نشریه محاسبات نرم در علوم مهندسی/بهار1403/ شماره 2/ صفحه 14الی 22
https://sanad.iau.ir/journal/pmi.ced

مطالعه عددی بهسازی خاک های ضعیف رسی به وسیله پیش بارگذاری خلاء و زهکش های عمودی بدون بار سربار

مهدی مخبری[1]، محمد مهدی پاردسویی[2]*، مهدی مومنی رق ابادی[3]

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحداستهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران
*۲- دانشجوی دکتری- مهندسی عمران-ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.
۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

چکیده

با گسترش روزافزون شهرها و مناطق صنعتی نیاز به زمین های جدید جهت ساخت و ساز به امری اجتناب ناپذیر تبدیل گردیده است. عمده این زمین ها معمولا در مناطقی واقع شده اند که قبلا به خاطر وجود خاک های سست امکان ساخت و ساز در آن ها وجود نداشت. یک از روش های معمول جهت بهسازی خاک در این مناطق در صورت وجود لایه های نرم رسی، استفاده از خاکریز با یا بدون زهکش های عمودی و پیش بار گذاری خلاء می باشد. در این تحقیق ابتدا خلاصه ای از روش پیش بارگذاری با استفاده از بار سربار و خلاء و زهکش های عمودی عنوان گردیده و سپس یک مطالعه موردی که شامل پیش بار گذاری به وسیله خلاء و بدون استفاده از بار سربار است به صورت عددی توسط نرم افزار اجزای محدود بررسی گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که در صورت وجود شرایط ژئوتکنیکی مناسب، استفاده از پیش بار گذاری خلاء به تنهایی نیز می تواند نتایج مطلوبی را از خود نشان دهد. استفاده از این روش در مناطقی که دسترسی به خاک مناسب جهت احداث خاکریز ممکن نبوده و یا به خاطر سازه ها و تاسیسات زیربنایی در مجاورت منطقه مورد بهسازی امکان احداث خاکریز ممکن نیست، می تواند گزینه بسیار مناسبی جهت بهسازی لایه ضعیف رس در آن منطقه باشد. نتایج این تحقیق می تواند مورد استفاده شرکت های و افراد فعال در زمینه بهسازی خاک های سست به خصوص در مناطق ساحلی قرار گیرد.

کلمات کلیدی : بهسازی خاک ، زهکش های عمودی ، تحکیم ، پیش بار گذاری خلاء ، رس

The numerical investigation of the weak clay soil treatments using vacuum preloading and vertical drains without embankment surcharge

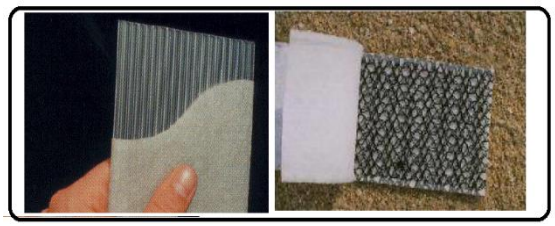
Abstract

Due to the fast growth of urban and industrial facilities, the necessity of construction in new land becomes inevitable. Most of these lands were left as a result of the existence of weak layers that make them unsuitable for construction. One the methods in treatment of such lands that have weak clay layers is the application of surcharge with or without prefabricated vertical drains or vacuum. In this literature first a brief description of the vacuum and surcharge preloading is presented and then a case history was investigated by finite element method that consists of only vacuum and prefabricated vertical drains without embankment. Based on the results the application of vacuum preloading alone even in the absence of surcharge, would give satisfactory results, especially where the application of surcharge preloading is not possible due to the unavailability of suitable loading material or the existence of sensitive buildings or infrastructures. The results of this literature can be used by consulting companies or personals who are active in land reclamation, especially in offshore regions.

