



Investigating the soil consolidation via vacuum method by using numerical analysis

M. Karimi, M. Yazdi*, A. Ali Zad

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Due to increasing population and urbanization and lack of suitable land in terms of bearing capacity, construction is performed on soft soils, especially clays with low bearing capacity and excessive conventional settling characteristics. In these types of saturated soils, the construction of structures, such as large buildings, will release pore water pressure and therefore create a consolidation. One of the ways to reduce consolidation to the permissible amount specified in the regulations is to use a preload method that will require soil and embankment operations and ultimately, necessity the removal of those embankments. Vacuum combined with vertical drainage is an effective way to reduce the number of soil operations and associated costs, which in other words will accelerate the construction of structures and reduce costs. In this study, the effect of several parameters on the amount of consolidation was investigated by simulating soil consolidation via using the COMSOL Multiphysics and GeoStudio software. Based on the results, it was found that increasing vacuum intensity in vacuum chambers, increasing soil void ratio, and increasing bedrock depth, each of them accelerated the consolidation process. However, the number of vacuum terminals does not have a significant impact on this process.

Review History:

Received: Apr. 13, 2020

Revised: Nov. 28, 2021

Accepted: Dec. 17, 2021

Available Online: Jan. 19, 2022

Keywords:

Soil Consolidation

COMSOL Software

Vacuum pressure

Number of Vacuum terminals

Numerical Modeling

1- Introduction

Considering the various simplistic assumptions used in the extraction of the differential equation of the consensus of consolidation, in recent years, many researchers have worked on the real conditions of soil layers, their type of loading, and their effect on consolidation. Chai et al., in 2005, proposed a semi-experimental method for calculating the settlement and displacement at the end of soil consolidation caused by vacuum pressure [1]. Also, Chai et al. in 2008 introduced two ways to apply vacuum to the soil [2]. Following Chai et al. in 2010 proposed the method for calculating the time on the edge of the vacuumed region [3].

In the pre-loading method with a vacuum, the surface of the soil is covered with an airborne layer, and the negative pressure (via the vacuum pump) applies to the section below this coating. To distribute and spread the vacuum, drain wells and horizontal layers are used under the airborne layer. At the same time, the drainage and pumping system will drain water and reduce the degree of saturation of the soil. The drainage wells of each section are connected to a vacuum pump. If they consider several sections simultaneously, drainage wells of these sectors are linked to several drain pumps using flexible pipes. This enhances simultaneous improvement but increases the installation time and the launch will increase [4].

In this research, soil consolidation operations were simulated by creating a vacuum in soil by numerical software to investigate the effect of different parameters such as depth of bedrock, vacuum pressure, soil void ratio, and vacuum distance interval on the consolidation process. The analysis carried out in this research was first accepted by the Comsol numerical simulation software.

2- Methodology

COMSOL Multiphysics Software [5] is a complete simulation set that can analyze differential equations of nonlinear systems by minor derivatives by finite element spaces in one, two and 3D spaces. In this research, simulations were performed by this software in a two-dimensional space and then simulated in Geostudio software [6], and verification was performed.

In choosing the soil profile information of Chai et al. in 2005 [1], which was a case study at the oil storage station in the Tianjin region, was used according to Table 1.

To investigate the effect of vacuum intensity on the amount of soil consolidation, the relative vacuum effect on soil in each simulation 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1- and 2-atmospheres are considered.

For simulations at this stage, 4 variables for soil void ratio and 3 depths of bedrock depth are considered.

*Corresponding author's email: mar.yazdi@iauctb.ac.ir



Table 1. Soil characteristics for the consolidation area

Parameter	Amount	Unit
Yang Modules	60 e6	Pa
Poisson Ratio	0.3	-
Density	1900	kg/m ³
Cohesion	14	kPa
Friction Angle	35	Deg

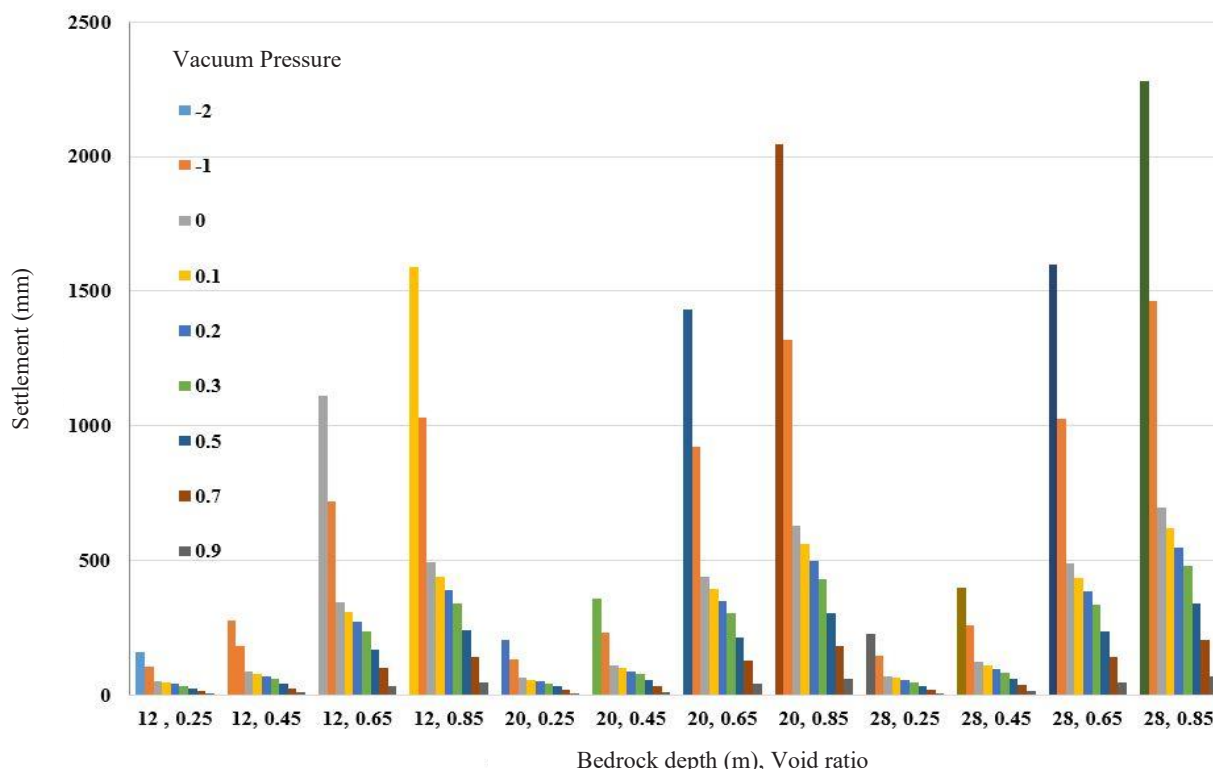


Fig. 1. Diagram of vacuum settlement by changing the relative vacuum pressure, bedrock depth, and soil void ratio

To further investigate, the effect of soil void ratio was evaluated to study the effect of this method in different geographic regions in terms of soil.

To investigate the impact of the number of vacuum terminals in the soil, the number of these terminals is changed from one to ten.

3- Results and conclusion

Figure 1 shows a summary of the results. Based on this, the general results of this research can be summarized as follows:

1- As the amount of vacuum pressure increases, with decreasing the pore water pressure, the overhead pressure increases at the same time, and therefore the consolidation settlement increases with a linear trend (according to Figure 1).

2- With increasing the void ratio of the soil, the amount of

soil settlement has also increased the amount of this change depending on the parameters and characteristics of the soil, including the depth of the bedrock and the relative vacuum pressure applied.

3- With increasing the depth of the bedrock and the relative pressure of the vacuum in the soil, the effect of void ratio increases. In the proportion of more void ratio, the rate of settlement is increased. In other words, the change in internal stresses in more porous soils is much greater and therefore causes much more settlement.

4- With the increasing depth of the bedrock, the amount of soil subsidence also increases. As the effect of the applied vacuum decreases in distant places, the effect of the applied vacuum will decrease with increasing the depth of the bedrock.

5- With other soil characteristics and applied vacuum being constant, changing the number of vacuum terminals has had a

negligible effect on effect on the amount of settlement. After giving enough time to the simulation system, the vacuum in the soil will expand to a certain extent in the whole range and the number of these terminals will only increase the speed of the result and will practically have no effect on the final settling rate.

References

- [1] Chai, J.-C., Carter, J.P. and Hayahsi, S., Ground deformation induced by vacuum consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(12), (2005) 1552–1561.
- [2] Chai, J.-C., Miura, N. and Bergado, D. T., Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain: Analyses versus performance. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), (2008) 220–230.
- [3] Chai, J.-C., Hong, Z.-S. and Shen, S.-L., Vacuum-drain consolidation induced pressure distribution and ground deformation. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), (2010) 525–535.
- [4] Walker, R., Indraratna, B. Consolidation analysis of a stratified soil with vertical and horizontal drainage using the spectral method, (2009).
- [5] “COMSOL Modeling Software”. COMSOL.com. Comsol, Inc. Retrieved 20 November 2015.
- [6] GEO-SLOPE International Ltd, *GeoStudio 2007 Add-Ins Programming Guide and Reference*[M]. 2007.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Karimi, M. Yazdi, A. Ali Zad, *Investigating the soil consolidation via vacuum method by using numerical analysis*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(7) (2022) 555-558.

DOI: [10.22060/ceej.2022.18264.6812](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.18264.6812)





بررسی تحکیم خاک به روش خارج کردن هوا با استفاده از تحلیل عددی

محمد کریمی، مریم یزدی*، امیرعلی زاد

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:

نشست تحکیمی
نرم افزار کامسول
شدت خلاء
تعداد کانون های خلاء
مدل سازی عددی

خلاصه: با توجه به افزایش جمعیت و شهرنشینی و کمبود زمین های مناسب از نظر ظرفیت باربری، ساخت و ساز در خاک های نرم به خصوص رس ها که دارای ظرفیت باربری کم و ویژگی های نشست پذیری بیش از حد متعارف می باشند، انجام می شود. در این نوع خاک ها در زمانی که اشباع باشند، ساخت سازه هایی از جمله ساختمان های بزرگ موجب خروج فشار آب منفذی و به طبع آن ایجاد نشست تحکیمی خواهد شد. یکی از روش های کاهش نشست تحکیمی به مقدار مجاز تعیین شده در آیین نامه استفاده از روش پیش بارگذاری است که مستلزم انجام عملیات خاکی و خاکریزی و نهایتاً جمع آوری سربار خواهد بود. برای کاستن از حجم عملیات خاکی و هزینه های مربوطه، استفاده از خلاء همراه با زهکش های قائم روشی موثر می باشد که موجب تسریع عملیات و کاهش هزینه ها می گردد. در این راستا در این پژوهش با شبیه سازی عملیات تحکیم خاک به روش خلاء به وسیله نرم افزار کامسول تاثیر پارامترهای شدت فشار خلاء، عمق سنگ بستر، نسبت تخلخل خاک و تعداد کانون های خلاء بر میزان نشست تحکیم بررسی گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که افزایش شدت خلاء اعمالی در کانون های خلاء، افزایش نسبت تخلخل خاک و افزایش عمق قرارگیری سنگ بستر، هر یک به نحوی موجب تسریع فرایند تحکیم می گردد، این در حالی است که تعداد پایانه های اعمال خلاء تاثیر ملموسی بر این روند ندارد.

ابتدا نشست آبی رخ می دهد. در خاک های رسی اشباع که ضریب نفوذپذیری آن ها به طور قابل ملاحظه ای کوچک تر از ضریب نفوذپذیری خاک های درشت دانه است، زهکشی آب حفره ای سریعاً انجام نشده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره ای ناشی از بارگذاری به طور تدریجی و در زمان طولانی صورت می پذیرد. بنابراین تحکیم در مدتی طولانی بعد از وقوع بارگذاری و نشست آبی ادامه خواهد داشت.

با توجه به فرضیات ساده کننده متعددی که در استخراج معادله دیفرانسیل پایه^۱ تحکیم ترزاقی استفاده شده است، در سال های اخیر، محققین زیادی روی شرایط واقعی لایه های خاک، نوع بارگذاری آن و تاثیر آن روی تحکیم کار کرده اند. از جمله^۲ فرضیاتی که منجر به دست آمدن نتایج غیرواقعی می شود، فرض ثابت بودن تراکم پذیری و نفوذپذیری خاک در طی بارگذاری و همچنین فرض عدم تغییر شدت بار در طی زمان است. بنابراین، تعریف معادله^۳ جدیدی برای تحکیم خاک، با در نظر گرفتن تغییر در میزان تراکم پذیری و نفوذپذیری اجتناب ناپذیر است [۱]. چیفمن^۴ در سال

۱- مقدمه

نشست خاک در اثر سه عامل اتفاق می افتد، این سه عامل عبارتند از: تغییر شکل ذرات خاک، جابجایی ذرات خاک و خروج آب یا هوا از فضاهای خالی.

در حالت کلی نشست های خاک به دو گروه زیر تقسیم می شوند:

الف- نشست تحکیم -^۱ که ناشی از تغییر حجم خاک اشباع به علت رانده شدن آب های موجود در حفرات است.

ب- نشست آبی^۲ - که ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک خشک و یا خاک های مرطوب و اشباع بدون هرگونه تغییری در میزان آب است. محاسبات نشست آبی معمولاً بر پایه روابط به دست آمده از تئوری الاستیسیته قرار دارد.

