Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 56(9) (2024) 1147-1162
DOI: 10.22060/ceej.2024.21628.7780

The investigation of the Efficiency of Vacuum preloading in the reclamation of the Weak clay soil Mahshahr Khuzestan Case Study

Mohammad Mehdi Pardsouie [1]*, S.M.A Zomorodian [2], Mehdi Mokhberi[1], Seyed Alireza Nasehi[1], Mohammad Hadi Pardsouie[1]

[1] Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Estahban branch, Estahban, Iran
[2] Department of Water and Agriculture Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

ABSTRACT: Vacuum preloading technology has been widely used all over the world for years. Unfortunately, in Iran, even after years of practical work, the efficiency and functioning of this technology remain unknown. Due to the extensive industrial constructions in the north and south coast of Iran, this technology can play an important role in advancing the overall goals of the project and increasing productivity due to the reduction of construction time and as a result of increasing the productivity of the entire soil improvement system. The use of vacuum pressure in order to increase the efficiency of systems containing surcharge loads and vertical drains is very effective and efficient and reduces the time required to reach the desired degree of consolidation. In this article, first, a summary of the history and basis of operation of vacuum soil consolidation systems is provided, and then the efficiency of this system is shown assuming its use for a practical project. Substrate consolidation of the Mahshahr clarification unit has been selected as a case study in which the project used surcharge along with vertical drains (PVD) for soil improvement. After confirming the model, a vacuum load of 30, 60, and 75 kPa was applied to the model in three states of initial surcharge of 6 meters, reduced surcharge of 3 meters, and no surcharge, and the increase in efficiency was investigated. According to the obtained results, the application of vacuum preloading significantly increases the efficiency both economically and time-wise in the soil improvement system in similar projects. The reduced slag load state of 3 meters and vacuum pressure of 30 kPa were determined as the optimal scenario in this study.

Review History:

Received: Jul. 26, 2022
Revised: Aug. 05, 2023
Accepted: Nov. 13, 2023
Available Online: Sep. 04, 2024

Keywords:

Vacuum Preloading
Surcharge
Vertical Drains
Consolidation
Weak Clay

1- Introduction

In recent years, the construction of railroad and highway embankments and foundations of large structures on soft and unconsolidated soils has led to many advances in soil remediation techniques. Most of the important constructions in most countries, due to economic conditions, the possibility of free access, the existence of oil and gas resources, and very fast developments, are carried out in areas with very weak soils with low bearing capacity, as well as with the potential of high settlements; Therefore, it is necessary to improve these soft soils before starting construction operations in order to prevent high settlements as well as differential settlements. The features of preloading with vacuum compared to the usual method of preloading are as follows: (a) The effective stress corresponding to the suction pressure increases rapidly, and the lateral displacement decreases. As a result, the risk of shear failure is minimized even with high embankment construction speeds. However, the internal displacement towards the embankment heel should be carefully considered. b) The vacuum preload pressure can be distributed to greater depths of the subsurface soil using a system of installed porous vertical drains. c) The amount of surcharge load can be reduced to obtain an equal amount of settlement, which depends on the efficiency of the vacuum system. d) Because the surcharge height can be reduced, the maximum additional pore water pressure created by vacuum preloading is lower than the conventional surcharge method. f) By applying vacuum pressure, the inevitable unsaturated conditions in the soil-drainage boundary layers are improved, which will lead to an increase in the rate of consolidation [1]. The cost of soil improvement with vacuum preloading is about 30% lower than using the usual surcharge method [9]. The efficiency of the system depends on several important factors, including the airtightness of the system, the efficiency of the insulation between the corners of the membrane and the ground surface, and the soil conditions and the location of the water surface [1, 2]. The project site is located about 20 kilometers northwest of Bandar Mahshahr Petrochemical Special Economic Zone. The two existing tanks are located on the pile. Due to economic issues, it was decided to modify the bed of two other tanks by preloading method. Previous studies have shown that according to the geotechnical characteristics of the soil in the area, a settlement of 450 and 900 mm can be achieved by using a combination of 6 and 9-meter surcharge and vertical

*Corresponding author's email: m.m.pardsouie@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

drains within 5 months. Preloading is the application of surcharge load on the execution site, before the placement of the permanent structure, under which primary consolidation will occur. During the pre-loading operation and with the exit of excess pore water pressure from the system, soil settlement took place and the effective stress in the subsurface loose and compressible layers increased and therefore the possibility of settlement of the structure after construction is significantly reduced [21]. The layering of the site is as follows:

Layer I: This layer starts from the surface of the earth and continues to a depth of 16 meters. This sticky layer is mostly thin clay and its strength is soft to semi-hard. One of the remarkable characteristics of this layer is the presence of sand and silt lenses at different depths, which sometimes increases the SPT number at that depth. Layer II: This layer starts from an average depth of 16 meters and continues to an average depth of 22 meters. This layer is non-sticky and mainly made of silty sand or sand silt with thin clay interlayers. In terms of density, this layer is placed in the medium to very dense category. Layer III: From the average depth of 22 meters to the end of the identification depth, in most of the boreholes, a sticky layer of thin clay material has been observed again. In terms of strength, this layer is placed in the rigid to hard category [4]. The pre-loading project of Mahshahr port clarifier units will be used to check the efficiency of the vacuum system in this article. The numerical model is made of plane strain type and finite element method and analyzed using Geostudio 2018 software. In this modeling, the Behavioral Model of Modified Cam Clay which obeys the closed flow law and its efficiency in the model. It has been proven that similar problems have been used [5, 6]. The elements used are Quads and Triangles and sand blankets and drains were applied as boundary conditions in the model. The impact zone around the drain is ignored. Since most of the settlement occurs in the upper 16 meters, only the upper layer is considered in the finite element modeling. Modeling details and additional explanations about the studied project can be checked in [3, 6-9].

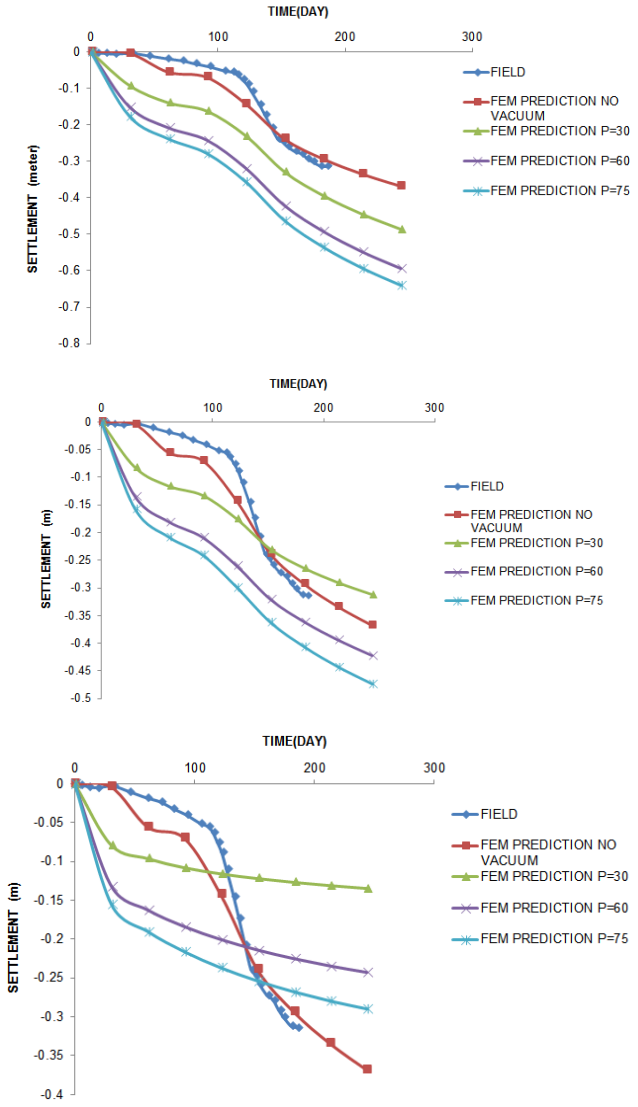


Fig. 1. Bed settlement under vacuum pressure of 30, 60, and 75 kilopascals for a) 6-meter surcharge b) 3-meter surcharge preloading c) without surcharge preloading

