

The Impact of Micropiles on the Subgrade Reaction Coefficient Using the Finite Element Method

Maryam Ghiasi¹ , Vahid Rostami²

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Islamic Azad University, Hamedan Branch, Hamedan, Iran. E-mail: maryamghiasi56@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Islamic Azad University, Hamedan Branch, Hamedan, Iran. E-mail: rostami@iauh.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-03-04

Received in revised form

2025-05-05

Accepted

2025-06-19

Available online

2025-06-29

Keywords:

Micropile,
Subgrade Reaction Coefficient,
Static Loading,
Sandy Soil

ABSTRACT

One of the crucial parameters in the design of foundations is the subgrade reaction coefficient, and accurately estimating this parameter is always a priority for engineers. Various methods have been proposed to determine this parameter, among which the Winkler method is one of the most well-known. The fundamental issue in this method is estimating the numerical value of the subgrade reaction coefficient (k_s), which is influenced by multiple factors such as the properties of the soil beneath the foundation, the groundwater level, and the presence of additional parameters like micropiles, nails, etc. In this research, the impact of micropiles on reducing settlement and determining the subgrade reaction coefficient, both in the presence and absence of groundwater, has been investigated using the finite element method with the software (PLAXIS3DFoundation). A foundation with dimensions of 10 meters in width and 20 meters in length was utilized for this purpose. The studies in this research were conducted using a sensitivity analysis method. In other words, the subgrade reaction coefficient was examined with variations in micropile diameter, micropile length, and different spacing of micropiles across four types of soil with varying elastic moduli. The results of the research indicate that increasing the micropile diameter from 0.2 meters to 0.3 meters will increase the subgrade reaction coefficient by 47 to 55 percent. Additionally, increasing the spacing of micropiles from 2 meters to 4 meters results in a reduction of the subgrade reaction coefficient by 20 to 33 percent. Furthermore, increasing the length of micropiles leads to an increase in the subgrade reaction coefficient. The findings of this study demonstrate that raising the groundwater level to the foundation level significantly reduces the subgrade reaction coefficient.

Cite this article: Ghiasi, Maryam., & Rostami, Vahid. (2025). The Impact of Micropiles on the Subgrade Reaction Coefficient Using the Finite Element Method. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 112-125.

DOI: 10.22126/amcen.2025.11336.1029



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.11336.1029

Publisher: Razi University

Introduction

Current One of the critical parameters in foundation design is the subgrade reaction coefficient, the accurate estimation of which is always a concern for engineers. Various methods have been proposed to determine this parameter, with the Winkler method being one of the most well-known. The primary challenge in this method is estimating the numerical subgrade reaction coefficient (k_s), which is influenced by numerous factors such as soil properties beneath the foundation, groundwater level, and additional parameters like micropiles, nails, etc. Estimation of which is always a concern for engineers. Various methods have been proposed to determine this parameter, with the Winkler method being one of the most well-known. The primary challenge in this method is estimating the numerical subgrade reaction coefficient (k_s), which is influenced by numerous factors such as soil properties beneath the foundation, groundwater level, and additional parameters like micropiles, nails, etc.

The subgrade reaction coefficient is a crucial parameter representing the interaction between the foundation and the soil, varying for different soil types. It is determined through various tests such as plate load tests, consolidation tests, CBR tests, and theoretical relationships. The coefficient k_s is not an exclusive soil property; it depends on the elastic characteristics of the subgrade, geometric properties of the load-transfer system, and the type of applied load. Factors influencing k_s include soil elastic modulus, geometric properties of the loaded surface, subsoil resistance, and groundwater level. Soil improvement techniques also affect mechanical properties and subsoil resistance. The Winkler model, the simplest approach for soil-foundation interaction analysis, replaces the soil with independent springs of specified stiffness. Terzaghi later expanded the concept of horizontal and vertical subgrade reaction coefficients, examining the effects of foundation dimensions, shape, and depth. Subsequent research by Scott, Horvath, and others further refined the understanding of soil-foundation interaction

Method

This study employs the finite element method using PLAXIS3D FOUNDATION software to investigate the effect of micropiles on reducing settlement and determining the subgrade reaction coefficient, considering the presence or absence of groundwater. A foundation with dimensions of 10 meters in width and 20 meters in length was used. The research was conducted through sensitivity analysis, examining the subgrade reaction coefficient with variations in micropile diameter, length, and spacing across four soil types with different elastic moduli.

This study uses PLAXIS3D to determine the subgrade reaction coefficient for mat foundations with micropiles, examining the effect of groundwater levels parametrically. The soil is modeled using the hardening soil model, The model dimensions (80×40 meters in plan and 12 meters in depth) ensure boundary condition effects are minimized. The foundation is centered, and mesh refinement is applied around micropiles for accuracy. One of the most critical stages

in finite element modeling is selecting the appropriate element type for the application. In this model, triangular meshing was employed for the elements, which offers the highest accuracy in 3D software. To account for boundary effects and ensure model accuracy, the soil mass dimensions were set larger than the foundation dimensions (80×40 meters in plan and 12 meters in depth, as shown in Figure 3). The foundation was aligned with the center of symmetry, and the mesh was refined around the micropiles for higher precision. Ensuring the reliability of software outputs is a primary concern for designers. To validate the numerical models, results were compared with laboratory studies. For this purpose, experimental work by Unsever et al. was numerically simulated. The study involved three aluminum micropiles embedded in concrete heads, subjected to vertical and horizontal loads. The test box was a rectangular prism with dimensions of 800 mm (length) × 500 mm (width) × 530 mm (depth). The micropiles were 255 mm in length and 20 mm in diameter, made of lightweight aluminum

Results and Conclusions

This research investigated mat foundations on sandy soils with varying friction angles, classified as loose, medium, and dense sands. The results indicate that increasing the micropile diameter from 0.2 meters to 0.3 meters raises the subgrade reaction coefficient by 47% to 55%. Conversely, increasing the spacing between micropiles from 2 meters to 4 meters reduces the coefficient by 20% to 33%. Additionally, increasing the micropile length enhances the subgrade reaction coefficient. The study also reveals that raising the groundwater level to just below the foundation significantly reduces the subgrade reaction coefficient

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تأثیر وجود ریزشمع‌ها بر ضریب عکس‌العمل بستر با استفاده از روش اجزاء محدود

مریم قیاسی^۱، وحید رستمی^۲✉

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران. رایانامه: maryamghiasi56@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران.

