

تخمین پارامترهای طراحی ژئوتکنیکی خاک بهسازی شده به روش پیش‌بارگذاری با استفاده از نتایج ابزارگذاری و روش عددی - مطالعه موردی*

خسرو مهرشاهی^(۱) حمید علی‌الهی^(۲)

چکیده در این مقاله با استفاده از آنالیز برگشتی حاصل از نتایج ابزاردقیق و به کمک روش عددی، به برآورد پارامترهای تأثیرگذار در روند طراحی عملیات پیش‌بارگذاری با خاکریز به همراه زهکش‌های قائم (PVDs) پرداخته شده است. به عنوان مطالعه موردی، پروژه انبار نفت ماهشهر واقع در بندر ماهشهر در نظر گرفته شده است. برای کنترل نتایج محاسبات و عملکرد مناسب خاکریزها از ابزارهایی دقیق نظیر نشست‌سنج‌ها و پیزومترها که در تمامی نقاط خاکریز نصب شده‌اند، بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای آزمایشگاهی در نظر گرفته شده برای محاسبات اولیه نشست تحکیمی خاک کمتر از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده است. در نهایت مقادیر نشست تخمینی مخزن نفت مربوط در قبل و پس از بهسازی خاک مورد مقایسه قرار گرفته است که نتیجه حاصل حاکی از عملکرد مناسب عملیات پیش‌بارگذاری خاک در پروژه حاضر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی پیش‌بارگذاری، زهکش‌های شعاعی، نشست تحکیمی، زمان تحکیم، روش عددی.

Estimating the Geotechnical Design Parameters of Improved Soil by Preloading Method Using Instrumentation Results and Numerical Approach- a Case Study

Kh. Mehrshahi H. Alielahi

Abstract In his paper, back-analysis using results from instrumentation by finite element software for design of preloading method by embankment with prefabricated vertical drains (PVDs) was used, and the results were compared with each other. Hence, the basic geotechnical parameters obtained by laboratory and field experiments have been modified using this method. In this regard, the Mahshahr oil storage project has been used as a case study. All of the methods that are used for improving soil must ultimately result in increased soil resistance parameters, reduced compressibility, and reduced soil permeability. The soil improvement technique using preloading was used in Mahshahr where there are soft soil layers beneath higher than sub-surface water. control performance of the embankments, some instruments such as Settlement Plates and Piezometers have been used. The results obtained from the analysis shows that settlement parameters obtained from the instruments data by back-analysis were less than primary consolidation settlement parameters based on laboratory tests. Finally, soil settlement estimation of the oil tank was compared before and after preloading, and it was found that using this method for soil improvement can be very efficient in the current project.

Key Words Preloading Method, Radial Drains, Consolidation Settlement, Numerical Approach.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۹/۲۱ تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۹ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران. Email: h.alielahi@iauz.ac.ir

مقدمه

در پروژه‌های مهندسی پیش از احداث سازه‌ها بر روی خاک‌های نرم و تحکیم‌پذیر به منظور جلوگیری از نشست‌های بزرگ و غیریکنواخت سازه مورد نظر، اصلاح و بهبود این خاک‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. تمامی روش‌های اصلاح خاک در آنها باید منجر به افزایش پارامترهای مقاومتی، کاهش تراکم‌پذیری و کاهش تراوایی خاک شوند. در این راستا، امروزه پیش‌بارگذاری به عنوان یکی از روش‌های سستی و متداول به منظور بهسازی خاک‌های نرم نشست‌پذیر با توجه به سهولت در اجرا و نیز اقتصادی بودن آن، مورد استفاده فراوانی دارد [1]. اصول اساسی این روش مبتنی بر کاهش تخلخل خاک‌ها در اثر تحکیم و محو اضافه فشار آب در خاک‌های ریزدانه در اثر اعمال بار در سطح زمین در یک بازه زمانی مشخص و سپس باربرداری آن و ساخت سازه دائمی است. از جمله مزایای این روش سادگی در اجرا، کنترل و اندازه‌گیری میزان نشست زمین و در بعضی موارد میزان فشارهای آب منفذی با استفاده از ابزارگذاری و بررسی رفتار و عملکرد این روش در حین اجرا می‌باشد. همچنین این روش با استفاده از زهکش شعاعی به منظور افزایش سرعت نشست تحکیمی به دو شکل استفاده از خاکریز و یا مکش و همچنین ترکیب آنها با یکدیگر قابل انجام است [2].

به طور کلی خاک‌های رسی نرم به علت تراوایی کم به زمان زیادی برای نشست تحکیمی نیاز دارند. برای افزایش سرعت تحکیم در این خاک‌ها زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (Prefabricated Vertical Drains) در خاک نصب می‌شوند. زهکش‌های شعاعی با کوتاه کردن مسیر زهکشی موجب افزایش سرعت فرآیند تحکیم می‌شوند که این عمل به نوبه خود سبب افزایش مقاومت خاک رس به صورت سریع می‌گردد و توانایی