Keywords: soil treatment, vertical drains, consolidation, vacuum preloading, clay

1. مقدمه

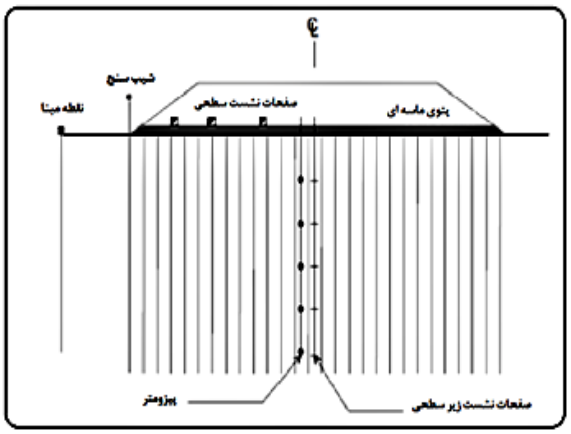
با پیشرفت شهرنشینی و رشد آهنگ صنعتی شدن به خصوص در کشورهای در حال توسعه، ساخت و ساز در زمین هایی که قبلا به خاطر وجود خاک های سست ناممکن به نظر می رسید در دستور کار قرار گرفته است. در خصوص خاک های رسی دریایی و خاک های آلی حاوی مقادیر بالای ریزدانه یکی از روش های معمول بهسازی، استفاده از زهکش های عمودی جهت تسریع در فرآیند تحکیم می باشد. عملکرد انواع مختلف زهکش های عمودی که شامل زهکش های ماسه ای، شمع های کوبیده شده شنی، زهکش های عمودی متخلخل (ژئوسینتتیک ها) و شمع های شنی در چند دهه اخیر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته اند. زهکش های ماسه ای در ابتدا در سال های حدود 1920 برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایشات میدانی و آزمایشگاهی سیستم های زهکشی ماسه ای توسط اداره بزرگراه های کالیفرنیا در سال 1933آغاز گردید. طی سال های 1940 هنوز رفتار زهکش های ماسه ای به خوبی شناخته شده نبود. ظرفیت باربری فونداسیون ها بلافاصله بعد از نصب زهکش های عمودی طوری در نظر گرفته می شد که تسلیح لازم فراهم آمده است، و بنابراین تمام بار آنقدر سریع بر روی فونداسیون قرار می گرفت که دفعتا موجب چندین گسیختگی در چنین پروژه هایی گردید . به همین خاطر، روش شمعهای متراکم ماسه ای گسترش یافت که در این روش زهکش های عمودی ماسه ای طی عملیات نصب کوبیده می شدند. از آن جا که هیچ اثر تراکمی در خاک های رسی انتظار نمی رود، این ستون های ماسه ای به صورت شمع های دانه ای در زمین های نرم عمل می نمودند، و در نتیجه بار بیشتری را متحمل شده و در زمان مشابه همانند یک زهکش عمودی نیز عمل می نمودند. از سال 1940 که کجلمن (1948) [1] زهکش های نواری متخلخل را معرفی نمود انواع مختلفی از این زهکش ها روانه بازار شده اند مثل : ژئودرین (سوئد)، آلیدرین (انگلیس)، مبرادرین (نروژ) و..... مشخصا، زهکش های نواری متخلخل از یک هسته پلاستیکی با نوارهای طولی درست شده اند که عنوان زهکش عمل می نمایند و یک پوشش کاغذی یا ساخته شده از مصالح متخلخل به عنوان فیلتر از هسته محافظت می نماید. نمونه ای از این زهکش ها در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 2-1 : نمونه ای از *PVD* های نسل جدید

