



# Investigation the Effect of Sludge Cake and Sewage Sludge on Clay Soil Parameters: A Numerical Approach

Nemat Allah Samiei Paghaleh, Mohammad Reza Boroomand \*, Mahmoud Reza Shahverdi

Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

**ABSTRACT:** This study investigates the influence of sludge cake and wastewater treatment plant effluent on the geotechnical parameters of clayey soils using a three-dimensional finite element method implemented in PLAXIS 3D software. Sixteen different scenarios were simulated, considering two curing periods (7 and 28 days) and varying sludge content percentages (0-16%). The results demonstrate that the addition of sludge cake significantly enhances the bearing capacity of the foundation, with the optimum sludge content identified as 14%. At this percentage, the bearing capacity increased by approximately 54% compared to pure clay, while the curing period exhibited negligible impact. The findings suggest that sludge cake can be effectively utilized as a soil stabilizer in geotechnical applications, offering both environmental and engineering benefits.

## Review History:

Received: May, 16, 2024

Revised: May, 22, 2025

Accepted: Jan. 17, 2026

Available Online: Jan. 30, 2026

## Keywords:

Sludge Cake

Wastewater Effluent

Soil Improvement

Bearing Capacity

Numerical Modeling

PLAXIS 3D

## 1- Introduction

The rapid growth of urbanization and population has led to increased water consumption and subsequent wastewater production, resulting in large quantities of sludge as a by-product of treatment processes. The disposal of sludge poses significant environmental challenges, including soil contamination and groundwater pollution [1-3]. Recent studies have explored the potential reuse of sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to traditional disposal methods [4-6].

Sludge from wastewater treatment plants has been investigated for its potential to improve soil properties. For instance, Arulrajah et al. (2013) reported that compacted sludge exhibits relatively high internal friction angles and moderate cohesion [6]. Similarly, Montalvan et al. (2019) observed that the addition of water treatment sludge (WTS) reduced cohesion but increased the internal friction angle of soil mixtures [7]. However, the effect of sludge content and curing time on the bearing capacity of the clayey soil has not been extensively studied through numerical modeling.

This research aims to fill this gap by evaluating the effect of sludge cake addition on the bearing capacity of clayey soil foundations using advanced finite element analysis. The study also examines the influence of curing time and

identifies the optimal sludge content for maximum bearing capacity improvement.

## 2- Materials and Methods

The soil used in this study was collected from a depth of 0.5 to 1 meter in Tehran, Iran, and classified as low plasticity clay (CL) according to ASTM standards. The sludge was obtained from Shahid Mahallati wastewater treatment plant in Tehran. The chemical composition of the sludge was analyzed using ICP-MASS, confirming that all elements were within permissible limits (Table2).

The numerical modeling was performed using PLAXIS 3D (2022), a finite element-based software widely used in geotechnical engineering. The Mohr-Coulomb constitutive model was adopted to stimulate soil behavior. The input parameters included cohesion, internal friction angle, elasticity modulus, Poisson's ratio, shear modulus, and dilation angle, all derived from laboratory tests (direct shear, unconfined compression, and chemical analysis).

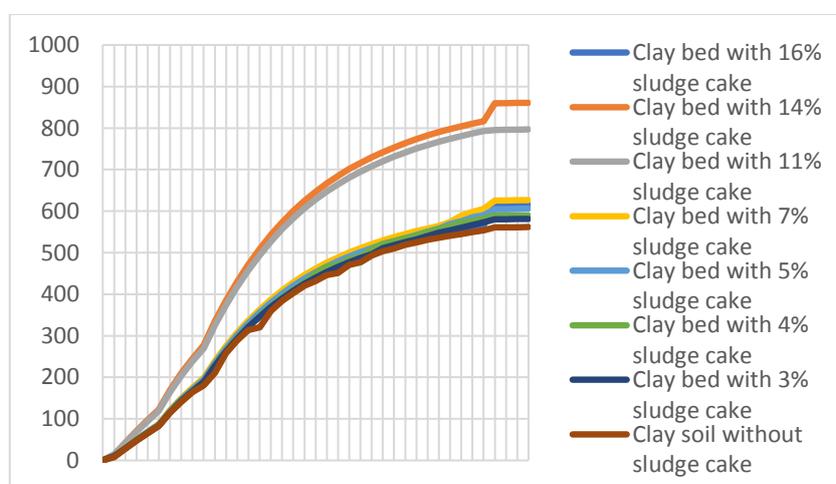
Sixteen models were developed with sludge contents of 0%, 3%, 4%, 5%, 7%, 11%, 14%, 16%, and two curing periods (7 and 28 days). The foundation was modeled as a square footing with dimensions of 2.5 m × 2.5 m, resting on a 4 m thick clay layer. A very fine mesh with approximately

\*Corresponding author's email: boroomand@tafreshu.ac.ir



**Table 1. Geotechnical properties of soil sludge mixtures for two curing periods (7 and 28 days).**

Sample	Sludge Content (%)	Curing Period (days)	Internal Friction Angle (°)	Cohesion (KPa)	Elasticity Modulus (MPa)	Poisson's Ratio
1	0	7	24.7	0.14	9.77	0.3
2	3	7	25.1	0.10	6.70	0.3
3	14	7	33.2	0.05	9.59	0.3
4	16	7	30.4	0.06	16.61	0.3
5	0	28	24.7	0.14	9.77	0.3
6	3	28	25.1	0.10	6.70	0.3
7	14	28	33.2	0.05	9.59	0.3
8	16	28	30.4	0.06	16.61	0.3



**Fig. 1. Bearing capacity vs. settlement for 7-day curing.**

47,000 elements was used to ensure accuracy.

**3- Results and Discussion**

The numerical results indicate a consistent increase in bearing capacity with higher sludge content, regardless of the curing period. Figures 1 and 2 illustrate the load settlement curves for different sludge percentages under 7-day and 28-day curing, respectively.

The optimum sludge content was found to be 14%, which resulted in a bearing capacity of 800 KN at 6 cm settlement, representing a 54% increase compared to pure clay. Even a small addition of 3% sludge improved the bearing capacity by 3.5%. Beyond the optimum point (16% sludge), the bearing capacity decreased but remained higher than that of pure clay.

The internal friction angle increased with sludge addition, while cohesion decreased, consistent with findings by Montalvan et al. (2019) [7]. The curing period (7 vs. 28 days) did not significantly affect the results, suggesting that chemical reactions between sludge and soil were minimal within this timeframe.

**Table 2. Summary of bearing capacity improvement.**

Sludge Content (%)	Bearing Capacity (KN)	Improvement (%)
0	516	-
3	534	3.5
14	800	54.0
16	560	8.5

**4- Conclusion**

This study demonstrates that sludge cake can effectively enhance the bearing capacity of clayey soils, with 14% identified as the optimum content. The curing period had negligible influence on the results, indicating that sludge stabilization does not require extended curing for practical

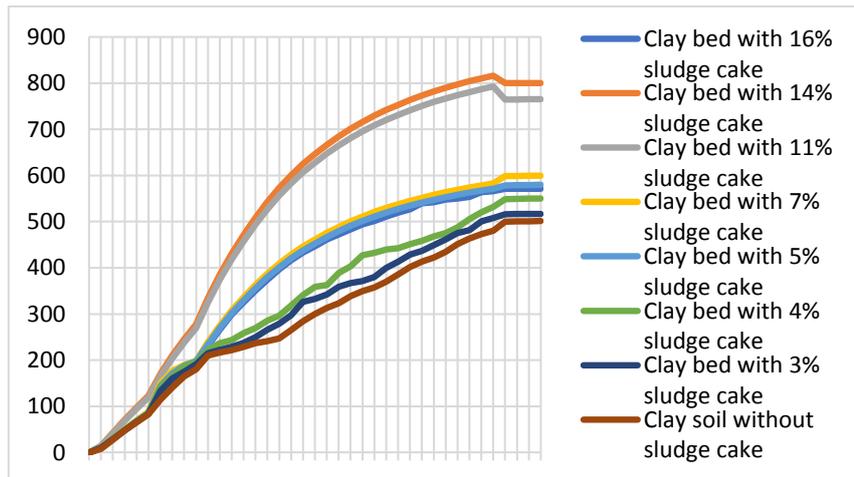


Fig. 2. Bearing capacity vs. settlement for 28-day curing.

applications. The use of sludge in geotechnical projects not only improves soil performance but also contributes to sustainable waste management by repurposing a problematic by-product.

The findings align with previous research on sludge reuse in geotechnics and provide a numerical basis for its application in foundation engineering. Future studies could explore the long-term durability and environmental impacts of sludge-stabilized soils under field conditions.

### References

- [1] R. Lai, Diggingdeeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems, *Global Change Biology*, 24(8) (2018) 3285–3301.
- [2] R. Lai, Soil carbon sequestration to mitigate climate change *Geoderma*, 123(1-2) (2004) 1–22.
- [3] S.R. Carpenter, DeFries, T., Mooney, H. A., Polasky, S., Reid, W. V., & Scholes, R. J., Millennium Ecosystem Assessment: Research needs, *Science*, 314(5797) (2006) 257–258.
- [4] C. Xu, Chen, W., & Hong, J., Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China, *Journal of Cleaner Production* 67 (2014) 79–87.
- [5] B.C. O’Kelly, Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling *Geotechnical Research*, 3(4) (2016) 148–179.
- [6] A. Arulrajah, Piratheepan, J., Disfani, M. M., & Bo, M. W., Geotechnical and geo-environmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(8) (2013) 1077–1088.
- [7] E.L. Montalvan, & Boscov, M. E. G., Geotechnical characterization of a soil-water treatment sludge mixture, *Geo-Chicago 2016*, (2016) 418–427.



## بررسی تاثیر کیک لجن و پساب تصفیه خانه ها بر پارامترهای خاک های رسی : روش عددی

نعمت اله سمیعی پاقلعه، محمدرضا برومند\*<sup>id</sup>، محمودرضا شاهرودی<sup>id</sup>  
گروه مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷  
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱  
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

### کلمات کلیدی:

کیک لجن  
پساب تصفیه خانه  
بهسازی خاک

**خلاصه:** با گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت، به تبع مصرف آب نیز افزایش می یابد که این افزایش مصرف آب، منجر به افزایش تولید فاضلاب و نهایتاً تصفیه فاضلاب باعث هدایت مسیر به سوی تولید یک سری مواد زائد تحت عنوان کیک لجن می شود. هدف از این مطالعه بررسی تاثیر کیک لجن و پساب تصفیه خانه ها بر پارامترهای خاک های رسی می باشد. به منظور ارزیابی دقیق اثر استفاده از کیک لجن بر ظرفیت باربری پی و همچنین تاثیر دوره عمل آوری بر ترکیب کیک لجن و خاک رس بستر پی، شانزده حالت مختلف بررسی شد. لازم به ذکر است که مدل های اول الی هشتم در دوره عمل آوری ۷ روزه و مدل های نهم الی شانزدهم در دوره عمل آوری ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج ارائه شده می توان دریافت که در هر دو دوره عمل آوری با افزایش میزان کیک لجن موجود در خاک، ظرفیت باربری پی نیز افزایش پیدا کرده است به عبارت دیگر پارامتر درصد کیک لجن موجود در بستر رسی پی در مقایسه با دوره عمل آوری از تاثیرگذاری بسیار بیشتری بر ظرفیت باربری پی برخوردار است. در مقابل افزایش مدت زمان عمل آوری تاثیر چشمگیری بر پارامترهای مورد بررسی نداشته است. نکته حائز اهمیت این است که حتی افزودن مقادیر اندک کیک لجن به خاک رس نیز باعث افزایش ظرفیت باربری پی شده است؛ به طوری که ترکیب ۳ درصد کیک لجن با خاک رس بستر پی، که به ازای نشست ۶ سانتی متر، ظرفیت باربری برابر ۵۱۶ کیلو نیوتن را نشان می دهد، نشان از رشد ۳۵ درصدی ظرفیت باربری پی در مقایسه با بستر رسی خالص، می دهد. همچنین ارزیابی نتایج نشان می دهد ترکیب ۱۴ درصد لجن با خاک رس بستر پی که به ازای نشست ۶ سانتی متر، ظرفیت باربری ۸۰۰ کیلو نیوتن را نمایش داد، منجر به رشد ۵۴ درصدی ظرفیت باربری پی شده است که بیانگر بیشترین افزایش ظرفیت باربری پی به ازای نشست ۶ سانتی متر، در بین سایر درصد ترکیبات است و می توان آن را به عنوان درصد بهینه معرفی نمود.

