



Research Article

Numerical modeling of Preloading by drainage and Stone Column Installation Approach

Rahman Sharifi^{1*}, Hamed Ali²

1*- Assistant Professor, Civil. Semnan Azad University, Semnan, Iran

2- Graduated from Semnan Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Semnan Branch, Semnan, Iran

Received: 25 November 2022; Revised: 04 January 2023; Accepted: 16 January 2023; Published: 15 February 2023

Abstract

There are many different methods to modify the mechanical properties of saturated clayey soils. It may be chosen depending of location and function of the structure. among those methods, preloading in presence of vertical drains and installation of stone columns are similar together and it is the cause of comparison. In this thesis, each mechanism of modification of soil was studied lonely and then the results of every method were compared with all together. Subsequently the mentioned approaches were graded technically. For this reason, a two dimensional finite element software was used to make the models. It should be necessary to forcast the results of choosing one approach, because there is no proper procedure available for engineers to choose one of these method as the first index, and also the long time that must be spent for in situ consolidation.the results show that the finite element program has the ability of simulating the consolidation phenomena in saturated clayey soils and declare that installation of stone columns is better than preloading by installation of vertical drains. Of course, there are many parameters influences the selection of superiority.

Keywords:

numerical modeling, landslides, safety, slope stability

Cite this article as: Sharifi, R., Ali, H., (2023). Numerical modeling of Preloading by drainage and Stone Column Installation Approach. Civil and Project Journal, 4(10), 22-30.
<https://doi.org/10.22034/CPJ.2023.383039.1177>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2022 by the author.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

مدل سازی عددی روش پیش بارگذاری با حضور زهکش و روش نصب ستون سنگی

رحمان شریفی^{۱*}، حامد عالی^۲

۱- عضو هیات علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (تات)، تهران، ایران

۲- دانش آموخته دانشکده فنی مهندسی سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران

تاریخ دریافت: ۰۴ آذر ۱۴۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴ دی ۱۴۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۲۶ دی ۱۴۰۱؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۲۶ بهمن ۱۴۰۱

چکیده

روش های متفاوتی در جهت بهبود خواص مکانیکی خاک های رسی اشباع وجود دارد که بسته به موقعیت ساختگاه و عملکرد سازه، اولیت بندی و انتخاب می شوند. از میان این روش ها، پیش بارگذاری با حضور زهکش های شعاعی و روش اجرای ستون های سنگی، به دلیل شباهت های اجرایی که دارند قابل مقایسه با یکدیگرند. این پژوهش به بررسی جداگانه هر یک از این روش ها پرداخته و سپس نتایج دو روش را با هم مقایسه کرده و نهایتاً ارجحیت یکی را بر دیگر بازگو می کند. بدین منظور از نرم افزار المان محدود دوبعدی جهت مدلسازی استفاده شده است. به دلیل عدم وجود دستورالعمل مناسب در شرکت های مشاور، جهت انتخاب بین این دو روش، همچنین زمانبر بودن پدیده تحکیم در صورت اجرای هر یک از این روش ها، لازم است با مدلسازی عددی به پیش بینی نتایج پرداخته و بهترین راه را برای سازه خاص انتخاب کرد. نتایج مدلسازی ها نشان داد علاوه بر توانایی نرم افزار المان محدود دوبعدی در مدلسازی پدیده پیش بارگذاری و تحکیم، روش اجرای ستون های سنگی روش بهینه ای در افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و کاهش فشار آب حفره ای اضافی خاک های رسی اشباع است. البته انتخاب یک گزینه، به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که باید در تحقیقات بعدی بررسی گردد.

کلمات کلیدی:

کلید پیش بارگذاری، زهکش، ستون سنگی، مدل عددی، المان محدود

۱- مقدمه

یکی از مهمترین مسائل عمرانی، حفاظت از گودها و ساختمان‌های مجاور، سازه‌ها و فنداسیون آن‌ها می‌باشد که در صورت عدم رعایت روش‌های مناسب این منظور، خسارات جبران‌ناپذیری وارد می‌آید. بهمین ترتیب مخاطرات به‌وجودآمده ناشی از نشست‌های احتمالی و تقلیل ظرفیت باربری و نیز تغییر مکان‌های جانبی که موجب ترک‌خوردگی سازه‌های مجاور می‌گردد؛ نیاز به بهبود و ابتکار روش‌های جدید ژئوتکنیکی به جهت محافظت از ابنیه را می‌طلبد. به طور کلی در مواجهه با خاک‌های مسأله‌دار نظیر خاک‌های سست با ظرفیت باربری کم، تراکم‌پذیری و نشست زیاد، روانگرا و خاک‌های دستی و ... دو راه پیش روی مهندسين ژئوتکنیک قرار دارد: الف) استفاده از المان‌های باربر در خاک (تسلیح خاک)، ب) بهسازی خواص فیزیکی مکانیکی توده‌ی خاک (تثبیت خاک).