هنگامی که یک لایه خاک رس اشباع، تحت تاثیر افزایش تنش قرار گیرد،

- 1 Consolidation settlement
- 2 Immediate settlement



سراسر جهان بسیار چشمگیر بوده است [۱۵ و ۱۴]. در خاک‌های رسی بسیار نرم میزان سربار مورد نیاز برای رسیدن به مقاومت برشی زهکشی نشده مورد نظر، مستلزم صرف هزینه قابل توجهی می‌باشد، و با توجه به هزینه‌های تحمیلی و دوره طولانی پیش بارگذاری، راه حل پیشنهادی بهینه، پیش بارگذاری توسط خلاء می‌باشد [۱۷ و ۱۶]. در مواقعی که فراهم کردن خاک برای احداث خاکریز با صعوبت همراه است و یا منوط به صرف هزینه بالایی می‌باشد. همچنین در محل‌هایی که خاک بستر به قدری نرم است که جابجایی ماشین آلات با صعوبت همراه می‌باشد، انتخاب روش خلاء گزینه مناسب و کاملاً بهینه خواهد بود. نمای کلی روش تحکیم خاک به واسطه خلاء در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در روش پیش بارگذاری همراه با خلاء ابتدا سطح خاک با یک لایه هواپند پوشانده می‌شود و فشار منفی (از طریق پمپ خلاء) به قسمت زیر این پوشش اعمال می‌گردد، جهت توزیع و گسترش خلاء از چاه‌های زهکش و لایه قابل نفوذ افقی در زیر لایه هواپند استفاده می‌شود. همزمان، سیستم زهکش و پمپاژ موجب تخلیه آب و کاهش درجه اشباع خاک می‌گردد. چاه‌های زهکش هر بخش، به یک پمپ خلاء متصل می‌گردد و در صورتی که در نظر باشد چند بخش به طور همزمان مورد بهسازی قرار گیرد، چاه‌های زهکش این بخش‌ها با استفاده از لوله‌های انعطاف‌پذیر به چندین پمپ تخلیه مرتبط می‌گردند. این امر بهسازی همزمان چندین بخش را میسر می‌سازد ولی موجب افزایش زمان نصب و هزینه راه‌اندازی خواهد شد [۱۹].

محمد الحسن و شانگ در سال ۲۰۰۲ با استفاده از تئوری تحکیم ترزاقی برای تعیین درجه تحکیم متوسط ناشی از ترکیب خلاء و پیش بارگذاری رابطه زیر را پیشنهاد نمودند [۲۰]:

$$U_{vc} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{m^2} \exp(-M^2 T_{vc}) \quad (1)$$

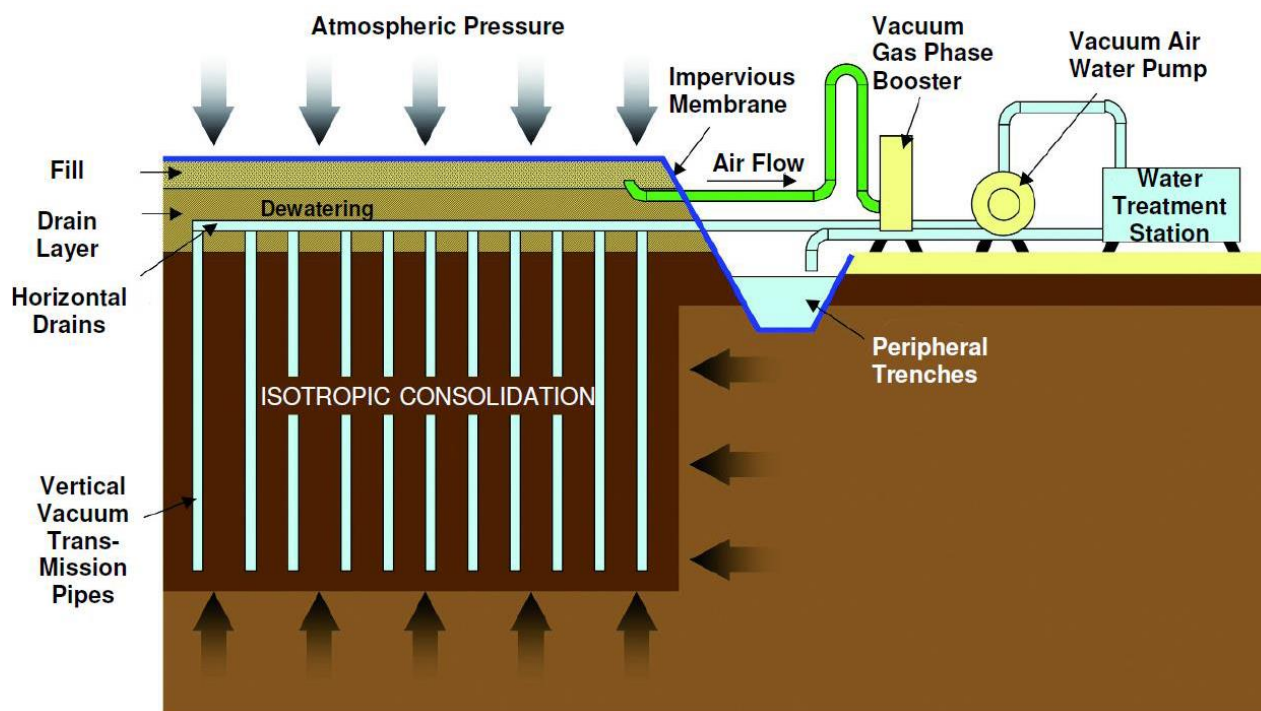
$$M = \frac{\pi}{2} (2m+1) \quad (2)$$

$$T_{vc} = c_{vc} t / H^2 \quad (3)$$

۱۹۵۸، رفتار کلی تحکیم خطی تحت بارگذاری وابسته به زمان را نشان داده است [۲]. ویلسون^۱ در سال ۱۹۷۴، بارگذاری متناوب را مورد توجه قرار داده و حل تحلیلی تحکیم تحت بارگذاری متناوب را بر اساس تئوری ترزاقی ارائه داده است [۳]. در مقاله آلونسو و کریزیک^۲ در سال ۱۹۷۴، بارگذاری تصادفی برای یک لایه رسی با رفتار خطی و الاستیک مورد بحث قرار گرفته است [۴]. السون^۳ در سال ۱۹۷۷، تحکیم خاک تحت بارگذاری وابسته به زمان را تحلیل کرده [۵]، و بلیق و لواداکس^۴ در سال ۱۹۷۸، بر اساس اصل برهم نهی، یک روش ساده برای پیش‌بینی تحکیم لایه‌های رسی تحت بار متناوب مستطیلی ارائه داده‌اند [۶]. یینگ چان^۵ و همکارانش در سال ۲۰۰۵، بر اساس رابطه خطی در نمودارهای $e-\log_k$ و $e-\log_{10}$ یک تئوری گسترده‌تر برای تحکیم در نظر گرفته‌اند [۷]. چای و همکاران در سال ۲۰۰۵ یک روش نیمه تجربی برای محاسبه نشست و تغییر مکان جانبی در پایان تحکیم خاک ناشی از فشار خلاء پیشنهاد دادند [۸]. همچنین چای و همکاران در سال ۲۰۰۸ دو روش اعمال خلاء به خاک را معرفی نمودند [۹]. همچنین توفیق و اوریه^۶ در سال ۲۰۰۹ معادله تحکیم ترزاقی را با در نظر گرفتن ضرایب تحکیم و تراکم‌پذیری و استفاده از اصل برهم نهی تحلیل کرده و راه حل ساده‌ای ارائه کرده‌اند [۱۰]. در ادامه تحقیقات چای و همکاران در سال ۲۰۱۰ روشی برای محاسبه منحنی نشست-زمان و مشخصات جابجایی جانبی در لبه منطقه خلاء ارائه دادند [۱۱]. کوساکا و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مطالعه اثر تحکیم به روش خلاء بر نشست زمین در ۱۰ متر از نهشته خاکی مورد استفاده در ساخت بزرگراهی در ژاپن پرداختند [۱۲]. چای و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز روشی برای محاسبه تغییر مکان جانبی ناشی از اثر همزمان اعمال خلاء و سربار ارائه نمودند [۱۳].

روش پیش بارگذاری همراه با خلاء در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار در سوئد توسط کیچی لیمان معرفی گردید و از آن زمان به طور گسترده به کار برده شد. از جمله می‌توان به فرودگاه بین‌المللی فیلادلفیا در آمریکا، بندر تیانجین در چین، بزرگراه شمال به جنوب مالزی، فرودگاه بین‌المللی سووارنابومی بانکوک تایلند و بندر بریزبن کوئینزلند در استرالیا اشاره نمود. بیش از ۱۵ سال سابقه تحقیقات فعال در دانشگاه ولونگونگ وجود دارد و می‌توان گفت سهم استرالیا در زمینه بهبود خاک نرم با این روش در

- 1 Wilson
- 2 ALonso and Krizek
- 3 Olson
- 4 Baligh and Levadoux
- 5 Ying-chun
- 6 Toufigh and Ouria



شکل ۱. نمای کلی روش تحکیم خاک به واسطه ایجاد خلاء در آن [۱۸]

Fig. 1. Overview of soil consolidation by vacuum method [18]

۲- مدل سازی با استفاده از نرم افزار کامسول

نرم افزار کامسول مولتی فیزیکیس^۱ [۲۲] یک مجموعه کامل شبیه سازی است که می تواند معادلات دیفرانسیل سیستم های غیرخطی را توسط مشتق های جزئی به روش اجزاء محدود^۲ در فضاهای یک، دو و سه بعدی تحلیل نماید. این نرم افزار می تواند در حضور چالش هایی نظیر میدان های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به خوبی راهگشا باشد. کامسول همچنین قادر به ایجاد مراحل برای حل مشکل به عنوان یک فرمول ریاضی (در فرم معادلات) و فیزیکی (انتخاب مدل فیزیکی، به عنوان مثال مدل فرایند انتشار) می باشد. بدیهی است، در هر مورد سیستم معادلات حل خواهد شد، تفاوت فقط در امکان استفاده از سیستم های فیزیکی و جسمی و واحدها نهفته است.

در این پژوهش شبیه سازی ها توسط این نرم افزار و در فضای دو بعدی انجام شده است و سپس با شبیه سازی در نرم افزار ژئواستدیو^۳ (با شاخصه های همسان از منظر هندسی، نوع مواد و شرایط مرزی) صحت سنجی انجام

1 COMSOL Multiphysics

2 Finite Element Method (FEM)

3 GeoStudio

که پارامترهای آن به شرح زیر است:

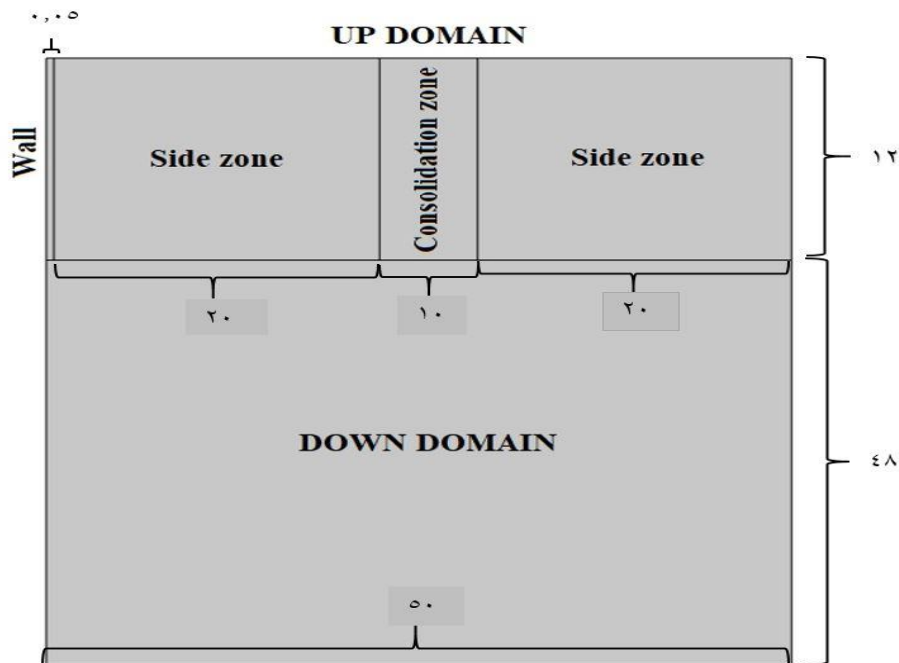
TVC: فاکتور زمان برای ترکیب خلاء و پیش بارگذاری

CVC: ضریب تحکیم برای ترکیب خلاء و پیش بارگذاری

H: عمق لایه رس

t: زمان تحکیم

همچنین ایندرا تا و همکاران در سال ۲۰۰۴ توضیح دادند که توزیع خلاء در طول زهکش یکنواخت نبوده و با افزایش عمق کاهش می یابد [۲۱]. سهولت و زمان کم اجرا، عدم نیاز به تجهیزات مکانیکی خاص و عدم نیاز به نیروی کاری زیاد را می توان از جمله اهم مزیت های این روش تحکیم به روش خلاء نسبت به سایر روش ها دانست در این پژوهش عملیات تحکیم خاک به وسیله ایجاد خلاء در خاک به وسیله نرم افزار عددی شبیه سازی گردیده تا تاثیر پارامترهای مختلف نظیر عمق قرارگیری سنگ بستر خاک، شدت خلاء اعمالی، میزان تخلخل خاک و فاصله پایانه های خلاء بر فرایند تحکیم مورد بررسی قرار گیرد. تحلیل های انجام شده در این پژوهش برای اولین بار توسط نرم افزار شبیه سازی عددی کامسول صورت پذیرفته است.