### ۱- مقدمه

تاثیرات مخرب زیست محیطی بسیار زیادی را از خود در محیط خاک به جا می گذارد. به عبارت دیگر با ورود فاضلاب به خاک عملکرد طبیعی خاک تغییر کرده و میزان آلودگی افزایش می یابد؛ این آلودگی می تواند به کاهش کیفیت خاک و آلودگی منابع آب زیرزمینی منجر شود. در نتیجه چنانچه فاضلاب به صورت غلط و بدون تصفیه دفع شود، ممکن است مخاطرات زیست محیطی فراوانی پدید آورده و سلامت انسان ها را تحت تأثیر قرار دهد [۵-۷]. مهم ترین و موثرترین راه حل، اجرای فرآیند تصفیه پساب است [۸-۱۰]. به طور کلی، پسماندهایی که به صورت جامد، نیمه جامد و یا دوغاب که در تصفیه خانه های فاضلاب به عنوان محصول جانبی فرایندهای تصفیه فاضلاب تولید می گردند، لجن نامیده می شوند. لجن فاضلاب در مراحل مختلف تصفیه از جمله مرحله تصفیه فیزیکی، تصفیه شیمیایی و تصفیه بیولوژیکی تولید می شود در نتیجه لجن تولید شده در مراحل مختلف

خاک یکی از مهم ترین و ارزشمندترین منابع طبیعی زمین است و در زندگی انسان از جایگاه ویژه ای برخوردار است. این اهمیت از ویژگی ها و کاربردهای متعدد آن نشأت می گیرد. خاک به عنوان بستری برای زیرساخت های شهری و ساختمانی به کار گرفته می شود و با در نظر گرفتن این ویژگی که خاک از مقاومت و ظرفیت باربری قابل قبولی برخوردار است، انواع سازه ها مانند خانه ها، جاده ها، پل ها و بنادر روی خاک احداث می گردند [۱-۴].

سلامت خاک به عنوان عامل حیاتی در اکوسیستم، تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار می گیرد. یکی از این عوامل نشست فاضلاب در خاک است. فاضلاب به عنوان یکی از بزرگ ترین عوامل تهدیدکننده سلامت خاک،

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: Boroomand@tafreshu.ac.ir



کاربردهای متفاوتی دارد [۱۱-۱۳].

مطالعات انجام شده پیشین نشان می دهد، یکی از کاربردهای جالب لجن، استفاده از آن به عنوان منبع سوخت جایگزین در صنعت سیمان است زیرا لجن فاضلاب دارای ارزش حرارتی خالص نسبتاً بالاتر و همچنین ضریب انتشار دی اکسید کربن کمتری در مقایسه با زغال سنگ است، همچنین با توجه به اینکه صنعت سیمان تقریباً ۵ درصد از انتشار  $CO_2$  را در سراسر جهان تشکیل می دهد، لذا استفاده از یک لجن فاضلاب شهری در کوره های سیمان می تواند اتکالی صنعت به سوخت های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه ای را کاهش دهد [۱۴]. استفاده مجدد از لجن تصفیه خانه به عنوان ماده ورودی برای فرآیندهای دیگر، به چرخه سیستم اقتصادی فعلی به سمت سیستمی پایدارتر کمک می کند [۱۵]. اگرچه هنوز در عمل رایج نیست، اما استفاده مجدد از لجن تصفیه خانه ها در کارهای ژئوتکنیکی به عنوان یک هدف مثبت زیست محیطی توسط چندین نویسنده مورد بررسی قرار گرفته است که علاوه بر کاهش اثرات زیست محیطی مربوط به دفع زباله، استفاده مجدد از لجن تصفیه خانه ها، به حفظ رسوبات طبیعی خاک نیز کمک می کند زیرا حجم این منبع مورد نیاز در کارهای ژئوتکنیکی را کاهش می دهد [۱۶]. همچنین نتایج تحقیقات آرولجاها و همکاران (۲۰۱۲) [۱۷] نشان داد نمونه های جامد زیستی فشرده، زوایای اصطکاک داخلی نسبتاً بالا، چسبندگی متوسط و پتانسیل تغییر شکل قابل توجهی دارد؛ همچنین این مواد فاقد ظرفیت باربری کافی برای استفاده از آن به عنوان ماده پرکننده است. طبق تحقیقات گولو و گریسکن (۲۰۱۲) [۱۸] زاویه اصطکاک داخلی خاک در بیشتر دوزهای لجن افزایش یافت و از نمونه های دارای حداقل ۵۰ درصد لجن می توان به عنوان مصالح بستر استفاده کرد. طبق مطالعات مونتالوان و همکاران (۲۰۱۹) [۱۹] با افزودن لجن تصفیه آب (WTS) چسبندگی موثر کاهش و زاویه اصطکاک موثر افزایش یافت. با این حال بسته به الزامات سازه، همچنان می توانند برای کارهای خاکی مجاز باشند. در این راستا محققان بسیاری به تحقیق در این زمینه پرداختند. محمدی و برومند در سال ۲۰۲۱ [۲۱] به ارزیابی اثر یک ماده بازیافتی از جنس گچ بر بهبود پارامترهای مقاومتی خاک پرداختند. آنها دریافتند که با افزودن باسانیت (همراه با سیمان و آهک)، مقاومت فشاری محصور نشده خاک های تثبیت شده به طور قابل توجهی از ۳۷ کیلو پاسکال به ۶۰۳ کیلو پاسکال افزایش یافت. ایشان در تحقیق دیگری به بررسی تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک و ظرفیت باربری پرداختند (محمدی، عبادی و برومند، ۲۰۱۹) [۲۱]. بوسکوف و همکاران (۲۰۲۱) [۲۲] نشان دادند از ترکیب مخلوط آهک، لجن تصفیه

آب و پودر سنگ می توان به عنوان پوشش روزانه و میانی محل های دفن زباله استفاده کرد. مطالعات جادهاو و همکاران (۲۰۲۱) [۲۳] نشان داد بریکت های ساخته شده از یک لجن تصفیه خانه و دانه های نشاسته دارای ارزش حرارتی بهتر از چوب و کمتر از زغال سنگ است و همچنین هزینه بریکت کمتر از سوخت معمولی با ارزش حرارتی یکسان است. فیوری و همکاران (۲۰۲۲) [۲۴] در مطالعه ای استفاده از ترکیب آلومینیوم و لجن آهن را در خاک های مختلف ارزیابی کردند. نتایج ضمن تأیید مناسب بودن آن ها برای راه سازی نشان داد که تمام درصد لجن های آلومینیومی و آهنی موجود در خاک های ماسه ای رسی و خاک شنی استانداردهای مکانیکی برای استفاده در خاکریز را برآورده می کنند. علاوه بر این لجن آلومینیومی وارد شده در خاک های شنی برای استفاده در بستر روسازی مناسب است. نتایج تحقیق دان بادو و ساهین (۲۰۲۲) [۲۵] نشان داد، اصلاح و بهسازی خاک های رسی با روش های مختلف، می تواند به افزایش بهره وری و کاهش فشار منابع طبیعی کمک نماید. از طرفی، مطالعه کاظم و همکاران (۲۰۲۲) [۲۶] بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک های رسی اصلاح شده با خاکستر لجن فاضلاب، نشان داد خاکستر لجن فاضلاب به عنوان یک ماده تثبیت کننده خاک های رسی، گزینه ای اقتصادی و دوستدار محیط زیست محسوب می شود. همچنین، مقدار ۱۰ درصد ماده افزودنی با دوره عمل آوری ۲۸ روزه، بهینه ترین نتیجه را در مقایسه با سایر نتایج نشان داد. همچنین ویجایا و آریا در سال (۲۰۲۲) [۲۷] در مطالعه ای، به بررسی تاثیر لجن فاضلاب بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک های رسی پرداختند که نتایج نشان داد لجن فاضلاب تا یک محدوده مشخص، خواص ژئوتکنیکی خاک های رسی را بهبود می بخشد و می توان از آن به عنوان روشی مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای تثبیت خاک استفاده کرد. بر اساس تحقیقات آلین و همکاران (۲۰۲۲) [۲۸] افزودن لجن به خاک منجر به کاهش وزن مخصوص جامدات و افزایش شاخص پلاستیسیته شد. هدایت هیدرولیکی مخلوط ها بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر خاک بود. مطالعه ماریچوری و همکاران (۲۰۲۳) [۲۹] با هدف ارزیابی لجن تصفیه خانه به عنوان ماده لاینر نشان داد لجن تصفیه خانه بر رفتار پلاستیسیته تأثیر می گذارد و به نظر می رسد ادغام آن با خاک، به تثبیت خاک کمک می کند.

به طور کلی، لجن و پساب تصفیه خانه ها برای محیط زیست یک معضل بسیار بزرگ و چالش برانگیز محسوب می شوند؛ زیرا علاوه بر این که دفن و انتقال لجن ها فرآیندی پرهزینه و زمان بر محسوب می شود، تعداد قابل توجهی از پرسنل و ماشین آلات سنگین تصفیه خانه را نیز به صورت

فشاری محصور نشده و مقاومت برشی) استفاده شده است زیرا نتایج آزمایش های انجام شده به صورت مستقیم، مدول الاستیسیته را ارائه نمی دهد لذا با استفاده روابط ریاضی موجود، در نهایت مدول الاستیسیته به دست آمد و از این عدد به عنوان پارامتر ورودی در مدلسازی استفاده شد. لازم به ذکر است، بخش الاستیک خطی موهر کولمب بر پایه قانون هوک الاستیک غیرچرخشی است. در حقیقت، قانون هوک برای مرتبط نمودن نسبت تنش به کرنش الاستیک استفاده می شود.

### ۳- ارزیابی اثر استفاده از کیک لجن بر ظرفیت باربری پی با استفاده از روش عددی

مطالعه و ارزیابی تاثیر افزودن کیک لجن به خاک رس بر ظرفیت باربری پی، با استفاده از نرم افزار مبتنی بر روش اجزا محدود پلکسیس سه بعدی (۲۰۲۲) بررسی شده است. روش اجزای محدود یک روش عددی برای حل مسائل مهندسی و فیزیک ریاضی است. به طور خلاصه، برای مسائلی که شامل هندسه ها، بارگذاری ها و خواص مواد پیچیده است، معمولاً نمی توان به حل های تحلیلی ریاضی دست یافت، از این رو برای حل های قابل قبول باید به روش های عددی، مانند روش اجزای محدود تکیه کرد. فرمول بندی المان محدود مسئله به جای نیاز به حل معادلات دیفرانسیل، منجر به یک سیستم معادلات جبری همزمان برای حل می شود. این روش های عددی، مقادیر تقریبی مجهولات را در تعداد گسسته ای از نقاط در پیوستار ارائه می دهد؛ از همین رو فرآیند مدلسازی یک جسم با تقسیم آن به یک سیستم معادل از اجسام یا واحدهای کوچکتر (المان محدود) که در نقاط مشترک با دو یا چند المان (نقاط یا گره های گره ای) و یا خطوط مرزی یا سطوح به هم مرتبط هستند، گسسته سازی نامیده می شود. نرم افزار پلکسیس (PLAXIS) یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای مبتنی بر روش اجزا محدود می باشد. در روش اجزای محدود به جای حل مسئله برای کل جسم در یک عمل، معادلات

روزانه درگیر می کند. در حقیقت، هدف از این مطالعه، ارزیابی تاثیر افزودن کیک لجن به خاک رس، بر ظرفیت باربری پی می باشد که با استفاده از نرم افزار مبتنی بر روش اجزا محدود پلکسیس سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، با استفاده از نتایج بدست آمده از طریق آزمایش های آزمایشگاهی و به منظور بررسی پدیده از منظر اجرایی، مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار پلکسیس سه بعدی و به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲- مواد و روش ها

نمونه خاک از عمق نیم تا یک متر با استفاده از مغزه گیر اخذ شده و سطح سفره آب زیرزمینی ۳۸ متر است. به دلیل عدم وجود سفره آب زیرزمینی، نیازی به اشباع کردن خاک نبوده و خاک در حالت طبیعی به کار گرفته شد. پس از انتقال نمونه به آزمایشگاه وزن مخصوص طبیعی ( $\gamma_p$ ) با استفاده از آزمایش پارافن (موم گیری) تعیین شد و رطوبت ( $w$ ) خاک نیز از طریق وزن کشی خاک قبل و بعد از قرارگیری نمونه در داخل آون محاسبه شد.