روش‌های بهسازی خاک شامل انواع تراکم (ارتعاشی، استاتیکی، دینامیکی، انفجاری، پیش‌بارگذاری و تعویض و تراکم مجدد) می‌باشد. روش‌های تسلیح خاک شامل انواع ستون سنگی (ارتعاشی، کوبشی، مسلح به ژئوسنتتیک، ستون سنگی صلب، ماسه‌ای متراکم، آهکی با سیمان)، میخکوبی، تسمه‌گذاری، استفاده از ژئوسنتتیک، اختلاط خاک با مواد شیمیایی، اختلاط عمیق، تزریق دوغاب و انجماد می‌باشد.

در تقسیم بندی دیگر، روش‌های جایگزینی خاک، تحکیم و نصب انواع ستون‌ها به منظور اصلاح خاک (کاهش نشست پذیری و افزایش مقاومت) استفاده می‌شود؛ که هر یک از این روش‌ها تنوع اجرایی و منابع دارند. جایگزینی خاک شامل جابجایی لرزه‌ای، جابجایی با بارگذاری، جابجایی با انفجار و جابجایی با حفاری در سنگ است. تحکیم نیز به دو دسته استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شود. پیش‌بارگذاری، بارگذاری، تحکیم با خلأ و تزریق با فشار از روش‌های تحکیم استاتیکی و فشردن لرزه‌ای، لرزه‌شناوری، فشردن ناگهانی و انفجار از روش‌های تحکیم دینامیکی است.

ستون‌هایی که در بهسازی خاک‌ها بکار می‌روند انواع متعددی دارند. ستون‌های تزریقی، شمع‌های ماسه‌ای فشرده، ستون‌های بتنی لرزه‌ای، شمع‌های جابجایی و در جا ریز، ریزشمع‌ها و ستون‌های مسلح به ژئوسینتتیک را می‌توان از روش‌های اصلاح با ستون‌ها نام برد.

هریک از راه‌حل‌های فوق دارای روش‌ها و مشخصات مربوط به خود می‌باشند که طی سالیان متمادی توسعه‌ی فراوانی یافته‌اند. برخی از تکنیک‌های ابداعی نیز ماهیتی ترکیبی از دو دسته‌ی فوق به‌مراه مزایای آن داشته‌اند. آنچه باعث می‌شود یک روش بر روش دیگر برتری یابد، پارامترهای اقتصادی، شرایط و مشکلات اجرایی، امکانات موجود و محدودیت‌های مکانی وزمانی است. اما مهندسين می‌بایست شناخت کافی از آنچه در دسترس دارند، از قبیل لوازم و روش‌های حفاری، مصالح سازه‌ای در دسترس، مقادیر محدودکننده منطقی و کنترل کیفیت، بمنظور ارائه‌ی روش جدید ژئوتکنیکی داشته باشند.

در میان تمامی روش‌های تثبیت و تسلیح ذکر شده دو روش اقتصادی، متداول و قدیمی وجود دارد که آنرا از دیگر روش‌ها متمایز می‌کند. ستون‌های سنگی یک روش مؤثر تجربی در بهسازی رفتار مهندسی رس نرم و سیلت سست است. در واقع نصب ستون‌های سنگی عملکردی دومنظوره در جهت تثبیت و تسلیح خاک دارد. زیرا با جایگزینی خاک رس نرم با شن و ماسه جنبه‌ی تثبیت بهسازی رقم می‌خورد و با توجه به صلبیت و تراکم ستون ماسه‌ای نسبت به خاک اطراف آن، روش تسلیح خاک نیز پیاده می‌شود. همچنین پیش‌بارگذاری به عنوان یکی از کلاسیک‌ترین و رایج‌ترین روش‌های اصلاح خاک است.