شکل ۲. دامنه‌ها و بخش‌های ایجاد شده جهت تعریف مسئله و شبیه‌سازی (ابعاد به متر)

Fig. 2. Domains and sections created for problem definition and simulation (dimensions in meters)

شبیه‌سازی می‌باشد. به منظور همگرا کردن سیستم یک دیواره در مرز مدل شبیه‌سازی شده است که در واقع باعث بسته شده مدل در آن ناحیه می‌شود. خلاء در قسمت مرکزی ناحیه بالا و به عرض ده متر اعمال می‌گردد که به اختصار ناحیه تحکیم^۲ نامیده می‌شود. در گام بعد، از بانک منابع کامسول مواد خام (خاک، هوا و آب) انتخاب و با توجه به ویژگی‌های مورد نظر جهت شبیه‌سازی مشخصه‌های آن‌ها مطابق جدول ۱ تعریف و هر یک به ناحیه مربوط به خود (که در قسمت قبل ایجاد گردیده) اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در انتخاب مشخصات خاک مورد استفاده از مقاله چای و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۸] که مطالعه‌ای موردی در ایستگاه ذخیره نفت در منطقه تیانجین چین بوده است استفاده شده است. خاک مورد استفاده در مدل‌ها از نوع عادی تحکیم یافته می‌باشد.

سپس، شرایط مرزی مربوط به هر ناحیه اعمال می‌گردد. برای طرف راست و چپ ناحیه تحکیم شرط مرزی آزاد (نیرو آزاد - جابجایی آزاد)، برای کف ناحیه تحکیم شرط مرزی جابجایی صفر و برای سطح فوقانی ناحیه^۱ تحکیم شرط مرزی فشار اتمسفر لحاظ گردیده است.

گرفته است. شکل ۲ ابعاد مورد استفاده در تحلیل عددی را نشان می‌دهد. در محیط نرم‌افزار کامسول ابتدا هندسه^۳ مورد نظر به صورت مجموعه‌ای از اشکال هندسی تولید گردیده است. مطابق شکل ۲ عرض و ارتفاع نواحی کناری به ترتیب ۲۰ و ۱۲ متر همچنین عرض ناحیه زیرین و ناحیه تحکیم به ترتیب ۵۰ متر و ۱۰ متر تعیین شده است. با توجه به حساسیت جواب‌ها به ابعاد مدل، آنالیزهای حساسیت جهت تعیین ابعاد صحیح مدل انجام شده است. چنانچه مرزهای کناری نزدیک به ناحیه تحکیم باشند (ابعاد مدل کوچک انتخاب شود)، مرزهای کناری روی نتایج تاثیر گذار خواهند بود. از سوی دیگر با افزایش ابعاد مدل، زمان تحلیل‌ها افزایش خواهد یافت. بنابراین با انجام آنالیزهای حساسیت، مرزهای مدل به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا تاثیری بر نتایج نداشته باشند.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد این هندسه مشتمل بر یک لایه به عنوان بستر خاک تحت عنوان ناحیه پایین^۱ و یک لایه با نام ناحیه بالا^۲ و یک شاخص راهنما جهت سهولت در همگرا نمودن سیستم به هنگام

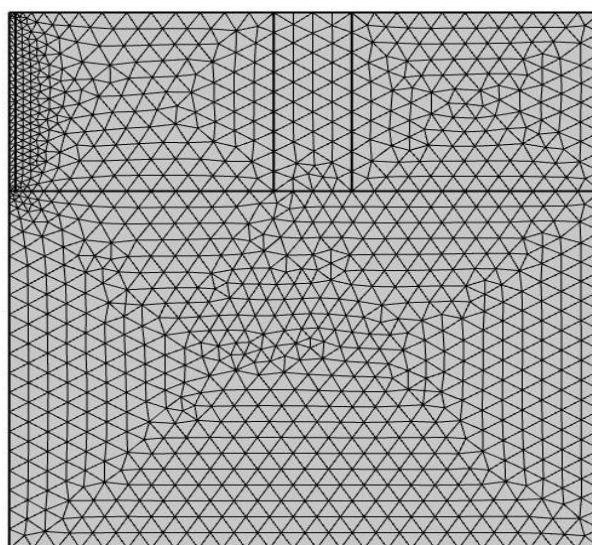
3 Consolidation Zone

1 Down Domain
2 Up Domain

جدول ۱. مشخصه‌های خاک مورد نظر برای ناحیه تحکیم

Table 1. Soil characteristics for the consolidation area

پارامتر	مقدار	واحد
مدول یانگ	۶۰ E۶	Pa
نسبت پواسون	۰/۳	-
چگالی	۱۹۰۰	kg/m ³
چسبندگی	۱۴	kPa
زاویه اصطکاک داخلی	۳۵	Deg



شکل ۳. ایجاد مش بندی در هندسه‌ی مورد نظر جهت شبیه‌سازی

Fig. 3. Creating mesh in the desired geometry for simulation

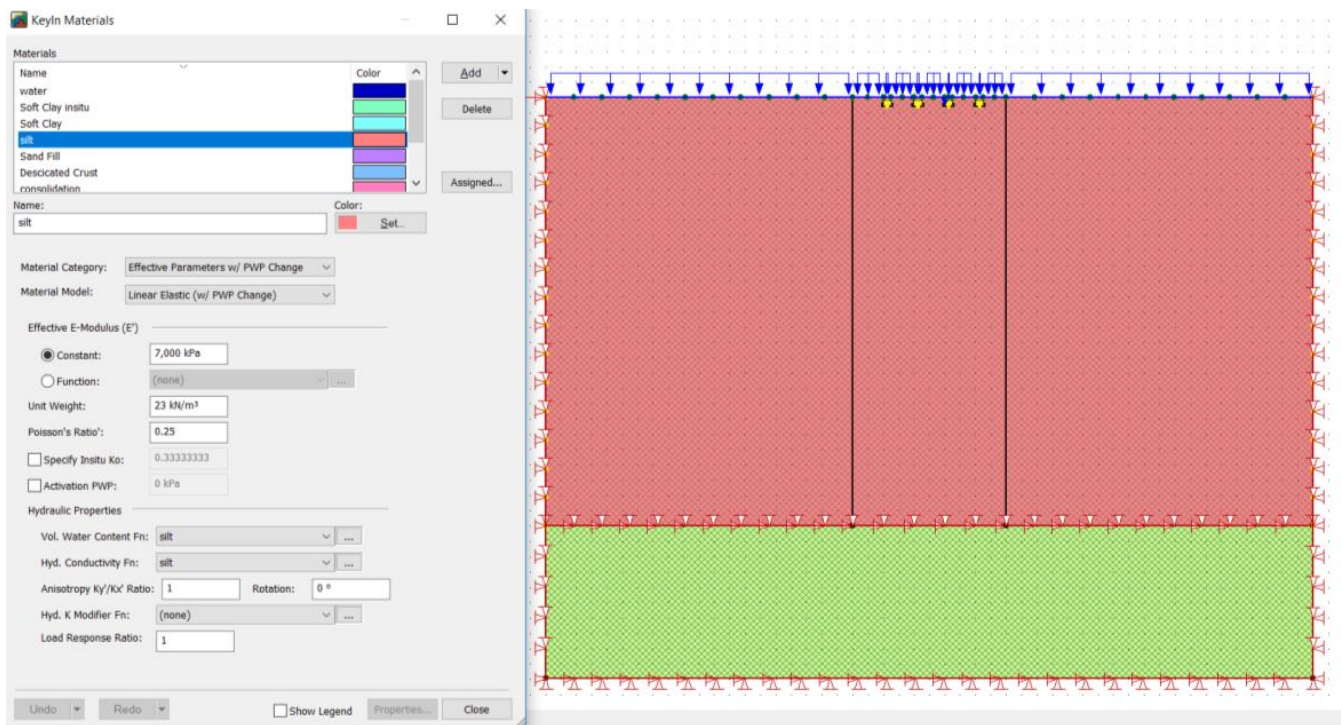
۳- اعتبارسنجی

این شبیه‌سازی برای اولین بار توسط نرم‌افزار مدل‌سازی عددی کامسول انجام گردیده است و به دلیل نبودن اطلاعات و منابع کافی جهت مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با تحقیقات پیشین و همچنین جدید بودن این تحقیق، از نرم‌افزار دیگری استفاده شده تا نتایج هر دو شبیه‌سازی مقایسه و مورد صحت‌سنجی قرار بگیرند. لذا یک مورد از سری شبیه‌سازی‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار کامسول در خصوص بررسی اثر نسبت خلاء در تحکیم خاک، توسط نرم‌افزار ژئواستدیو^۲ [۲۳] مجدداً مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، خاک به عنوان ماده‌ای متخلخل در نظر گرفته شده که فضاهای خالی آن تماماً با آب پر شده است لذا با تعریف این ماده برای هر قسمت هندسی، سطح آب، هم سطح بالاترین نقطه‌ای آن قسمت خواهد بود. جهت حل به روش المان محدود در تمام نواحی تعریف شده مش ایجاد می‌گردد. دقت مش مطابق با شکل ۳ بر روی حالت ریز^۱ قرار داده شد که دقت آن برای حل این مسئله کافی و بار محاسباتی آن نیز مناسب می‌باشد.

2 GEOSTUDIO

1 Finer



شکل ۴. مشخصات مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ژئواستدیو

Fig. 4. Specifications of the simulated model in Geostudio software

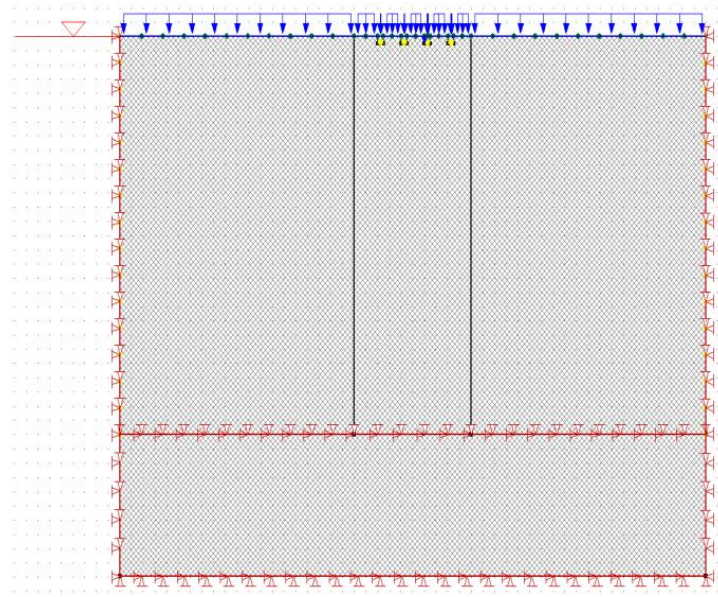
بر ایجاد خلاء کامل در قسمت تحکیم، به میزان یک اتمسفر فشار معادل بر سطح پیرامون خاک اعمال گردیده است. نتایج حاصله از نرم‌افزارهای کامسول و ژئواستدیو در شکل ۶ جهت مقایسه ترسیم گردیده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود مقدار نشست در هر دو شبیه‌سازی با دقت مناسبی همسان می‌باشند. از آنجا که هر کدام از نرم‌افزارها با روش متفاوتی کار مش‌بندی و محاسبات عددی جهت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی را انجام داده‌اند، لذا وجود درصد خطایی با تفاوت اندک نتایج شبیه‌سازی‌ها را اعتبارسنجی می‌کند.

به منظور شناخت و تحلیل بیشتر، نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با نرم‌افزار ژئواستدیو در شکل ۷ ترسیم گردیده است.

در شکل ۸ نتایج مربوط به فشار آب حفره‌ای در دو فشار ۰/۹، ۰/۵ و اتمسفر جهت بررسی و تحلیل دقیق‌تر ترسیم گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان خلاء اعمالی (خلاء در مقدار ۰/۵ اتمسفر از ۰/۹ اتمسفر بیشتر است) جریان بیشتری از دیواره‌های کناری و فوقانی خارج می‌گردد لذا فشار آب حفره‌ای نیز مطابق شکل ۷ با افزایش فشار رابطه مستقیم داشته و افزایش می‌یابد.

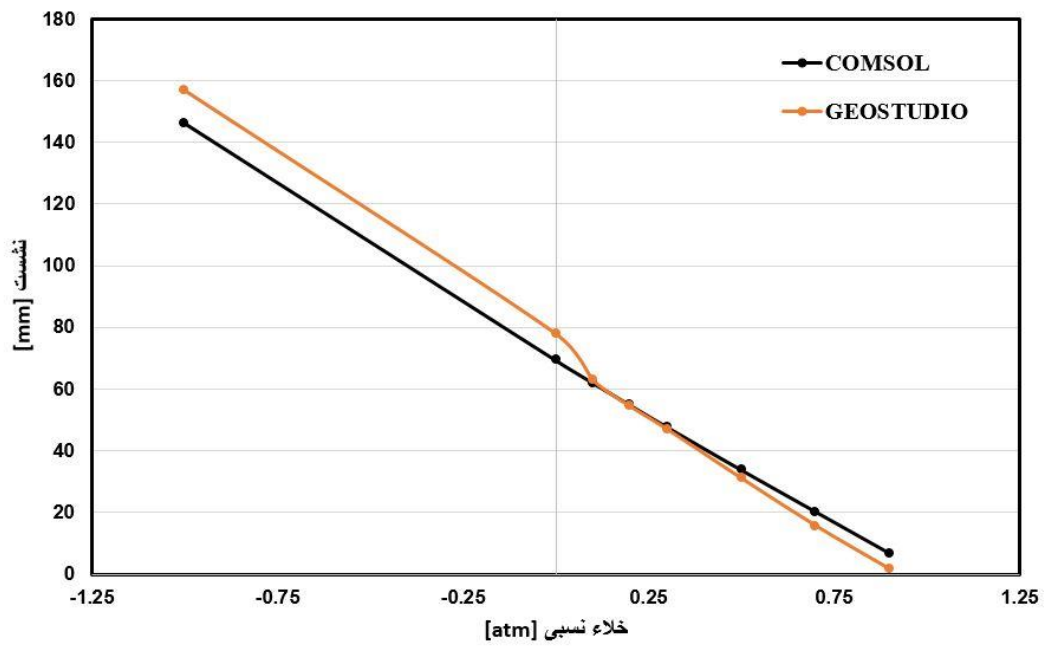
بدین منظور تمام مشخصات خاک و شرایط مرزی به مانند شبیه‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار کامسول یکسان تنظیم گردید. در شکل ۴ مشخصات مدل ساخته شده در نرم‌افزار ژئواستدیو نشان داده شده است. ابتدا هندسه مسئله توسط نرم‌افزار ژئواستدیو مطابق شکل ۴ ترسیم و در گام بعدی مشخصات خاک جهت شبیه‌سازی تعریف و به هندسه مورد نظر اعمال گردید و سپس شرایط مرزی مطابق شکل ۵ تعریف گردیده است. مطابق این شکل، سطح آب نیز در بالاترین نقطه هندسی در شکل تعریف گردیده است. پس از تعریف هندسه و نوع خاک، در مرحله بعد برای کل سیستم مش‌بندی انجام شده و با تعیین مدت زمان ۳۰ روز، شبیه‌سازی صورت پذیرفته است.