لجن به کار گرفته شده در این پژوهش از نوع لجن فاضلاب شهری بوده که متعلق به تصفیه خانه شهید محلاتی تهران بوده و همچنین لجن حاضر هیچ گونه مواد منعقدکننده ای ندارد. از طرف دیگر، نظر به اینکه پارامتر های ورودی تحقیق مبتنی بر آزمایش های آزمایشگاهی برش مستقیم، تک محوری و ICP-MASS بوده است لذا با توجه به داده ها و شرایط موجود از مدل رفتاری موهر کولمب جهت شبیه سازی پدیده مورد مطالعه استفاده شده است. همچنین پارامتر های ورودی در نرم افزار پلکسیس شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مدول برشی و زاویه اتساع بوده است. نکته حائز اهمیت آن است که برای بدست آوردن مدول الاستیسیته از نتایج حاصل از آزمایش تک محوری (مقاومت

#### جدول ۱. مشخصات پایه خاک.

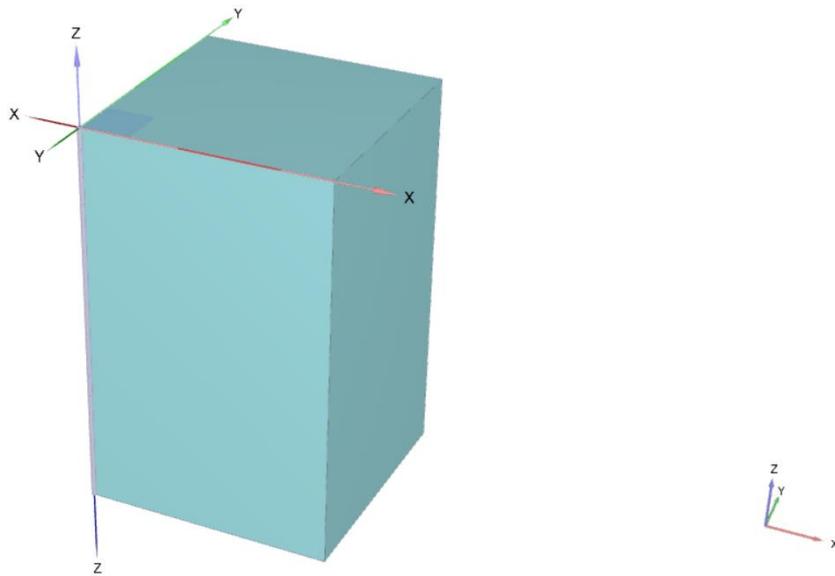
Table 1. Basic properties of the soil.

D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	شاخص خمیری (PI)	حد روانی (LL)	حد خمیری (PL)	وزن مخصوص بیشینه	رطوبت بهینه	نوع خاک	مصالح
۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۸۱	۱۸	۳۹	۲۱	۱/۸۳	٪۱۰	رس با خصوصیات خمیری کم (CL)	خاک استان تهران

جدول ۲. مشخصات پایه لجن.

Table 2. Basic properties of the sludge.

نام عنصر شیمیایی	نماد شیمیایی	مقدار	نوع آزمایش
نقره	Ag	<۱ (ppm)	ICP-Mass
آلومینیوم	Al	۰/۵ (%)	ICP-Mass
آرسنیک	As	۷ (ppm)	ICP-Mass
باریم	Ba	۱۳۶ (ppm)	ICP-Mass
برلیوم	Be	<۱ (ppm)	ICP-Mass
بیسموت	Bi	۹ (ppm)	ICP-Mass
کلسیم	Ca	۱/۹۵ (%)	ICP-Mass
کادمیوم	Cd	<۱ (ppm)	ICP-Mass
سرب	Ce	<۱ (ppm)	ICP-Mass
کوبالت	Co	۲ (ppm)	ICP-Mass
کروم	Cr	۱۶ (ppm)	ICP-Mass
سزیم	Cs	<۱ (ppm)	ICP-Mass
مس	Cu	۱۶۵ (ppm)	ICP-Mass
دیسپروزیوم	Dy	<۱ (ppm)	ICP-Mass
اریوم	Er	<۱ (ppm)	ICP-Mass
یورویوم	Eu	<۱ (ppm)	ICP-Mass
آهن	Fe	۱/۲ (%)	ICP-Mass
گالیوم	Ga	<۱ (ppm)	ICP-Mass
گادولینیم	Gd	<۱ (ppm)	ICP-Mass
هافنیم	Hf	<۱ (ppm)	ICP-Mass
جیوه	Hg	<۱ (ppm)	ICP-Mass
هولمیم	Ho	<۱ (ppm)	ICP-Mass
ایندیوم	In	<۱ (ppm)	ICP-Mass
پتاسیم	K	۰/۲۱ (%)	ICP-Mass
لانتان	La	۳/۵ (ppm)	ICP-Mass
لیتیوم	Li	<۱ (ppm)	ICP-Mass
لوتتیم	Lu	<۱ (ppm)	ICP-Mass
منیزیم	Mg	۰/۲۵ (%)	ICP-Mass
منگنز	Mn	۱۹۵ (ppm)	ICP-Mass
مولیبدن	Mo	۷ (ppm)	ICP-Mass
سدیم	Na	۰/۲ (%)	ICP-Mass



شکل ۱. هندسه کلی مدل.

Fig. 1. General geometry of the model.

کنار محیط خاک قرار گیرد و در صورت امکان واکنش صورت پذیرد و به همین منظور نمونه ۲۸ روزه ساخته شد تا در صورت وجود، تاثیرات واکنش نمایان شود. در جدول ۳ بحث حساسیت سنجی و مشخصات و ویژگی‌های مصالح خاک بستر پی ارائه شده است. همچنین مشخصات مصالح مربوط به پی نیز در جدول ۴ بیان گردیده است.

در شکل ۱ هندسه کلی مدل‌های مذکور ارائه شده است. همچنین شکل ۲ نیز نشان‌دهنده وضعیت قرارگیری پی بر بستر خاک را نیز نشان می‌دهد.

به منظور افزایش حداکثری دقت نتایج از مش‌بندی با ابعاد بسیار ریز (Very Fine) استفاده شد؛ از همین رو تعداد المان‌های مدل پس از مش‌بندی در حدود ۴۷ هزار عدد لحاظ شد. شکل ۳ هندسه مدل پس از تکمیل مش را نشان می‌دهد.

در شکل ۴ و ۵ نمودارهای ظرفیت باربری پی مستقر بر بستر رسی دارای کیک لجن ارائه شده است. با هدف ارزیابی تاثیر درصد کیک لجن و دوره عمل‌آوری بر خاک بستر پی مقادیر درصد کیک لجن به ترتیب ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۱، ۱۴ و ۱۶ درصد و همچنین دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز در نظر گرفته شد.

هر المان محدود، فرمول بندی می‌شود و با ترکیب آنها جواب کل جسم به دست می‌آید. در فضای این نرم‌افزار از المان‌های مثلثی ۶، ۱۰ و ۱۵ گرهی برای تحلیل سه‌بعدی مسائل ژئوتکنیکی استفاده می‌شود.

در این پژوهش، به منظور تعیین درصد‌های افزودن لجن به خاک، از بحث حساسیت سنجی استفاده شده است. در حقیقت، بر اساس مطالعه و بررسی پژوهش‌های پیشین، مقدار درصد افزودنی انتخابی اولیه برابر ۳٪ تعیین شد و در ادامه مقدار درصد‌ها به تدریج افزایش پیدا کرد و این افزایش تا جایی بود که نتایج تغییر محسوسی را نشان داد و از یک نقطه به بعد، روند عکس شد و به نظر رسید که احتمالاً این نقطه، در واقع همان نقطه بهینه پژوهش است و به همین خاطر، یک درصد بالاتر از آن هم ادامه پیدا کرد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب ترکیب نمونه‌های آزمایش از ۳٪ الی ۱۶٪ تعیین شد. همچنین جهت آماده کردن نمونه‌ها، ابتدا به منظور عدم دست‌دادن عناصر و املاح معدنی ماده افزودنی، کیک لجن به مدت ۴۵ روز در معرض باد و سایه قرار گرفت تا به صورت کامل خشک شود و در ادامه پس از پودر شدن با درصد‌های تعیین شده به خاک اضافه شد. همچنین به منظور ارزیابی برقرار شدن واکنش در نمونه‌ها، شرایطی فراهم شد که این ماده افزودنی در رطوبت بهینه در

جدول ۳. مشخصات و ویژگی‌های مصالح خاک بستر.

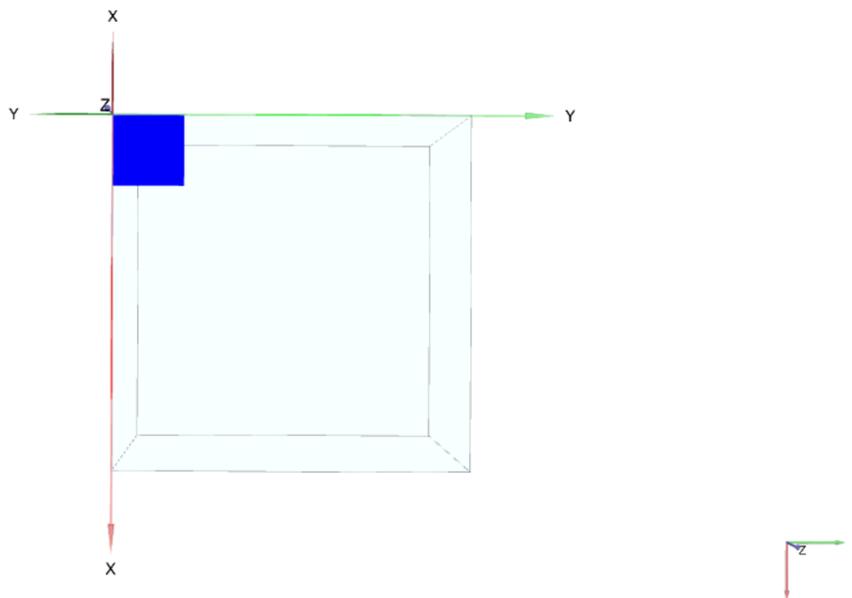
Table 3. Characteristics and specifications of the foundation soil materials.

شماره نمونه	نمونه	دوره عمل آوری	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	مدول الاستیسیته Es	ضریب پواسون	دانسیتته	مدل رفتاری
۱	نمونه فاقد لجن	۷روزه	۲۴/۷	۰/۱۴	۹/۷۷	۰/۳	۱/۷۳	موهر کولمب
۲	محتوی رس ۳٪/لجن	۷روزه	۲۴/۹	۰/۱۲	۸/۱۱	۰/۳	۱/۷۶	موهر کولمب
۳	محتوی رس ۴٪/لجن	۷روزه	۲۵/۷	۰/۱۱	۹/۷۱	۰/۳	۱/۷۷	موهر کولمب
۴	محتوی رس ۵٪/لجن	۷روزه	۲۶/۷	۰/۱۰	۷/۳۷	۰/۳	۱/۷۸	موهر کولمب
۵	محتوی رس ۷٪/لجن	۷روزه	۲۷/۸	۰/۰۹	۷/۳۰	۰/۳	۱/۸۰	موهر کولمب
۶	محتوی رس ۱۱٪/لجن	۷روزه	۳۱/۷	۰/۰۸	۱۰/۵۷	۰/۳	۱/۸۱	موهر کولمب
۷	محتوی رس ۱۴٪/لجن	۷روزه	۳۲/۸	۰/۰۷	۹/۴۷	۰/۳	۱/۸۳	موهر کولمب
۸	محتوی رس ۱۶٪/لجن	۷روزه	۳۰/۷	۰/۰۷	۱۰/۹۲	۰/۳	۱/۶۶	موهر کولمب
۹	رس فاقد لجن	۲۸روزه	۲۴/۷	۰/۱۴	۹/۷۷	۰/۳	۱/۷۳	موهر کولمب
۱۰	محتوی رس ۳٪/لجن	۲۸روزه	۲۵/۱	۰/۱۰	۶/۷۰	۰/۳	۱/۷۶	موهر کولمب
۱۱	محتوی رس ۴٪/لجن	۲۸روزه	۲۶	۰/۱۰	۸/۱۵	۰/۳	۱/۷۷	موهر کولمب
۱۲	محتوی رس ۵٪/لجن	۲۸روزه	۲۷/۱	۰/۰۹	۷/۵۴	۰/۳	۱/۷۸	موهر کولمب
۱۳	محتوی رس ۷٪/لجن	۲۸روزه	۲۸/۱	۰/۰۸	۷/۴۰	۰/۳	۱/۸۰	موهر کولمب
۱۴	محتوی رس ۱۱٪/لجن	۲۸روزه	۳۲/۱	۰/۰۷	۷/۸۰	۰/۳	۱/۸۱	موهر کولمب
۱۵	محتوی رس ۱۴٪/لجن	۲۸روزه	۳۳/۲	۰/۰۵	۹/۵۹	۰/۳	۱/۸۳	موهر کولمب
۱۶	محتوی رس ۱۶٪/لجن	۲۸روزه	۳۰/۴	۰/۰۶	۱۶/۶۱	۰/۳	۱/۶۶	موهر کولمب

جدول ۴. مشخصات مصالح مربوط به پی.