2- Results and Discussion

To check the efficiency of the consolidation system with different amounts of vacuum preload, three modes were considered: 1) applying vacuum pressure of 30 kPa, 2) applying vacuum pressure of 60 kPa 3) applying vacuum pressure of 75 kPa, which is the maximum amount that can be applied in practical terms in the subsoil. It is assumed that the vacuum application system has no leaks and no interruptions have occurred during its operation. These three cases were tested with three different surcharge loading modes to get a clear picture of the effect of vacuum. In the first case (Figure 1a), it is assumed that the conditions of the project are the same as the previous ones, and we want to use the vacuum load in addition to the 6-meter surcharge and vertical drains just to speed up the implementation process of the project. It can be seen from Figure 1a that under these conditions, with an applied vacuum of 30, 60, and 75 kPa, the duration of the project is reduced by 40, 60, and 78 days, respectively, to reach the target consolidation settlement (33 cm). As can be seen, in the case of using the combination of surcharge and vacuum pressure, the time has been significantly reduced, and if time is considered a key factor in the project, this combined method can be very efficient. In the second case, it is assumed that the surcharge height is reduced by half. It is clear that in this case, with a vacuum pressure of 30 kPa, the desired settlement would have been achieved at the same time as before, while 3 meters of the embankment height has been reduced, and following that, the problems related to the embankment's stability and implementation issues have also been reduced (Figure 1b). Considering the high cost of earthmoving and embankment operations, using the combination of surcharge preloading and vacuum with

reduced height is a suitable economic option to present the improvement plan. Currently, using the combination of load and reduced surcharge in most of the current projects in the world as an efficient and economic method is considered by geotechnical designers. In this case, due to the existence of a slag, there is no need to use high vacuum pressures, and as a result, the technical problems associated with maintaining high pressures and leakage in the system and the overall cost of maintaining the system are significantly reduced. Also, using this method in areas where access to embankment materials for slag construction is limited can also be considered as a desirable option. In the case of no embankment (Figure 1c), optimal performance is not observed in the vacuum pressure of 30 and 60 kPa. The reason for this is the presence of sand lenses in the first layer of soil, which has greatly reduced the efficiency of the vacuum consolidation system. In this case, despite the presence of sand lenses and the absence of a surcharge, we can see that the system has reached the target on the 170th day, similar to the case implemented with a 6-meter surcharge. In the case of using a vacuum pressure of 60 kpa, in 170 days, 90% of the target consolidation settlement has been achieved, and if the operation continues, the expected final settlement will be achieved within 30 days. According to the mentioned cases, it can be seen that the use of vacuum loading alone at pressures of 60 and 75 kpa has a performance similar to that of the constructed surcharge, with the difference that in this case there is no need for embankment and excavation operations in this huge volume and immediately after the completion of the operation The operation of the next part, which is the construction of the foundation, could be started, which could save a significant amount of time and money in the project.

3- Conclusions

In this research, after introducing the vacuum consolidation system and describing its operating mechanism, the effectiveness of the vacuum preloading system was investigated in a case project (substrate consolidation of Mahshahr clarification unit). In areas where, due to atmospheric, geotechnical conditions or a combination of these, it is not possible to build high embankments to improve the subsoil, this technology shows its efficiency well. In cases where due to lack of time, a system that has high reliability should be used, the vacuum consolidation system can be very beneficial. Due to the fact that this system is about 30% or more cheaper than the slag load, depending on the project conditions, this system can be used alone or in combination with vacuum and surcharge to reduce costs. In this case study, although due to the presence of sand lenses, this system did not have the efficiency expected in previous similar projects, but still in the presence of 6 meters surcharge, it significantly reduced the time to reach the target, especially in the vacuum pressure mode of 60 and it was 75 kPa. In the case of a reduced surcharge of 3 meters with a vacuum pressure of 30 kPa, the system had almost the same performance as the presence of a 6-meter surcharge, and in the case of no surcharge, with a vacuum pressure of 75 kPa, it reached the target landing in almost the same time. According to the results of this research, the use of the 3-meter reduced surcharge combination mode with a minimum vacuum pressure of 30 kPa was the most economical and at the same time the most efficient soil improvement system. Due to the decrease in efficiency due to the presence of sand lenses, the importance of geotechnical investigations before starting such projects is evident. Due to the expansion of coastal and offshore constructions in the country, it is hoped that this system will also be used in similar projects.

References

[1] J. Chu, S. Yan, B. Indraratna, Vacuum preloading techniques-recent developments and applications, (2008).

[2] C. Rujikiatkamjorn, B. Indraratna, Current state of the art in vacuum preloading for stabilising soft soil, (2013).

[3] T. Fakharian , Mehdi zade , Mohammad loo the numerical modelling of radial consolidation and callibration of instrumentation data in Sarbandar Decanter center in Mahshahr, in: forth international conference of soil mechanic and geotechnic in iran, undefined, 2010.

[4] A. Tasalloti, K. Fakharian, A. Mehdizadeh, Preliminary investigation of instrumentation in decanter units preloading project in Mahshahr port (South-west of Iran), 2010.

[5] M.C. Yapriadi, I. Sumarli, A.J.J.J.M.T.S. Iskandar, Evaluasi Settlement Menggunakan Surcharge Preloading Dengan Pvd Pada Proyek Di Bandung Selatan, 3(3) (2020) 911-922.

[6] S.M.A.Z. Mohammad Mehdi Pardsouie the investigation of the percentage of improvement in the case of applying vacuum pressure along with PVD and surcharge (part 2), in: the second Iranian national conference on structure , earthquake and geotechnical engineering, Mazandaran, 2011.

[7] S.M.A.Z. Mohammad Mehdi Pardsouie The numerical investigation of soil improvement of Mahshahr decanter unit with surcharge and embankment preloading (part 1), in: the second Iranian national conference on structure , earthquake and geotechnical engineering, Mazandaran, 2011.

[8] M.M. Pardsouie, M. Mokhberi, M.H.J.A.R.i.C.E. Pardsouie, The Importance of Incorporating Hydraulic Modifier Function versus Step Loading in Ground Improvements Including Vacuum Preloading, 4(2) (2022) 54-60.

[9] M.M. Pardsouie, M.H. Pardsouie, S.M.A. Zomorodian, M.J.J.o.C.E. Mokhberi, M. Application, Numerical Study of efficiency of the Vacuum Preloading in Weak Clay Treatment (a case study), 6(2) (2022).

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۶، شماره ۹، سال ۱۴۰۳، صفحات ۱۱۴۷ تا ۱۱۶۲
DOI: 10.22060/ceej.2024.21628.7780

بررسی میزان افزایش کارآمدی در روش پیش بارگذاری با خلاء در پروژه بهسازی خاک رس‌های نرم: مطالعه موردی ماهشهر خوزستان

محمد مهدی پاردسوئی[1*]، سید محمد علی زمردیان[2]، مهدی مخبری[1]، سید علیرضا ناصحی[1]، محمد هادی پاردسوئی[1]

۱- دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران
۲- دانشکده کشاورزی، بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

خلاصه: تکنولوژی اعمال پیش بارگذاری به‌وسیله خلاء سال‌ها است که در اقصی‌نقاط دنیا به طور وسیعی مورداستفاده قرار می‌گیرد. متأسفانه در ایران، هنوز پس از گذشت سال‌ها در کارهای عملی همچنان کارآمدی و نحوه عملکرد این تکنولوژی ناشناخته باقی‌مانده است. باتوجه‌به ساخت‌وسازهای صنعتی گسترده در نوار ساحلی شمال و جنوب ایران، این تکنولوژی به‌خاطر کاهش زمان ساخت و در نتیجه افزایش بهره‌وری در کل سیستم بهسازی خاک، می‌تواند نقش مهمی در پیشبرد اهداف کلی پروژه و افزایش بهره‌وری ایفا نماید. استفاده از فشار خلاء به‌منظور افزایش بهره‌وری سیستم‌های مشتمل بر بار سربار و زهکش‌های عمودی بسیار مؤثر و کارآمد است و زمان موردنیاز برای رسیدن به درجه تحکیم موردنظر را کاهش می‌دهد. در این مقاله ابتدا خلاصه‌ای از تاریخچه و اساس کارکرد سیستم‌های تحکیم خاک با خلاء ارائه شده و سپس میزان کارآمدی این سیستم با فرض به‌کاربردن آن برای یک پروژه عملی نشان داده می‌شود. تحکیم بستر واحد زلال سازی ماهشهر به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است که در آن پروژه، از بار سربار به همراه زهکش‌های عمودی (PVD) جهت بهسازی خاک مورداستفاده قرار گرفته بود. پس از تأیید مدل، بار خلاء به میزان ۳۰، ۶۰ و ۷۵ کیلوپاسکال در مدل در سه حالت وجود سربار اولیه ۶ متری، سربار کاهش‌یافته ۳ متری و در حالت بدون سربار اعمال گردید و میزان افزایش کارآمدی مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده اعمال پیش بارگذاری خلاء به میزان قابل‌توجهی باعث افزایش میزان کارآمدی هم از نظر اقتصادی و هم از نظر زمانی در سیستم بهسازی خاک در پروژه‌های مشابه می‌گردد. حالت بار سربار کاهش‌یافته ۳ متری و فشار خلاء ۳۰ کیلوپاسکالی به‌عنوان حالت بهینه در این مطالعه مشخص گردید.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴

کلمات کلیدی:
پیش بارگذاری با خلاء
سربار
زهکش‌های عمودی
تحکیم
رس ضعیف

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ساخت خاکریزهای ریل‌ها و بزرگراه و فونداسیون سازه‌های بزرگ بر روی خاک‌های نرم و تحکیم نیافته، منجر به پیشرفت‌های زیادی در زمینه تکنیک‌های بهسازی در خاک شده است. بیشتر ساخت‌وسازهای مهم در بیشتر کشورها، به‌خاطر شرایط اقتصادی، امکان دسترسی آزاد، وجود منابع نفتی و گازی و پیشرفت‌های بسیار سریع، در مناطقی با خاک‌های بسیار ضعیف با ظرفیت باربری پایین، و همچنین با قابلیت نشست‌های زیاد انجام می‌پذیرد؛ بنابراین، بهسازی این خاک‌های نرم قبل از شروع عملیات ساخت‌وساز به‌منظور جلوگیری از نشست‌های زیاد و همچنین نشست‌های تفاضلی امری ضروری است.

روش های متعددی در طول سالیان گذشته برای بهبود خصوصیات مهندسی خاک های ضعیف رسی مورد استفاده قرار گرفته است که می توان از محبوب ترین آن ها به روش اختلاط عمیق رس و سیمان [۱, ۲] و پیش بار گذاری اشاره کرد. استفاده از پیش بارگذاری، به عنوان یکی از روش های کلاسیک و محبوب در کارهای عملی شمرده می شود[۳]. پیش بارگذاری، استفاده از بار سربار بر روی محل اجرایی، قبل از قرار گیری سازه دائم می باشد که تحت آن تحکیم اولیه حادث خواهد شد. بهرحال، در حالت رسوبات ضخیم با نفوذ پذیری پایین، زمان تحکیم به وسیله پیش بارگذاری به تنهایی به مقدار قابل توجهی طولانی می گردد. به همین دلیل یک سیستم از زهکش های عمودی (PVD)، معمولا برای تسریع در عمل زهکشی شعاعی و فرآیند تحکیم مورد استفاده قرار می گیرد[۴, ۵]. عملکرد سیستم زهکش های عمودی بدین گونه است که مسیر زهکشی شعاعی را کاهش می دهند. استفاده از فشار خلاء همراه با بارگذاری سربار می تواند به مقدار بیشتری باعث تسریع در فرآیند تحکیم شده و مقدار سربار مورد نیاز را کاهش دهد. فشار خلاء اعمالی باعث به وجود آمدن فشار آب منفذی منفی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.m.pardsouie@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

شکل ۱. پیش بارگذاری به‌وسیله بار سربار و بار خلاء [۱۵]

Fig. 1. Preloading by surcharge preloading and vacuum load [15]

می گردد که منجر به افزایش گرادیان هیدرولیکی و تنش موثر در خاک می گردد، که نهایتا فرآیند تحکیم بدون افزایش مثبت فشار آب منفذی اضافی در ابتدای کارتسریع می یابد. در مناطقی با خاک های بسیار نرم، که امکان ساخت خاکریز های بلند وجود ندارد، فشار خلاء می تواند به صورت مطلوبی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اهمیت زمان در پروژه های مشابه محققین و مهندسین شاغل در پروژه همواره به دنبال راهی برای کاهش زمان مورد نظر جهت بهسازی خاک پروژه بوده اند که می توان به طور مثال به کاهش فاصله زهکش ها یا افزایش عمق نصب زهکش ها اشاره نمود [۴, ۶]. در سال های اخیر، سیستم های مشتمل بر PVD نیز به منظور توزیع فشار خلاء مورد استفاده قرار گرفته اند که قادر به نفوذ به لایه های عمیق بوده، و در نتیجه سرعت و کارآمدی سیستم را به مقدار قابل توجهی افزایش داده اند[۷, ۸].

تحکیم با خلاء در سال ۱۹۵۲ توسط کجلمن پیشنهاد شد[۹]. بعد از آن در دو دهه بعدی مطالعات جداگانه ای در گوشه و کنار دنیا در این خصوص انجام پذیرفت. در سال های اخیر استفاده های میدانی زیاد و بسیار موفقی از این شیوه در مقالات گزارش شده است[۱۰-۱۳]. مطالعات نشان داده اند که تحکیم به کمک خلاء می تواند یک جایگزین کارآمدتر، ارزان تر و سریع تر در مقایسه با روش معمول در پیش بارگذاری رس های نرم به وسیله خاکریز است[۱۴]. شکل ۱ شمایی از یک پروژه تحکیم با خلاء به همراه سربار و زهکش عمودی را نشان می دهد.

۲- مقایسه پیش بارگذاری خلاء با روش‌های معمول

شکل ۲ فرایند تحکیم روش معمول و پیش بارگذاری به‌وسیله خلاء را نشان می‌دهد. افزایش در تنش مؤثر برای این روش مربوط به اعمال فشار خلاء است. باید توجه نمود که فشار خلاء نمی‌تواند از فشار اتمسفر بیشتر باشد تا از پدیده کاویتاسیون[1] جلوگیری شود[۸]. ویژگی های پیش بارگذاری با خلاء در مقایسه با روش معمول پیش بارگذاری از قرار زیر می باشند :

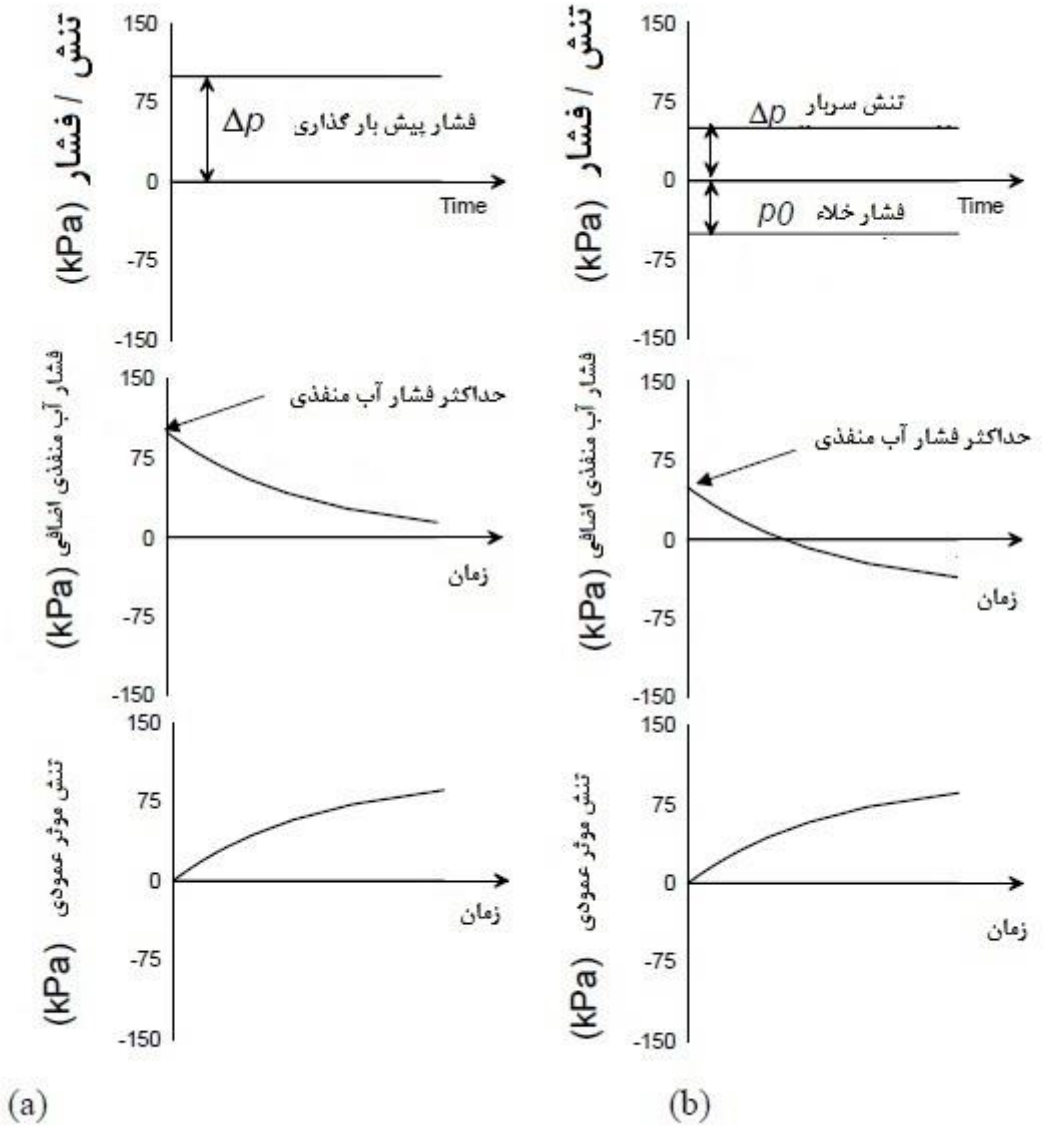
الف) تنش مؤثر مربوط به فشار مکشی با سرعت زیادی افزایش می‌یابد، و جابه‌جایی جانبی[2] کاهش می‌یابد. در نتیجه، خطر گسیختگی برشی حتی با سرعت‌های زیاد ساخت خاکریز به حداقل می‌رسد. به‌هرحال، جابه‌جایی درونی به سمت پاشنه خاکریز باید بادقت بررسی شود.