در شبیه‌سازی انجام شده، میزان جابجایی متوسط سطح قسمت میانی (ناحیه تحکیم) به واسطه ایجاد خلاء در آن در فشارهای مختلف ۰/۹، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰ و ۱- اتمسفر در عمق سنگ بستر ۲۸ متر و نسبت تخلخل ۰/۲۵ اندازه‌گیری گردید. (بدیهی است عملاً رسیدن به خلاء نسبی بیش از مقدار یک اتمسفر ناممکن است. با این حال در این شبیه‌سازی به جهت مشاهده بهتر تغییرات، این ارقام لحاظ شده است. برای این منظور علاوه



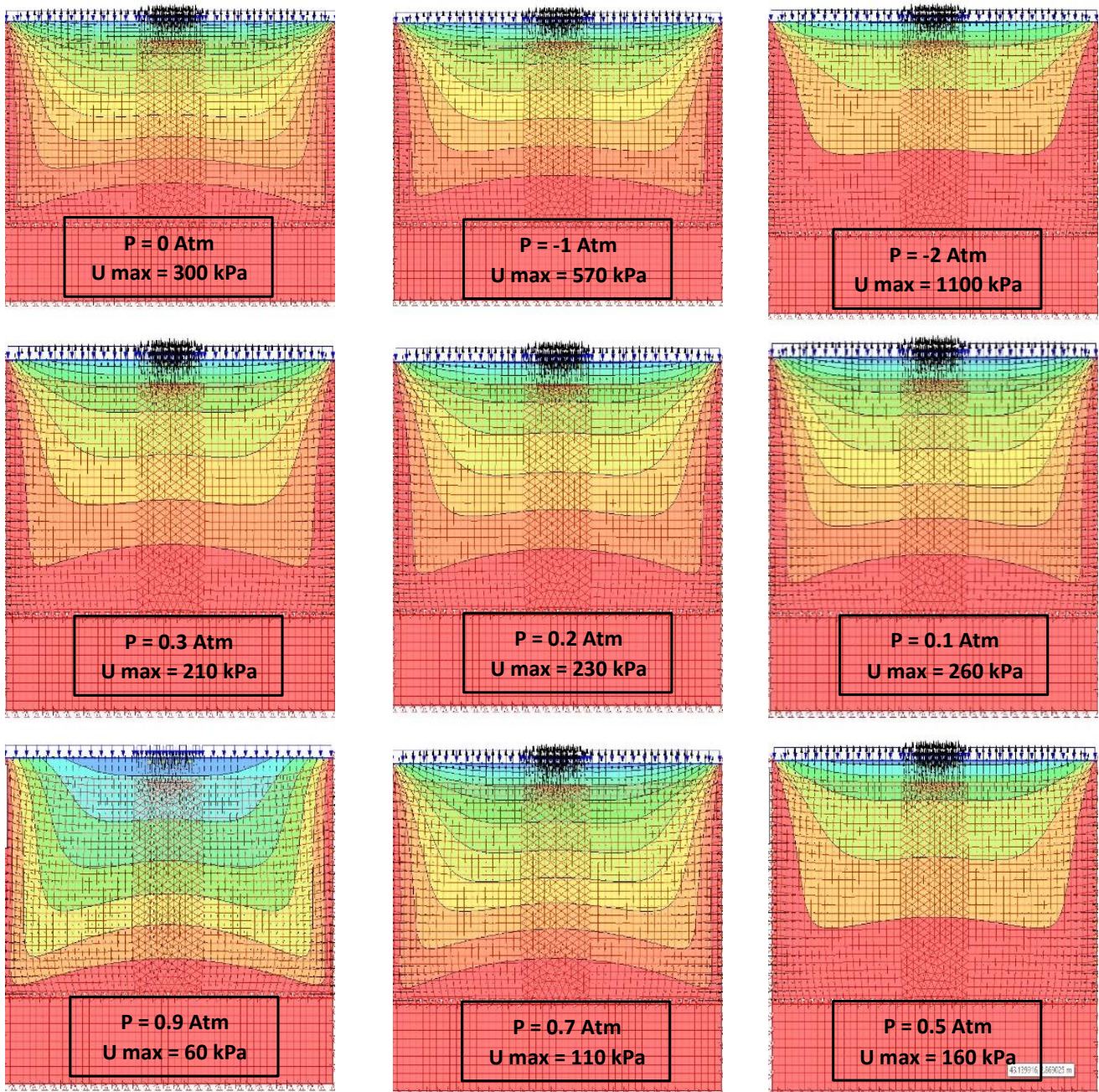
شکل ۵. نمودار هندسه و شرایط مرزی در نرم افزار ژئواستدیو

Fig. 5. Diagram of geometry and boundary conditions in Geostudio software



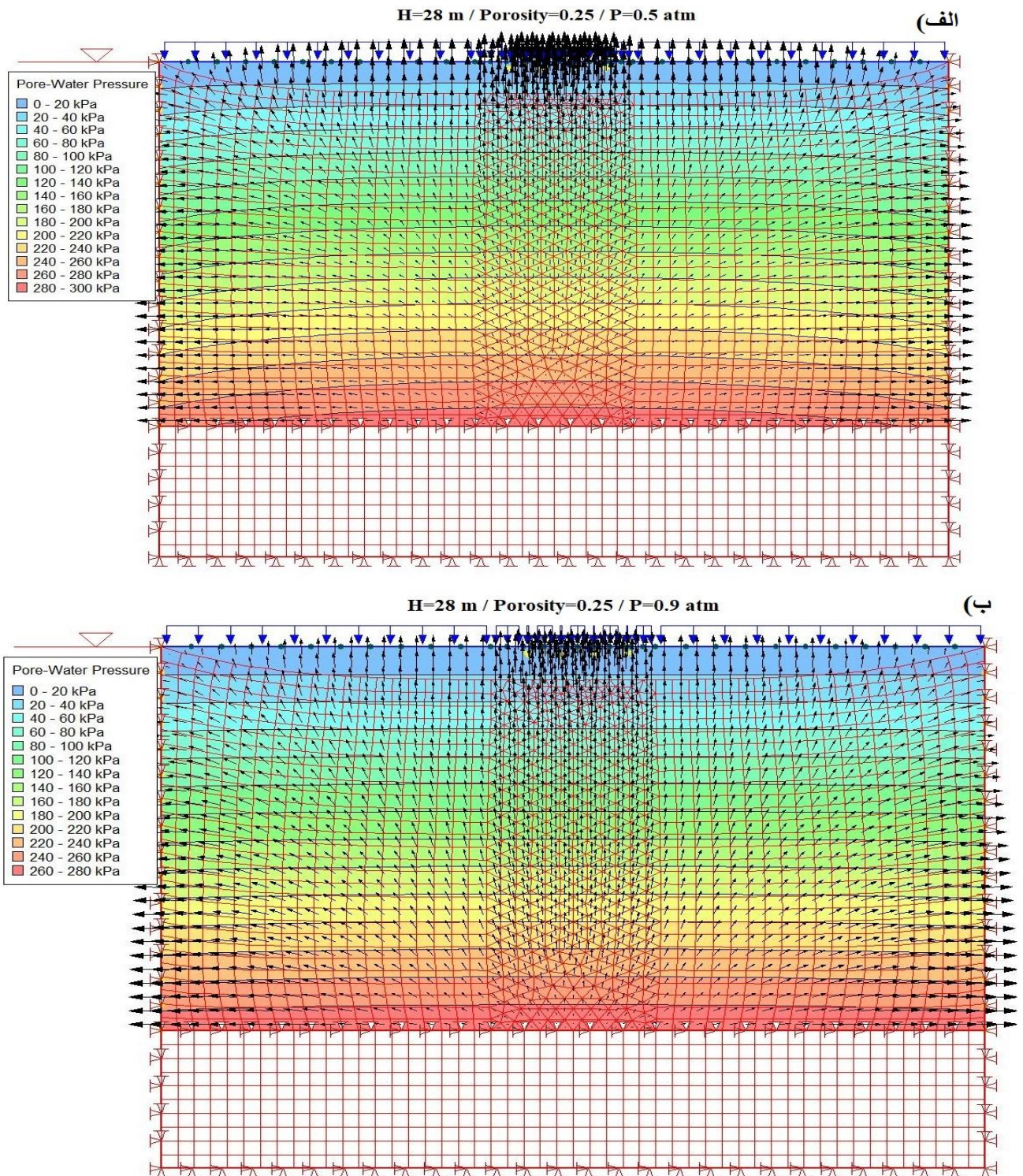
شکل ۶. نمودار میزان جابجایی متوسط سطح مورد نظر به واسطه فشارهای خلاء ۰/۹، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰ و -۱ اتمسفر در عمق سنگ بستر ۲۸ متر و نسبت تخلخل ۰/۲۵

Fig. 6. Diagram of the average displacement due to the vacuum pressures of 0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0 and -1 atm at a 28 m depth of bedrock, and void ratio of 0.25



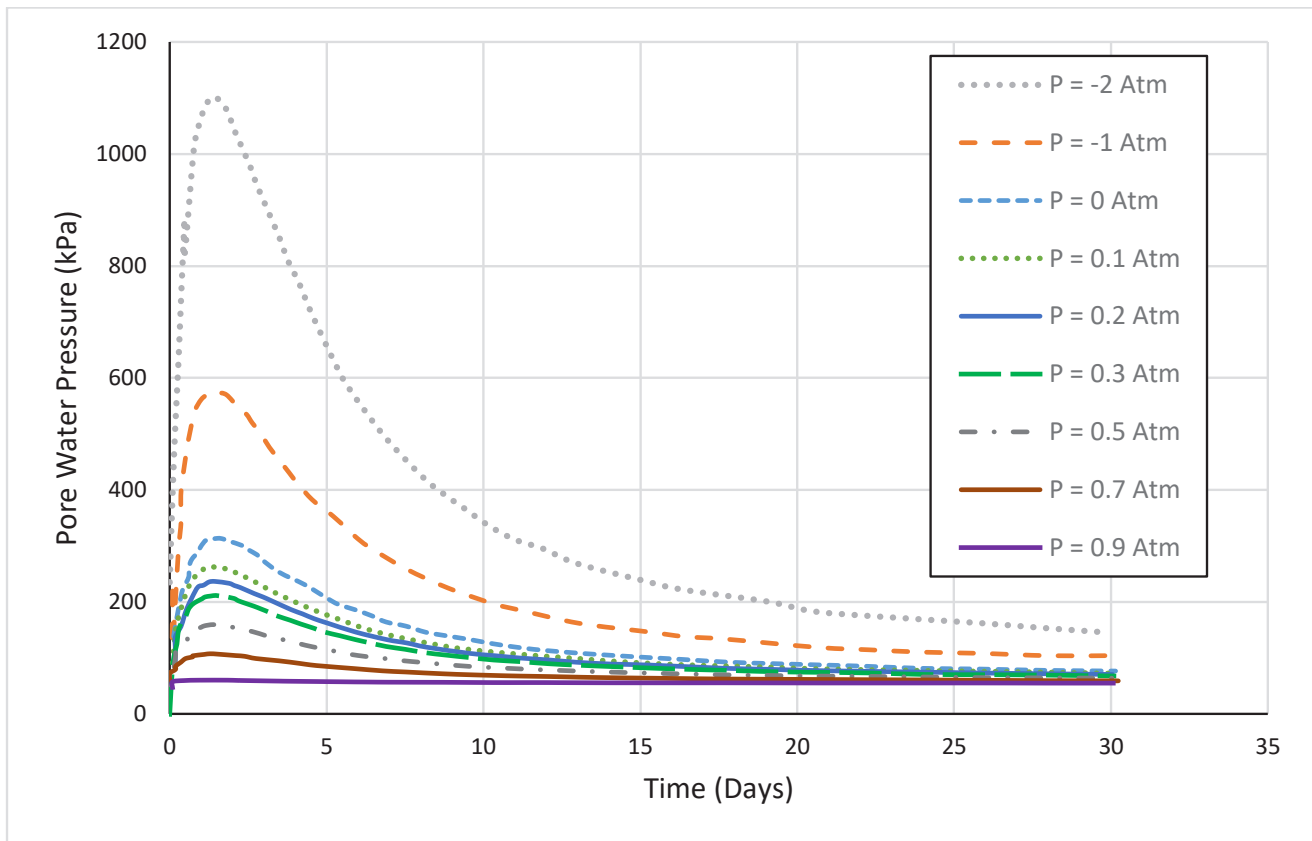
شکل ۷. میزان جابجایی نسبی ذرات خاک نسبت به یکدیگر در فشارهای به ترتیب: ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹، ۱ و ۲ اتمسفر در عمق سنگ بستر ۲۸ متر و میزان تخلخل ۰/۲۵ به کمک نرم افزار ژئواستدیو