Table 4. Specifications of the footing material.

مدل رفتاری	ابعاد پی	مقدار	پارامترها
الاستیک	۱*۱*۰/۱ m	۲۵/۰۰	وزن مخصوص
		$1.0 \cdot E_{16/9}$	مدول الاستیسیته
		۰/۲۵۰۰	ضریب پواسون
		$44.0 \cdot E_{6/9}$	مدول برشی
		۰/۱۶۰۰	D



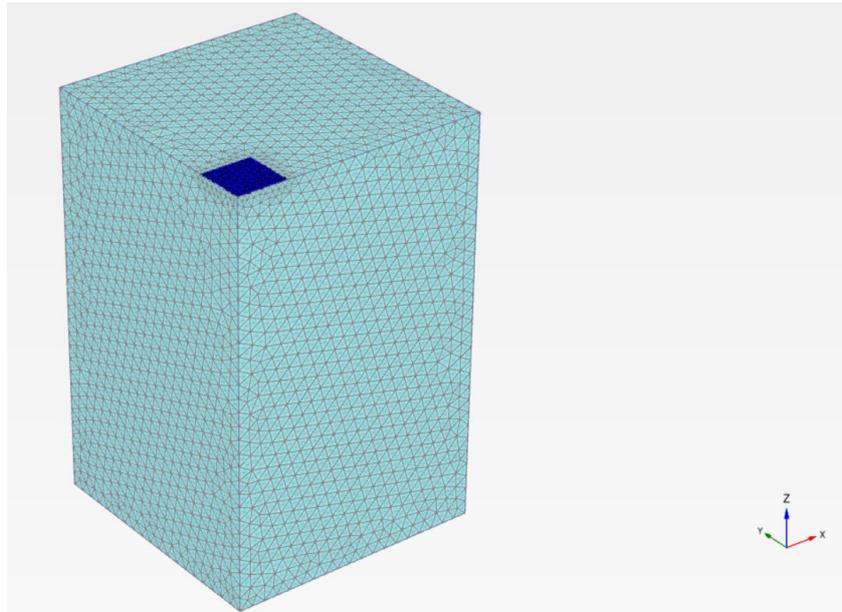
شکل ۲. وضعیت قرارگیری پی بر بستر خاک.

Fig. 2. Position of the footing on the soil bed.

#### ۴- مدل رفتاری و مشخصات آن

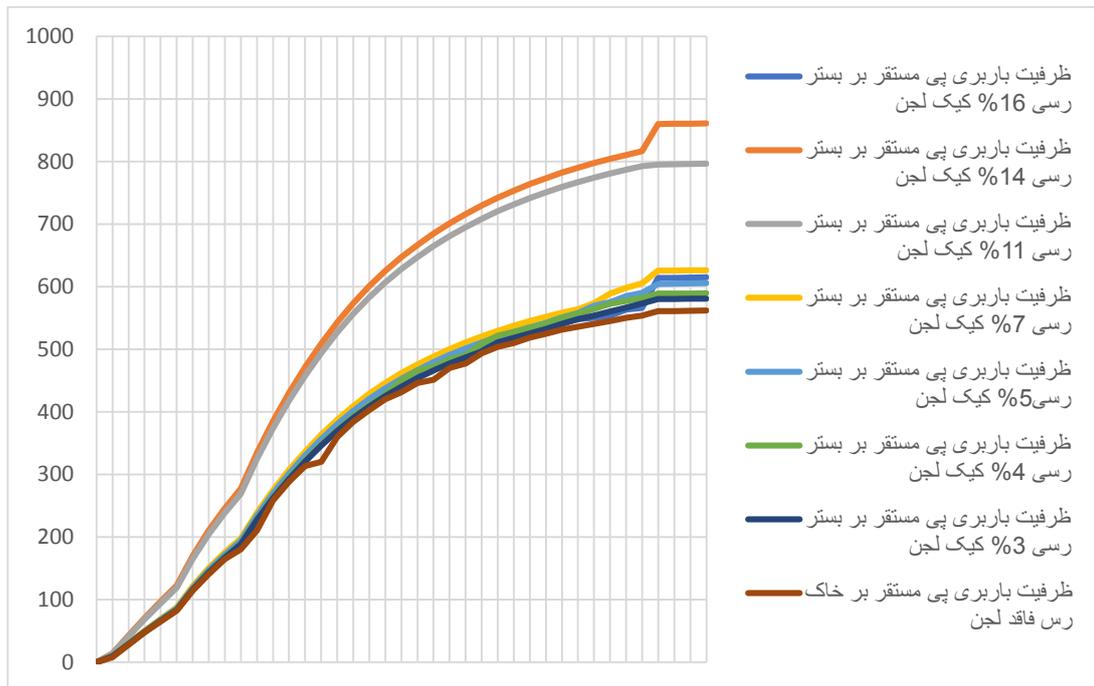
در این مطالعه به منظور بررسی و مطالعه عددی تاثیر استفاده از کیک لجن بر ظرفیت باربری پی مربعی شکل، به دلیل وجود تقارن در هندسه، بارگذاری و مصالح به کارگرفته از تحلیل تقارن محوری استفاده شده است. هندسه مدل: ( بر حسب متر )

$x_{min} = 0$	$x_{max} = 2/5$
$Y_{min} = 0$	$Y_{max} = 2/5$
$Z_{top} = 0$	$Z_{bottom} = -4$



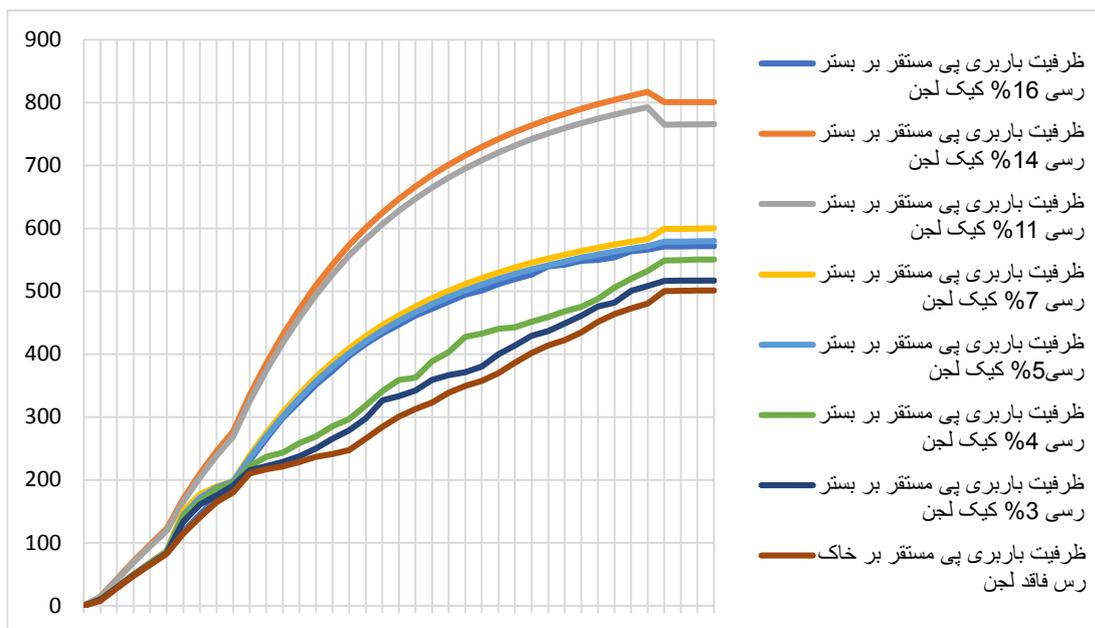
شکل ۳. هندسه مدل پس از تکمیل مش.

Fig. 3. Geometry of the model after mesh completion.



شکل ۴. نمودار ظرفیت باربری پی مستقر بر بستر رسی دارای الف) فاقد کیک لجن ب) دارای ۳ درصد کیک لجن ج) دارای ۴ درصد کیک لجن د) دارای ۵ درصد کیک لجن ن) دارای ۷ درصد کیک لجن و) دارای ۱۱ درصد کیک لجن ه) دارای ۱۴ درصد کیک لجن ی) دارای ۱۶ درصد کیک لجن با دوره عمل‌آوری ۷ روز

Fig. 4. Bearing capacity diagram of the footing on clayey soil bed: a) without sludge cake, b) with 3% sludge cake, c) with 4% sludge cake, d) with 5% sludge cake, e) with 7% sludge cake, f) with 11% sludge cake, g) with 14% sludge cake, h) with 16% sludge cake, for a 7-day curing period.



شکل ۵. نمودار ظرفیت باربری پی مستقر بر بستر رسی دارای الف) فاقد کیک لجن ب) دارای ۳ درصد کیک لجن ج) دارای ۴ درصد کیک لجن د) دارای ۵ درصد کیک لجن ن) دارای ۷ درصد کیک لجن و) دارای ۱۱ درصد کیک لجن ه) دارای ۱۴ درصد کیک لجن ی) دارای ۱۶ درصد کیک لجن با دوره عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 5. Bearing capacity diagram of the footing on clayey soil bed: a) without sludge cake, b) with 3% sludge cake, c) with 4% sludge cake, d) with 5% sludge cake, e) with 7% sludge cake, f) with 11% sludge cake, g) with 14% sludge cake, h) with 16% sludge cake, for a 28-day curing period.

#### ۴-۱- تعریف المان‌های سازه‌ای

المان‌های سازه‌ای در مد Structures برنامه ایجاد می‌شوند و برای ایجاد سطح (Create surface) مختصات نقطه اولیه برابر (۰ و ۰) و مختصات ۳ نقطه دیگر به ترتیب برابر (۰ و ۰/۵)، (۰ و ۰/۵ و ۰/۵)، (۰ و ۰/۵ و ۰) در نظر گرفته شد و برای ایجاد حجم با استفاده از Extrude object مولفه Z برای این مطالعه برابر ۰/۱- تعیین گردید.