ب) فشار پیش بارگذاری خلاء را می‌توان تا عمق‌های بیشتر خاک زیر سطحی با استفاده از سیستم زهکش‌های عمودی متخلخل نصب شده توزیع نمود.

ج) میزان بار سربار را می‌توان برای به‌دست‌آوردن مقدار برابر نشست کاهش داد که این موضوع به کارآمدی سیستم خلاء بستگی دارد.

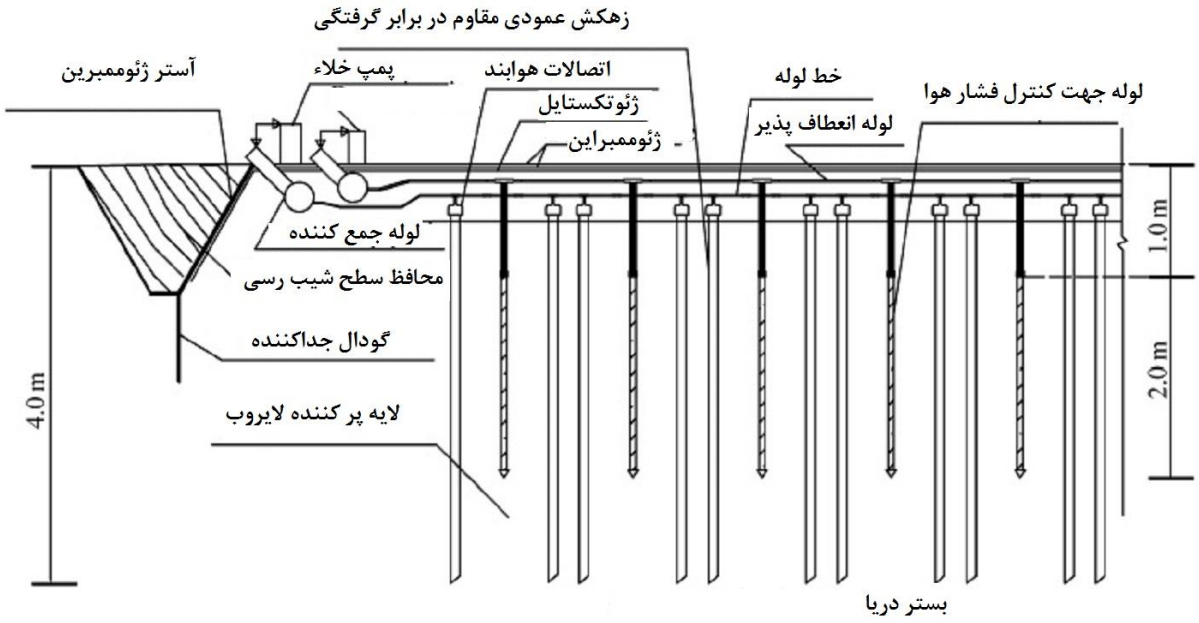
د) به این دلیل که ارتفاع سربار را می‌توان کاهش داد، حداکثر فشار آب منفذی اضافی به وجود آمده با پیش بارگذاری خلاء از روش سربار معمول کمتر است.

1 Cavitation
2 Lateral displacement



شکل ۲. فرایند تحکیم الف) بارگذاری معمول ب) پیش بارگذاری خلاء با فرض بدون هیچ هدررفت خلاء [۱۶]

Fig. 2. Consolidation process a) Normal loading b) Vacuum preloading assuming no vacuum loss [16]



شکل ۳. نمائی شماتیک از تحکیم با خلاء [۱۷]

Fig. 3. Schematic representation of vacuum consolidation [17]

و) با اعمال فشار خلاء، شرایط اجتناب‌ناپذیر غیراشباع در لایه‌های مرزی خاک – زهکش بهبودیافته که منجر به افزایش میزان سرعت تحکیم خواهد شد[۳].

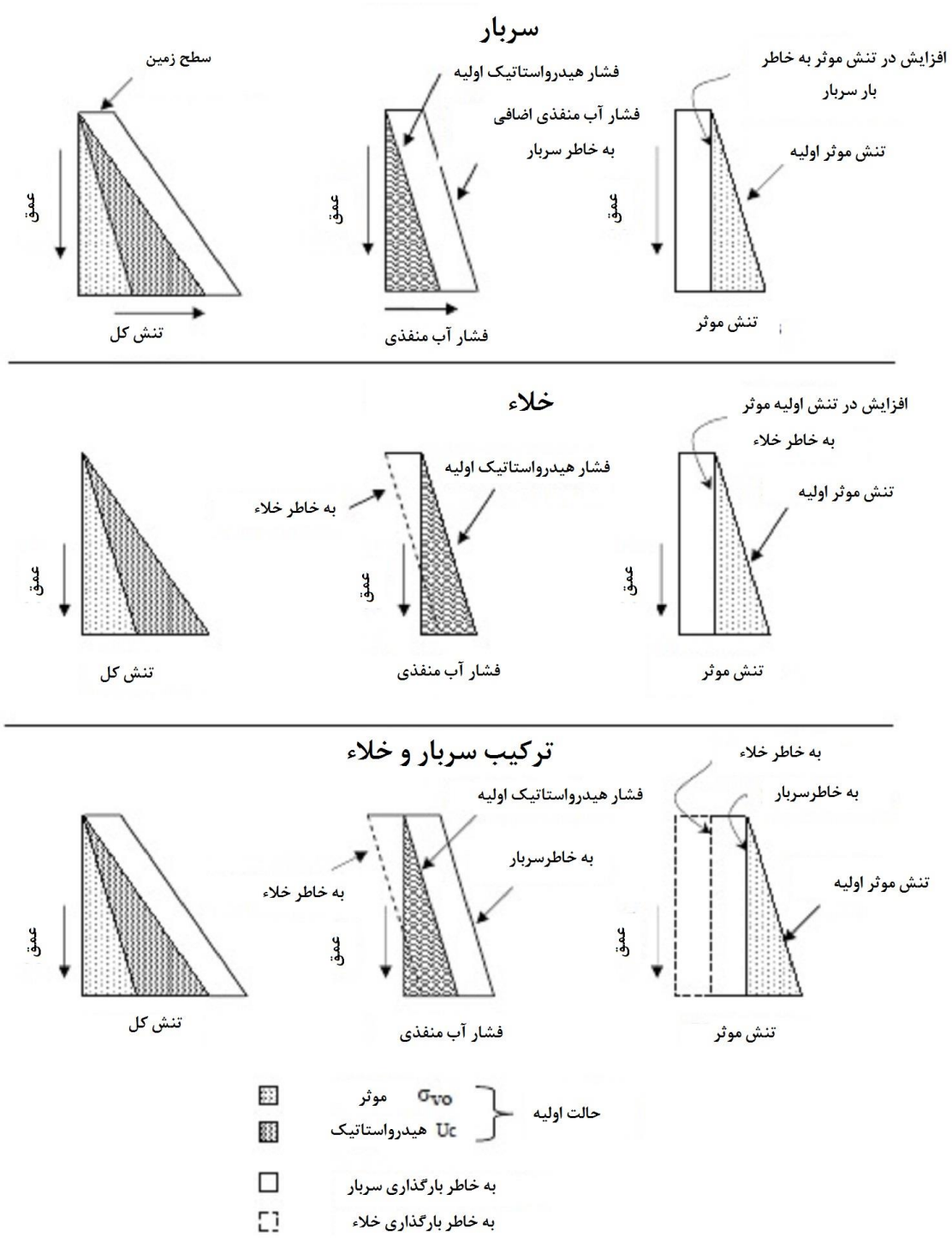
هزینه بهسازی خاک با پیش بارگذاری خلاء حدود ۳۰٪ کمتر از استفاده از روش سربار معمول است[۱۶]. کارآمدی سیستم به چندین فاکتور مهم بستگی دارد که عبارتند از: هوابند بودن سیستم، کارآمدی عایق ها میان گوشه های غشاء و سطح زمین و شرایط خاک و مکان قرارگیری سطح آب[۳, ۴].