Fig. 7. The relative displacement of soil particles at pressures, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, and 2 atm respectively at a 28 m depth of bedrock, and void ratio of 0.25 using Geostudio software



شکل ۸. نمودار فشار آب حفره‌ای به واسطه ایجاد خلاء در فشارهای الف) ۰/۵ اتمسفر و ب) ۰/۹ اتمسفر در عمق سنگ بستر ۲۸ متر و نسبت تخلخل ۰/۲۵ به همراه بردارهای جریان آب

Fig. 8. Pore water pressure diagram by creating a vacuum at pressures a) 0.5 atm and b) 0.9 atm at a 28 m depth of bedrock, and void ratio of 0.25 with vectors of water flow



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای فشار آب حفره‌ای به واسطه خلاء در فشارهای ۰/۹، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰، -۱ و -۲ اتمسفر در عمق سنگ بستر ۲۸ متر و نسبت تخلخل ۰/۲۵

Fig. 9. Comparative diagram of pore water pressure by vacuum at pressures of 0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0, -1 and -2 atm at a 28 m depth of bedrock, and void ratio of 0.25

۴- نتایج مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار کامسول

۴-۱- بررسی تاثیر شدت خلاء اعمالی^۱ بر روند تحکیم

در ابتدا، جهت بررسی تاثیر شدت خلاء بر میزان تحکیم حاصل شده در خاک، سایر پارمترها نظیر عمق قرارگیری سنگ بستر، میزان تخلخل و تعداد کانون‌های خلاء ثابت در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌های انجام شده است. بدین منظور میزان خلاء نسبی اعمال شده بر خاک در هر یک از شبیه‌سازی‌ها برابر ۰، ۱/۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹، ۱- و ۲- اتمسفر در نظر گرفته شده است. در این خصوص به بررسی تغییر میزان خلاء نسبی در ۸ مقدار متفاوت فوق پرداخت شده است.

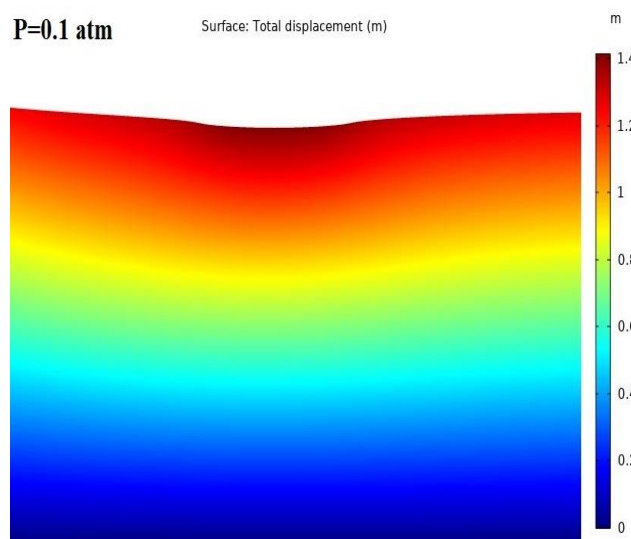
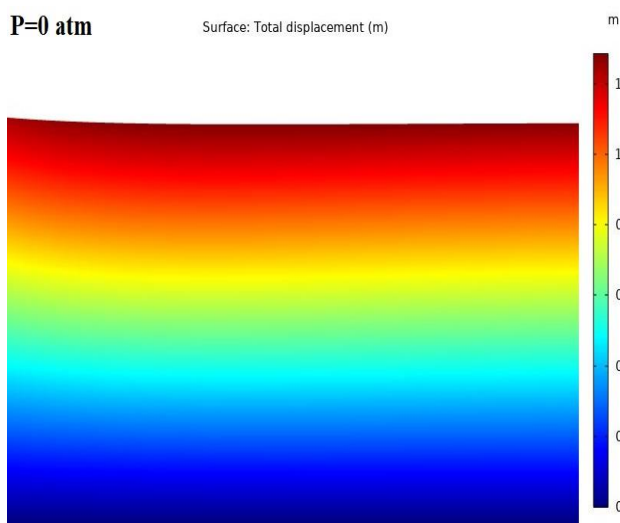
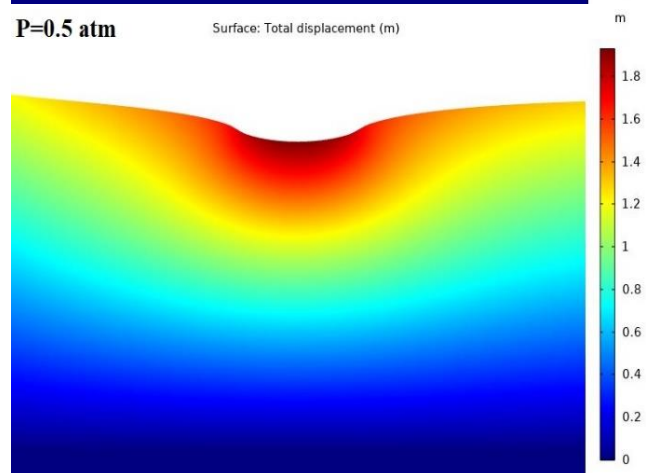
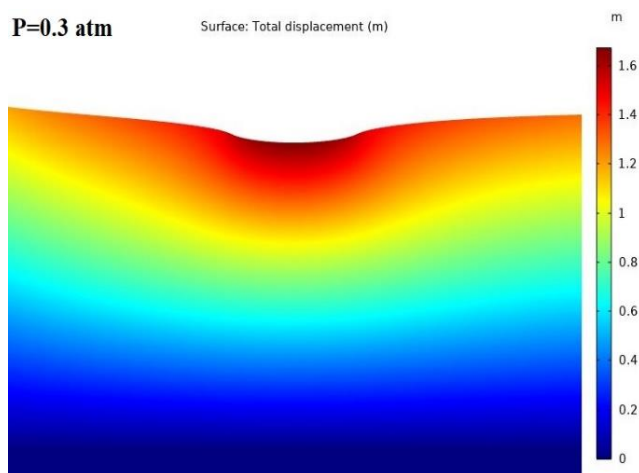
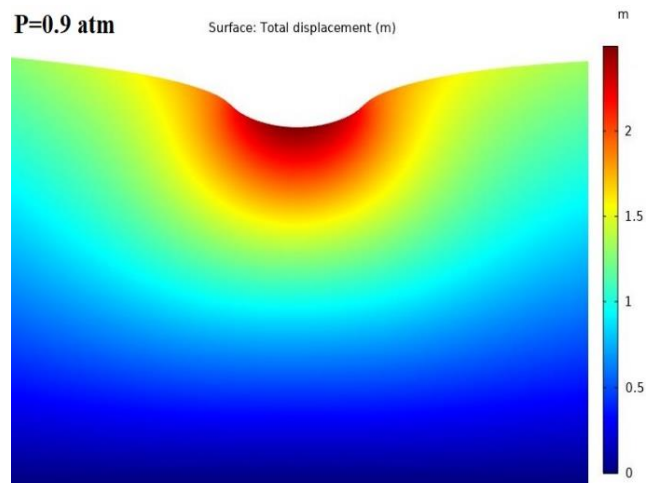
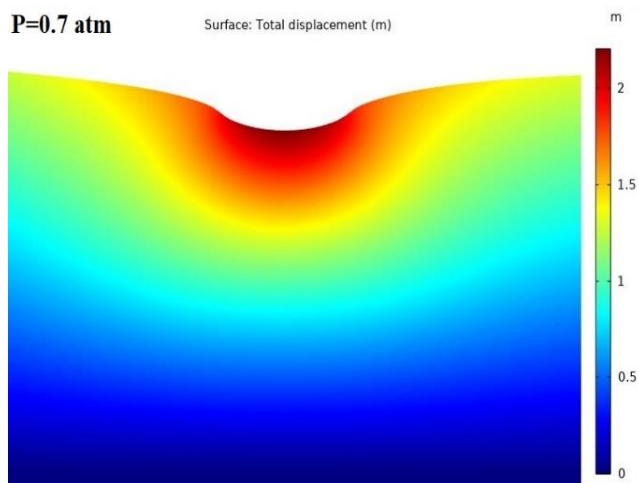
جهت شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مرحله، تعداد ۴ متغیر برای میزان تخلخل خاک و ۳ متغیر عمق سنگ بستر لحاظ گردیده است لذا تعداد شرایط اولیه جهت شروع شبیه‌سازی ۱۲ عدد بوده که در هر کدام از این

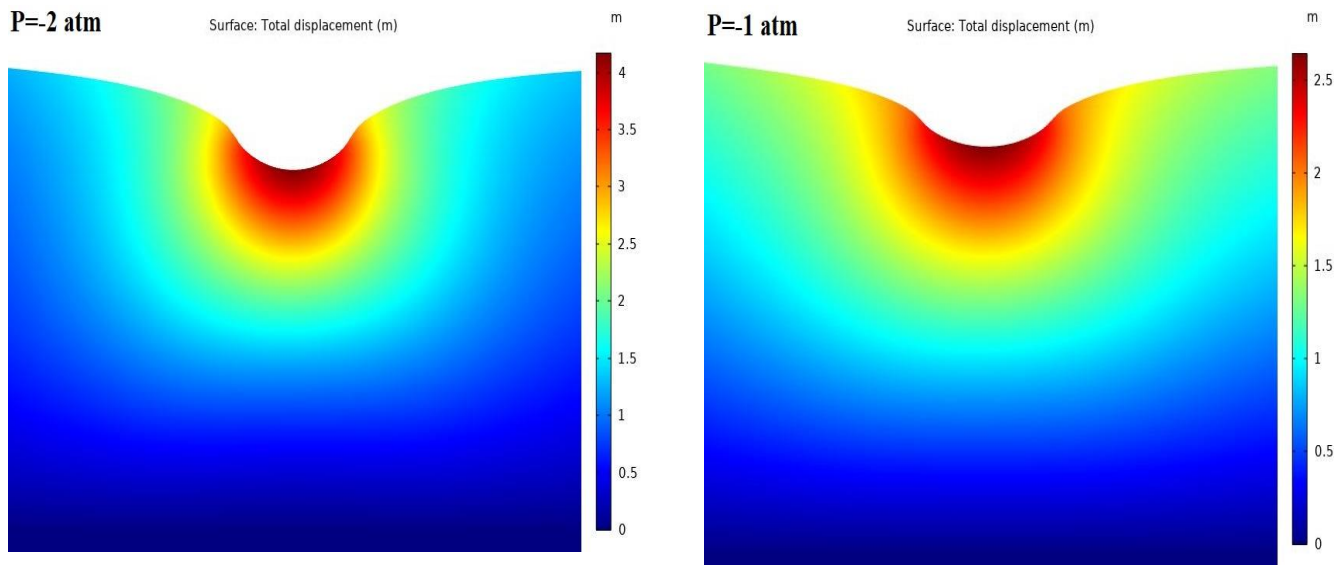
در شکل ۹ تغییرات فشار آب حفره‌ای در طول زمان ۳۰ روز نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۹ مشخص است فشار آب حفره‌ای مربوط به یک نقطه با ارتفاع مشخص در ابتدای اعمال خلاء (ظرف ۴۸ ساعت اول شبیه‌سازی) روند افزایشی داشته و پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود، روند نزولی طی می‌کند تا به فشار استاتیکی پایدار نزدیک و نهایتاً ثابت گردد. با توجه به شکل هر چه میزان فشار خلاء به فشار اتمسفر نزدیک‌تر می‌شود تاثیر فشار خلاء بر افزایش فشار آب حفره‌ای کمتر و با افزایش اختلاف بین فشار اعمالی با فشار اتمسفر، میزان افزایش فشار آب حفره‌ای افزایش یافته است. از آنجایی که آب حفره‌ای با فرار از فضای بین دانه‌های خاک به تدریج مستهلک خواهد شد تقریباً پس از گذشت ۲ روز در مدل‌ها این فشار کاهش می‌یابد و در انتهای ۳۰ روز به کمترین مقدار خود خواهد رسید. نکته قابل توجه این است که به دلیل یکسان بودن جنس خاک در همه مدل‌ها این کاهش فشار آب حفره‌ای در همه مدل‌ها پس از روز دوم روی داده است.

1 Relative Vacuum

که دلیل آن اولاً کاهش تدریجی فشار منفی در حفره‌ها با فاصله گرفتن از کانون‌های خلاء و ثانیاً رفتار تجمیعی نشست لایه‌های زیرین خاک می‌باشد. در محاسبات موجود در این شبیه‌سازی، به منظور دستیابی به آنالیزهای منطقی‌تر، میزان نشست متوسط در سطح محاسبه گردیده است.