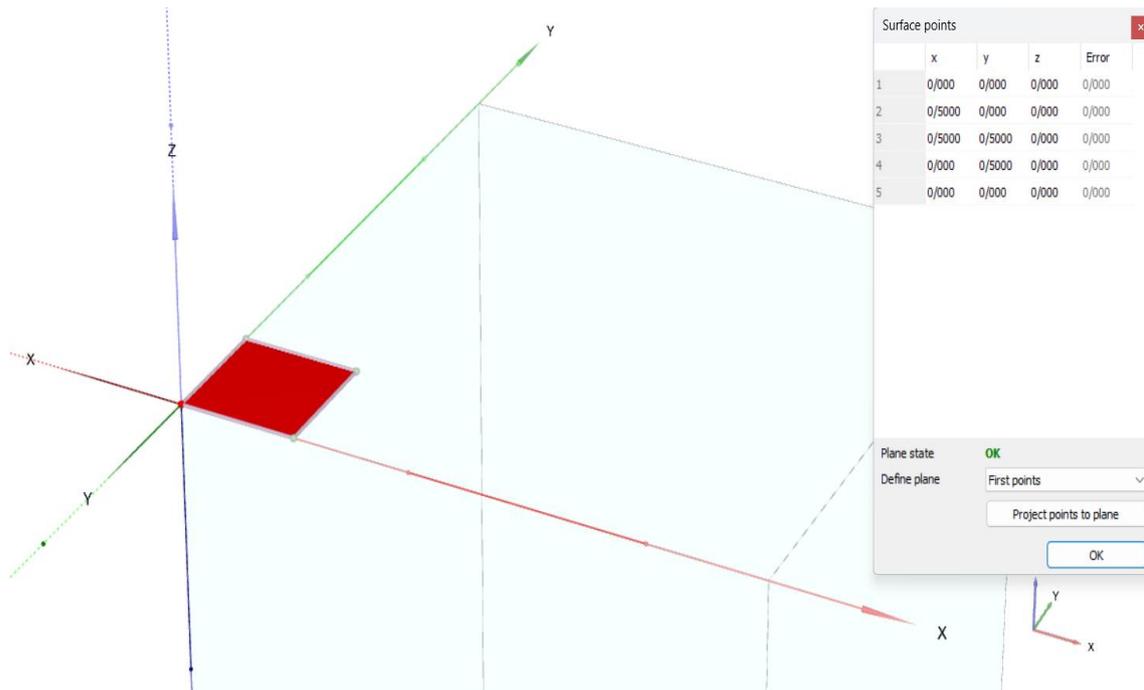
#### ۴-۲- شبکه بندی

مدل کامل است. نرم افزار PLAXIS 3D مراحل ایجاد شبکه مش بندی را به شکل کاملاً اتوماتیک فراهم می‌سازد که در آن هندسه مدل در صورتیکه قابل اجرا باشد، به المان‌های حجم و سازه‌ای سازگار تقسیم می‌شود. مش بندی ایجاد شده، موقعیت هندسی کامل مدل را در نظر می‌گیرد بنابراین موقعیت دقیق لایه‌ها، بارها و سازه‌ها برای شبکه مش بندی المان محدود محاسبه می‌شود. همچنین توزیع المان مش بندی پژوهش حاضر به صورت بسیار ریز در نظر گرفته شده است زیرا میزان دقت تحلیل مدل به

سطح سفره آب زیر زمینی برابر ۳۸- متر است و مشخصات مصالح بستر پی نیز طبق جدول ۳ حاصل از نتایج آزمایشات تعیین گردید. همچنین با توجه به اینکه تحکیم مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، نفوذپذیری خاک تأثیری بر نتایج نخواهد داشت و پنجره سفره آب (Groundwater) کنار گذاشته می‌شود و سطوح مشترک (Interfaces) به دلیل اینکه مدل هندسی شامل فصل مشترک نمی‌شود، نادیده گرفته می‌شود. همچنین در خصوص شرایط اولیه تخمین  $K_0$  را بر روی حالت اتوماتیک تنظیم کرده و در این شرایط  $K_0$  از معادله جکی (۱) و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

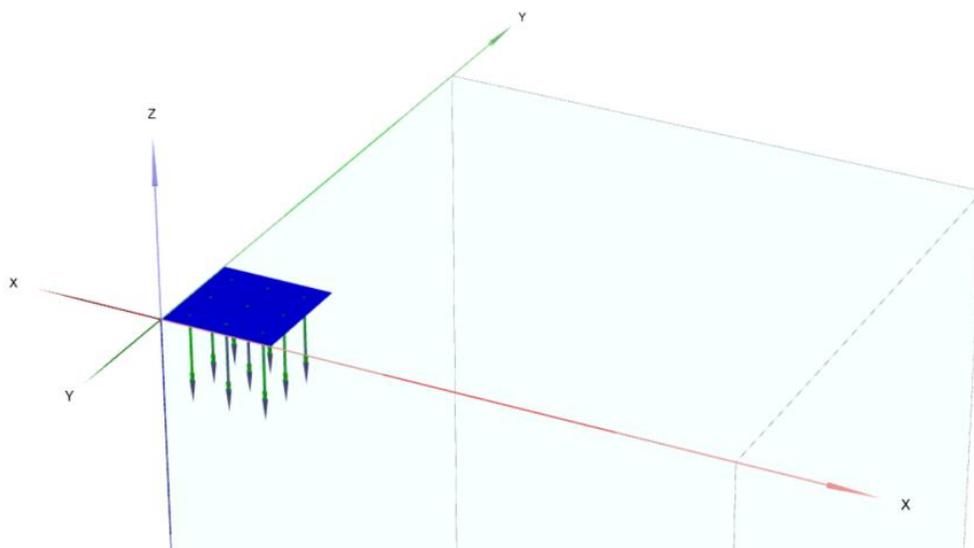
$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (1)$$

بدین ترتیب مشخصات مصالح خاک بستر تحت مدل رفتاری موهر کولمب و مشخصات پی طبق جدول ۴ و تحت مدل الاستیک خطی فشرده (بدون تخلخل) تعیین شد.



شکل ۶. هندسه پی مربعی.

Fig. 6. Geometry of the square footing.



شکل ۷. اعمال جابجایی عمودی یکنواخت پی مربعی.

Fig. 7. Application of uniform vertical displacement to the square footing.

### ۵- بحث و نتیجه گیری

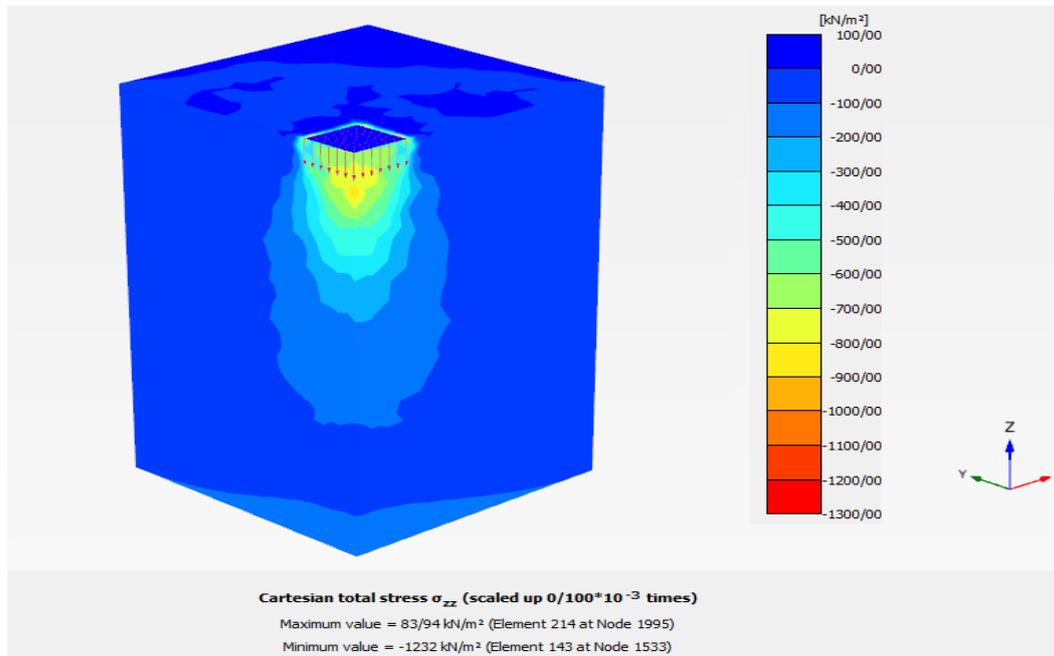
تمرکز اصلی پژوهش حاضر بر این است که با توجه به کار آزمایشگاهی صورت گرفته و نتایج حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی، به منظور ارائه یک رویکرد جهت بررسی پدیده حاضر به لحاظ اجرایی و همچنین ارزیابی توانمندی مدل برای شبیه سازی های آتی، به شبیه سازی عددی این پدیده با استفاده از روش عددی مبتنی بر نرم افزار پلکسیس در فضای ۳ بعدی پرداخته شده است.

با توجه به اشکال ۴ و ۵، نتایج شبیه سازی عددی نشان می دهد در هر دو دوره عمل آوری با افزایش میزان کیک لجن موجود در خاک، ظرفیت باربری پی افزایش پیدا کرده است. همچنین بر اساس اشکال ۱۴ و ۱۵، پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک که به عنوان پارامترهای اساسی در بحث شبیه سازی پدیده کنونی شناخته می شوند، با افزودن کیک لجن به خاک دستخوش تغییر شدند که در این مورد با تحقیقات صورت گرفته توسط مونتالوان و همکاران (۲۰۱۹) به نوعی تطابق دارد. به طور کلی افزودن کیک لجن به نمونه های خاک رس سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی نمونه ها با دوره های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه گردیده است. همچنین میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی ترکیب خاک رس

حداکثر مقدار خود برسد. نوع مش نیز از نوع ۱۰ گره ای لحاظ گردیده است و همچنین تعداد المان ها برابر ۴۷۹۱۵ و تعداد گره ها نیز ۷۰۷۸۲ محاسبه شده است.

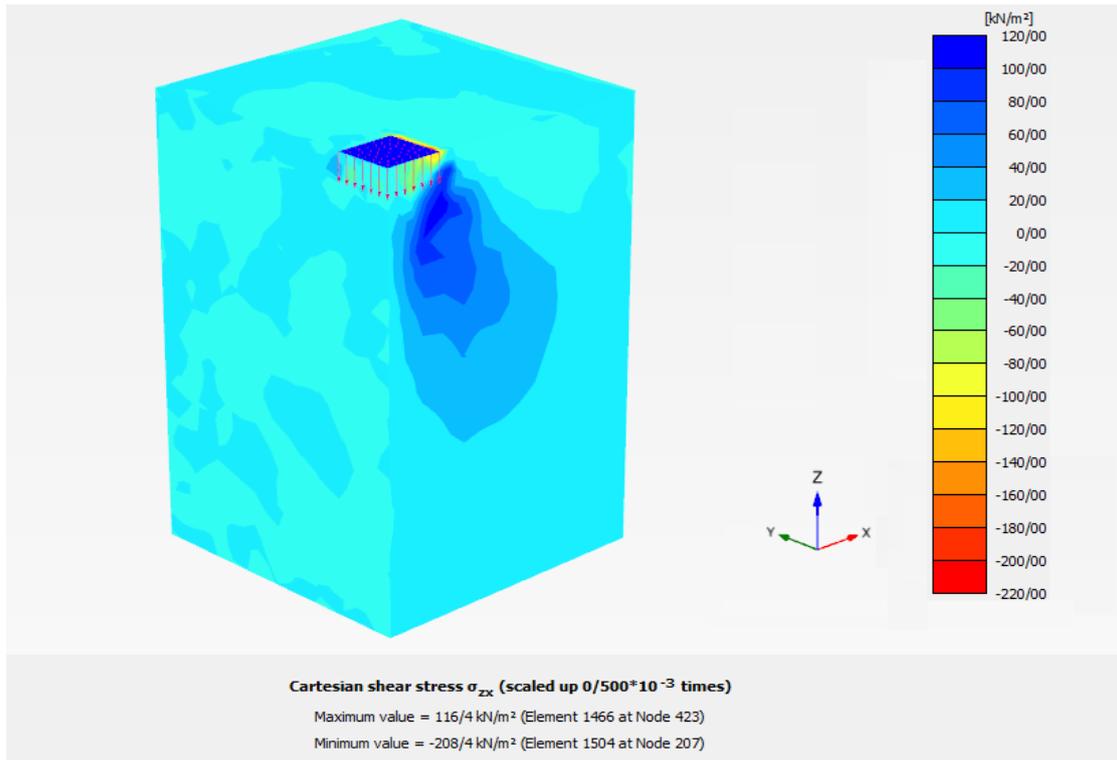
### ۴-۳- انجام محاسبات

این پژوهش شامل ۳ فاز می باشد که فاز اولیه شامل پیکربندی اولیه هندسی مدل و حالت تنش های اولیه بود که مشخص گردید و سپس در فاز یک صفحه فعال شد و در فاز دو علاوه بر فعال نمودن سطح تغییر مکان، مقدار  $U_z$  برابر ۰/۰۹- تعیین گردید. لازم به ذکر است  $U_z$  بیانگر مولفه تغییر مکان در راستای محور Z بوده که نشان می دهد به ازای نشست های مختلف، نیرو چه مقدار تغییر کرده است. همچنین بررسی نمودارهای پژوهش های حاضر نشان می دهد که به ازای نشست برابر ۹ سانتی متر، بیشینه نیرو رخ داده است و بعد از ۹ سانتی متر روند افزایش و صعود نیروها به صورت ثابت و افقی درآمده است، بنابراین با توجه به بررسی های صورت گرفته، متغیر  $U_z$  برابر ۹ سانتی متر در نظر گرفته شد. سپس در ادامه، محاسبات فازها شروع شد. اشکال ۸ الی ۱۳ ارزیابی نتایج تنش در مدل های اصلی را نشان می دهد.