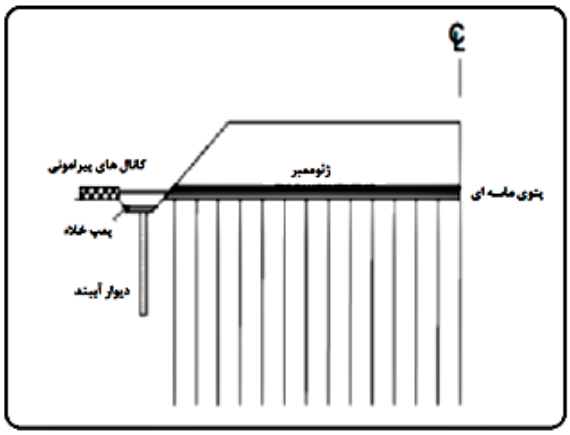
شکل 2 نحوه نصب و تجهیزات ابزار دقیق مورد نیاز برای نظارت بر عمکرد خاک فونداسیون در زیر خاکریز را نشان می دهد [2]. قبل از نصب زهکش های عمودی، آماده سازی عمومی که شامل از بین بردن گیاهان و زباله های سطحی، تسطیح زمین و ساخت یک پتوی ماسه ای می باشد

انجام می گردد. سیستم پتوی ماسه ای برای خارج نمودن آب زهکش ها و همچنین ایجاد یک منطقه مناسب کاری ایجاد می شود.



شکل 2ابزار بندی یک خاکریز (ایندراراتنا، 2000)

در حالت پیش بار گذاری با خلاء نصب زهکش های افقی در جهت طولی و عرضی بعد از نصب سیستم پتوی ماسه ای مورد نیاز می باشد [3]. این زهکش ها، سپس به گوشه پیرامونی ترانشه هایی متصل می شوند که با پوشش نفوذ ناپذیر، در امتداد محیط خود، جهت جلوگیری از نشت سطحی عایق بندی شده اند. در آخر، پمپ های خلاء به مدول های تخلیه که از ترانشه ها بیرون آمده اند متصل می گردند. شکل 3، 4، 5 و6 نمایی از مناطقی که تحت پیش بارگذاری خلاء قرار گرفته اند را نشان می دهند.



شکل 3 : دیاگرام شماتیک از یک خاکریز که تحت بارگذاری خلاء [2]

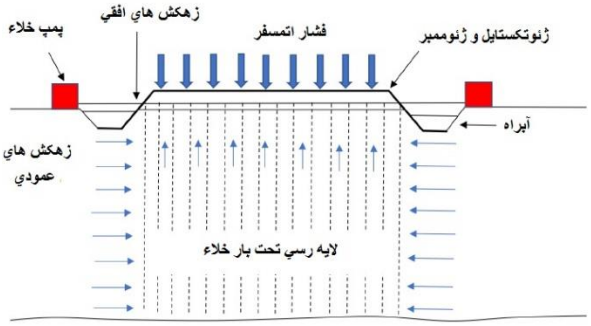
شکل 4 : نمایی از پمپ یک پروژه تحکیم با خلاء

شکل 5 : نمایی از سیستم جمع آوری آب های سطحی از PVD های نصب شده در زمین

شکل 6 : پیش بار گذاری به وسیله بار سربار و بار خلاء

ابزار دقیق میدانی برای نظارت و ارزیابی عملکرد خاکریز به منظور جلوگیری از گسیختگی ناگهانی، و ثبت تغییرات در میزان نشست و همچنین تایید پارامتر های طراحی ضروری می باشد. انواع مختلف این ابزارها مثل گیج های نشست، پیزومترها و شیب سنج ها برای نصب در محل کار ضروری می باشند. ارزیابی عملکرد نیز برای بهبود پیش بینی نشست ها و همچنین فراهم آوردن تجارب برای پروژه های آتی ضروری می باشد.