رایانامه: rostami@iauh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸ کلیدواژه‌ها: ریزشمع، ضریب عکس‌العمل بستر، بارگذاری ثابت، خاک ماسه‌ای	یکی از پارامترهای مهم در طراحی پی‌ها ضریب عکس‌العمل بستر می‌باشد که تخمین دقیق این پارامتر همواره مدنظر مهندسان می‌باشد. برای تعیین این پارامتر روش‌های متعددی بیان گردیده، که از جمله شناخته شده‌ترین آن‌ها روش وینکلر می‌باشد. مسئله اساسی در این روش تخمین ضریب عددی عکس-العمل بستر ks بوده که تحت تأثیر عوامل متعدد مانند: خصوصیات خاک زیر پی، سطح آب زیرزمینی، وجود پارامترهای اضافی مانند ریزشمع، میخ و... می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود، به کمک نرم‌افزار (PLAXIS3DFFOUNDATION) به بررسی تأثیر ریز شمع‌ها در کاهش نشست و تعیین ضریب عکس‌العمل بستر، با وجود آب زیرزمینی یا عدم حضور آب زیرزمینی پرداخته شده است. به این منظور از یک شالوده به ابعاد، ۱۰ متر عرض و ۲۰ متر طول، استفاده شده است. مطالعات در این تحقیق به روش آنالیز حساسیت صورت گرفته است. به عبارت دیگر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر با تغییرات قطر ریز شمع، طول ریز شمع و فواصل متفاوت ریز شمع بر روی چهار نوع خاک با مدول الاستیک متفاوت، مطالعه گردیده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش قطر ریز شمع از ۰.۲ متر به ۰.۳ متر، بین ۴۷ تا ۵۵ درصد ضریب واکنش بستر افزایش خواهد یافت. با افزایش فاصله ریزشمع از ۲ متر به ۴ متر، بین ۲۰ تا ۳۳ درصد ضریب واکنش بستر کاهش می‌یابد. همچنین افزایش طول ریز شمع باعث افزایش ضریب عکس‌العمل بستر می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، افزایش سطح آب زیرزمینی تا تراز زیر پی مقدار ضریب عکس‌العمل بستر را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

استناد: قیاسی، مریم؛ رستمی، وحید. (۱۴۰۴). تأثیر وجود ریزشمع‌ها بر ضریب عکس‌العمل بستر با استفاده از روش اجزاء محدود. *مجله مدل‌سازی*

پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۱)، ۱۱۲-۱۲۵. DOI: 10.22126/amcen.2025.11336.1029

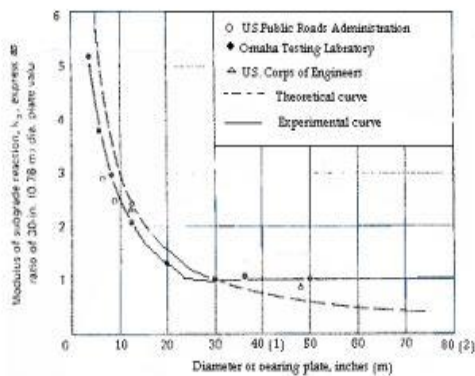


© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

ضریب عکس‌العمل بستر، یکی از پارامترهای مهم و کلیدی خاک است که بیانگر عکس‌العمل بین شالوده و خاک می‌باشد و مقدار آن برای خاک‌های مختلف متفاوت است. ضریب عکس‌العمل خاک با استفاده از آزمایش‌های گوناگونی مانند آزمایش بارگذاری صفحه، تحکیم، CBR و روابط تئوریک تعیین می‌گردد. K_s ، جزء مشخصات انحصاری خاک نیست و علاوه بر وابستگی به مشخصات الاستیک بستر، به مشخصات هندسی سیستم منتقل‌کننده بار و حتی نوع بار وارده وابسته می‌باشد. عواملی که در تعیین ضریب عکس‌العمل بستر نقش دارند، شامل مدول ارتجاعی خاک، مشخصات هندسی سطح بارگذاری، مقاومت خاک بستر، سطح آب زیرزمینی می‌باشند. نوع بهسازی خاک، بر مقاومت خاک بستر و خصوصیات مکانیکی تأثیر دارد. مهمترین مساله برای مهندسين تخمین فشار تماسی خاک و فونداسیون و نشست حاصل از آن می‌باشد که بدلیل چند فازی بودن محیط خاک و وجود متغیرهای وابسته، تخمین دقیق آن حتی با دانش امروزی کاری دشوار است. اولین و ساده‌ترین مدل برای بررسی اندرکنش خاک و شالوده، مدلی است که توسط وینکلر^۱ ارائه شده است. در این مدل خاک بوسیله مجموعه‌ای از فنرهای مستقل با یک ضریب سختی مشخص جایگزین می‌شود. از مشخصات بارز این مدل رفتار غیرپیوسته آن می‌باشد [۱]. اولین بار ترزاقی^۲ مفهوم ضریب عکس‌العمل افقی و قائم خاک را پایه‌گذاری کرد و اثر عوامل مختلف بر این ضریب‌ها را مورد بررسی قرار داد. از جمله عواملی که اثر آن‌ها بوسیله ترزاقی مورد بررسی قرار گرفت می‌توان به ابعادی، شکل پی و عمق آن اشاره نمود [۲]. در ادامه تحقیقات ترزاقی، محققان زیادی به بررسی اندرکنش خاک-فونداسیون پرداختند و ضریب عکس‌العمل خاک را مورد بررسی‌های دقیق قرار دادند، محققین همچنین عوامل مختلف تأثیرگذار بر رفتار اندرکنشی خاک-فونداسیون را مورد تجزیه تحلیل قرار داده‌اند. اسکات^۳، براساس تجربیات قبلی، نشان داد، استفاده از صفحاتی با قطر بیش از ۳۰ اینچ برای خاک‌های یکنواخت، تغییرات کمی را در مقدار ضریب عکس‌العمل بستر نشان می‌دهد [۳]. (شکل ۱)



شکل ۱. تغییرات ضریب عکس‌العمل خاک نسبت به قطر صفحه

هورواس^۴، به وضوح نشان داد، که روند تغییرات نشست و در نتیجه آن ضریب عکس‌العمل بستر همراه با افزایش ابعاد ناحیه بارگذاری شده را نمی‌توان در خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های متفاوت، تنها با یک منحنی نشان داد. در عوض این محقق دو منحنی به عنوان حد بالا و پایین و یک منحنی که میانگین آن دو می‌باشد را ارائه نمود و نشان داد که نتایج حاصل از رابطه ترزاقی در محدوده‌ای مابین منحنی میانگین و حد پایین قرار گرفته است [۴]. ابدالسامی^۵، یک مجموعه بررسی آزمایشگاهی برای عوامل تأثیرگذار بر ضریب عکس‌العمل بستر خاک انجام داد. وی در آزمایش‌های خود نشان داد، که اندازه طول، عرض و همچنین شکل بستر خاک می‌تواند همانند عمق فونداسیون بر ضریب عکس‌العمل بستر خاک تأثیرگذار باشد. تحقیق وی نشان داد که افزایش اندازه‌های بستر خاک باعث افزایش عکس‌العمل بستر خاک می‌شود. همچنین در پی‌هایی که به شکل مستطیلی هستند این ضریب بیشتر از پی‌هایی به شکل دایره‌ای و مربعی می‌باشد [۵]. تورانی‌سما و کلانتری، به بررسی اثر ابعاد شالوده بر تعیین ضریب عکس‌العمل بستر پرداختند. از جمله نتایج این تحقیق، ارائه روشی جهت تعیین ضریب عکس‌العمل بستر در نیم فضای الاستیک ناهمگن می‌باشد [۶]. یکی دیگر از عواملی که در خاک‌های ماسه‌ای بر نسبت نشست‌ها و مقدار ضریب عکس‌العمل بستر اثر می‌گذارد، مساله سمنته شدن است. این مساله توسط