پیش بارگذاری، بارگذاری موقتی است که در محل ساخت ساختمان‌ها و تأسیسات برای بهبود بخشیدن خاکهای زیرسطحی استفاده می‌شود و متداولترین روش آن، انباشتن مصالح خاکریز، آجر، منبع آب وحتی دپوی میلگرد است که معمولاً قبل از مرحله ساخت در نظر گرفته می‌شود. این دو روش بهسازی در موارد متعددی با یکدیگر اشتراک دارند. روش اجرا، مدت زمان اجرا، وسایل مورد نیاز در اجرا و خاک مسأله دار ساختگاه در هر دو روش یکسان است. بنابراین می‌توان این دو روش را در نتایج نهایی با یکدیگر مقایسه کرد.

این پژوهش به تحلیل عددی رفتار خاک رس اشباع، بهسازی شده با دو روش پیش بارگذاری و نصب ستون سنگی به‌مراه اجرای خاکریز می‌پردازد. پس از انجام مدلسازی و صحت‌سنجی نرم افزار به مقایسه اجرای ستون سنگی در شرایط ساختگاهی پیش بارگذاری پرداخته شده است. نهایتاً نتایج صحت‌سنجی و مقایسه فنی دو روش در قالب نمودارها و خروجی‌های گرافیکی به همراه چند پیشنهاد برای ادامه کار ارائه شده است.

ظاهراً ابداع روش ستون سنگی از سال ۱۸۳۰ در فرانسه نشأت می‌گیرد. وقتی مردم به تجربه زمینهای خود را با جایگزینی خاک برای ساختمان سازی مهیا می‌کردند. البته روش جایگزینی به اشکال مختلف در تمدنهای پیش از میلاد نیز وجود داشته است ولی در آن زمان ستون حفاری نمیشد بلکه کل خاک به ضخامت مشخص برچیده شده و با مصالح سخت تر پر میشد. در این میان میتوان به تمدن بابل، ایران و روم اشاره کرد. در آمریکا از ستون سنگی نخستین بار در سال ۱۹۷۲ در چندین پروژه به صورت محدود استفاده شد. اما در اروپا از سال ۱۹۵۰ با ظهور دستگاه های مخصوص تراکم که از سال ۱۹۳۵ به بازار عرضه شد، بطور وسیعی از ستون های سنگی جهت اصلاح خاک استفاده میشود. ساخت ستون سنگی شامل حفاری ۱۵ الی ۳۵ درصد از خاک نامرغوب و جایگزینی آن با ستون های سنگی متراکم (ماسه، شن یا سنگریزه) است.

تاریخ استفاده از روش پیش‌بارگذاری در ترمیم و اصلاح خاک مربوط به قبل از دهه ۱۹۳۰ است. ایده استفاده از زهکش های عمودی در پایدار کردن خاک های ریزدانه در اواسط دهه ۱۹۲۰ میلادی بوجود آمد. اولین بار در آمریکا دانیال موران زهکشهای عمودی ماسه ای را پیشنهاد کرد که در سال ۱۹۲۶ به اسم او ثبت شد. تجربیات آزمایشگاهی و صحرایی موفق او در سال ۱۹۳۴ و در نصب اولین سیستم زهکش ها به انجام رسید. متعاقباً اولین کاربرد عملی زهکش های ماسه ای را در پایدار کردن خاک در زیر جاده ای در حوالی خلیج سانفرا نسیسکو نشان داد. از آن پس کاربرد زهکش های عمودی ماسه ای در کاهش زمان تحکیم خاک های ریزدانه گسترش یافت. قطر زهکش های عمودی از ۱۶۰ تا ۵۰۰ میلیمتر متغیر بود که بعده ها با ظهور ژئوسینتتیک ها به ۵۰ میلیمتر تقلیل یافت تا از اثرات ناشی از دستخوردگی خاک اطراف زهکش هنگام نصب بکاهد. خاکریزهای مورد استفاده در این روش به طور متوسط دارای ۳-۱۰ متر ارتفاع دارند و معمولاً نشست در حدود ۱ تا ۳ متر پیدا می‌کنند. برای دریافت نتایج بهتر از زهکش های عمودی در خاک مسأله دار استفاده می‌کنند سپس عملیات خاکریزی انجام می‌شود.