اعمال پیش بار گذاری باعث افزایش فشار آب منفذی در خاک گردیده و با توجه به نصب زهکش ها، این افزایش فشار در آب منفذی باعث تسریع در جریان تحکیم می گردد. دو روش جهت اعمال بار پیش بارگذاری همانطور که ذکر گردید شامل بار سربار و اعمال خلاء می باشد. در روش ترکیبی اعمال پیش بار گذاری خلاء به همراه بار سربار، معمولا مشکلاتی از قبیل گسیختگی در پای خاکریز، به وجود آمدن نشتی در سیستم پس از ساخت خاکریز سرباره به وجود می آید. از این رو در مناطقی که معمولا دسترسی به مصالح مناسب جهت ساخت خاکریز موجود نیست و یا خاک رسی در لایه های زیرین بسیار سست می باشد، با توجه به پیشرفت های اخیر در ارتقای سیستم اعمال پیش بارگذاری خلاء، از سیستم زهکش های عمودی و خلاء بدون استفاده از بار سربار استفاده می گردد. تصویر شماتیک روش ذکر شده در شکل 7 نشان داده شده است. در این نوشتار یک مطالعه موردی در این خصوص که در تایلند انجام گردیده است به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

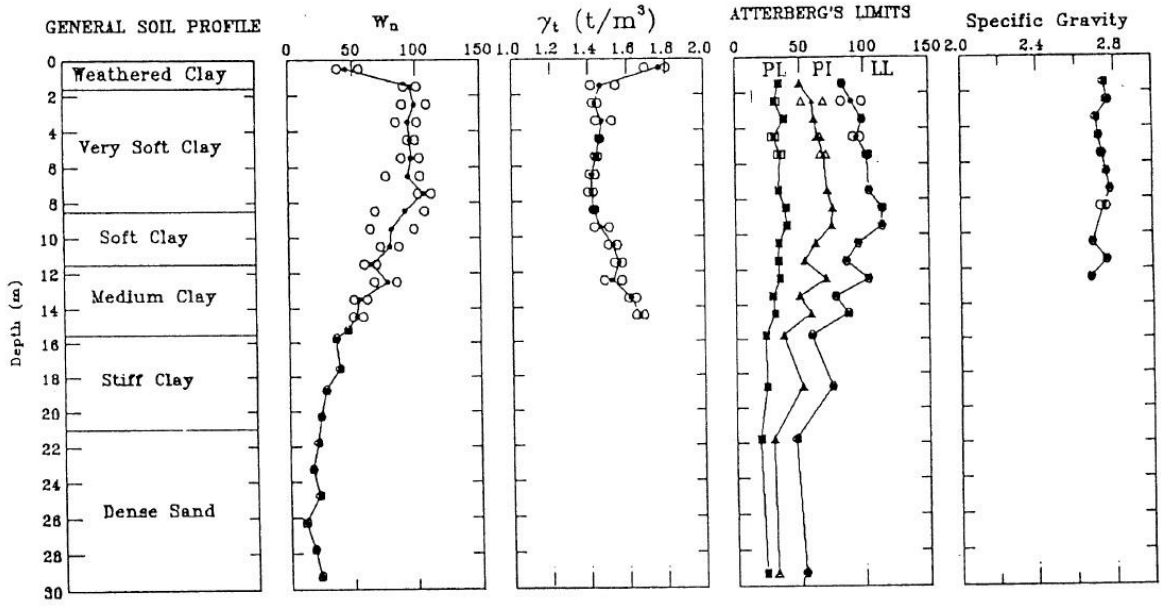


شکل 7 : تصویر شماتیک از روش بهسازی خاک با پیش بار گذاری خلاء و زهکش های عمودی

2. مواد و روش ها

1.2. معرفی مطالعه موردی

مطالعه موردی مورد بررسی در این نوشتار در یک منطقه در نوار ساحلی قرار گرفته است. شکل 8 پروفیل خاک منطقه ذکر شده بدست آمده از مطالعات اولیه را نشان می دهد.



شکل 8: پروفیل خاک قبل از عملیات بهسازی در منطقه ساحلی[4]

بر اساس مطالعات اولیه سطح آب زیرزمینی در عمق 1.3 متری قرار گرفته بود. مساحت منطقه بهسازی 2927 متر مربع بود دارای عرض تقریبی 19 و طول 155 متر می گردید. مراحل عملیات بهسازی از قرار زیر می باشد [5].