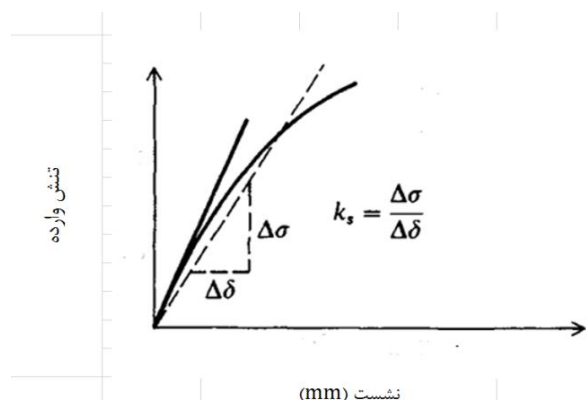
⁴ Horovaci

⁵ Abdolsami

¹ Winkler

² Terzaghi

³ Scott



شکل ۲. مشخصات مورد استفاده در تعیین واکنش بستر

بولز^۸، نشان داد که می توان منحنی $q-\delta$ به چند ناحیه تقسیم کرد، به طوری که مقدار ضریب واکنش بستر شیب هر یک از این چند ناحیه خواهد بود. اما این روش ظرافت های بیش از حدی در مسئله وارد می کند. زیرا در اکثر روش های تحلیلی از مقادیر تخمینی یا در بهترین حالت از یک آزمایش بارگذاری تقریبی استفاده می شود. در بیشتر تحلیل ها محققین برای طراحی و مدل سازی از مدول الاستیک و ضریب پواسون به جای ضریب واکنش بستر در محیط های اجزای محدود استفاده می کنند [۹].

روش اجزاء محدود (FEM) موثرترین ابزار حل مسئله هایی از نوع تیر بر بسترالاستیک براساس معادله ۲ است.

$$k_s = A_s + B_s Z^n \quad (2)$$

بولز و ونگ، هر یک جداگانه برنامه کامپیوتری نوشتند که با تشکیل سختی ماتریس سازه ضریب واکنش بستر را محاسبه می کند، خروجی این برنامه در رابطه ۳ نوشته شده است:

$$X = (ASA^T)^{-1} P \quad (3)$$

در رابطه ۱۲ ASA^T ماتریس کلی است، چرا که نشانگر سیستمی از معادلات برای ورودی P یا X هر گره است [۹].

اسمعیل^۶، با انجام یک سری آزمایش بارگذاری با صفحاتی به قطرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای ماسه های سمنته شده، نسبت نشست ها از تمام نتایج ارائه شده برای خاک های دانه ای کوچک تر است که علت این مسئله آن است که در خاک های سمنته شده بر خلاف خاک های دیگر چسبندگی صفر نیست [۷]. لی و شیک^۷، مطالعه آزمایشگاهی در رابطه با برآورد مدول عکس العمل بستر خاک ها بر روی فونداسیون های سنگی منقطع انجام دادند. در این مطالعه مشخص شد که زمان استفاده از سنگ ناپیوسته در تقابل با خاک، مدول عکس العمل بستر خاک در حدود ۶۰٪ کاهش می یابد و اساس مشخصات خاک های مشابه اندازه گیری در شرایطی است که قطعه سنگی در حالت دست نخورده باقی می ماند [۸]. برای تعیین مدول عکس العمل بستر روابط تجربی و تئوریک توسط محققین ارائه شده، که خلاصه ای از آنها در جدول ۱ آمده است.

۲. محاسبه ضریب واکنش بستر از مطالعات عددی

ضریب واکنش بستر، رابطه ای مفهومی بین فشار و تغییر شکل خمشی خاک است که به طور وسیعی در تحلیل سازه ای پی مورد استفاده قرار می گیرد. از این ضریب برای شالوده های پیوسته، پی گسترده و انواع پی عمیق استفاده می شود. نسبت این عدد در شکل ۲ تعریف شده است.

$$k_s = \frac{q}{\delta} \quad (1)$$

q : بار وارد بر صفحه بارگذاری

δ : نشست رخ داده در زیر صفحه بارگذاری

چنانچه از این منحنی برای بدست آوردن ضریب عکس العمل بستر استفاده شود، روشن است که مقدار آن به مماسی یا وتری بودن ضریب و مکان مختصات q و δ بستگی دارد.