حالت‌ها میزان خلاء به مقادیر مشخص بیان شده در قبل تغییر نموده و میزان نشست نهایی اندازه‌گیری و ثبت شده است. مطابق انتظار همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، در نواحی نزدیک‌تر به سطح خاک، میزان نشست نسبت به نواحی عمیق‌تر بیشتر است





شکل ۱۰. میزان جابجایی نسبی ذرات خاک در فشارهای به ترتیب: ۰/۹، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱، ۰، ۱- و ۲- اتمسفر در عمق سنگ بستر ۲۸ متر و نسبت تخلخل ۰/۴۵

Fig. 10. Relative displacement of soil particles at pressures of 0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1, 0, -1 and -2 atm respectively, at a 28 m depth of bedrock, and void ratio of 0.45

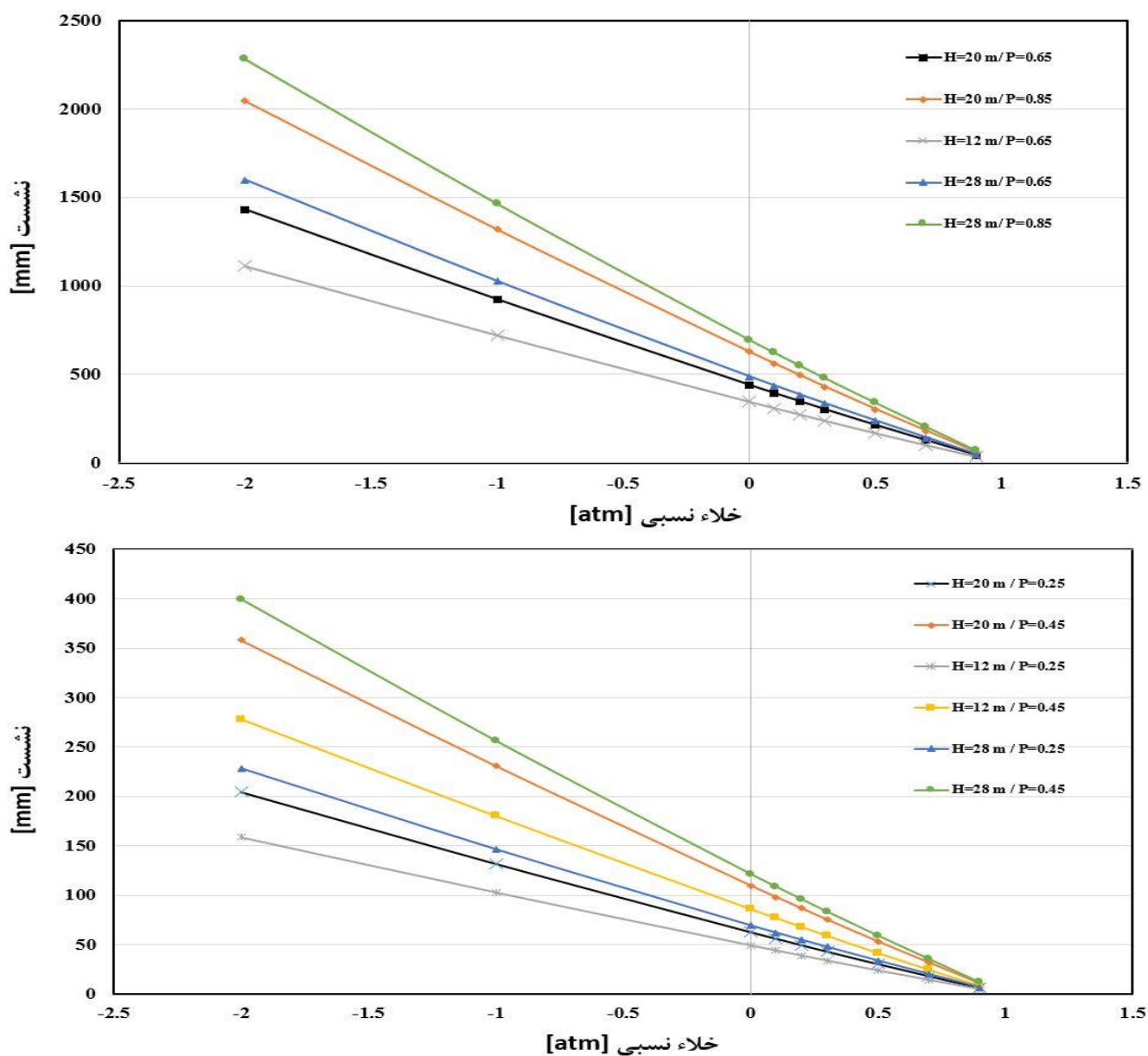
در شکل ۱۲ نمودارهای میزان جابجایی به واسطه ایجاد خلاء در فشارها، نسبت‌های تخلخل و عمق سنگ بسترهای متفاوت نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت تخلخل خاک میزان نشست خاک نیز به واسطه ایجاد خلاء در خاک افزایش می‌یابد و میزان و اندازه این تغییر به پارامترهای و مشخصه‌های خاک از جمله عمق سنگ بستر و میزان خلاء نسبی اعمال شده وابسته می‌باشد.

با افزایش عمق سنگ بستر و فشار نسبی خلاء در خاک تاثیر میزان تخلخل بیشتر می‌گردد و همچنین در نسبت تخلخل‌های بیشتر میزان افزایش این نشست تشدید می‌گردد. برای مثال با توجه به شکل ۱۲-الف در فشار ۲- اتمسفر با تغییر عمق سنگ بستر از ۱۲ به ۲۸ متر، میزان تغییرات نشست از تخلخل ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ به میزان ۱۰۸ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. با افزایش نسبت تخلخل خاک، در هر مقطع فرضی و دلخواه از خاک، سطح تخصیص یافته به حفره‌ها نسبت به سطح تخصیص یافته به ذرات خاک افزایش می‌یابد و لذا در یک فشار حفره‌ای منفی ثابت، نیروی فشاری موثر اعمال شده به ذرات خاک بیشتر از خاک با نسبت تخلخل کم خواهد بود.

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افزایش اندازه خلاء نسبی در خاک، میزان نشست نیز افزایش پیدا می‌کند (رابطه همسو). نشست ایجاد شده در خاک از میزان ۱۵ سانتی‌متر تا ۲۲۸ سانتی‌متر متغیر است که این مقادیر نشست به پارامترهای دیگر (نسبت تخلخل خاک و عمق سنگ بستر) نیز وابسته است. با افزایش میزان خلاء در خاک متخلخل‌تر و با سنگ بستر عمیق‌تر، حجم آب خارج شده بیشتر و نتیجتاً میزان نشست نیز بیشتر خواهد بود و این افزایش نشست مطابق شکل ۱۱ به صورت خطی با میزان خلاء اعمالی در خاک متناسب می‌باشد.

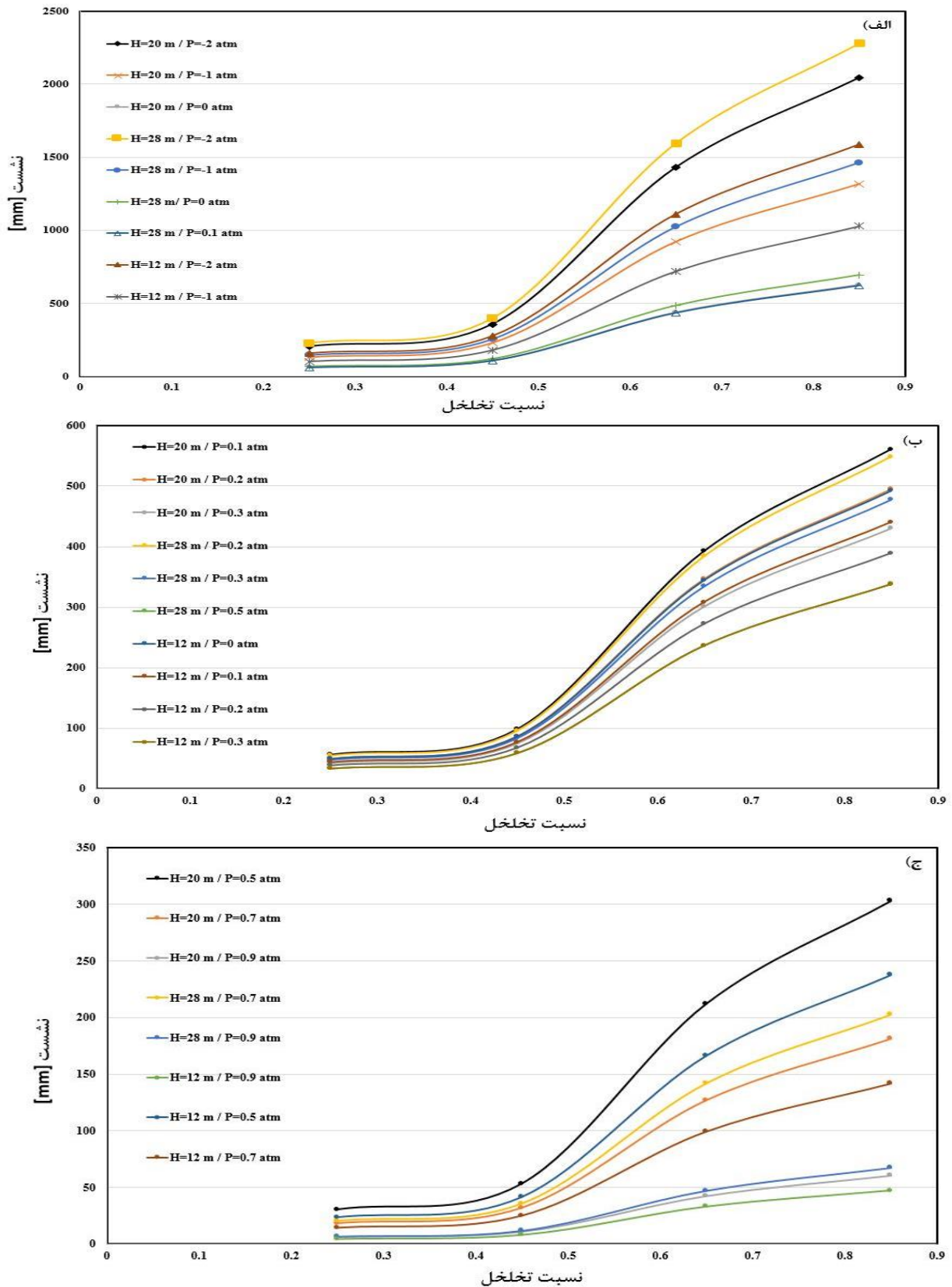
۴-۲ بررسی تاثیر نسبت تخلخل خاک در میزان تحکیم به واسطه ایجاد خلاء در خاک

به منظور بررسی بیشتر، تاثیر نسبت تخلخل خاک نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته تا تاثیر این روش در مناطق مختلف جغرافیای از لحاظ جنس خاک مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا برای نسبت تخلخل خاک اعداد ۰/۲۵، ۰/۴۵، ۰/۶۵ و ۰/۸۵ در نظر گرفته شده و برای هر یک فشار خلاء نسبی از ۰/۱ تا ۲- اتمسفر تغییر یافته است. همچنین برای عمق سنگ بستر مقادیر ۱۲، ۲۰ و ۲۸ متر منظور شده است.



شکل ۱۱. نمودار میزان جابجایی متوسط سطح مورد نظر به واسطه خلاء در فشارهای مختلف در عمق سنگ بستر ۱۲، ۲۰ و ۲۸ متر و نسبت تخلخل ۰/۲۵، ۰/۴۵، ۰/۶۵ و ۰/۸۵

Fig. 11. Diagram of the average displacement of the desired surface by vacuum at different pressures in the bed-rock depth of 12, 20 and 28 m and void ratios of 0.25, 0.45, 0.65 and 0.85