1- تمیز کاری منطقه و پر کردن چاله های موجود با خاک نرم رسی موجود در محل

2- تراز کردن منطقه بهسازی و درست کردن یک عرشه با استفاده از ماسه تمیز به ضخامت 0.5 متر

3- نصب زهکش های عمودی با آرایش مثلثی با فواصل 0.8 متری توسط دستگاه ریگ

4- پهن کردن یک پتو با استفاده از ژئوتکستایل و و یک لایه ژئوممبر جهت هوابند کردن منطقه

5- احداث یک گودال در اطراف منطقه بهسازی و آببند کردن درون آن توسط ژئوتکستایل جهت ایزوله کردن منطقه بهسازی

6- اتصال سر زهکش های عمودی به وسیله زهکش های افقی و اتصال سیستم به پمپ خلاء

7- اعمال پیش بار گذاری خلاء به مدت 120 روز با فشار اسمی 80 کیلو پاسکال

مراحل ذکر شده در شکل های8 نشان داده شده است.

(الف)

(ب)

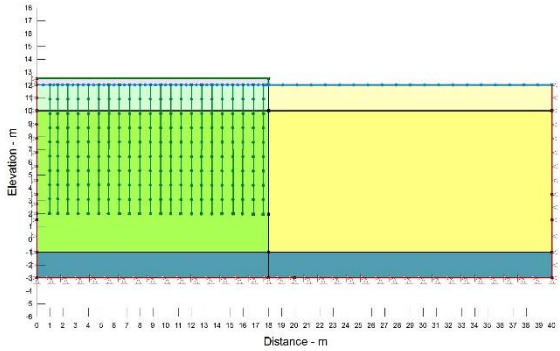
(ج)

(د)

شکل 8 : مراحل ساخت سیستم بهسازی خاک در منطقه ساحلی [5]

2.2. مدل سازی عددی

جهت مدل سازی عددی از نرم افزار اجزای محدود *Geostudio 2018R2* استفاده گردید. جهت تحلیل مدل از مدل رفتاری کم کلی اصلاح شده استفاده شد که کارآیی این مدل در کارهای مشابه قبلی به اثبات رسیده است [6, 7]. نوع تحلیل از نوع کرنش صفحه ای می باشد. شکل 9 مدل ساخته شده در نرم افزار اجزای محدود در این مطالعه را نشان می دهد.

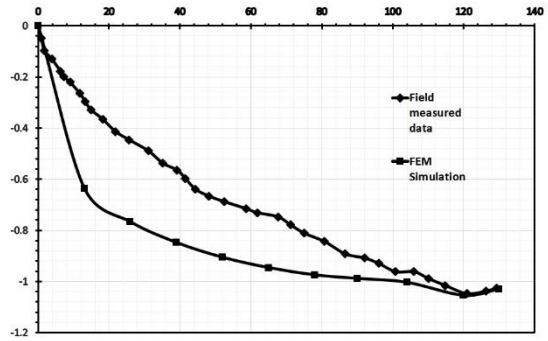


شکل 9: نمایی از مدل اجزای محدود

مراحل مدل سازی سیستم های بهسازی خاک توسط سربار و پیش بار گذاری خلاء قبلا توسط نگارندگان این مقاله به صورت مفصل تشریح شده است [8, 9]که خوانندگان می توانند جهت مطالعه به مراجعه فرمایند.

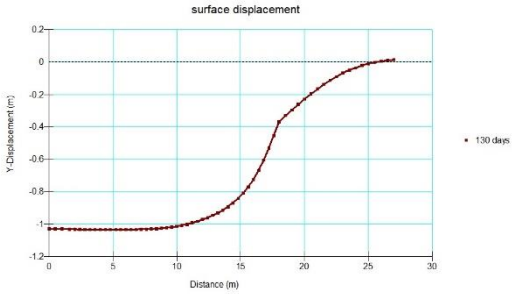
3. نتایج و بحث

شکل 10 نشست اندازه گیری شده در محل را در برابر شبیه سازی اجزای محدود نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد علیرغم این مهم که نشست نهایی به درستی محاسبه گردیده است اما در شبیه سازی اجزای محدود نشست ها در طول مدت پروژه بیش مقدار محاسبه گردیده اند.