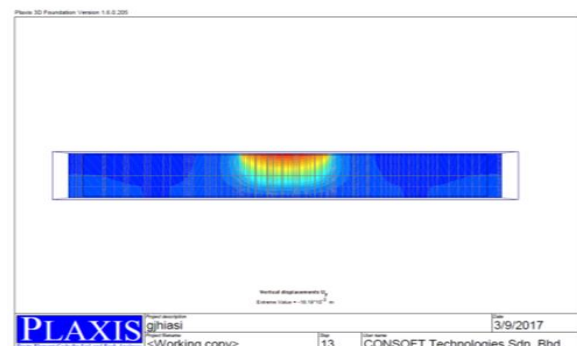
⁸ Bowles

⁶ Ismael

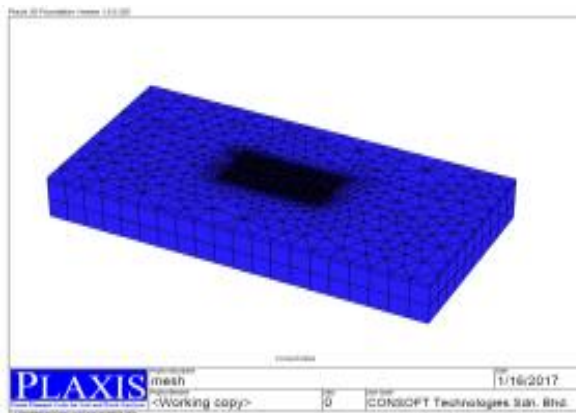
⁷ Leeshik

۳. مدل‌سازی عددی

در این تحقیق از برنامه اجزاء محدود PLAXIS3D برای تعیین ضریب واکنش بستر در شرایط وجود ریزشمع در زیر پی گسترده استفاده شده است و تأثیر سطح آب زیرزمینی بر ضریب عکس‌العمل بستر به طور پارامتریک مطالعه شده است. برای مدل‌سازی خاک از مدل رفتاری خاک سخت شونده استفاده شده است. خصوصیات چهار نوع خاک مورد مطالعه در مدل‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است. بطور تجربی خاک نوع ۱ و ۴ در طبقه بندی خاک سست و خاک نوع ۳ در تراکم متوسط در نظر گرفته شده است. پارامترهای مهم ورودی این مدل رفتاری عبارتند از C : چسبندگی خاک، ϕ : زاویه اصطکاک داخلی خاک، Ψ : زاویه اتساع خاک، E_{50}^{ref} : سختی سکانت در آزمایش سه محوری استاندارد در فشار محصور کننده مرجع، $\sigma_3 = p^{ref}$ است. E_{50}^{oed} : سختی مماسی آزمایش تحکیم، E_{50}^{ur} : سختی خاک در بارگذاری و باربرداری و m پارامتر بیان کننده میزان وابستگی سختی خاک به سطح تنش محصور کننده می‌باشد. یکی از حساس‌ترین مراحل مدل‌سازی یک مسئله اجزا محدود، انتخاب نوع المان مناسب برای کاربرد در مدل می‌باشد که در این مدل از مش-بندی مثلثی برای المان‌ها استفاده شده است، که بیشترین دقت را در نرم‌افزار سه بعدی داراست. برای در نظر گرفتن اثر شرایط مرزی و صحت عملکرد مدل، ابعاد توده خاک بزرگتر از ابعاد پی و به مقادیر 40×80 متر به عمق ۱۲ متر مطابق شکل شماره ۳، مدل گردیده است، شالوده منطبق بر مرکز تقارن بوده و مش‌بندی در اطراف ریزشمع با تعداد بیشتری انتخاب شده است. شکل ۳ ابعاد کافی برای شرایط میدان آزاد را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ابعاد مدل



شکل ۴. مش‌بندی در فضای ۳ بعدی

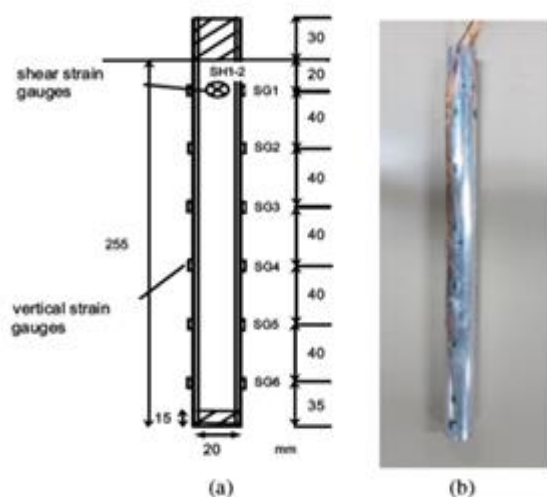
۴. صحت سنجی نتایج

اطمینان از صحت پاسخ نرم‌افزار دغدغه اصلی طراحان می‌باشد. بدین منظور لازم است نتایج مدل‌های ساخته شده اعتبارسنجی شوند. راه‌های مختلفی برای اعتبارسنجی وجود دارد. در این تحقیق از مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی یونسور، استفاده شده است. بدین منظور از مطالعات آزمایشگاهی یونسور، شبیه‌سازی عددی شده است.

در تحقیق مذکور ۳ ریز شمع آلومینیومی که در سرشمع بتنی گیردار هستند، تحت سربارهای مختلف شامل بار عمودی و افقی قرار گرفته‌اند. جعبه آزمایش یک مکعب مستطیل به ابعاد: طول ۸۰۰ میلی‌متر، عرض ۵۰۰ میلی‌متر و عمق ۵۳۰ میلی‌متر است. طول ریز شمع ۲۵۵ میلی‌متر و قطر آن ۲۰ میلی‌متر بوده و از جنس آلومینیوم سبک می‌باشد [۱۰].

شکل ۵ ابعاد جعبه آزمایش و سرشمع و شکل ۶ محل نصب قرائت کننده‌های دیجیتالی را نشان می‌دهد.

ردیف	سال انتشار	نام محقق	رابطه پیشنهاد	کاربرد
۱	۱۹۸۶	Winkler	$k_s = \frac{q}{\delta}$	-
۲	۱۹۳۷	Biot ^۱	$k_s = \frac{0.95 E_s}{B(1-\nu_s^2)} \times \left[\frac{B^4 E_s}{(1-\nu_s^2)} \right]^{0.108}$	برای تیرهای واقع بر بستر الاستیک با استفاده از تئوری الاستیک، پیوسته تعریف شده است
۳	۱۹۵۵	Terzaghi ^۲	$k_s = k_1 \frac{B1}{B} \text{ For clay}$	زمانی قابل استفاده است که ضریب عکس العمل بستر در زیر صفحه ای به عرض 1ft معلوم باشد و در واقع این رابطه با جایگذاری عرض صفحه بارگذاری به جای 1ft در تحلیل نتایج آزمایش بارگذاری صفحه، بسیار مفید است
			$k_s = k_1 \left(\frac{B+B1}{2B} \right)^2 \text{ For sand}$	
۴	۱۹۶۱	Vesic	$k_s' = 0.65 \times \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_f I_f} \frac{E_s}{1-\mu^2}}$	در اصل به منظور تخمین ضریب عکس العمل افقی بستر در لوله های دایره ای مدفن در خاک ارائه شده است.
۵	۱۹۶۵	Meyerhof and Baike	$k_s = \frac{E_s}{B(1-\nu_s^2)}$	برای تیرهای واقع بر بستر الاستیک با استفاده از تئوری الاستیک، پیوسته تعریف شده است
۶	۱۹۸۴	Selvadurai	$k_s = \frac{0.65}{B} \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)}$	در اصل به منظور تخمین ضریب عکس العمل افقی بستر در لوله های دایره ای مدفن در خاک ارائه شده است
۷	۱۹۹۸	Bowles	$k_s = \frac{E_s}{B'(1-\nu_s^2) m I_F I_s}$	با استفاده از تئوری الاستیسیته نیز برای تخمین Ks توصیه شده است
۸	۱۹۹۸	Bowles	$SI : k_s = 40(SF)q_a \quad kN / m^3$	برای تخمین Ks از روی مقادیر ظرفیت باربری پیشنهاد داده اند.
			$Fps : k_s = 12(SF)q_a \quad kp / ft^3$	