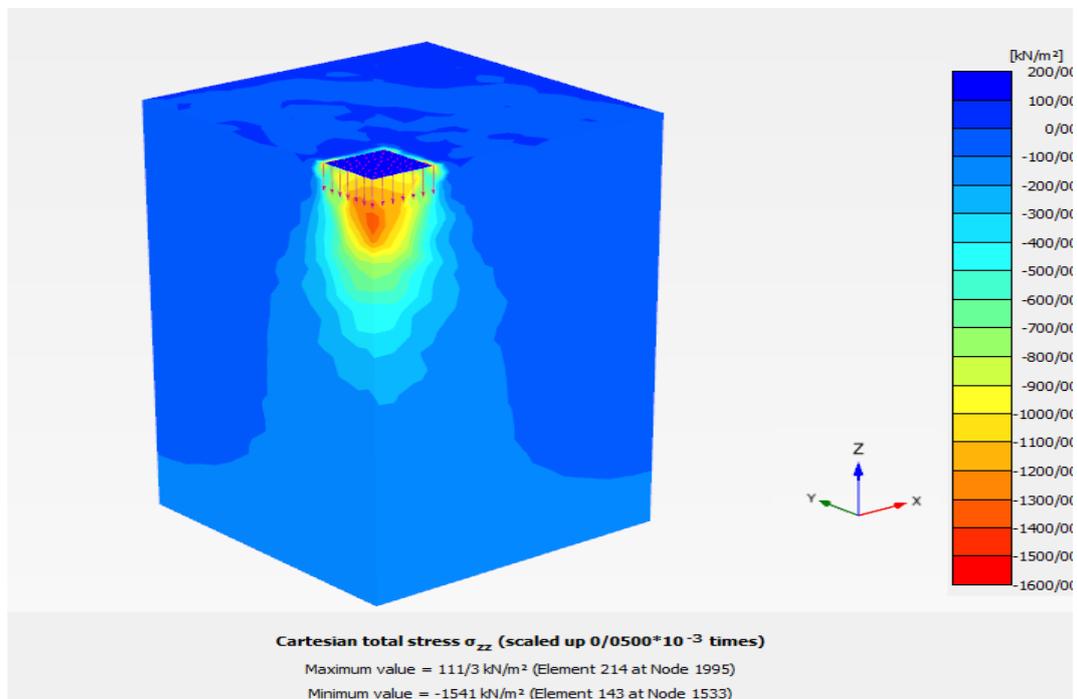
شکل ۸. تنش قائم ایجاد شده در بستر رسی فاقد کیک لجن با دوره عمل آوری ۷ روز.

Fig. 8. Vertical stress developed in the clayey bed without sludge cake for a 7-day curing period.



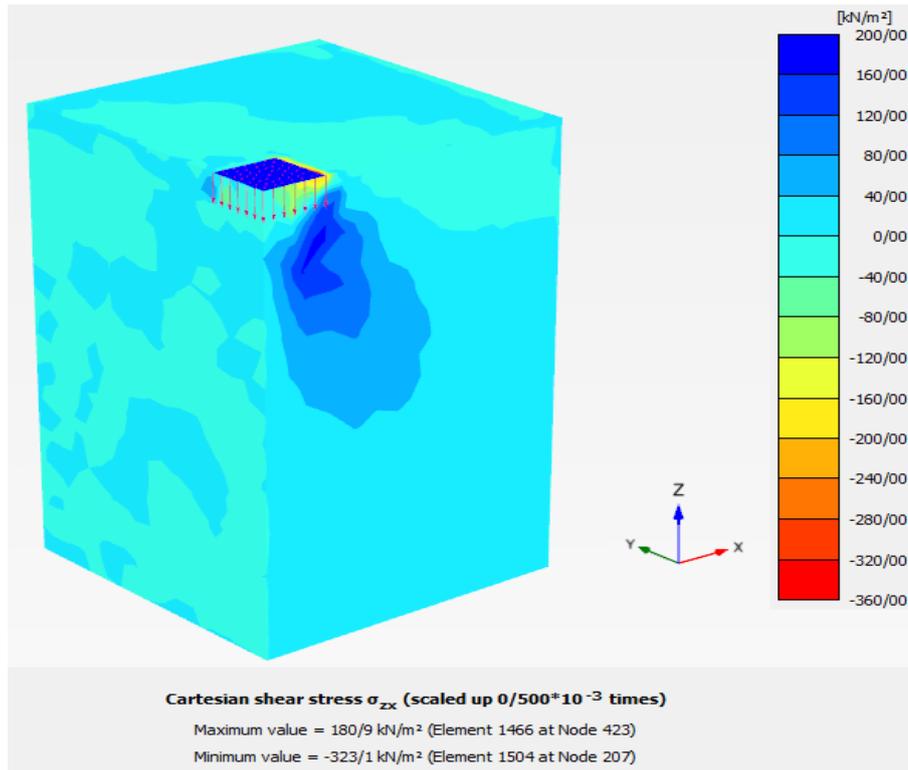
شکل ۹. تنش برشی ایجاد شده در بستر رسی فاقد کیک لجن با دوره عمل‌آوری ۷ روز.

Fig. 9. Shear stress developed in the clayey bed without sludge cake for a 7-day curing period.



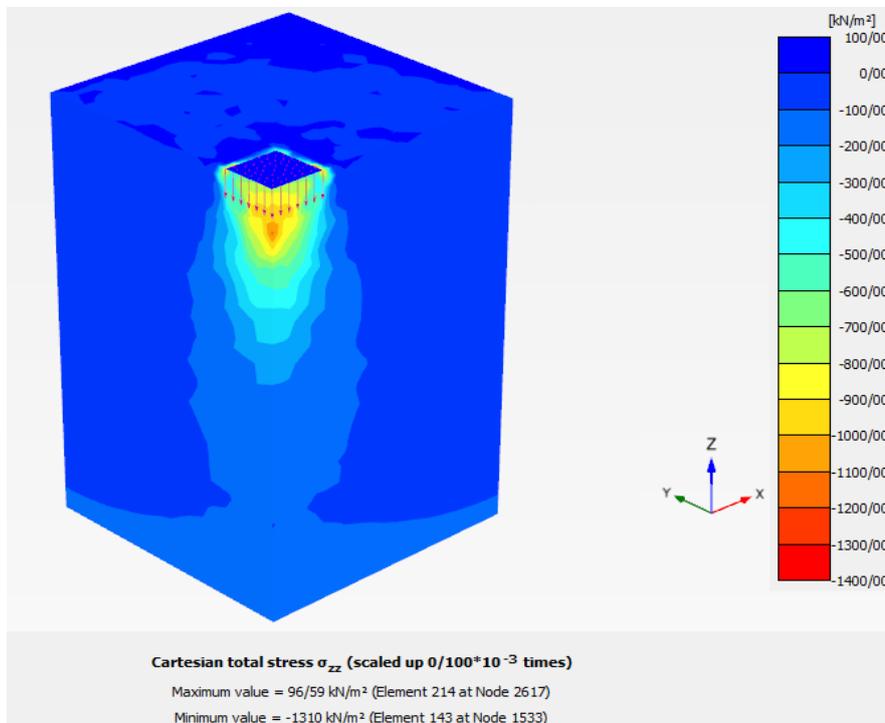
شکل ۱۰. تنش قائم ایجاد شده در بستر رسی حاوی ۱۴ درصد کیک لجن با دوره عمل‌آوری ۷ روز.

Fig. 10. Vertical stress developed in the clayey bed containing 14% sludge cake for a 7-day curing period.



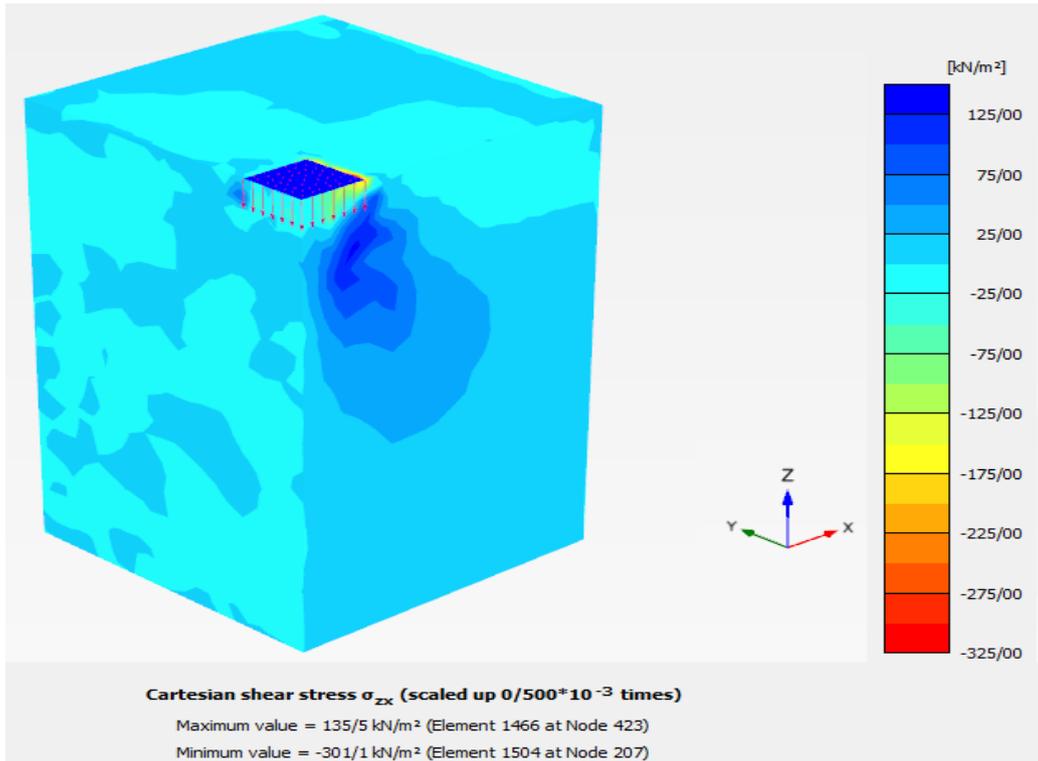
شکل ۱۱. تنش برشی ایجاد شده در بستررسی حاوی ۱۴ درصد کیک لجن با دوره عمل‌آوری ۷ روز

Fig. 11. Shear stress developed in the clayey bed containing 14% sludge cake for a 7-day curing period.



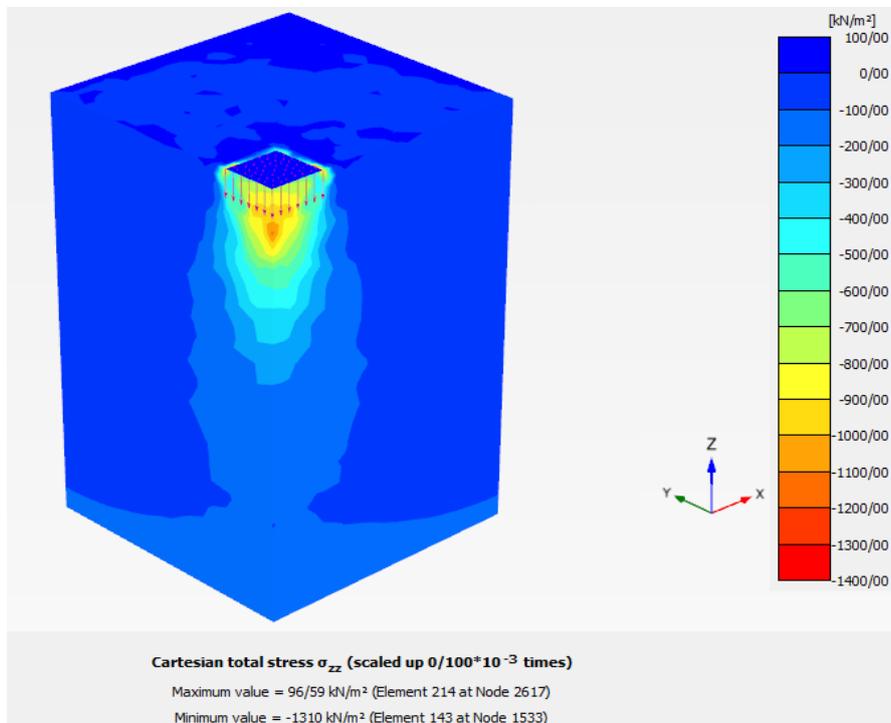
شکل ۱۲. تنش قائم ایجاد شده در بستررسی حاوی ۱۶ درصد کیک لجن با دوره عمل‌آوری ۷ روز.