۳- اصول تحکیم با خلاء

در روش معمول بار سرباره، تنش مؤثر با افزایش تنش کل افزایش می‌یابد، اما در روش تحکیم با خلاء با ثابت نگه‌داشتن تنش کل، تنش مؤثر با کاهش فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. مفهوم تحکیم با خلاء در شکل ۳ و ۴ به‌صورت شماتیک نشان‌داده‌شده است.

این فرایند به طور خلاصه عبارت است از افزایش تنش مؤثر (σ') به‌خاطر فشار آب منفذی منفی ($-u$) که از کاهش فشار به‌خاطر خلاء ناشی می‌شود. با استفاده از روابط تنش مؤثر پیشنهادی ترزاقی برای خاک کاملاً اشباع می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در تنش مؤثر ($\Delta\sigma'$) به طور معکوس به فشار آب منفذی مرتبط است (Δu). در نتیجه یک افزایش در مقاومت خاک و کاهش در حجم خاک را شاهد خواهیم بود.

اساس پیش بارگذاری خلاء اینگونه می باشد که توده خاک به خاطر خلاء موجود در زیر لایه ناتراوا تحت بار گذاری قرار می گیرد. اگر لایه خاکریز نیز بر روی لایه ناتراوا وجود داشته باشد توده خاک تحت اثر ترکیبی از بار خلاء و سربار خواهد بود. در آغاز، توده خاک تحت اثر فشار اتمسفر است (p_a). طی تحکیم با خلاء، فشار خلاء در زیر لایه ناتراوا تا فشار کاهش می یابد تا فشار $-p_0$ به وجود می آید. این فشار اعمالی باعث به وجود آمدن فشار در کوشن ماسه ای گردیده و عمل زهکشی حادث می گردد تا فشار به p_v کاهش یابد، یا به عبارت دیگر ($p_v = p_a - p_0$) طوری که اختلاف فشار نهایی برابر با ($p_a - p_v$) باشد. از طرف دیگر، در پیش بارگذاری سرباره، فشار تا p_p افزایش می یابد و در نتیجه اختلاف فشار برابر با ($p_p - p_a$) خواهد بود. در نتیجه در حالت ترکیبی پیش بارگذاری فشار خلاء و فشار سرباره، تفاوت فشار برابر با ($p_p - p_v$) خواهد بود، که در نتیجه زهکشی بالاتری را خاطر این تفاوت فشار بزرگتر خواهیم داشت که باعث بهبود بیشتری در مقاومت خاک شده و نشست خاک تسریع بیشتری خواهد یافت[۱۶]. یک



شکل ۴. الف) تحکیم به کمک خلاء الف) بار سربار معمول ب) بار اعمالی خلاء در سطح زمین ج)ترکیبی از بارگذاری خلاء و سربار [۱۹]

Fig. 4. a) Consolidation with the help of vacuum preloading b) normal surcharge load b) applied vacuum preloading on the ground surface c) the combination of vacuum and surcharge preloading [19]

نمای شماتیک تحکیم با خلاء به وسیله زهکش های عمودی متخلخل (PVD) پیشنهادی توسط [۱۸] در شکل ۳ نشان داده شده است. یک مقایسه میان پروفیل تنش کل، فشار آب منفذی، تنش موثر تحت الف) بار سرباره معمول، ب) بار اعمالی خلاء در سطح زمین و ج) ترکیبی از بار گذاری خلاء و سرباره در شکل ۴ نشان داده شده است. فشار آب منفذی نظری و توزیع تنش عمودی طی تحکیم با بار سرباره و بار خلاء در شکل ۴ نشان داده شده است. در پیش بارگذاری با خلاء یک عرشه کاری معمولا ساخته می شود. این عرشه از یک لایه ۸/ . تا ۱ متری ماسه زهکشی ساخته می شود که از میان آن ها زهکش های عمودی که تا عمق مناسب فرو رانده می شوند، نصب می گردند. یک آستر پلی اتیلنی انعطاف پذیر منطقه را می پوشاند و به یک سری آبراه متصل می گردد که این شبکه، یک عایق هوابند را در منطقه به وجود می آورد. در زیر این لایه ناتراوا یک سیستم لوله های متخلخل جمع کننده آب قرار داده می شود که آب بالا کشیده شده توسط زهکش ها را جمع آوری می نمایند. پمپ های خلاء که اختصاصا به همین منظور طراحی شده اند، و قادرند فشار های خلاء بزرگی را به وجود آورند، همانطور که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است به سیستم جمع آوری آب ها متصل می شوند.

همان‌طور که در شکل ۴ نشان‌داده‌شده است، بلافاصله بعد از اعمال بار سرباره، فشار آب منفذی و تنش کل افزایش می‌یابد. در انتهای تحکیم، زایل شدن فشار آب منفذی باعث افزایش تنش مؤثر خواهد شد. بهر حال، در تحکیم با خلاء تنش مؤثر با میزان کاهش فشار آب منفذی به‌خاطر فشار خلاء، افزایش خواهد داشت. در روش تحکیم با خلاء، تنش کل طی فرایند مکش تغییری نخواهد کرد. به طور مشابه، ترکیبی از بار خلاء و بار سرباره باعث افزایش تنش مؤثر خواهد شد. به‌هرحال، تنش کل تنها به میزان بار سربار اعمالی افزایش خواهد یافت. به‌صورت نظری، تحکیم با خلاء محدود به حدود ۱ اتمسفر (۱۰۰ kpa) است که تقریباً معادل ۶ متر سربار است. در واقعیت مشکلات فنی باعث کاهش کارآمدی سیستم خلاء در عمل می‌گردند. یک سیستم با کارآمدی ۷۵٪، تقریباً معادل یک‌بار سرباره ۴/۵ متری است[۴]. بنابراین، تحت شرایط بهتر یا با یک سیستم با عایق بندی موثرتر، عملکرد بهتر و در نتیجه بارسرباره بالاتری را می توان نتیجه گرفت.

۴- پروژه تحکیم واحدهای زلال‌ساز بندر ماهشهر به‌وسیله سربار و زهکش‌های عمودی و خلاء

محل پروژه در حدود ۲۰ کیلومتری شمال غربی منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی بندر ماهشهر قرار دارد. دو مخزن موجود بر روی ریز شمع قرار دارند. به‌خاطر مسائل اقتصادی تصمیم گرفته شد که بستر دو مخزن دیگر به روش پیش بارگذاری اصلاح گردد. مطالعات پیشین انجام شده توسط ایزدی و همکاران[۲۰] نشان داده اند که با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی خاک موجود در منطقه می توان یک نشست ۴۵۰ و ۹۰۰ میلیمتری را با استفاده از ترکیب سربار ۶ و ۹ متری و زهکش های عمودی در مدت ۵ ماه مشاهده نمود. پیش بارگذاری، استفاده از بار سربار بر روی محل اجرایی، قبل از قرار گیری سازه دائم می باشد که تحت آن تحکیم اولیه حادث خواهد شد. در طول عملیات پیش بارگذاری و با خروج اضافه فشار آب حفرهای از سیستم، نشست خاک صورت گرفته و تنش موثر در لایه های سست و تراکم پذیر زیرسطحی افزایش یافته و لذا امکان نشست سازه پس از احداث به میزان قابل توجهی کاهش می یابد[۲۱]. لایه بندی پژوه از قرار ذیل است:

لایه I: این لایه از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۱۶ متر ادامه می‌یابد. این لایه چسبنده و عمدتاً از جنس رس لاغر بوده و استحکام آن نرم تا نیمه سفت است. از مشخصات قابل‌توجه این لایه وجود لنزهای ماسه‌ای[1] و سیلتی در اعماق مختلف بوده که بعضاً باعث افزایش عدد SPT در آن عمق شده‌اند.

لایه II: این لایه از عمق متوسط ۱۶ متر شروع و تا عمق متوسط ۲۲ متر ادامه می‌یابد. لایه موردنظر غیرچسبنده و عمدتاً از جنس ماسه سیلتی و یا سیلت ماسه‌ای است که دارای میان‌لایه‌هایی از جنس رس لاغر با ضخامت کم است. این لایه از نظر تراکم در رده با تراکم متوسط تا خیلی متراکم قرار گرفته است.