شکل ۵. ابعاد جعبه آزمایش

جدول ۲. مشخصات خاک مورد مطالعه

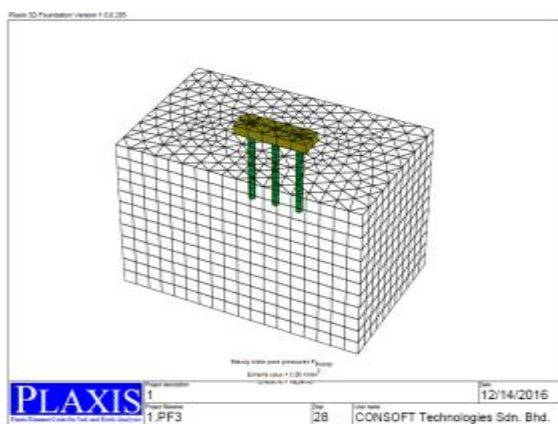
Soil name	Type1	Type2	Type3	Type4	Unit
	loose	Medium	Dense	Medium	
$E_{50}^{ref} (for \quad p_{ref} = 100kpa)$	20000	30000	40000	29560	$\frac{KN}{m^2}$
$E_{ur}^{ref} (for \quad p_{ref} = 100kpa)$	60000	90000	120000	99590	$\frac{KN}{m^2}$
$E_{oed}^{ref} (for \quad p_{ref} = 100kpa)$	20000	30000	40000	23650	$\frac{KN}{m^2}$
Cohesion c	0	0	0	0	$\frac{KN}{m^2}$
Friction angle ϕ	30	35	40	43.25	°
Dilatancy Ψ	0	5	8	15.8	
Poisson ratio ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.19	-
Power m	0.5	0.5	0.5	0.5	-
$k_0^{mc} \quad (u \sin gcap)$	0.5	0.43	0.36	0.36	-
Tensile strength	0	0	0	0.75	$\frac{KN}{m^2}$
Failure ratio	0.9	0.9	0.9	0.9	-

برای مدل‌سازی آزمایش فوق در این تحقیق از کد اجزای محدود Plaxis 3D foundation استفاده شده است. از المان با رفتار خطی برای مدل‌سازی ریزشمع و سرشمع استفاده شده است. خاک زیر پی مطابق خاک تیپ ۴ با مدل رفتاری موهرکولمب فرض شده است. محیط خشک و فاقد آب در نظر گرفته شده است. شکل ۷، شبکه‌بندی اجزای محدود مدل و شکل ۸، نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

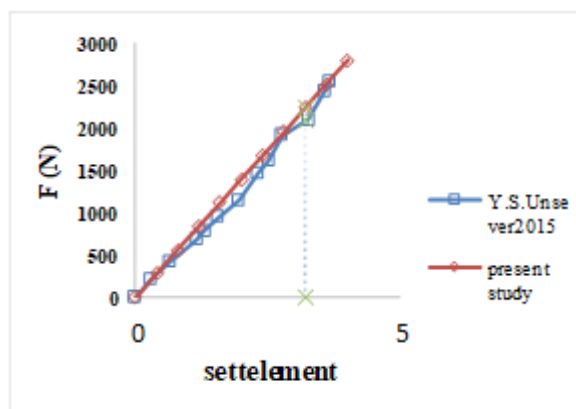
بارگذاری به صورت کرنش کنترل بوده و به صورت همزمان بار عمودی و افقی به سرشمع بتنی اعمال شده است. در این نرم‌افزار امکان بارگذاری به صورت کرنش کنترل و جانبی وجود ندارد، لذا تنها بارگذاری قائم و نشست مربوطه توسط نگارنده شبیه‌سازی شده است. خصوصیات خاک مورد آزمایش با عنوان خاک تیپ ۴ در جدول ۱ آورده شده است. خصوصیات شمع و سرشمع در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. خصوصیات شمع و سرشمع و مصالح مورد آزمایش

-	ریزشمع	سرشمع
$\gamma (N / mm^3)$	2.25×10^{-6}	2.02×10^{-5}
Young's modulus, E (N/mm ²)	54.04×10^2	48.96×10^3
Poisson's ratio ν	0.31	-



شکل ۷. شبکه اجزای محدود



شکل ۱۰. نتایج نمودار بار نشست آزمایشگاهی و نرم افزار

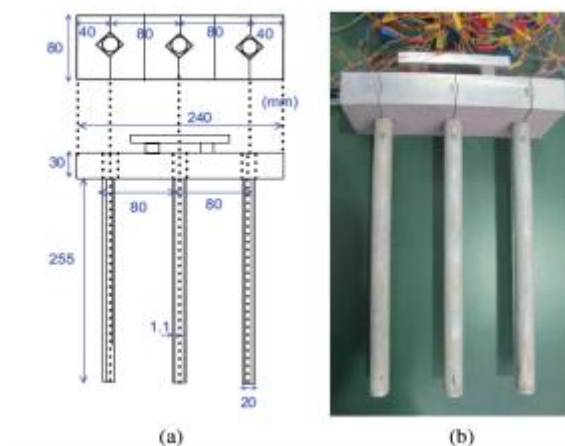
۵. آنالیز حساسیت

در راستای بررسی عوامل موثر بر ضریب واکنش بستر، تحلیل های استاتیکی در شرایط متفاوت انجام شده است. در این تحقیق به مطالعه پارامتریک پی های گسترده واقع بر خاک ماسه ای با زوایای اصطکاک متفاوت که در طبقه بندی تراکمی، به ماسه شل، متوسط و متراکم شناخته می شوند، مطابق شکل ۷ پرداخته شده است. جدول ۴ برنامه تحلیل ها را بیان می کند.