Fig. 12. Vertical stress developed in the clayey bed containing 16% sludge cake for a 7-day curing period.



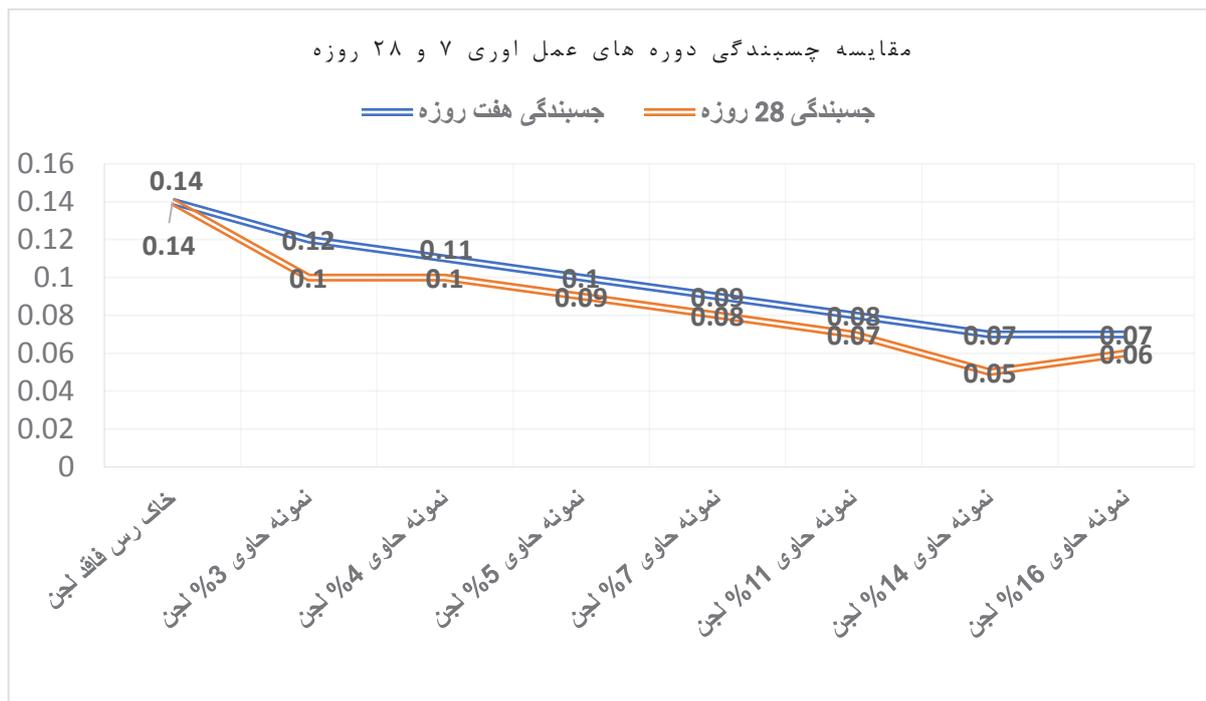
شکل ۱۳. تنش برشی ایجاد شده در بستر رسی حاوی ۱۶ درصد کیک لجن با دوره عمل آوری ۷ روز.

Fig. 13. Shear stress developed in the clayey bed containing 16% sludge cake for a 7-day curing period.



شکل ۱۴. نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی دوره های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه.

Fig. 14. Variation diagram of internal friction angle for 7 and 28-day curing periods.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات چسبندگی دوره های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه.

Fig. 15. Variation diagram of cohesion for 7 and 28-day curing periods.

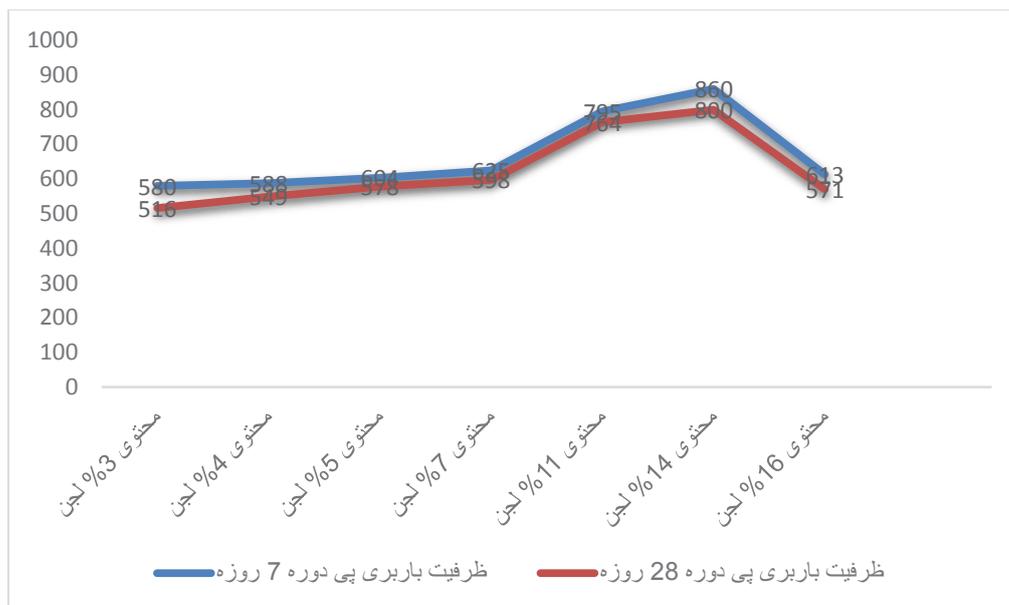
به بیشترین افزایش ظرفیت باربری پی در بین سایر درصد ترکیبات شده است؛ به طوری که در این حالت ظرفیت باربری پی در مقایسه با شرایطی که بستر پی از نوع خاک رس خالص است در حدود ۵۴ درصد افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این، در شرایطی که میزان لجن موجود در خاک رس بیش از حد بهینه (۱۴ درصد) شد؛ ظرفیت باربری پی در مقایسه با حالتی که بستر پی از نوع خاک رس خالص است، حدود ۹ درصد افزایش ظرفیت باربری را نشان داد. با مشاهده اشکال ۴ و ۵ می توان دریافت، علت اختلاف ناچیز بین ظرفیت باربری پی مستقر بر بستر رسی حاوی ۳ درصد لجن و بستر رس خالص به این دلیل است که در این حالت کیک لجن خصوصیات و ویژگی های خود را بر ترکیب خاک و لجن تحمیل کرده و حضور لجن رفتار پی را تحت تاثیر قرار داده است. درحقیقت، یکی از خصوصیات کیک لجن، حضور برخی از عناصر در ماهیت آن است که می تواند به بهبود عملکرد و اثرگذاری بهتر آن در ترکیب با خاک رس، کمک نماید. به طور کلی بر اساس جدول ۲، نتایج آزمون شیمیایی لجن (ICP-MASS) نشان داد، همه عناصر موجود در کیک لجن در محدوده مجاز استاندارد قرار دارند؛ با این حال، حضور برخی از عناصر که به نسبت سایر عناصر موجود در جدول ۲،

و لجن تابعی از مقدار درصد ماده افزودنی است؛ از همین رو با افزایش مقدار ماده افزودنی تا نقطه بهینه، زاویه اصطکاک داخلی افزایش پیدا کرده است. در حالی که ترکیب کیک لجن و خاک رس سبب کاهش چشمگیر میزان چسبندگی نمونه ها با دوره های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه شده است زیرا چسبندگی مربوط به کانی های رسی است و با افزودن هر ماده ای به خاک رس، میزان چسبندگی کاهش می یابد. طبق اشکال ۴ و ۵، نکته حائز اهمیت این است که حتی افزودن مقادیر اندک کیک لجن به خاک رس نیز باعث افزایش ظرفیت باربری پی شده است؛ به طوری که ترکیب ۳ درصد کیک لجن با خاک رس نشان از افزایش ظرفیت باربری پی در مقایسه با شرایطی که خاک رس از نوع رس خالص است، به مقدار ۳/۵ درصد می دهد؛ بدین ترتیب، ترکیب ۴ درصد کیک لجن با خاک رس سبب افزایش ظرفیت باربری پی به میزان ۵ درصد؛ ترکیب ۵ درصد کیک لجن با خاک رس سبب رشد ظرفیت باربری به میزان ۷/۸ درصد؛ ترکیب ۷ درصد کیک لجن با خاک رس سبب رشد ظرفیت باربری به میزان ۱۱/۶ درصد؛ ترکیب ۱۱ درصد کیک لجن با خاک رس سبب افزایش ظرفیت باربری به میزان ۴۱/۹ درصد؛ همچنین ترکیب ۱۴ درصد لجن با خاک رس بستر پی منجر

افزایش ظرفیت باربری در بین سایر درصد ترکیبات شده است. به عبارت دیگر بر خلاف تحقیقات صورت گرفته توسط گولو و گریسکن (۲۰۱۲) که از لجن تصفیه خانه آب استفاده کرده و در نتیجه مقدار لجن بهینه برابر ۵۰ درصد تعیین شد، در این تحقیق که از لجن و پساب تصفیه خانه فاضلاب استفاده شده است، ترکیب ۱۴ درصد لجن و خاک رس به عنوان بهینه ترین حالت مشخص گردید؛ همچنین در شرایطی که میزان لجن موجود در خاک رس بیش از حد بهینه و برابر ۱۶ درصد شد؛ ظرفیت باربری پی حدود ۲۸،۷ درصد، نسبت به نمونه حاوی درصد بهینه کاهش یافت، اما با این وجود باز هم نسبت به حالتی که بستر پی از نوع خاک رس خالص است، افزایش ۹ درصدی ظرفیت باربری را نمایان ساخت؛ به عبارت دیگر، توضیحات فوق به درستی بر تاثیر حضور کیک لجن بر رفتار خاک های رسی اشاره دارد، همانطور که آلین و همکاران (۲۰۲۳) طی تحقیقاتی که بر روی لجن تصفیه خانه آب در ترکیب با خاک های لاتریتی صورت پذیرفت به اهمیت حضور لجن اشاره نمودند. به طور کلی مقایسه پژوهش حاضر با تحقیق صورت گرفته توسط ویجایان و آریا (۲۰۲۲) نشان داد، با توجه به متفاوت بودن شرایط آزمایش در دو تحقیق، محدوده تغییرات مقادیر افزودنی در تحقیق کنونی بین ۳ تا ۱۶ درصد و در سوی مقابل بین ۰ تا ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است نحوه تعیین درصد مقادیر افزودنی در تحقیق کنونی، مبتنی بر روش حساسیت سنجی است در حالی که در طرف دیگر، محدوده بین ۰ تا ۲۵ را به صورت پلکانی و با سرعت رشد ۵ درصد در هر مرحله نسبت مرحله قبل می پیماید. همچنین با توجه به اینکه مواد موجود در لجن برای هیدراته شدن به آب بیشتری نیاز دارند، میزان رطوبت بهینه در هر دو تحقیق افزایش یافته است. بررسی ها نشان داد مقاومت فشاری محصور نشده در هر دو تحقیق با افزودن مقادیر مختلف افزودنی افزایش یافت و در یک نقطه به مقدار اوج رسیده است که این نقطه برای تحقیق کنونی برابر ۱۴ درصد و در طرف مقابل برابر ۱۵ درصد است که سهم هر کدام به ترتیب ۸۲/۲۳ و ۶۲/۶۹ درصد بهبود در مقاومت محوری محصور نشده، نسبت به خاک خالص را نشان می دهند. در حقیقت اعداد مذکور بیانگر این است که ماده افزودنی به کار گرفته شده در این تحقیق نشان از برتری ۱،۳۱ درصدی در مقاومت محوری محصور نشده نسبت به تحقیق ویجایان و آریا (۲۰۲۲) دارد. همچنین لازم به ذکر است، بعد از نقطه پیک، هر دو مورد مطالعاتی روندی نزولی طی کردند. همچنین حضور عناصر کلسیم و آلومینیوم و سیلیس می تواند نقش مهمی در بهبود یا تضعیف پارامتر های خاک ایفا کند اما به نوعی وجه تمایز دو تحقیق، به بررسی جنبه شیمیایی و دوره های

از مقادیر عددی بیشتری برخوردارند، عملکرد کیک لجن در ترکیب با خاک رس را تحت تاثیر قرار می دهند؛ به عنوان مثال می توان به عناصر آلومینیوم و کلسیم اشاره کرد که باعث بهبود مقاومت برشی شده و برای مقادیر بیش از حد بهینه، سبب کاهش مقاومت برشی می شوند؛ به طوری که در نمونه ۱۴ درصد سبب افزایش مقاومت خاک رس و در نمونه بیش از حد بهینه (۱۴درصد)، سبب کاهش مقاومت برشی شده است. همچنین، افزودن آهن به خاک رس باعث کاهش رطوبت بهینه و افزایش خصوصیات خمیری و علاوه بر این، سبب افزایش مقاومت زهکشی نشده خاک رسی شده است؛ در نتیجه یکی از عواملی که سبب افزایش مقاومت نمونه رس حاوی لجن در مقایسه با فاقد لجن شده، حضور مقدار قابل توجهی آهن بوده است. همچنین با مقایسه روند خطوط موجود در شکل ۱۶ می توان دریافت، دوره عمل آوری تاثیر بسزایی در نتایج نداشته است زیرا مقایسه نتایج حاصل از دو دوره عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه، تغییرات محسوس و گسترده ای را نشان نمی دهد؛ به عبارت دیگر گذشت زمان باعث ایجاد واکنش شیمیایی بین عناصر ماده افزودنی و خاک نشده است.