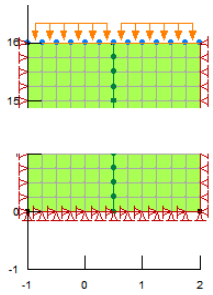
لایه III: از عمق متوسط ۲۲ متر تا انتهای عمق شناسایی در اکثر گمانه‌ها مجدداً لایه چسبنده از جنس رس لاغر مشاهده شده است. این لایه از نظر استحکام در رده سفت تا سخت قرار گرفته است[۲۲].

پروژه پیش بارگذاری واحدهای زلال سازی بندر ماهشهر برای بررسی میزان کارآمدی سیستم خلاء در این مقاله مورداستفاده قرار خواهد گرفت.

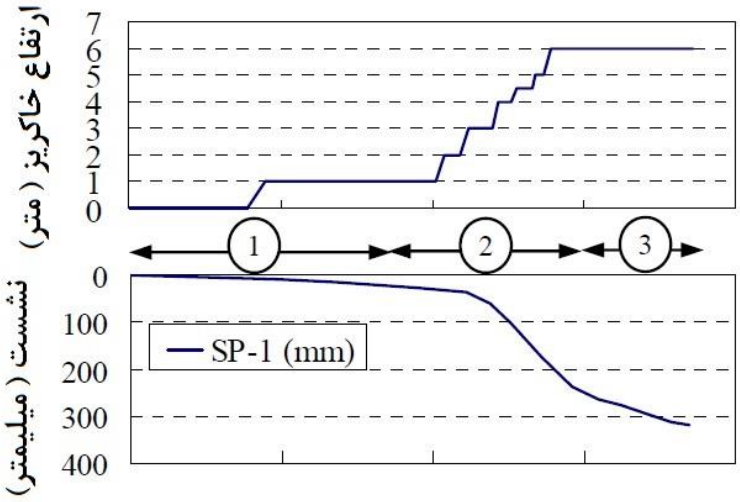
۵- مدل اجزای محدود

مدل عددی ساخته شده از نوع کرنش صفحه ای و به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم افزار Geostudio 2018 تحلیل شده است.در این مدل سازی از مدل رفتاری Modified Cam Clay که از قانون هم بسته جریان تبعیت می کند و کارآمدی آن در مدل سازی مسائل مشابه به اثبات رسیده است استفاده گردید[۲۳, ۲۴]. المان مورد استفاده از نوع Quads

1 Sand lenses



(الف)



(ب)

شکل ۵. (الف) مدل تک‌سلولی تقارن محوری مورداستفاده در شبیه‌سازی اجزای محدود ب) نمودار خاکریزی و نشست در محدوده شماره ۱ واحد زلال سازی ماهشهر [۲۲]

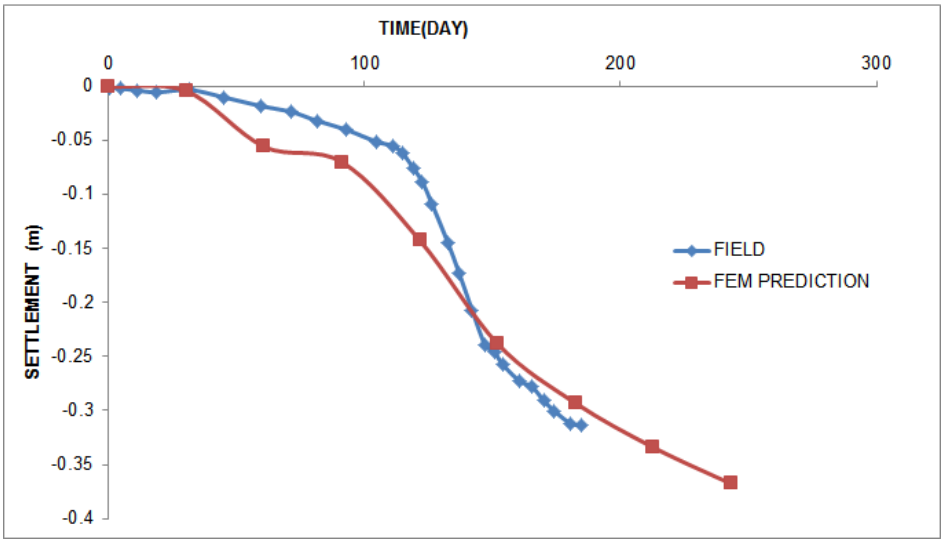
Fig. 5. (a) Axisymmetric single-cell model used in finite element simulation b) Diagram of embankment construction and settlement in area No. 1 of Mahshahr clarification unit [22]

and Triangles بوده و پتوی ماسه ای و زهکش ها به صورت شرایط مرزی در مدل اعمال شدند. شکل ۵ شبکه بندی مدل در برنامه اجزای محدود را نشان می دهد. از منطقه تاثیر در اطراف زهکش صرفنظر شده است. از آن جایی که بخش اعظم نشست در ۱۶ متر بالایی روی می دهد در مدل سازی اجزای محدود تنها لایه بالایی در نظر گرفته شده است. جزییات مدل سازی و توضیحات تکمیلی در خصوص پروژه مورد مطالعه را می توان در [۲۱, ۲۴–۲۷] بررسی کرد. شکل ۶ نتایج مدل اجزای محدود را نسبت به داده های اندازه گیری شده در محل نشان می دهد.

۶- بحث‌وبررسی نتایج

به‌منظور بررسی میزان کارآمدی سیستم تحکیم با مقادیر مختلف پیش بارگذاری خلاء سه حالت در نظر گرفته شد:

۱- اعمال فشار خلاء ۳۰ کیلوپاسکال ۲- اعمال فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال ۳- اعمال فشار خلاء ۷۵ کیلوپاسکال که بیشترین مقداری است که از لحاظ عملی در خاک زیرین قابل‌اعمال است. فرض می‌شود که سیستم اعمال خلاء هیچ‌گونه نشتی نداشته و در طی مدت‌زمان بهره‌برداری هیچ‌گونه وقفه‌ای در کار آن حادث نگردیده است. این سه مورد با سه حالت مختلف



شکل ۶. نشست پیش‌بینی‌شده در برابر داده اندازه‌گیری شده در محل در پروژه واحد زلال سازی ماهشهر (داده‌های اندازه‌گیری شده از [۲۱])

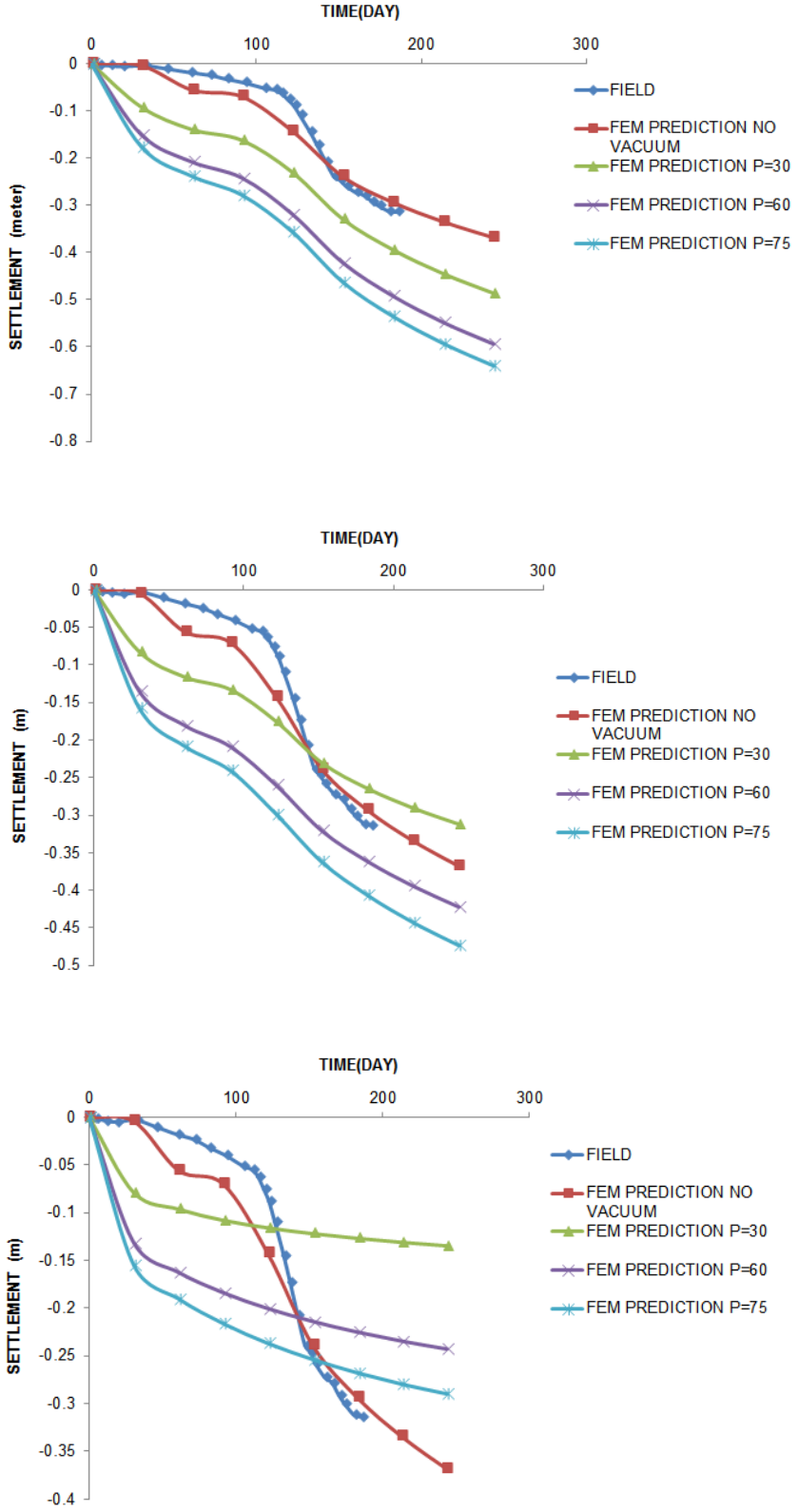
Fig. 6. Predicted settlement against measured data on site in Mahshahr clarification unit project (measured data from [21])