هر دو روش فوق‌الذکر در خاک های رسی اشباع یا خاکهای رسی در معرض سیکل تر و خشک شدگی، قابل اجرا است. همچنین صرفه اقتصادی و عدم نیاز به تکنولوژی سطح بالا (نیروی متخصص و ماشین آلات خاص)، سهولت و کاهش زمان اجرا در بهسازی، باعث پذیرش جامعه پیمانکاران و ارجحیت این دو روش بر دیگر روش های اصلاح خاک شده است. متذکر می‌شود این روش ها برای مناطق سرد و خشک و گرم و خشک بسیار مناسب است.

۲- مواد و روش ها

استفاده از نرم افزار المان محدود دوبعدی PLAXIS، در مدلسازی پیش بارگذاری و ستون های سنگی مناسب عمل می کند. وجه اشتراکی بین دو روش، محدوده نوسان جواب ها با خطای ۰ تا ۲۴ درصد است. در کل الگوی نتایج حاصل از مطالعه پیش رو با الگوی نتایج مطالعه مرجع و ساختگاه برابری کرده و خطای کمتر از ۲۴٪ می دهد. بنابراین با در نظر گرفتن ساده سازی، از این نرم افزار می توان در محاسبات سرانگشتی و پیش بینی نتیجه زهکشی و نشست سازه پس از مدت معلوم استفاده کرد اما بهتر است مقداری ضریب اطمینان در نظر گرفت.

برای مقایسه دو روش بهسازی زمین (پیش بارگذاری با حضور زهکش و اجرای ستون های سنگی) می بایست تمامی پارامترها ثابت مانده و فقط روش بهسازی تغییر یابد. بدین منظور از ستون های سنگی در ساختگاهی که پیشتر با روش پیش بارگذاری و زهکش های شعاعی اصلاح شده بود، استفاده می شود. بنابراین با ثابت در نظر گرفتن تمامی مشخصات ساختگاه و مدلسازی ستون های سنگی بجای زهکش های شعاعی، میتوان ارجحیت یک روش بر دیگری را بخوبی نشان داد. ملاحظاتی که در مدلسازی ستون های سنگی در ساختگاه پیش بارگذاری انجام شد عبارتند از:

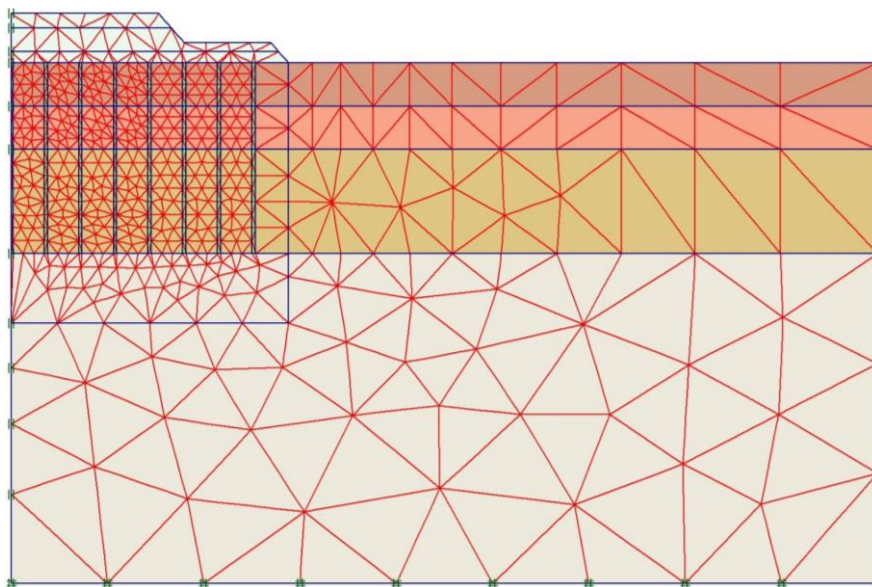
* شرایط مرزی، نوع خاک و تعداد و ضخامت لایه های خاکریزی، همچنین زمان اجرای لایه ها و زمان استراحت و تحکیم مطابق ساختگاه پیش بارگذاری با حضور زهکش است.

* عرض معادل ستون سنگی برابر ۲۵ سانتیمتر و فاصله ستون ها ۲ متر در نظر گرفته شد.