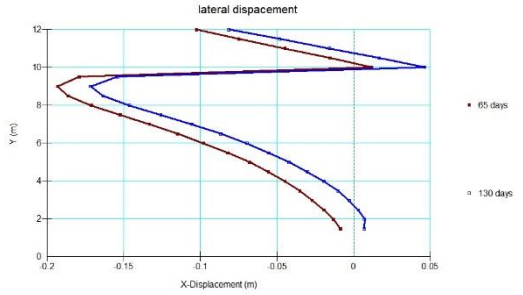
شکل 10 : نمودار نشست محاسبه شده در برابر اندازه گیری های انجام شده در محل

دلیل این موضوع می تواند احتمالا به خاطر تاخیر در انتقال تنش پیش بار گذاری به خاک باشد که توسط محققین متعددی نیز عنوان گردیده است [10, 11].



شکل 11: نشست سطحی بعد از گذشت 130 روز

شکل 11 نشست سطح زمین بعد از 130 روز از آغاز عملیات بهسازی را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است به خاطر عدم وجود خاکریز در این روش بهسازی، بالاآمدگی در پاشنه محل عملیات در حد 6 سانتمتر بیشتر نیست. پدیده بالا زده گی یکی از آثار مخرب بهسازی در حالت وجود خاکریز می باشد که توسط محققین متعددی گزارش شده است [8, 12, 13] که همانطور مشاهده می شود با حذف سربار در این روش بهسازی، عملا این اثر مخرب از بین رفته است.



شکل 12: تغییرات مکان جانبی در پاشنه محل بهسازی بعد از گذشت 65 و 130 روز

شکل 12 تغییرات مکان جانبی در انتهای محدوده بهسازی را نشان می دهد. بر خلاف حالت وجود سربار که تغییر مکان جانبی به سمت خارج می باشد و بار سربار یک نیروی برشی مثبت را در پاشنه خاکریز ایجاد می نماید [14] در حالت بدون سربار همانطور که در شکل 12 نیز دیده می شود اعمال بار سربار باعث به وجود یک نیروی به سمت داخل گردیده است که این پدیده یکی از مهمترین مزیت های عدم استفاده از سربار ساخته شده با خاکریز می باشد.

با توجه به نتایج ابزار گذاری در محل و همچنین نتایج آنالیز محدود می توان دید که استفاده از پیش بار گذاری خلاء حتی بدون استفاده از بار سربار به تنهایی می تواند یک روش مطمئن و کارآمد جهت بهسازی خاک های نرم رسی در نوار ساحلی باشد. البته این موضوع را باید مد نظر داشت که در صورت وجود لنز های ماسه ای عملکرد این سیستم در حالت پیش بار گذاری خلاء به شدت کاهش می یابد [9] و استفاده از بار سربار در مواردی اجتناب ناپذیر می گردد. این مهم اهمیت دقت مضاعف مطالعات اولیه آزمایشگاهی و صحرایی را نشان می دهد. همچنین همانند تمام عملیات های بهسازی می بایست قبل از شروع عملیات بهسازی، یک قسمت از منطقه به صورت نمونه با روش ها و الگوهای بهسازی پیشنهادی توسط مشاور مورد آزمایش

قرار گیرد تا بعد از گذشت زمان مورد نظر کارآمدی روش یا الگوی پیشنهادی که می تواند شامل استفاده یا عدم استفاده از بار سربار، فاصله و الگوی نصب زهکش های عمودی ، میزان راندمان و فشار پیش بار گذاری خلاء و دیگر موارد به صورت کامل مشخص شود.