جدول ۴. برنامه تحلیل ها

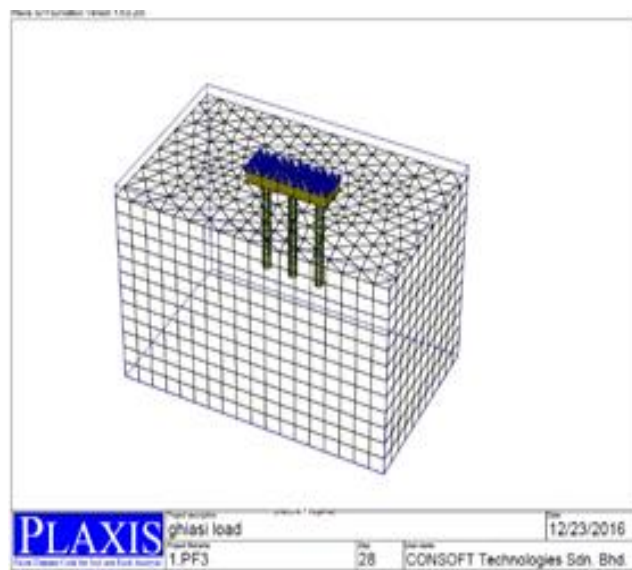
سطح آب زیر زمینی	ϕ	فاصله ریز شمع (s) (m)	طول ریز شمع (L) (m)	قطر ریز شمع (D) (m)
0,-5,- 10m	30,35,40,43.25	2,4	1,2,4,6,10	0.2
0,-5,- 10m	30,35,40,43.25	2,4	1,2,4,6,10	0.3

چهار فاز برای شبیه سازی واقعی پی و ریز شمع در مدل عددی مورد محاسبه قرار گرفته است. بنا بر توصیه راهنمای نرم افزار، در فاز اول، بارگذاری K_0 انجام شده است. در فاز دوم فعال سازی ریز شمع، در فاز سوم فعال سازی پی گسترده و در نهایت اعمال بار به میزان 100 kPa به پی گسترده برای شبیه سازی وزن سازه انجام گردید. نتایج بدست آمده به صورت گراف در ادامه نشان داده شده است.



شکل ۸. نمونه آزمایشگاهی

در مطالعه مذکور آزمایش بارگذاری با سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه انجام شده است. این سرعت بارگذاری برای جلوگیری از خرد شدگی مصالح است. شکل ۹، بارگذاری در مدل نرم افزاری را نشان می دهد.



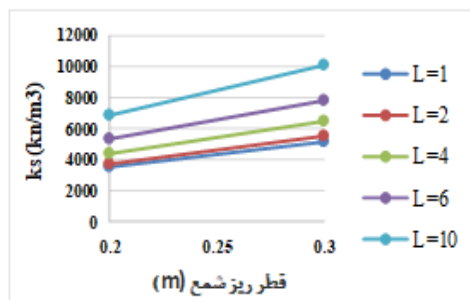
شکل ۹. مدل و نحوه بارگذاری در نرم افزار

در شکل ۱۰، نتایج بارگذاری آزمایشگاه و مدل سازی آورده شده است. بیشترین اختلاف در نشست $3/27$ میلی متر مشاهده می شود. مقدار این اختلاف $4/23$ درصد می باشد. با توجه به این مقدار و انطباق بالا در سایر نقاط نتایج حاصل از نرم افزار قابل اعتماد می باشد.

در زیرپی ناشی از تغییر شکل پی و ریزشمع افزایش یافته و ضریب عکس‌العمل بستر کاهش خواهد یافت. مطابق شکل ۱۲ در صورتیکه فاصله ریز شمع از ۲ متر به ۴ متر افزایش یابد، برای ریز شمع به طول‌های مختلف بین ۲۰ تا ۳۳ درصد ضریب واکنش بستر کاهش خواهد یافت. شیب این کاهش ضریب برای تمامی حالات یکسان است.

۳-۵. تأثیر قطر ریز شمع بر ضریب عکس‌العمل بستر

در این تحقیق ریز شمع با قطر ۰/۲ و ۰/۳ متر جهت بررسی تأثیر قطر ریزشمع بر ضریب عکس‌العمل بستر مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۱۳ تغییرات ضریب واکنش بستر با قطر ریزشمع را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. تأثیر قطر ریز شمع بر ضریب عکس‌العمل بستر در $s=2m$ و soil type1

با افزایش قطر سطح مقطع جانبی ریزشمع نیز افزایش یافته، افزایش سطح مقطع نوک ریزشمع در مقایسه با افزایش سطح جانبی قابل چشمپوشی است. این نتیجه با رابطه تجربی لیزی نیز منطبق است [۹].

$$Q_s = \pi \cdot D \cdot \sum f_{si} dl_i \quad (4)$$

D : قطر ریزشمع

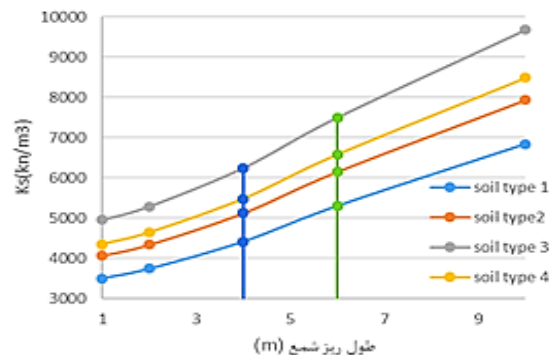
f_{si} : ضریب اصطکاک جداره ریزشمع با مصالح اطراف

dl_i : ضخامت لایه خاک

با توجه به شکل ۱۳، ضریب واکنش بستر با افزایش قطر به صورت خطی افزایش می‌یابد. مقدار این افزایش برای طول‌های مختلف ۴۷ تا ۵۵ درصد و با شیب یکسان است.

۱-۵. تأثیر طول ریز شمع بر ضریب عکس‌العمل بستر

برای مطالعه تأثیر طول ریز شمع بر ضریب عکس‌العمل بستر، ریز شمع با طول‌های ۱، ۲، ۴، ۶، ۱۰ متر استفاده شده است. شکل ۱۱ تغییرات عکس‌العمل بستر با تغییرات طول در چهار نوع خاک نشان می‌دهد.

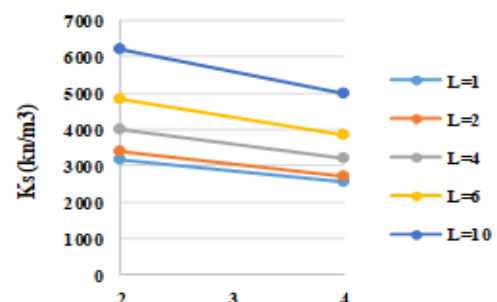


شکل ۱۱. تأثیر طول ریز شمع بر ضریب عکس‌العمل بستر در $s=2m$ و $D=0.2m$

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول ریز شمع از ۱ متر به ۶ متر، به دلیل افزایش مقاومت اصطکاکی جداره، ضریب عکس‌العمل بستر ۱/۵ برابر می‌شود.

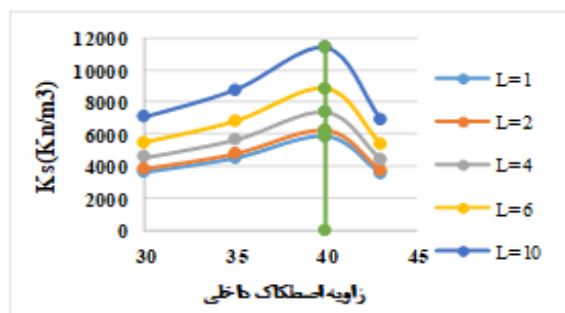
۲-۵. تأثیر فاصله بر ضریب عکس‌العمل بستر

در شکل ۱۲ به بررسی تأثیر فاصله ریزشمع بر ضریب عکس‌العمل بستر پرداخته شده است.