* سطح ایستایی نیز در سطح زمین قرار داده شد.

* گامهای تحلیل مشابه گامهای تعریف شده در پیش بارگذاری است بعلاوه گام آخری که برای تعیین مدت زمان لازم جهت زهکشی کامل فشار آب حفره ای اضافی تعریف شده است.

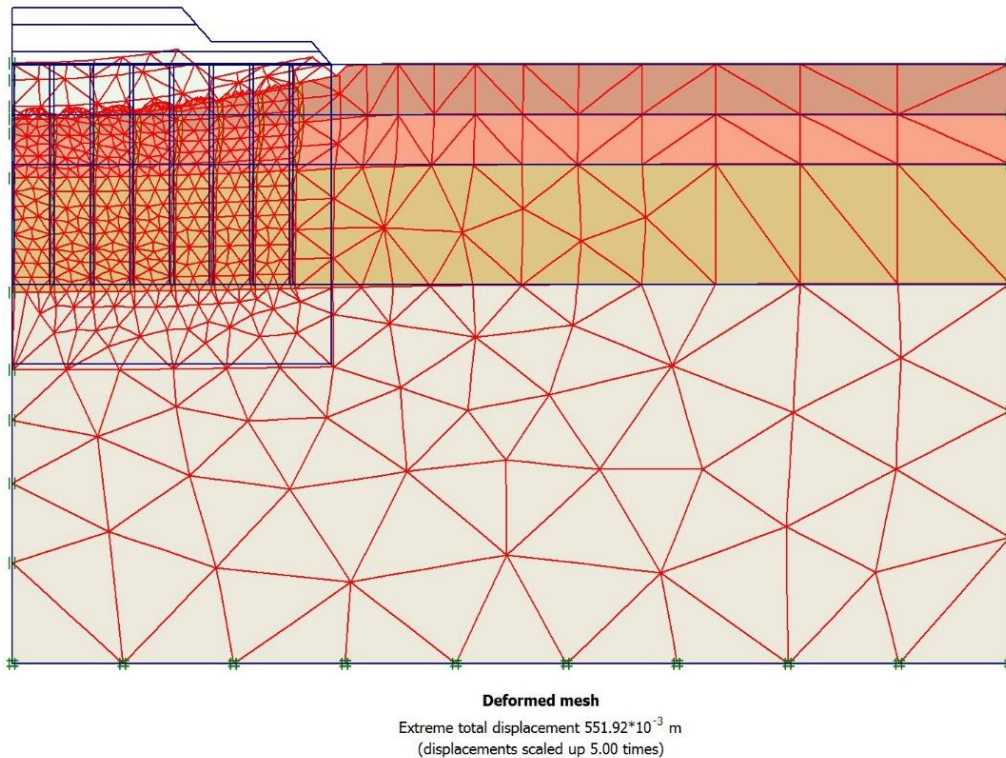
شکل ۱ هندسه و المان بندی مدل ستون سنگی را نشان می دهد. مش بندی مدل بگونه ای صورت گرفت تا در نقاط حساس مدل که نیاز به بررسی بیشتر است، المانهای بیشتری موجود بوده و تحلیل از دقت بالاتری برخوردار باشد.



شکل ۱: هندسه و المان بندی مدل ستون سنگی

در کنار مدلسازی ستون های سنگی در ساختمانی روش پیش بارگذاری، بهتر است مطالعاتی بر زمین طبیعی بدون زهکش یا ستون سنگی انجام شود. بدین منظور فقط عملیات پیش بارگذاری مدل شد. ملاحظات مدلسازی همانند ملاحظات ذکر شده در مدلسازی با حضور زهکش است. ضمناً تغییر شکل مدل تحت اعمال سربار های مختلف طی ۹۰ روز تحکیم بدون زهکش، فشار آب حفره ای، پیش بارگذاری و..... طی نمودارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