4. نتیجه گیری

در ابتدا در خصوص مکانیسم عملکرد روش پیش بار گذاری با خلاء و سربار به همراه زهکش های عمودی توضیحاتی ارائه گردید و یک مطالعه موردی که در آن از روش پیش بارگذاری خلاء بدون بار سربار استفاده شده بود معرفی شد. بر اساس مطالعه عددی و همچنین نتایج ابزار گذاری در محل مشخص گردید که روش پیش بارگذاری با خلاء به تنهایی و بدون استفاده از بار سربار، یک روش کارآمد جهت بهسازی خاک نرم رسی واقع شده در زمین های واقع شده در نوار ساحلی می باشد. بر اساس نتایج مدل سازی اجزای محدود انجام شده مشاهده گردید که با حذف خاکریز خاکی، بالازده گی در پیرامون محدوده بهسازی است عملا از بین می رود. همچنین با توجه به نبود خاکریز و ایجاد فشار به سمت داخل ناشی از اعمال خلاء، بر خلاف حالت بار سربار که فشار و جابه جایی جانبی به سمت خارج است، مشکلات ترک خورده گی و آسیب به سازه ها و تاسیسات زیر سطحی مجاور عملیات بهسازی به شدت کاهش می یابد. البته باید توجه داشت که بهرحال قبل از انتخاب روش بهسازی به خصوص مشابه این روش، که شامل حذف بار سرباره است، مطالعات اولیه و تست های مقیاس کوچک می بایست توسط مهندسین ذیصلاح انجام گردد.

5. مراجع

[1] W.J.P.n.I. Kjellman, Accelerating consolidation of fine grain soils by means of cardboard wicks, 2 (1948) 302-305.
[2] B. Indraratna, I.J.C.G.J. Redana, Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay, 37(1) (2000) 132-145.
[3] J.D. Quaranta, Use of prefabricated vertical drains (PVDs) for enhanced soil flushing, West Virginia University, 1996.
[4] D. Bergado, P. Long, A.J.G.E. Balasubramaniam, Compressibility and flow parameters from PVD improved soft Bangkok clay, 27 (1996) 1-20.
[5] N. Koirala, S. Soralump, S.J.C.E. Phakdimek, Architecture, Observations from Ground Improvement Using Vacuum Consolidation Method, (2022) 771-783.
[6] H. Li-wen, L.J.R. Zhi-jun, S. Mechanics, of soft soil Analysis of deformation mechanism reinforcement by vacuum preloading, 42(3) (2021) 790.
[7] Y. Cai, Coupled Numerical Moelling Of Vacuum Consolidation With Nonuniform Pore Pressure Distribution, University of Waterloo, 2021.
[8] 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).
[9] م. پاردسویی, س. زمردیان, بررسی میزان افزایش کارآمدی در صورت اعمال خلاء در پروژه های تحکیم خاک بستر به وسیله بار سربار ویا زهکش های عمودی (بخش دوم), in: دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله، ژئوتکنیک, undefined, 1391.
[10] J. Graham, J. Crooks, A.L.J.G. Bell, Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays, 33(3) (1983) 327-340.
[11] E. Alonso, V. Navarro, Modelling long term deformations of clay, in: Chemo-Mechanical coupling in clays, Routledge, 2018, pp. 167-176.
[12] C. Rujikiatkamjorn, B. Indraratna, J. Chu, 2D and 3D numerical modeling of combined surcharge and vacuum preloading with vertical drains, (2008).
[13] M.M. Pardsouie, M. Momeni, S.A. Nasehi, M.H. Pardsouie, 2D Numerical Investigation of the Effectiveness of Surcharge and Vacuum Preloading Along with PVDs, in: 13th National Congress on Civil Engineering Isfahan University of Technology, Isfahan, IranAt: Isfahan, Iran, Esfahan, Iran, 2022, pp. 22.

[14] M.M. Pardsouie, M.H.J.G.G. Pardsouie, The effect of PVDs length on the lateral displacement of embankments, 18(1) (2022) 655-658.