیکی و عددی می‌تواند ناشی از مدل رفتاری در نظر گرفته شده در تحلیل عددی و همچنین مقادیر پارامترهای

فیزیکی و مقاومتی خاک به‌ویژه (E, ν) فرض شده در مدل عددی باشد؛ لذا برای نزدیکی نتایج به واقعیت لازم است در مدل عددی کالیبراسیون انجام شود.

References

- Al-khafaji, R., & Shafiqu, Q. S. M. (2025). The seismic response of a shallow foundation supported on geogrid-reinforced sand soil. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 28(3), 481–492. <https://doi.org/10.29194/NJES.28030481>
- Al-Sumaiday, H., Khalaf, W. D., & Muhauwiss, F. M. (2024). Experimental investigation of bearing capacity of circular and ring footings on geogrid-reinforced cohesionless soils. *Civil and Environmental Engineering*, 20(1), 349–363. <https://doi.org/10.2478/cee-2024-0027>
- Anaswara, S., & Shivashankar, R. (2021). Study on behaviour of two adjacent strip footings on unreinforced/reinforced granular bed overlying clay with voids. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1831–1848. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01590-1>
- Swarnkar, D. C., & Singh, A. K. (2025). Characteristic of ring footing fixed with geogrid strip resting on sand using numerical technique. *Indian Geotechnical Journal*, 55(1), 135–144.
- Chen, J., Guo, X., Sun, R., Rajesh, S., Jiang, S., & Xue, J. (2021). Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(2), 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2020.10.011>
- Hassan, H. A. J., & Shakir, R. R. (2022). Ultimate bearing capacity of eccentrically loaded square footing over geogrid-reinforced cohesive soil. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 1–12. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0035>
- Helis, R., Mansouri, T., & Abbeche, K. (2023). Behavior of a circular footing resting on sand reinforced with geogrid and grid anchors. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(1), 10165–10169. <https://doi.org/10.48084/etasr.5607>
- Kianpour, M., Bagherzadeh Khalkhali, A., Dabiri, R., & Mahdavi Adeli, M. (2024). Experimental study on the effect of eccentric loads on the bearing capacity of strip footing located on the inclined multi-layer soil mass with a weak soil layer. *AUT Journal of Modeling and Simulation*. DOI:10.22060/miscj.2024.22912.5349
- Lafifi, B., Ammar, R., & Soltani, E. A. (2023). A novel method for optimizing parameters influencing the bearing capacity of geosynthetic reinforced sand using RSM, ANN, and multiobjective genetic algorithm. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 45(2), 174–196. <https://doi.org/10.2478/sgem-2023-0006>
- Pezeshkian, P., Kazemzadeh, M., Zad, A. A., & Yazdi, M. (2024). Experimental evaluation of the behavior of geogrid-reinforced sand placed on top of twin voids. *Civil Engineering Journal*. <https://doi.org/10.22034/ceej.2024.59826.2313>
- Meyerhof, G. G., & Hanna, A. M. (1978). Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), 565–572.
- Masanobu, Oda., and Soe, Win., (1990). Ultimate bearing capacity teste on sand with clay layer. *Journal Of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, pp. 1902-1906
- Jignesh N. Lad and A. K. Verma. (2011). Behaviour of strip Footing on Sand Bed with Thin Soft Lens. National Conference on Recent Trends in Engineering Technology
- Ziccarelli, M. Valore, C. Muscolino, S.R & Fioravante, V. (2017). Centrifuge tests on the strip footings on sand with a weak layer. *Geotechnical Research*, 4(1), 47-64
- Laxmikant Yadu., R. K. Tripathi. (2013). Effect of the length of geogrid layers in the bearing capacity ratio of geogrid reinforced granular fill-soft subgrade soil system. *Journal of Procedia- Social and behavioral Sciences*, Vol. 104, pp. 225-234
- Askari, M., Bagherzadeh Khalkhali, A., Makarchian, M., & Ganjian, N. (2022). Evaluation of the thin layer effect on the ultimate bearing capacity of strip foundation on sand. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(7), 543–546. <https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20657.7490>
- Hoseini MF, Khalkhali AB, Ganjian N (2024). Experimental and Numerical Investigation of Strip Footing Behavior on Sand with a Weak Layer of Thicknesses and Overburden Loads. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction of Civil Engineering Geomech Eng* 27(2):123-130. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01417-6>

Sadeghi, J., Bagherzadeh Khalkhali, A., Nazariafshar, J., & Ganjian, N. (2025). Experimental investigation of eccentric loading effect on circular footing located on sandy bed with a weak thin layer. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. DOI:10.22060/ceej.2024.23365.8150

Ruqayah Al-Khafaji, et al. (2025). The seismic response of a shallow foundation supported on geogrid-reinforced sand soil. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 28(3), 481–492. <https://doi.org/10.29194/NJES.28030481>

Reem, S. T., et al. (2025). Increase in bearing capacity and reduction of settlement of square footing on weak granular soil using multilayer geogrid reinforcement.

Rabah, A., & Emara, O. M. (2026). Numerical assessment of geogrid-reinforced weak thin layer in slope. *Innovative Infrastructure Solutions*, 11(6). <https://doi.org/10.1007/s41062-026-02739-2>