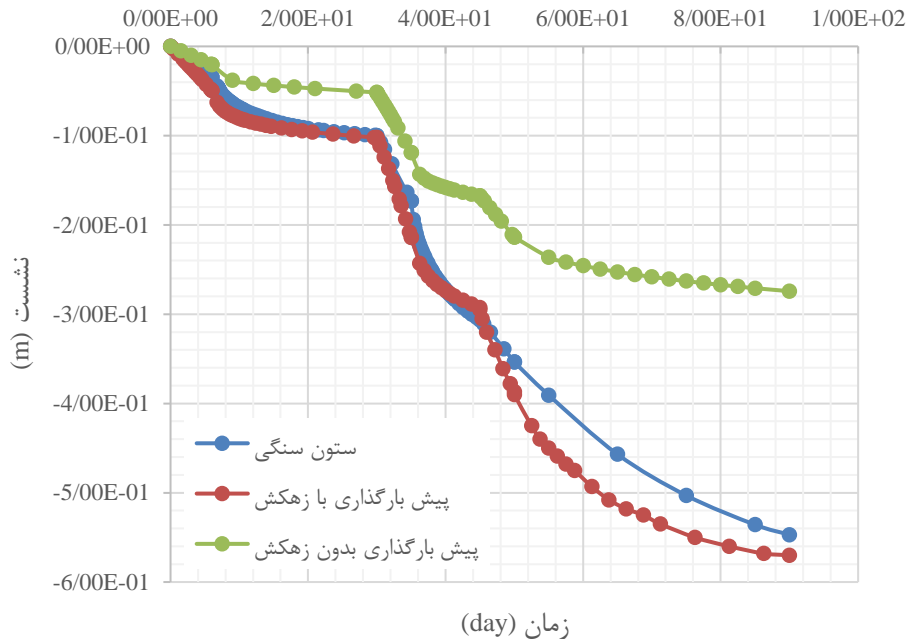
بررسی عملکرد ستون های سنگی در ساختمانی که گزینه دیگر بهسازی آن، روش پیش بارگذاری است پرداخته شد. پس از بارگذاری خاکریز بر سطح زمین مسلح به ستون های سنگی، در پایان ۹۰ روز تغییر شکل کل مدل مطابق شکل ۲ حاصل شد.



شکل ۲: تغییر شکل مدل ستون سنگی در ساختمانی مدل پیش بارگذاری

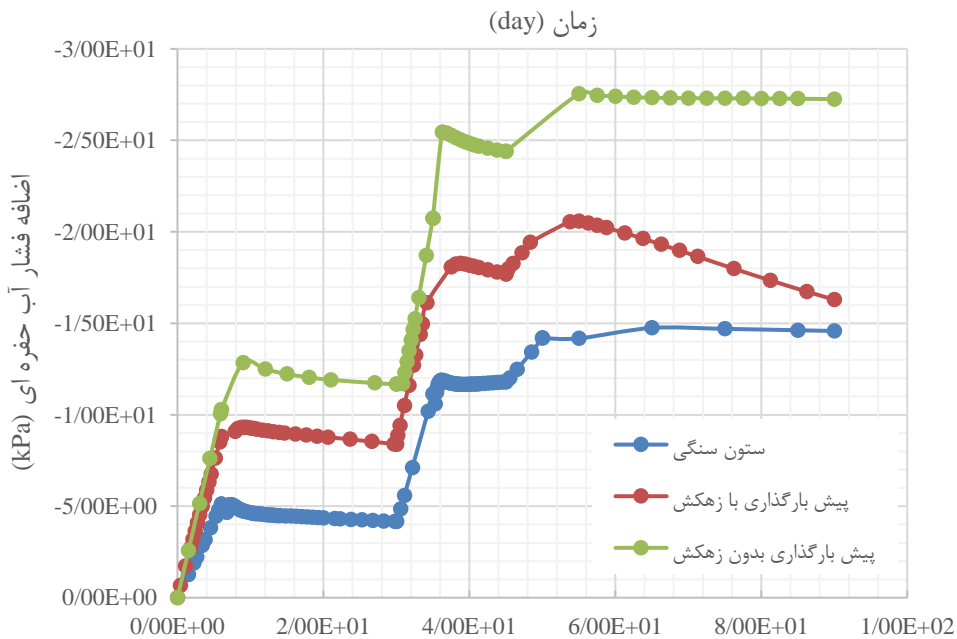
همانطور که مشاهده می شود بیشینه تغییر شکل کل مدل برابر ۵۵ سانتیمتر است. این مقدار عمدتاً در سطح زمین در نزدیکی محور تقارن رخ می دهد. در مقایسه با مدل زهکش توام با پیش بارگذاری، مقدار نشست کلی کمی کمتر (حدود ۲ سانتیمتر) تخمین زده شده است.