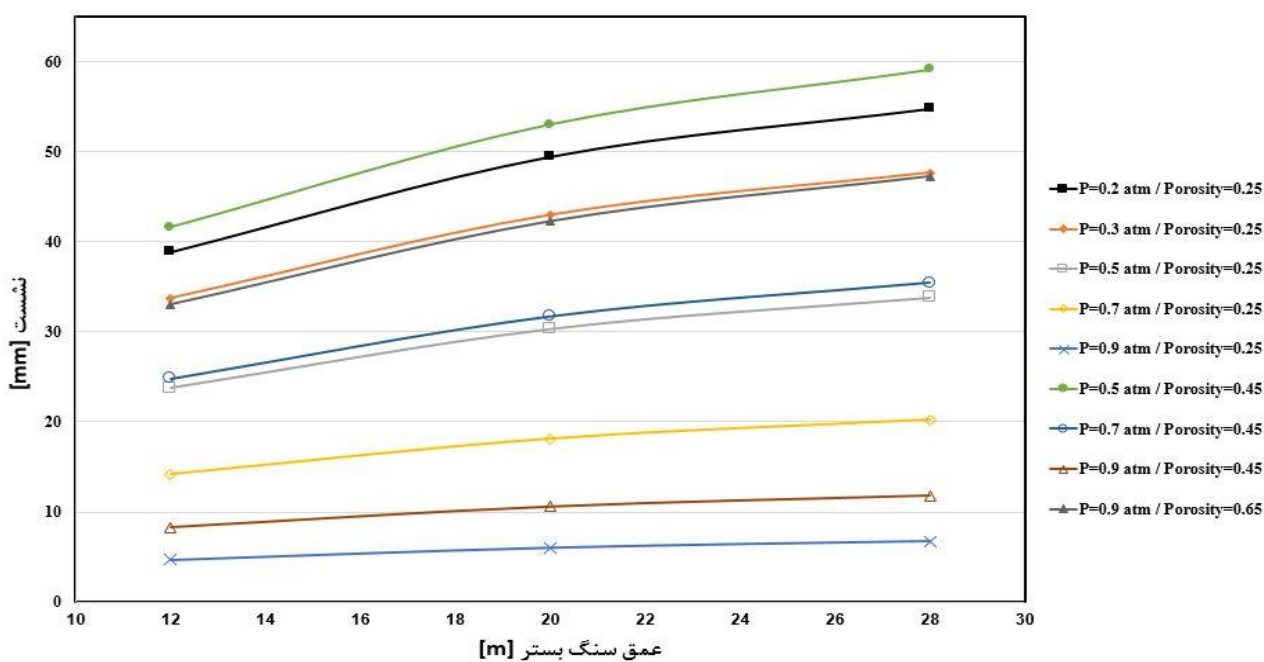
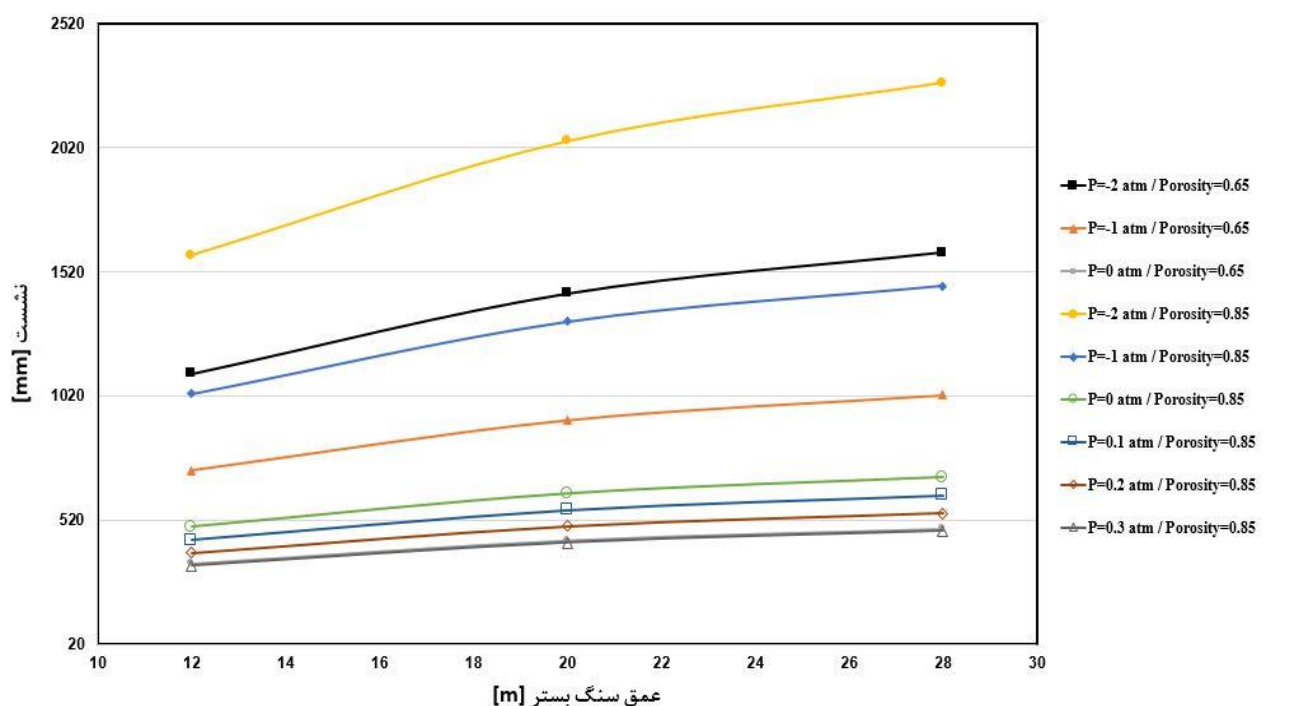
شکل ۱۲. نمودار میزان جابجایی متوسط سطح مورد نظر به واسطه ایجاد خلاء در نسبت تخلخل‌های ۰/۲۵، ۰/۴۵ و ۰/۶۵ در فشارهای نسبی از ۰/۱ تا -۲- اتمسفر و عمق سنگ بستر الف) ۱۲ متر، ب) ۲۰ متر و ج) ۲۸ متر

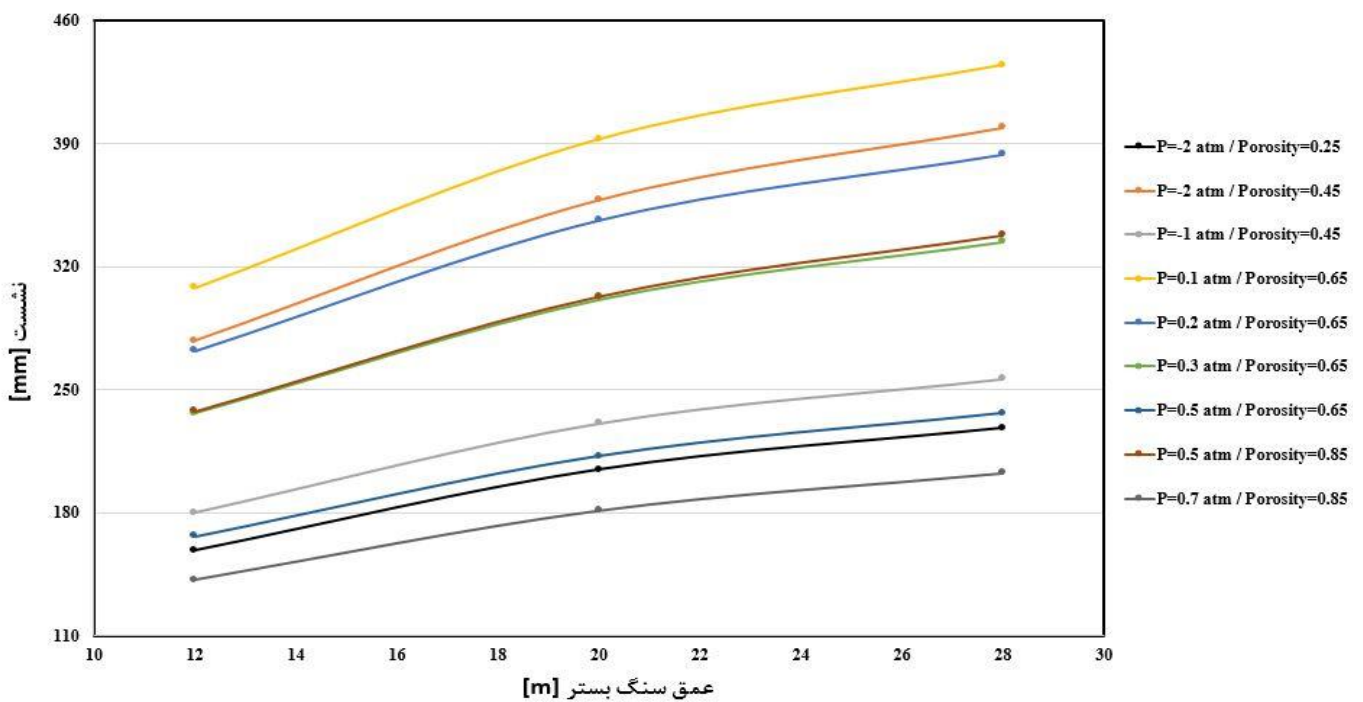
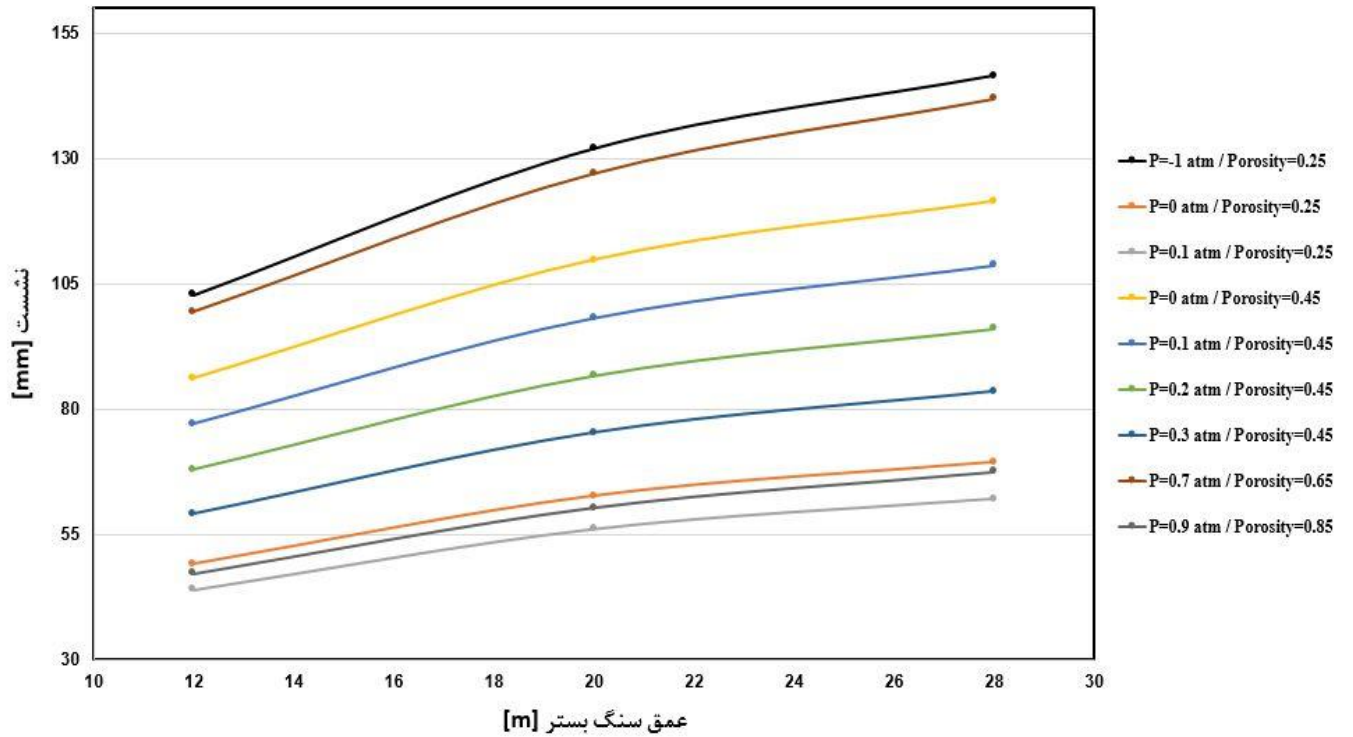
Fig. 12. Diagram of the average displacement of the desired surface by vacuum in the void ratio of 0.25, 0.45 and 0.65 at relative pressures from 0.1 to -2 atm and the depth of the bedrock a) 12 m, b) 20 m and c) 28 m

شکل ۱۳ نمودار تغییرات نشست خاک با تغییر عمق سنگ بستر برای نسبت خلاء و نسبت تخلخل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عمق سنگ بستر میزان نشست خاک افزایش می‌یابد که دلیل آن، تجمعی بودن میزان نشست لایه‌های زیرین خاک است. شایان ذکر است از آنجایی که تاثیر خلاء اعمالی در نقاط دوردست کمتر می‌گردد، در سنگ بستر با عمق‌های بیشتر، روند افزایشی نشست نهایی، اندکی کم می‌شود و این کاهش نرخ نشست نیز از کاهش شیب نمودارهای شکل ۱۳ در عمق سنگ بسترهای بیشتر کاملاً مشهود می‌باشد.

۳-۴ بررسی تاثیر نسبت عمق بستر خاک در میزان تحکیم به واسطه ایجاد خلاء در خاک

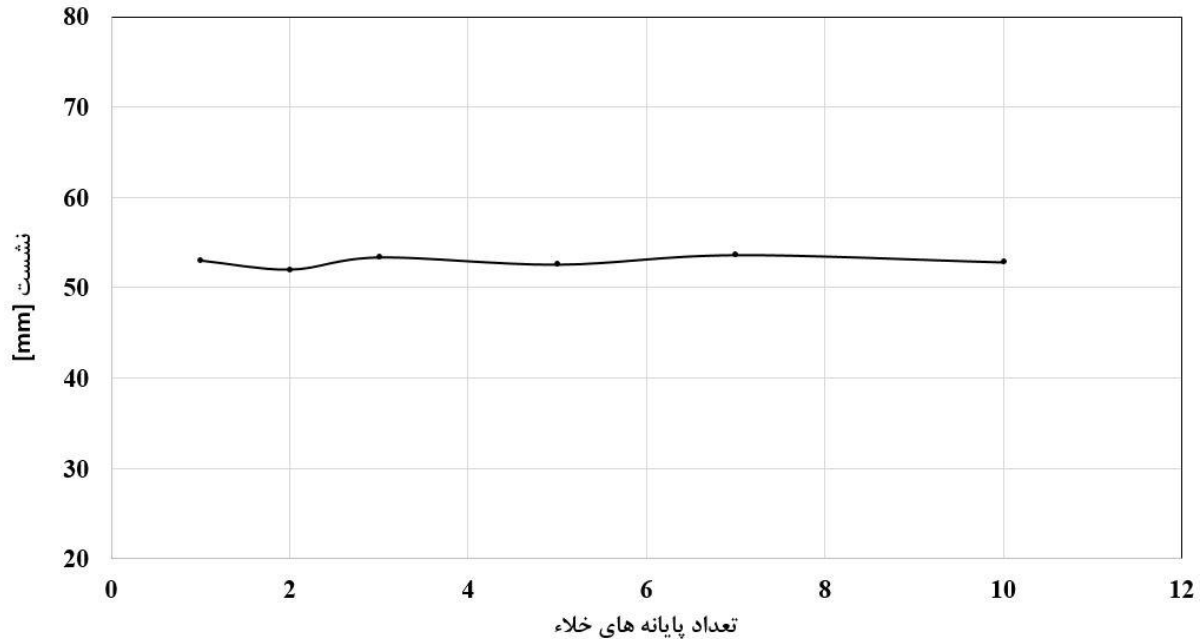
در گام بعدی همانند آنچه برای دو پارامتر دیگر انجام شد، بدین منظور در هر نسبت تخلخل و فشار خلاء معین، پارامتر عمق سنگ بستر مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور فشار خلاء اعمالی را مابین ۰/۱ تا ۲- اتمسفر و نسبت تخلخل خاک را مقادیر گوناگون ۰/۲۵، ۰/۴۵، ۰/۶۵ و ۰/۸۵ متغیر در نظر گرفته و در هر کدام از شرایط فوق عمق سنگ بستر را در مقادیر ۱۲، ۲۰ و ۲۸ متر در نظر گرفته شده است.