شکل ۱۲. تأثیر بر ضریب عکس‌العمل بستر

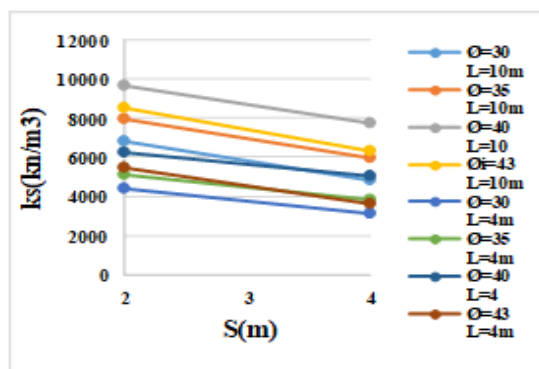
با افزایش فاصله ریزشمع سطح بارگیر هر ریزشمع افزایش می‌یابد، با افزایش سطح بارگیر و کمتر شدن تعداد ریزشمع تغییر مکان رخ داده



شکل ۱۵. تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر ضریب عکس العمل بستر $D=0.3$ $s=4m$

۵-۵. تأثیر متقابل فاصله ریز شمع و ضریب اصطکاک داخلی مصالح بر ضریب عکس العمل بستر

با توجه به اینکه هر دو پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و فاصله ریز شمع بر ضریب عکس العمل موثر هستند در این قسمت به بررسی تأثیر همزمان این دو پارامتر پرداخته شده است. در شکل ۱۶ تأثیر متقابل فاصله و طول ریز شمع بر ضریب واکنش بستر به تصویر کشیده است.



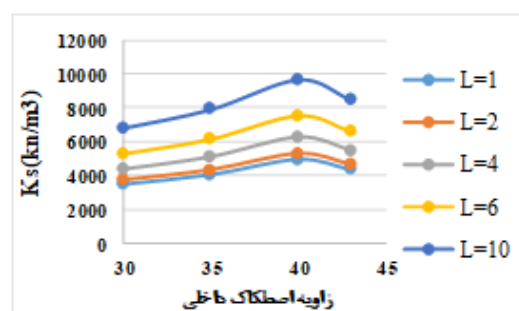
شکل ۱۶. تأثیر فاصله و طول بر ضریب واکنش بستر

نتایج این قسمت از تحقیق نشان می دهد که با دو برابر شدن فاصله ریز شمع به طول ۴ متر، ۲۰ درصد از ضریب واکنش بستر کاسته می شود، این امر هم به دلیل افزایش سطح بارگیر هر ریز شمع و افزایش نشست در زیر پی می باشد که به نوبه خود به کاهش ضریب عکس العمل بستر منجر می شود. با افزایش طول ریز شمع از ۴ متر به ۱۰ متر، ضریب واکنش بستر به دلیل کاهش نشست و انتقال تنش ناشی از بارگذاری به لایه های عمیق تر ۵۵ درصد افزایش می یابد.

۴-۵. تأثیر زاویه اصطکاک داخلی مصالح بر ضریب واکنش بستر

ریز شمع ها به لحاظ عملکردی به دو دسته تقسیم می شوند:

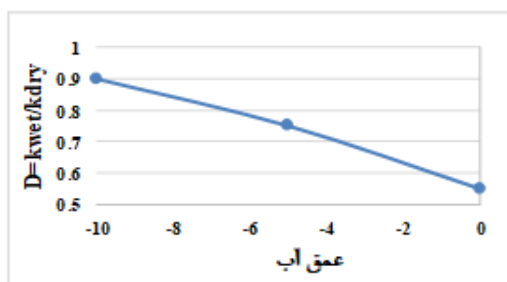
۱- ریز شمع باربر، ۲- ریز شمع تحکیمی. ریز شمع باربر با اتصال به فونداسیون برای تحمل بارهای وارده، کاهش نشست، مقاوم سازی لرزه ای بناهای موجود، افزایش ظرفیت باربری شالوده های موجود، بلند کردن و تراز کردن سازه های موجود و پایداری شیروانی ها به کار می رود. ریز شمع تحکیمی با عملکرد بهسازی خاک با هدف افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست، کنترل تراوش، پیشگیری و کاهش خطر روانگرایی، بهسازی خاک های مسئله دار، پایداری سازی شیروانی و گود برداری ها بکار می رود. در این تحقیق ریز شمع به صورت تحکیمی مدل شده است. شکل ۱۴ و ۱۵، تأثیر زاویه اصطکاک بر ضریب واکنش بستر را نشان می دهند.



شکل ۱۴. تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر ضریب عکس العمل بستر در $D=0.2m$ بستر $s=2$

مطابق با رابطه تجربی لیزی با افزایش زاویه اصطکاک ضریب اندرکنش بین ریز شمع و خاک نیز افزایش یافته و نشست کاهش خواهد یافت. شکل ۱۴ و ۱۵ نشان می دهد افزایش اصطکاک تا حدی باعث افزایش ضریب واکنش بستر می شود و در زاویه اصطکاک داخلی بیشتر از ۴۰ درجه، مقدار ضریب عکس العمل بستر کاهش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت استفاده از ریز شمع در خاک های متراکم تر که سختی بالایی دارند، به دلیل اینکه اصطکاک خاک و شمع کمتر از اصطکاک خاک می باشد، باعث کاهش ضریب عکس العمل بستر می شود.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد، در تراز ۱۰-، ضریب واکنش بستر نسبت به حالت خشک ۱۰ درصد کاسته می‌شود، با قرارگیری تراز آب زیرزمینی بر سطح زمین، ضریب واکنش بستر نسبت به حالت خشک، ۴۵ درصد کاسته می‌شود و نسبت کاهش ضریب واکنش بستر در تراز ۵- به تراز ۰، ۲۵ درصد می‌باشد. شکل ۱۹ شیب کاهش ضریب عکس‌العمل بستر خاک در حالت مرطوب نسبت به حالت خشک به ازای عمق متفاوت آب را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹. نسبت کاهش ضریب عکس‌العمل بستر خاک مرطوب به خشک
soil type 4, s=2, L=1, D=0.2

۶. نتیجه‌گیری

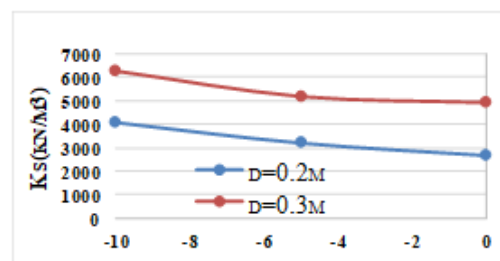
۱- نتایج نشان داد با افزایش قطر ریزشمع، ضریب واکنش بستر ۴۷ تا ۵۵ درصد افزایش خواهد یافت، این افزایش ناشی از رشد سختی و صلبیت محوری ریزشمع بوده، که به نوبه خود افزایش سختی خاک و پی سازه را به همراه دارد. این افزایش انطباق بالایی با رابطه لیزی نشان می‌دهد.