بارگذاری سربار مورد آزمون قرار گرفت تا تصویر روشنی از میزان تأثیر خلاء حاصل شود. منظور از P در نمودارها فشار خلاء است.

در حالت اول (شکل a۷) فرض می‌گردد که شرایط پروژه همان شرایط قبلی است و فقط به‌خاطر تسریع در روند اجرایی پروژه در کنار سربار ۶ متری و زهکش‌های عمودی از بار خلاء نیز می‌خواهیم استفاده نماییم. از شکل a۷ پیداست که در این شرایط با خلاء اعمالی ۳۰، ۶۰ و ۷۵ کیلوپاسکال به ترتیب ۴۰، ۶۰ و ۷۸ روز از مدت‌زمان پروژه برای رسیدن به نشست تحکیمی هدف موردنظر (۳۳ سانتیمتر) کاسته می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت استفاده از ترکیب سربار و فشار خلاء زمان به میزان قابل‌توجهی کاهش‌یافته است که درصورتی‌که زمان در پروژه عامل کلیدی محسوب گردد این روش ترکیبی می‌تواند بسیار کارآمد باشد.

در حالت دوم فرض می‌گردد که ارتفاع سربار به نصف کاهش پیدا کرده است. پرواضح است که در این حالت با یک فشار خلاء ۳۰ کیلوپاسکالی نشست موردنظر در همان زمان قبلی حاصل می‌شد درحالی‌که ۳ متر از ارتفاع خاکریز کاسته شده است و به دنبال آن مشکلات مربوط به پایداری خاکریز و مسائل اجرایی نیز کاهش‌یافته است (شکل b۷). باتوجه‌به هزینه گزاف عملیات خاک‌برداری و خاک‌ریزی، استفاده از ترکیب پیش بارگذاری سربار و خلاء با ارتفاع کاهش‌یافته یک گزینه مناسب اقتصادی جهت ارائه طرح بهسازی باشد. هم اکنون استفاده از ترکیب بار و سربار کاهش‌یافته در اکثر پروژه‌های حال حاضر در جهان به‌عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی، مدنظر طراحان ژئوتکنیک است. در این حالت باتوجه‌به وجود یک سرباره، نیازی به استفاده از فشارهای بالای خلاء نبوده و در نتیجه مشکلات فنی مرتبط با نگه‌داشتن فشارهای بالا و نشتی در سیستم و در کل هزینه نگهداری سیستم به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از این روش در مناطقی که دسترسی به مصالح خاکریز جهت احداث سرباره محدود است نیز می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب تلقی گردد.

در حالت بدون وجود خاکریز (شکل c۷) عملکرد مطلوبی را در حالت فشار خلاء ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکالی مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر وجود لنزهای ماسه‌ای در لایه اول خاک است که به‌شدت کارآمدی سیستم تحکیم با خلاء را کاهش داده است. در این حالت علی‌رغم وجود لنزهای ماسه‌ای و نبود سربار مشاهده می‌کنیم که سیستم در روز ۱۷۰ ام مشابه حالت اجرا شده با سربار ۶ متری، نشست هدف حاصل گردیده است. در حالت استفاده از فشار



شکل ۷. نشست بستر تحت‌فشار خلاء ۳۰، ۶۰ و ۷۵ کیلوپاسکال برای الف) سربار ٦ متری ب) سربار ۳ متری ج) بدون سربار

Fig. 7. Bed settlement under vacuum pressure of 30, 60, and 75 kPa for a) 6-meter surcharge b) 3-meter surcharge c) without surcharge

خلاء ۶۰ کیلوپاسکال، در زمان ۱۷۰ روز، ۹۰ درصد نشست تحکیمی هدف حاصل گردیده که در صورت استمرار عملیات نهایتاً ظرف ۳۰ روز نشست نهایی مورد انتظار حاصل می‌گردد. باتوجه‌به موارد مذکور مشاهده می‌گردد که استفاده از بارگذاری خلاء به‌تنهایی در فشارهای ۶۰ و ۷۵ کیلوپاسکالی عملکردی مشابه سربار احداث شده داشته است با این تفاوت که در این حالت دیگر نیازی به عملیات خاکریزی و خاک‌برداری در این حجم بسیار زیاد نبوده و بلافاصله بعد از اتمام عملیات، عملیات قسمت بعدی که احداث فونداسیون است می‌توانست آغاز گردد که از نظر زمانی در پروژه و از نظر مالی صرفه‌جویی قابل‌توجهی قابل‌دسترسی بود. در حال حاضر در پروژه جاده ابریشم چین، در صورت وجود شرایط مناسب محلی و ژئوتکنیکی معمولاً از روش بارگذاری خلاء بدون سربار استفاده می‌گردد به‌خصوص در مناطق باتلاقی که دسترسی به مصالح جهت احداث بار سربار محدود یا ناممکن است[۲۸].

بهر حال طراحی سیستم‌های بهسازی خاک‌های نرم رسی باتوجه‌به پیچیدگی ذاتی به‌صورت بهینه با درنظرگرفتن شرایط پروژه، مسائل اقتصادی و اهداف پروژه یک امر بسیار چالش‌برانگیز است که می‌بایست الزاماً توسط مهندسین ژئوتکنیک ذی‌صلاح در این زمینه انجام گردد. در صورت ضعف در مطالعات اولیه، درنظرنگرفتن شرایط جوی و محیطی و همچنین موارد خاص اجرایی پروژه، امکان ارائه یک طرح نامناسب و ناکارآمد دورازذهن نیست. دراین‌خصوص باید این نکته مهم را در نظر داشت که همانند تمام پروژه‌های بهسازی خاک، احداث یک منطقه آزمایشی جهت آزمایش‌کردن طراحی اولیه به‌صورت محدود، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است که در تمام پروژه‌های بزرگ بین‌المللی این امر با صرف زمان و هزینه‌های بسیار انجام پذیرفته است[۱۶, ۲۹]. امید است که بزودی با همت متخصصان داخلی شاهد انجام پروژه های مشابه در کشور عزیز ایران نیز باشیم.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس معرفی سیستم تحکیم با خلاء و توصیف مکانیسم عامل بر آن، کارآمدی سیستم پیش بارگذاری به‌وسیله خلاء در یک پروژه موردی (تحکیم بستر واحد زلال سازی ماهشهر) بررسی گردید. در مناطقی که به علت شرایط جوی، ژئوتکنیکی و یا تلفیقی از این موارد، امکان احداث خاکریزهای بلند جهت بهسازی زمین بستر وجود ندارد، این تکنولوژی کارآمدی خود را به‌خوبی نشان می‌دهد. در مواردی که به علت کمبود زمان، می‌بایستی از سیستمی استفاده گردد که دارای قابلیت اطمینان زیادی باشد، سیستم تحکیم با خلاء می‌تواند بسیار سودمند باشد. باتوجه‌به ارزان‌تر بودن حدود ۳۰ درصدی یا بیشتر این سیستم نسبت به بار سرباره، بسته به شرایط پروژه می‌توان برای کاهش هزینه‌ها از این سیستم به‌تنهایی و یا به‌صورت تلفیقی از خلاء و سربار استفاده نمود. در این مطالعه موردی، هر چند به علت وجود لنزهای ماسه‌ای، این سیستم کارآمدی مورد انتظار در پروژه‌های مشابه اجرا شده قبلی را نداشت، اما همچنان در حالت وجود سربار ۶ متری باعث کاهش قابل‌توجهی در زمان حصول به نشست هدف به‌خصوص در حالت فشار خلاء ۶۰ و ۷۵ کیلوپاسکالی گردید. در حالت سربار کاهش‌یافته ۳ متری فشار خلاء ۳۰ کیلوپاسکالی، سیستم عملکردی تقریباً مشابه وجود سربار ۶ متری داشت و در حالت بدون سربار، با فشار خلاء ۷۵ کیلوپاسکالی در مدت تقریباً مشابه به نشست هدف دست‌یافت. استفاده از حالت ترکیب سربار کاهش‌یافته ۳ متری با فشار خلاء حداقلی ۳۰ کیلوپاسکالی، اقتصادی‌ترین و درعین‌حال کارآمدترین سیستم بهسازی خاک باتوجه‌به نتایج این تحقیق بود. باتوجه‌به کاهش کارآمدی به‌خاطر وجود لنزهای ماسه‌ای اهمیت بررسی‌های ژئوتکنیکی قبل از شروع پروژه‌های ازاین‌دست نمایان می‌گردد. باتوجه‌به گسترش ساخت‌وسازهای ساحلی و فراساحلی در کشور امید می‌رود که این سیستم نیز در پروژه‌های مشابه به کار گرفته شود.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