شکل ۳ مقایسه ای از عملکرد سه حالت پیش بارگذاری بدون زهکش، پیش بارگذاری با حضور زهکش و اجرای سون های سنگی را در کاهش نشست زمین طبیعی نشان می دهد. شکل ۳ پیش بارگذاری با حضور زهکش ها را بر استفاده از ستون های سنگی ارجحیت می دهد. علی رغم تشابه الگوی نشست تا گام دوم افزایش سربار خاکریز، نشست نهایی در حضور زهکش بیشتر از نشست نهایی در حضور ستون های سنگی برآورد شد. البته این نمودار، فاکتور کافی برای قضاوت مهندسی نیست چراکه اضافه نمودن ستون های سنگی بخودی خود، به علت بالاتر بودن مدول الاستیسیته مصالح ستون و تراکم آن، منجر به رخداد نشست های کمتری در خاک می گردد. در مقابل زهکشها هیچ مقاومتی از خود در برابر ورود سربار نشان نمی دهند.



شکل ۳: مقایسه نشست های ناشی از بارگذاری سربار به سه حالت حضور ستون های سنگی، حضور و عدم حضور زهکش های شعاعی

شکل ۴ تغییرات فشار آب حفره ای را در سه حالت مذکور با یکدیگر مقایسه می کند. از این شکل می توان نتیجه گرفت استفاده از ستون های سنگی علی رغم تشابهات اجرایی زیادی که با روش نصب زهکش های شعاعی دارد، اما روش به صرفه تر و مرغوبتری است زیرا علاوه بر کاهش نشست پذیری خاک، فشار آب حفره ای را به طرز بهتری کاهش داده و اعتمادپذیری خاک را افزایش می دهد. در عین حال بنظر می رسد برای زهکشی کامل خاک، روش نصب زهکش زمان کمتری بدست دهد زیرا شیب نزولی نمودار فشار آب حفره ای-زمان آن شیب تندتری دارد.



شکل ۴: مقایسه فشار آب حفره ای اضافی ناشی از بارگذاری سربار به سه حالت حضور ستون های سنگی، حضور و عدم حضور زهکش های شعاعی

۳- نتیجه گیری

نتایج حاصل از سه مدل‌سازی (ستون سنگی، پیش بارگذاری با و بدون حضور زهکش) با یکدیگر مقایسه شد و تلویحاً نتیجه معقولی بدست آمد. اما در اولویت بندی چند طرح فارغ از روش اجرا، پارامترهای دیگری مؤثرند که انتخاب را تحت تاثیر قرار می دهند.

جنس مصالح این پژوهش (یعنی مصالح سنگی ستون سنگی و زهکش پیش ساخته ژئوسینتتیک) با هم یکسان نبوده که همین در عملکرد یکسان آنها اثر می گذارد. دستخوردگی خاک همواره مسئله مهمی است که می باید به آن توجه داشت. در مدل ستون های سنگی نصب شده در ساختگاه پیش بارگذاری، اثر دستخوردگی خاک لحاظ نشد. زیرا با توجه به کاهش مقاومت برشی خاک در ناحیه دستخورده، احتمال وقوع نشست های بیشتر وجود داشت. اما ستون سنگی بخودی خود نشست قابل ملاحظه ای ارائه داد.

استفاده از مفاهیم سلول واحد در مدل‌سازی ستون های سنگی برخلاف مدل‌سازی زهکش ها با تعیین قطر معادل زهکش و قطر معادل غلاف خود عامل دیگری در تعیین ارجحیت یک روش بر دیگری است. در کل از بهترین روش مدل‌سازی زهکش و ستون سنگی در این پژوهش استفاده شد. بنابراین می توان این دو روش را با هم مقایسه کرد.

نتایج حاصل از مدل‌سازی ها را مختصراً می توان به صورت زیر بیان کرد:

مطابق صحت سنجی روش پیش بارگذاری با حضور زهکش، استفاده از مدل‌سازی عددی راه تخمین سرانگشتی و مناسبی است که در کمترین زمان ممکن، نتایج تقریبی مناسبی در اختیار مهندسين مشاور قرار میدهد. متذکر می شود به دلیل برخی ملاحظاتی که نویسنده مقاله مرجع از لحاظ کردن آن در متن مقاله خودداری کرده است نتایج مدل‌سازی کنونی با نتایج مقاله کمی تفاوت دارد.