با توجه به نتایج ارائه شده می توان دریافت که پارامتر درصد کیک لجن موجود در بستر رسی پی در مقایسه با دوره عمل آوری از تاثیرگذاری بسیار بیشتری بر ظرفیت باربری پی برخوردار است که این مورد برخلاف تحقیقات صورت گرفته توسط آرولجاها و همکاران (۲۰۱۲)، بر روی نمونه های جامد زیستی فشرده، نمایانگر پتانسیل مطلوب ترکیب کیک لجن و خاک رس، در افزایش ظرفیت باربری است. در مدل های با دوره عمل آوری ۷ روزه، کمترین و بیشترین ظرفیت باربری متعلق به مدل های با میزان کیک لجن ۳ و ۱۴ درصد با مقدار ۵۸۰ و ۸۶۰ کیلو نیوتن می باشد؛ این در حالی است که در مدل های با دوره عمل آوری ۲۸ روزه، کمترین و بیشترین ظرفیت باربری متعلق به مدل های با میزان کیک لجن ۳ و ۱۴ درصد با مقدار ۵۱۶ و ۸۰۰ کیلو نیوتن می باشد. با مقایسه نتایج می توان دریافت با افزایش مدت زمان عمل آوری فارغ از میزان کیک لجن موجود در بستر رسی پی، از ظرفیت باربری کاسته می شود. همچنین مقایسه شکل های ۴ و ۵ نشان می دهد، درصد کیک لجن بهینه در هر دو دوره عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه یکسان و برابر ۱۴ درصد است. لازم به ذکر است در هر دو دوره عمل آوری، ظرفیت باربری پی تابعی از میزان افزودن کیک لجن به خاک است. همچنین ترکیب حاوی ۱۴ درصد لجن با خاک رس بستر پی که می توان آن را به عنوان درصد بهینه لجن نیز معرفی کرد، بهترین بازدهی را در میان نمونه های مورد مطالعه در هر دو دوره عمل آوری نشان داده و منجر به بیشترین



شکل ۱۶. مقایسه ظرفیت باربری پی در برابر افزایش محتویات نمونه در دو دوره عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه

Fig. 16. Comparison of footing bearing capacity versus increasing sample contents for 7 and 28-day curing periods.

روزه و در سوی مقابل، دوره های عمل آوری ۳، ۱۴، ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفته است که تنها وجه اشتراک را می توان دوره عمل آوری ۲۸ روزه در نظر گرفت. همچنین در خصوص درصد مقادیر افزودنی طبق بررسی ها، درصد ۲۰ در تحقیق کاظم و همکاران، معادل با ۱۴ الی ۱۶ درصد تحقیق حاضر بوده و درصد ۱۰ موجود در تحقیق کاظم و همکاران (۲۰۲۲) تقریباً معادل درصد ۱۱ این تحقیق است. در نتیجه درصد ۱۵ به گونه ای است که حد فاصل گپ ایجاد شده بین درصد های ۱۱ تا ۱۴ را پوشش می دهد. در این تحقیق عمل آوری و گذشت زمان تأثیری چشمگیری بر نتایج نداشته است زیرا پارامتر زمان باعث ایجاد فعل و انفعالات شیمیایی نشده است. در حالی که در سوی مقابل عمل آوری ۲۸ روزه تأثیر محسوس بر نتایج داشته است. همچنین رطوبت بهینه با افزودن لجن افزایش یافته است. وجه اشتراک دو تحقیق در این است که به اثر بخشی کیک لجن تصفیه خانه و خاکستر لجن فاضلاب به تنهایی و بدون افزودن آهک و نانومواد تأکید میکنند. به طور کلی نتایج نشان می دهد، استفاده از کیک لجن در فرآیندهای ژئوتکنیکی می تواند علاوه بر رفع یک معضل زیست محیطی به بهبود کیفی خاک و تثبیت آن کمک کند.

عمل آوری هر یک باز میگردد. در حقیقت حضور ۱/۹۵ درصدی کلسیم در ماده افزودنی مورد مطالعه تأثیر خود را بر جای گذاشته است، در حالی که در سوی دیگر اشاره ای به جنبه های شیمیایی تحقیق نشده است. در تحقیق دیگر، این بار به مقایسه تحقیق کنونی با مطالعه صورت گرفته توسط کاظم و همکاران (۲۰۲۲) پرداخته شده است. طبق مطالعات صورت گرفته مشخص گردید شرایط آزمایش در دو تحقیق مورد بررسی متفاوت است. این تفاوت به نوع لجن، و همچنین نحوه افزودن آن به خاک رس بر میگردد. به عنوان مثال، لجن بکار گرفته شده در این تحقیق جهت جلوگیری از، از دست رفتن املاح و مواد معدنی، ماده افزودنی در دمای محیط و به دور از نور خورشید به مدت ۴۵ روز نگهداری شد تا خشک شود در حالی که در طرف مقابل، لجن به مدت ۲ ساعت در دمای ۹۰۰ درجه جهت سوزاندن قرار گرفت و خاکستر حاصل به خاک افزوده شد. مورد بعدی، تفاوت در تعیین درصد های کیک لجن جهت افزودن به خاک رس است. همانطور که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق به روش حساسیت سنجی درصد ها تعیین شده است و محدوده تغییرات برابر ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۱، ۱۴، ۱۶ است در حالی که در طرف دیگر تنها ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. بر اساس مقایسه های صورت گرفته بین دو تحقیق مشخص گردید، در این تحقیق دوره های ۷ و ۲۸

- Kantathum, K., & Arulrajah, A., Improved mechanical and microstructure of cement-stabilized lateritic soil using recycled materials replacement and natural rubber latex for pavement applications, *Construction and Building Materials* 347 (2022) 128547.
- [15] C. Xu, Chen, W., & Hong, J., Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China, *Journal of Cleaner Production* 67 (2014) 79–87.
- [16] B.C. O’Kelly, Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling *Geotechnical Research*, 3(4) (2016) 148–179.
- [17] A. Arulrajah, Piratheepan, J., Disfani, M. M., & Bo, M. W., Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(8) (2013) 1077–1088.
- [18] H. Gullu, & Giriskan, S., Performance of fine-grained soil treated with industrial wastewater sludge, *Environmental earth sciences* 70 (2013) 777–788.
- [19] E.L. Montalvan, & Boscov, M. E. G., Geotechnical characterization of a soil-water treatment sludge mixture, *Geo-Chicago 2016*, (2016) 418–427.
- [20] E.L. Montalvan, & Boscov, M. E. G., Geotechnical characterization of a soil-water treatment sludge mixture, *Geo-Chicago 2016*, (2016) 418–427.
- [21] A.Mohammadi & Boroomand, M. R., Strength and Durability of Soft Clay Stabilized with Recycled Gypsum (Bassanite), *Advances in Civil Engineering Materials* 10(1) (2021) 16-33.
- [22] A. Mohammadi, Ebadi T, & Boroomand MR, Physical modelling of axial compressive bearing capacity of instrumented piles in oil-contaminated sandy soil. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, (2019).
- [23] L. Ramteke, Gawali, P., Jadhav, B. L., & Chopade, B. A., Comparative study on antibacterial activity of metal ions, monometallic and alloy noble metal nanoparticles against nosocomial pathogens, *BioNanoScience*, 10 (2020) 1018–1036.
- [24] F.A. Fiore, Rodgher, S., Ito, C. Y. K., dos Santos
- [1] R. Lai, Soil degradation on as a reason for inadequate human nutrition *Food Security*, 7(5) (2015) 981–996.
- [2] N.C. Brady, & Weil, R. R., *The nature and properties of soils*, Pearson (2008).
- [3] D.R. Montgomery, Soil erosion and agricultural sustainability *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(33) (2007) 13268–13272.
- [4] FAO, *Status of the World’s Soil Resources (SWSR) - Main Report*, Food and Agriculture of the Organization of the United Nations (2015).
- [5] R. Lai, Diggingdeeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems, *Global Change Biology*, 24(8) (2018) 3285–3301.
- [6] R. Lai, Soil carbon sequestration to mitigate climate change *Geoderma*, 123(1-2) (2004) 1–22.
- [7] S.R. Carpenter, DeFries, T., Mooney, H. A., Polasky, S., Reid, W. V., & Scholes, R. J., *Millennium Ecosystem Assessment: Reseach needs*, *Science*, 314(5797) (2006) 257–258.
- [8] G. Tchobanoglous, Burton, F. L., & Stensel, H. D., *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, (2003).
- [9] I. Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, (2003).
- [10] J.F. Malina Jr, & Spears, B. R., *Introduction to environmental engineering (Vol. 4)*, McGraw-Hill, (1996).
- [11] UNEP, *Guidelines on Integrated Environmental Management in Countries in Transition* United Nations Environment Programme, (2010).
- [12] W.W.W.A. Programme), *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource* (2017).
- [13] B.C. O’Kelly, Geotechnical properties of municipal sewage sludge, *Geotechnical & Geological Engineering* 24 (2006) 833–850.
- [14] N.Q. Tran, Hoy, M., Suddeepong, A., Horpibulsuk, S.,

- [27] K.a.A. Vijayan, U.S., Effect of sewage sludge on the geotechnical properties of clayey soil International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ICART, 10(6) (2022).
- [28] R. Aline, Tejada, M. E. L., & Gimenez, B. M. E., Reuse of water treatment plant sludge mixed with lateritic soil in geotechnical works, Environmental Challenges, 7 (2022) 100465.
- [29] L. Marchiori, Studart, A., Albuquerque, A., Andrade Pais, L., Boscov, M. E. G., & Cavaleiro, V., Mechanical and chemical behaviour of water treatment sludge and soft soil mixtures for liner production The Open Civil Engineering Journal, 16(1) (2022).
- [25] A.A.D.a.S. Badaou, U., Effects of sewage sludge amendment and wetting-drying cycles of wastewater irrigation on structural improvement of clay soil, International Journal of Environmental Science and Technology 19(7) (2022) 6453–6466.
- [26] Y.M. Kadhim, Al-Adhamii, R.A. and Fattah, M.Y., Geotechnical properties of clayey soil improved by sewage sludge ash, Journal of the Air & Waste Management Association 72(1) (2022) 34–47.
- Bardini, V. S., & Klinsky, L. M. G., Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study, Cleaner Engineering and Technology, 9 (2022) 100512.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Samiei Paghaleh, M. R. Boroomand, M. R. Shahverdi, Investigation the Effect of Sludge Cake and Sewage Sludge on Clay Soil Parameters: A Numerical Approach, Amirkabir J. Civil Eng., 57(9) (2025) 1597-1618.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23194.8126](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23194.8126)