σ'	تنش مؤثر (N/m^2)
$\Delta\sigma'$	تغییرات تنش مؤثر (N/m^2)
u	فشار آب منفذی (kPa)
Δu	تغییرات فشار آب منفذی (kPa)
p_p	فشار سربار (kPa)
pv	فشار خلاء (kPa)
p_0	فشار صفر اتمسفر (kPa)
p_a	فشار اتمسفر (kPa)

منابع

[1] [1] M.S. Pakbaz, R. Alipour, Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay, (2012) 1-4.

[2] R. Alipour, J. Khazaei, M.S. Pakbaz, A. Ghalandarzadeh, Settlement control by deep and mass soil mixing in clayey soil, 170(1) (2017) 27-37.

[3] J. Chu, S. Yan, B. Indraratna, Vacuum preloading techniques-recent developments and applications, (2008).

[4] C. Rujikiatkamjorn, B. Indraratna, Current state of the art in vacuum preloading for stabilising soft soil, (2013).

[5] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, A. Balasubramaniam, G.J.G. McIntosh, Geomembranes, Soft ground improvement via vertical drains and vacuum assisted preloading, 30 (2012) 16-23.

[6] M.R. Motahari, H. Kiani vafa, Studying Performance of PVDs on Consolidation Behavior of soft Clayey Soils Using EFM, Mahshahr Oil Storages %J Journal of Civil Engineering and Materials Application, 4(2) (2020) 75-88.

[7] B. Indraratna, R. Zhong, P.J. Fox, C.J.J.o.G. Rujikiatkamjorn, G. Engineering, Large-strain vacuum-assisted consolidation with non-Darcian radial flow incorporating varying permeability and compressibility, 143(1) (2017) 04016088.

[8] B. Indraratna, I. Sathananthan, C. Rujikiatkamjorn, A. Balasubramaniam, Analytical and Numerical Modeling of Soft Soil Stabilized by Prefabricated Vertical Drains Incorporating Vacuum reloading, (2005).

[9] W. Kjellman, Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, in: Proc. of Conf. on Soil Stabilization, 1952, 1952.

[10] W. Zhu, J. Yan, G.J.O.E. Yu, Vacuum preloading method for land reclamation using hydraulic filled slurry from the sea: a case study in coastal China, 152 (2018) 286-299.

[11] G. Kang, T.-H. Kim, S.-K.J.J.o.O.U.o.C. Yun, Measured Performance and Analysis of the Residual Settlement of a PVD-Improved Marine Soft Ground, 20(5) (2021) 1055-1066.

[12] Y. Wu, R. Zhou, Y. Lu, X. Zhang, H. Zhang, Q.C.J.G. Tran, Geomembranes, Experimental study of PVD-improved dredged soil with vacuum preloading and air pressure, (2022).

[13] Z.J.S.E. Ji, Foundation, Application of Vacuum Preloading Method in Narrow Road on Soft Ground Treatment Project, 36(2) (2022) 131.

[14] A. de Lillis, G. Fasano, A. Flora, S.J.P.o.t.I.o.C.E.-G.I. Miliziano, A novel application of vacuum preloading: conception, analysis and performance evaluation, (2022) 1-16.

[15] rncc.co, construction site vacuum preloading, in, 2022.

[16] B. Indraratna, Recent advances in the application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilisation, (2010).

[17] J. Wang, Y. Cai, J. Ma, J. Chu, H. Fu, P. Wang, Y.J.J.o.G. Jin, G. Engineering, Improved vacuum preloading method for consolidation of dredged clay-slurry fill, 142(11) (2016) 06016012.

[18] J. Cognon, I. Juran, S. Thevanayagam, Vacuum consolidation technology-principles and field experience, in: Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. Part 2 (of 2), Publ by ASCE, 1994, pp. 1237-1248.

[19] A. Jacob, S. Thevanayagam, E. Kavazanjian, Vacuum-assisted consolidation of a hydraulic landfill, in: Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. Part 2 (of 2), Publ by ASCE, 1994, pp. 1249-1261.

[20] P. Izedi Preloading and wick drain installation at Emam khomeini port in: the first conference on soil improvement in iran, undefined, 2001.

[21] T. Fakharian , Mehdi zade , Mohammad loo the numerical modelling of radial consolidation and callibration of instrumentation data in Sarbandar Decanter center in Mahshahr, in: forth international conference of soil mechanic and geotechnic in iran, undefined, 2010.

[22] A. Tasalloti, K. Fakharian, A. Mehdizadeh, Preliminary investigation of instrumentation in decanter units preloading project in Mahshahr port (South-west of Iran), 2010.

[23] M.C. Yapriadi, I. Sumarli, A.J.J.J.M.T.S. Iskandar, Evaluasi Settlement Menggunakan Surcharge Preloading Dengan Pvd Pada Proyek Di Bandung Selatan, 3(3) (2020) 911-922.

[24] S.M.A.Z. Mohammad Mehdi Pardsouie the investigation of the percentage of improvement in the case of applying vacuum pressure along with PVD and surcharge (part 2), in: the second Iranian national conference on structure , earthquake and geotechnical engineering, Mazandaran, 2011.

[25] S.M.A.Z. Mohammad Mehdi Pardsouie The numerical investigation of soil improvement of Mahshahr decanter unit with surcharge and embankment preloading (part 1), in: the second Iranian national conference on structure , earthquake and geotechnical engineering, Mazandaran, 2011.

[26] M.M. Pardsouie, M. Mokhberi, M.H.J.A.R.i.C.E. Pardsouie, The Importance of Incorporating Hydraulic Modifier Function versus Step Loading in Ground Improvements Including Vacuum Preloading, 4(2) (2022) 54-60.

[27] M.M. Pardsouie, M.H. Pardsouie, S.M.A. Zomorodian, M.J.J.o.C.E. Mokhberi, M. Application, Numerical Study of efficiency of the Vacuum Preloading in Weak Clay Treatment (a case study), 6(2) (2022).

[28] J. Shang, M. Tang, Z.J.C.G.J. Miao, Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study, 35(5) (1998) 740-749.

[29] D.T. Bergado, P. Jamsawang, P. Jongpradist, S. Likitlersuang, C. Pantaeng, N. Kovittayanun, F.J.G. Baez, Geomembranes, Case study and numerical simulation of PVD improved soft Bangkok clay with surcharge and vacuum preloading using a modified air-water separation system, 50(1) (2022) 137-153.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. M. Pardsouie, S.M.A Zomorodian, M. Mokhberi, S. A. R. Nasehi, M. H. Pardsouie, The investigation of the Efficiency of Vacuum preloading in the reclamation of the Weak clay soil Mahshahr Khuzestan Case Study, Amirkabir J. Civil Eng., 56(9) (2024) 1147-1162.

DOI: 10.22060/ceej.2024.21628.7780

این صفحه عمداً خالی است