۲- با دو برابر شدن فاصله ریز شمع، به دلیل افزایش سطح بارگیر هر ریزشمع ضریب واکنش بستر، ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت.

۳- برای مطالعه اثر طول ریزشمع بر ضریب واکنش بستر، پنج طول مختلف، ۱۰، ۱۴، ۱۶، ۲۰، ۲۴ متر مدل‌سازی عددی گردید. نتایج نشان داد که ضریب واکنش بستر در هر دو واحد افزایش طول ریزشمع، ۲۶ درصد می‌باشد. این امر هم می‌تواند ناشی از افزایش سطح جانبی ریزشمع باشد.

همچنین شیب کاهش ضریب بستر در چهار تیپ خاک با افزایش فاصله تقریباً یکسان می‌باشد.

۵-۶. تأثیر سطح آب زیرزمینی بر ضریب واکنش بستر در قطره‌های مختلف در محاسبه ظرفیت نهایی بارگذاری خاک و تعیین مقاومت مجاز خاک باید تغییرات سطح آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته و در محاسبه مقاومت مجاز خاک، بالاترین سطح آب زیرزمینی که می‌تواند در دوران عمر ساختمان به آن سطح برسد، در نظر گرفته شود. در برآورد بالاترین سطح آب زیرزمینی که در طول عمر سازه ممکن است بوجود آید، عواملی همچون بالا آمدن موقت سطح آب زیرزمینی، بارندگی شدید در محل، امکان وقوع سیلاب و عوامل مشابه دیگر، باید مورد توجه طراح سازه و ژئوتکنیک قرار بگیرد. بطور کلی خاکی که به حالت غرقاب درآید چسبندگی ظاهری خود را از دست داده و وزن مخصوص مؤثر خاک غرقاب بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. از آنجایی که ظرفیت بارگذاری خاک بستگی به چسبندگی و وزن مخصوص مؤثر خاک دارد، لذا وقتی سطح آب زیرزمینی بالا بیاید، ظرفیت بارگذاری نهایی خاک کم و نشست سازه افزایش می‌یابد. بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در انواعی از کانی‌های خاک‌های رسی سبب تورم دانه‌های خاک و در خاک‌های درشت دانه سبب تقلیل زاویه اصطکاک داخلی دانه‌های خاک می‌شود که همگی منجر به کم شدن ظرفیت نهایی بارگذاری خاک می‌شوند. در شکل ۱۷ ضریب واکنش بستر برای ریز شمع به طول ۱ متر و فاصله ۲ متر در خاک تیپ ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۷. تأثیر تراز آب بر ضریب واکنش بستر در soil type 4, s=2, L=1

منابع

- [1] E.winkler,(1983)"Die Lehre von Elastizitat and festigkeit(on elasticity and fixity)," Praguc, 1987, p-182
- [2] Terzaghi K,(1955) "Evaluation of coefficient of subgrade reaction". Geotechnique, Vol. 5, No. 4, PP. 297-326
- [3] Scott R.F, (1981) Foundation Analysis. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering
- [4] Horvath J. S, "Modulus of Subgrade Reaction: New Perspective". J. Geotech. Engrg., ASCE, 1983, Vol. 109, Issue 12, pp.1591-1596
- [5] Abd Elsamee W.N," An Experimental Study on the Effect of Foundation Depth, Size and Shape on Subgrade Reaction of Cohesionless Soil" , Scientific Research An Academic Publisher, 2013,5, pp. 785-795.
- [6] تورانی سماندرا؛ کلانتری فرزین. (۱۳۸۹) "بررسی اثر ابعاد شالوده بر تعیین ضریب عکس العمل بستر"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [7] Ismael N.F, (1996)"Loading tests on circular and ring plates in very dense cemented sands" J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 122, Issue 4, pp. 281-287.
- [8] Lee Sungjune, and Joon-Shik Moon,(2016) "Effect of Interactions between Piled Raft Components and Soil on behavior of Piled Raft Foundation" KSCE Journal of Civil Engineering , Korean Society of Civil Engineers.
- [9] Bowles, J. E., (1998)"Foundation Analysis and Design", 6th ed., McGraw-Hill International Press.
- [10] Unsever, Y. S., Matsumoto, T., & Özkan, M. Y. (2015). Numerical analyses of load tests on model foundations in dry sand. Computers and Geotechnics, 63, 255-266.
- ۴- ترازهای آب ۰-، ۵-، ۱۰- در تحلیل ها مدنظر قرار داده شد، نتایج نشان داد که در تراز ۱۰-، ضریب واکنش بستر نسبت به حالت خشک ۱۰ درصد کاسته می شود، با قرارگیری تراز آب زیرزمینی بر سطح زمین، ضریب واکنش بستر نسبت به حالت خشک، ۴۵ درصد کاسته می شود. نسبت کاهش ضریب واکنش بستر در تراز ۵- به تراز ۰، ۲۵ درصد می باشد.
- ۵- چهار نوع متفاوت از خاک مورد مطالعه عددی قرار گرفت، از مهم ترین تفاوت این خاک ها زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیک می باشد، مطابق با رابطه تجربی لیزی با افزایش زاویه اصطکاک ضریب اندرکنش بین ریزشمع و خاک نیز افزایش یافته و نشست کاهش خواهد یافت. نتایج نشان داد که افزایش زاویه اصطکاک همیشه منجر به افزایش ضریب واکنش بستر نخواهد شد و با افزایش زاویه اصطکاک بیشتر از ۴۰ درجه ضریب واکنش بستر کاهش خواهد یافت. می توان نتیجه گرفت استفاده از ریز شمع در خاک های متراکم تر که سختی بالایی دارند، باعث کاهش ظرفیت باربری و در نتیجه کاهش ضریب عکس العمل بستر خاک می گردد.
- ۶- مقایسه ضریب واکنش بستر با رابطه تجربی وسیک نشان داد که این ضریب با استفاده از ریز شمع افزایش می یابد و برای ریزشمع با طول ۱ متر، ضریب عکس العمل بستر، ۱.۶ برابر رابطه وسیک می باشد.