مطابق صحت سنجی روش اجرای ستون های سنگی، استفاده از مدل‌سازی عددی نایج معقول و مناسبی از محدوده کار در اختیار قرار میدهد. اعتمادپذیری این روش به علت اسفاده از زهکش های طبیعی شن و ماسه ای بالا است. علت برخی تفاوتها در نتایج صحت سنجی یا نتایج مقاله ساده سازیهاست که نویسنده مقاله در نظر گرفته است. ضمناً اگر ساده سازی اتفاق نیفتاده باشد میتوان ضریبی برای نتایج مدل‌سازی در نظر گرفت که بیانگر ضریب اصلاحی یا تطبیقی است.

استفاده از ستون های سنگی نشست کمتری در پایان ۹۰ روز نسبت به استفاده از زهکش های پیش ساخته می دهد. اما فشار آب حفره ای را بیشتر زایل می کنند. قطر ستون سنگی و عملکرد آن در بهبود ظرفیت باربری خاک علت کاهش نشست آن است.

هر دو روش بهسازی به بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری خاک می انجامد اما به نظر می رسد با توجه به معیارهایی که برای اجرای ستون های سنگی در نظر گرفته شد، استفاده از روش پیش بارگذاری به همراه زهکش های افقی راهکار مؤثرتری در اعماق بالاتر از ۱۰ متر خواهد بود.

در حضور ستون های سنگی بیشترین فشار آب حفره ای اضافی کاهش می یابد زیرا مصالح مشکلساز رسی با ستون- های شنی و ماسه ای پر شده و عملاً مقداری از بار وارده در لحظه اعمال به آب و مقداری به دانه های خاک وارد می شود.

منابع

- ۱- طاهرآبادی، ع.، تحلیل عددی پتانسیل روانگرایی خاک های ماسه ای با استفاده از میکروپایل و مقایسه با مطالعه موردی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امام خمینی (۱۳۹۳).
- ۲- خزائی پول، ا.، ارزیابی عملکرد چاههای زهکش (مطالعه موردی)، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، مجتمع عالی فنی مهندسی نوشیروانی (۱۳۸۸).
- ۳- نوری، ل.، اولی پور، م.، حسینی دهدشتی، س. ع.، بهینه سازی الگوی زهکش قائم در روش پیش-بارگذاری. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۹۲).
- ۴- خداپرست، م.، پهلوان، ب.، فاخر، ع.، مطالعه موردی پیش-بارگذاری با زهکش قائم در منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس بهسازی زمین. دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران (۱۳۸۰).
- ۵- پردازی، م.، ایزدی، م.، ارومیه ای، ع.، ارزیابی کاربرد زهکش های عمودی در بهسازی خاکهای رسی مجتمع پتروشیمی بندر امام، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۷۶).
- ۶- نقی زاده، س.، بازرگان، ج.، فرخی، ف.، ارزیابی کارایی پیش-بارگذاری با نصب زهکش نواری در بهسازی خاک-های ریزدانه پروژه انبار نفت ماهشهر. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه زنجان. (۱۳۹۲).
- ۷- خداپرست، م.، کاربرد روش پیش-بارگذاری در اصلاح خاک-های نرم- مطالعه موردی در منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر. نهمین کنگره بین-المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۹۱).
- 8- Dheerendra Babu, M. R, Nayak, S and Shivashankar, R. A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of Stone Columns, Geotech Geol Eng, 31:1-22.(۲۰۱۳)
- 9- Kirsch, F., Sondermann, W. " Field Measurements and Numerical Analysis of the Stress Distribution Below Stone Column Supported Embankments and Their Stability", International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-theory and Practice, Vermeer, Schweiger, Karstunen & Cudny (eds.).(۲۰۰۳)
- 10- Najjar, S., Sadek, S. and Bou Lattouf, H., The Drained Strength of Soft Clays with Partially Penetrating Sand Columns at Different Area Replacement Ratios, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.(۲۰۱۳) .
- 11- Ambily, A. P., Ganghi, S. R. Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis, J Geotech Geoenviron Eng, ASCE, 133(4):405-415.(۲۰۰۷) .