شکل ۱۳. نمودار میزان جابجایی متوسط سطح مورد نظر به واسطه ایجاد خلاء در نسبت تخلخل‌های به ترتیب: 0.25 ، 0.45 و 0.65 در عمق سنگ بستر 12 ، 20 و 28 متر و فشارهای نسبی از 0.1 تا -2 اتمسفر

Fig. 13. Diagram of the average displacement of the desired surface due to the vacuum in the void ratio of 0.25, 0.45 and 0.65 respectively, in the bedrock depth of 12, 20 and 28 m and relative pressures from 0.1 to -2 atm



شکل ۱۴. نمودار میزان جابجایی متوسط سطح مورد نظر به واسطه ایجاد خلاء در نسبت تخلخل ۰/۴۵ در عمق سنگ بستر ۲۰ متر و فشارهای نسبی ۰/۵ + اتمسفر در تعداد کانون‌های خلاء متفاوت

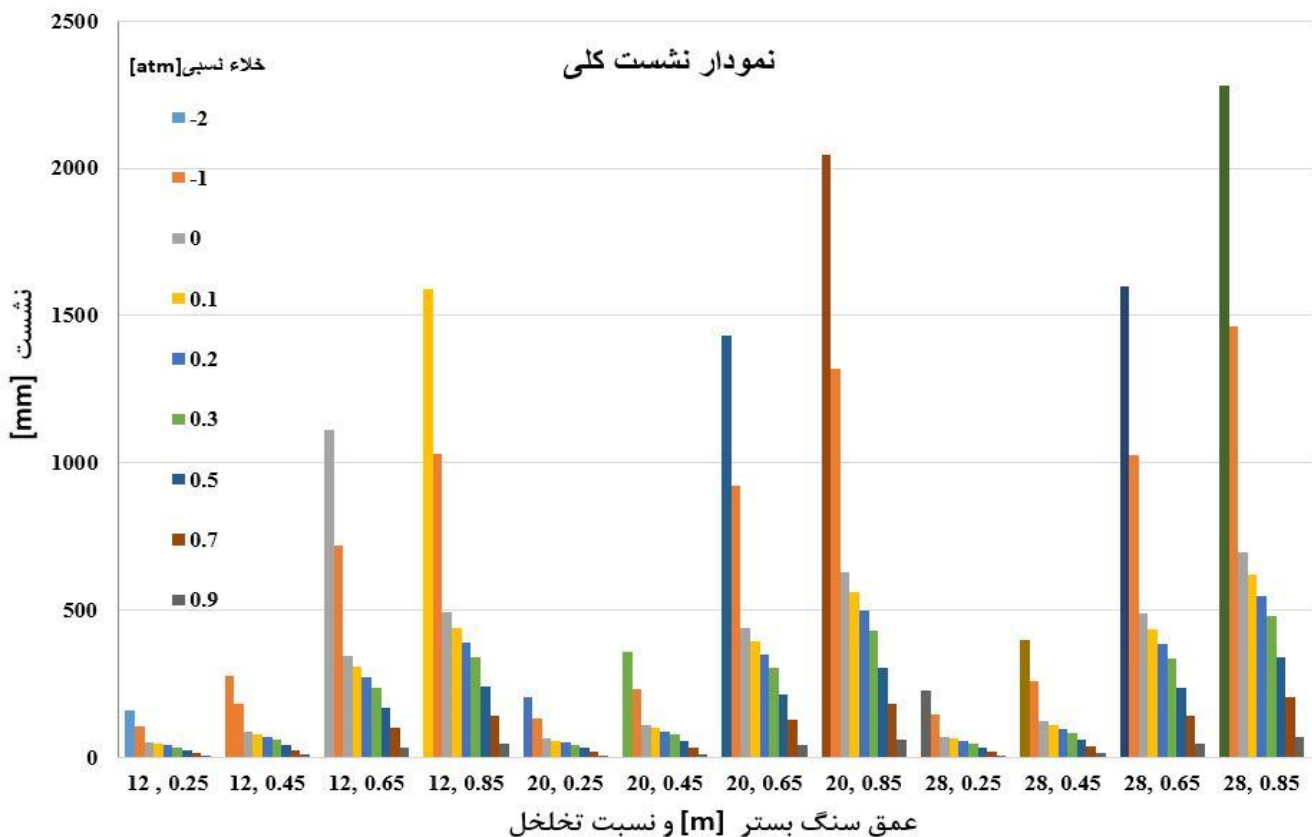
Fig. 14. Diagram of the average displacement of the desired surface due to the vacuum in the void ratio of 0.45 at the bedrock depth of 20 m and relative pressures of 0.5 atm in the number of different vacuum terminals

۵- نتیجه‌گیری

خاک‌های رسی اشباع، دارای ظرفیت باربری کم و ویژگی‌های نشست‌پذیری بیش از حد متعارف می‌باشند. بر این اساس، تعیین میزان نشست تحکیمی از طریق خارج کردن آب موجود در حفره‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش این نشست استفاده از روش خلاء می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی "کامسول" روش تحکیم توسط خلاء مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر چهار پارامتر مهم شامل: شدت خلاء اعمالی، تعداد کانون‌های خلاء، نسبت تخلخل خاک و عمق سنگ بستر تبیین گردیده است (در خصوص خلاء اعمال شده، در راستای بهبود نتایج پژوهش، به جای ۳ حالت، ۹ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است). با توجه به تعدد نمودارها و خروجی‌ها، نهایتاً در شکل ۱۵ خلاصه‌ای از نتایج به نمایش گذاشته شده است. بر این اساس نتایج کلی این

۴-۴- بررسی تاثیر تعداد پایانه‌های خلاء در میزان تحکیم به واسطه ایجاد خلاء در خاک

در راستای بررسی متغیر تعداد کانون‌های اعمال خلاء در خاک، تعداد این پایانه‌ها را از یک تا عدد ده تغییر داده و مطابق شکل ۱۴ ملاحظه گردید که با ثابت بودن سایر مشخصه‌های خاک و خلاء اعمالی، تغییر این تعداد کانون‌ها تاثیری ملموسی بر میزان نشست نخواهد داشت. از جمله برداشت‌های حاصل از بررسی این پارامتر این می‌باشد که بعد از دادن زمان کافی به سیستم شبیه‌سازی، خلاء داخل خاک به میزان معین شده در کل محدوده گسترش خواهد یافت و تعداد این پایانه‌ها تنها سرعت حاصل شدن نتیجه را بیشتر خواهد نمود و عملاً تاثیری بر میزان نشست نهایی نخواهد داشت. این امر می‌تواند هزینه عملی بودن و کاربردی بودن این روش را به حداقل ممکن برساند.



شکل ۱۵. نمودارهای کلی نشست به وسیله خلاء با تغییر پارامترهای فشار خلاء نسبی، عمق سنگ بستر و نسبت تخلخل خاک ۱.

Fig. 15. Diagrams of vacuum settlement by changing the relative vacuum pressure, bedrock depth, and soil void ratio parameters

۴- با افزایش عمق سنگ بستر میزان نشست خاک نیز افزایش پیدا می‌کند. از آنجا که تاثیر خلاء اعمالی در نقاط دوردست کمتر می‌گردد تاثیر خلاء اعمالی با افزایش عمق سنگ بستر کمتر خواهد شد.

۵- در خصوص تاثیر تعداد کانون‌های اعمال خلاء در خاک، با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده (۱۰ متر عرض) می‌توان نتیجه گرفت که با ثابت بودن سایر مشخصه‌های خاک و خلاء اعمالی، تغییر تعداد کانون‌ها تاثیر ملموسی بر میزان نشست نداشته است. از جمله برداشتهای حاصل از بررسی این پارامتر این می‌باشد که بعد از دادن زمان کافی به سیستم شبیه‌سازی، خلاء داخل خاک به میزان معین شده در کل محدوده گسترش خواهد یافت و تعداد این پایانه‌ها تنها سرعت حاصل شدن نتیجه را بیشتر خواهد نمود و عملاً تاثیری بر میزان نشست نهایی نخواهد داشت.

تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ۱- با افزایش میزان خلاء اعمال شده بر خاک، ضمن کاهش فشار آب حفره‌ای، همزمان فشار نیروی سربار افزایش می‌یابد و لذا نشست تحکیم با روندی خطی (مطابق شکل ۱۵) افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش نسبت تخلخل خاک، میزان نشست خاک نیز افزایش یافته و میزان و اندازه این تغییر به پارامترها و مشخصه‌های خاک از جمله عمق سنگ بستر و همچنین میزان خلاء نسبی اعمال شده وابسته است.
- ۳- با افزایش عمق سنگ بستر و فشار نسبی خلاء در خاک تاثیر میزان تخلخل به صورت سینرژیک بیشتر می‌شود و همچنین در نسبت تخلخل‌های بیشتر میزان افزایش این نشست بیشتر می‌باشد. به عبارتی تغییر تنش‌های درونی در خاک‌های متخلخل‌تر بسیار بیشتر بوده و لذا سبب نشست به مراتب بیشتری در مقایسه با تخلخل‌های کمتر می‌شود.

- deformation.
- Geotextiles and Geomembranes, 28(6), (2010) 525–535.
- [12] Kosaka T, Kawaida M, Yamada K and Toyota M., 10 meters of ground settlement behaviors induced by vacuum consolidation and high embankment highway construction. Proceedings of the 46th Annual Meeting of Japanese Geotechnical Society, Kobe, Japan, (2010) pp. 853–854 (in Japanese).
- [13] Chai JC, Ong CY, Carter JP and Bergado DT., Lateral displacement under combined vacuum pressure and embankment loading. *Geotechnique* 63(10), (2010) 842–856
- [14] Indraratna, B., Recent advances in the application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilisation, (2010).
- [15] Kargar, S., Moosavi, A. Bidirectional water transport through non-straight carbon nanotubes, *J. Mol. Liq.* 276 (2019) 39–46.
- [16] Rujikiatkamjorn, C., Indraratna, B., Chu, J. 2D and 3D numerical modeling of combined surcharge and vacuum preloading with vertical drains, *Int. J. Geomech.* 8 (2008) 144–156.
- [17] Reihani, A., Soleimani, A., Kargar, S., Sundararaghavan, V., Ramazani, A. Graphyne Nanotubes: Materials with Ultralow Phonon Mean Free Path and Strong Optical Phonon Scattering for Thermoelectric Applications, *J. Phys. Chem. C.* 122 (2018) 22688–22698.
- [18] Dam, L.T.K, Sandanbata, I and Kimura, M., Vacuum Consolidation Method-Worldwide Practice and the Latest Improvement in Japan (2006)
- [19] Walker, R., Indraratna, B. Consolidation analysis of a stratified soil with vertical and horizontal drainage using the spectral method,
- [1] Masse, F., et al., Vacuum Consolidation -A Review of 12 Years of Successful Development, (2001)
- [2] Schiffman, R.L. Consolidation of soil under time-dependant loading and varying permeability, in: *Highw. Res. Board Proc.*, 1958.
- [3] Wilson, N.E., Elgohary, M.M. Consolidation of soils under cyclic loading, *Can. Geotech. J.* 11 (1974) 420–423.
- [4] Alonso, E.E., Krizek, R.J. Randomness of settlement rate under stochastic load, *ASCE J Eng Mech Div.* 100 (1974) 1211–1226.
- [5] Olson, R.E. Consolidation under time-dependent loading, *J. Geotech. Eng. Div.* 103 (1977) 55–60.
- [6] Baligh, M.M., Levadoux, J.N. Consolidation theory for cyclic loading, *J. Geotech. Eng. Div.* 104 (1978) 415–431.
- [7] Ying-chun, Z., Kang-he, X., Xi-bin, L. Nonlinear analysis of consolidation with variable compressibility and permeability, *J. Zhejiang Univ. A.* 6 (2005) 181–187.
- [8] Chai, J.-C., Carter, J.P. and Hayahsi, S. Ground deformation induced by vacuum consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 131(12), (2005) 1552–1561.
- [9] Chai, J.-C., Miura, N. and Bergado, D. T. Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain: Analyses versus performance. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), (2008) 220–230.
- [10] Toufigh, M.M., Ouria, A. Consolidation of inelastic clays under rectangular cyclic loading, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 29 (2009) 356–363.
- [11] Chai, J.-C., Hong, Z.-S. and Shen, S.-L. Vacuum-drain consolidation induced pressure distribution and ground

- Consolidation at Port of Brisbane. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 137(5), (2011) 550–554.
- [22] “COMSOL Modeling Software”. COMSOL.com. Comsol, Inc. Retrieved 20 November 2015.
- [23] GEO-SLOPE International Ltd, GeoStudio 2007 Add-Ins Programming Guide and Reference[M]. 2007.
- (2009).
- [20] Mohamedelhassan, E., Shang, JQ., Vacuum and surcharge combined one-dimensional consolidation of clay soils, Canadian Geotechnical Journal 39 (5), (2002) 1126-1138
- [21] Indratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Ameratunga, J. and Boyle, P., Performance and Prediction of Vacuum Combined Surcharge

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Karimi, M. Yazdi, A. Ali Zad, Investigating the soil consolidation via vacuum method by using numerical analysis, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 2739-2758.

DOI: 10.22060/ceej.2022.18264.6812