پذیرش بار جدید خاک را افزایش می‌دهند [2 و 1]. امروزه مطالعات متعددی بر روی این روش به منظور بهسازی خاک نرم انجام پذیرفته است که از نمونه‌های موفق پیش‌بارگذاری با استفاده از زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته در پروژه‌های بهسازی خاک می‌توان به مطالعات بوشان و همکاران [3] اشاره کرد. پروژه مورد نظر انبار ذخیره مایعات در کشور اندونزی به مساحت ۲۵۳۰۰ مترمربع بر روی لایه‌ای به ضخامت ۳ الی ۸ متر رس نرم تراکم‌پذیر واقع شده است که با خاکریزی معادل ۱۰ الی ۱۳ متر ارتفاع و با به‌کارگیری زهکش‌های نواری نشست معادل ۶۰ الی ۱۷۰ سانتی‌متر به وقوع پیوسته است. ایندراواتنا و ردانا [4] بیان نمودند که عملیات پیش‌بارگذاری با نصب زهکش‌های نواری، اثر ناحیه به هم‌خورده (Smear Zone) اطراف زهکش‌های شعاعی در مدت زمان کم (چند ده روز) قابل توجه است ولی در مدت زمان زیاد (۴۰۰ روز) اثری نداشته است. همچنین ایندراواتنا و همکاران [5] مطالعات تحلیلی و عددی بر روی تحکیم خاک رس نرم انجام دادند و متوجه شدند که کاهش درجه اشباع خاک اطراف مندرل (Mandrel) یا هادی زهکش شعاعی در موقع نصب می‌تواند در مرحله اولیه تحکیم موجب کاهش سرعت محو اضافه فشار آب حفره‌ای شود.

ساتاناتان و ایندراواتنا [6]، ویژگی منطقه دست‌خورده اطراف زهکش ایجاد شده توسط مندرل زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که وسعت ناحیه دست‌خورده اطراف زهکش در خاک‌های رسی مرویا (Moruya) حدوداً ۲/۵ برابر شعاع معادل زهکش می‌باشد. به هر حال وسعت ناحیه دست‌خورده به علت شکل زهکش، سرعت نصب زهکش و همچنین سختی خاک می‌تواند قابل تغییر باشد.

زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته درمقایسه با حالت بدون زهکش دو برابر افزایش یافته است. همچنین ایشان متوجه شدند که میزان نشست در اعماق سطحی خاک بسیار بیشتر از میزان نشست در اعماق زیاد خاک می‌باشد.

برگادو و همکاران [11] زهکش‌های پیش‌ساخته معمولی را با زهکش‌های پیش‌ساخته مکش‌شونده مورد مقایسه قرار دادند و دریافتند که زهکش‌های پیش‌ساخته مکش‌شونده در حدود ۱/۷ الی ۱/۸ برابر زهکش‌های معمولی سرعت نشست را افزایش می‌دهد. همچنین با استفاده از این زهکش‌ها می‌توان دست‌خوردگی کمتری در خاک اطراف زهکش ایجاد نمود. از جمله آخرین مطالعات انجام‌شده در سال ۲۰۱۵، جیا لام [12] به بررسی عملکرد پروژه بهسازی خاک در رس بانکوک (Bangkok) با استفاده از ترکیب دو روش پیش‌بارگذاری با خاکریز و مکش به همراه زهکش‌های پیش‌ساخته (PVD) پرداختند. در این تحقیق با استفاده از دو روش تحلیلی و عددی پارامترهای دخیل در مسئله درمقایسه با نتایج اندازه‌گیری شده ابزار دقیق را برآورد نمودند.

با مرور ادبیات فنی مشاهده می‌شود که تمرکز اکثر مطالعات انجام‌شده بر عملکرد و کارایی زهکش‌ها در پروژه‌های پیش‌بارگذاری با خاکریز می‌باشد. از این رو استخراج پارامترهای اصلاح‌شده با مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از آنالیز معکوس به کمک ابزار دقیق به ندرت مورد تحقیق قرار گرفته است. همچنین در زمینه پیش‌بینی مقادیر نشست مخازن نفت پس از اتمام عملیات پیش‌بارگذاری مبتنی بر پارامترهای اصلاح‌شده که می‌تواند در ادامه روند طراحی و اجرایی پروژه کمک شایانی داشته باشد، مطالعات محدودی انجام شده است؛ لذا در این مقاله به بررسی عملکرد بهسازی خاک با استفاده از روش پیش‌بارگذاری با خاکریز به همراه زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) در پروژه انبار نفت ماهشهر به عنوان مطالعه موردی پرداخته شده است.

سائو و پاکیبون و ایندرا راتنا [7] تأثیر پیش‌بارگذاری به روش ایجاد مکش در تسریع عمل تحکیم رس نرم بانکوک با استفاده از PVD درمقایسه با نتایج متناظر این آزمایش بدون پیش‌بارگذاری مکش را ارائه نمودند. از پروژه‌های موفق دیگر می‌توان به تحقیقات روجیکیاتکامجرن و همکاران [8] اشاره نمود. ایشان با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (ABAQUS) و با استفاده از مدل رفتاری کم-کلی اصلاح‌شده (Modified Cam-Clay) به مدل‌سازی انبار ذخیره مایعات در بندر تیانجین (Tianjin) در کشور چین پرداختند. ویژگی ژئوتکنیکی خاک این منطقه تا عمق ۱۵ متری از خاک بسیار نرم تحکیم‌پذیر تشکیل یافته و برای بهسازی خاک با روش پیش‌بارگذاری به سرباری معادل ۱۴۰ کیلو پاسکال نیاز بوده است. ایشان با ترکیب پیش‌بارگذاری از نوع خاکریز و مکش، مشکل ارتفاع زیاد خاکریز را حل نمودند و با مقایسه نتایج ابزار دقیق و پیش‌بینی‌های انجام‌شده به این نتیجه رسیدند که استفاده از ترکیب خاکریز و مکش به‌طور هم‌زمان می‌تواند تأثیر بسزایی در کوتاه نمودن زمان پیش‌بارگذاری و همچنین کاهش ارتفاع خاکریز و جابه‌جایی جانبی خاک داشته باشد.

دار و همکاران [9]، روند پیش‌بارگذاری بندر چیتاگونگ (Chittagong Sea Port) در کشور بنگلادش را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که نسبت ضریب تحکیم شعاعی به قائم (C_H/C_V) عددی معادل ۱/۵۳ و همچنین نسبت ضریب افقی به قائم تراوایی خاک (K_H/K_V) ، ۲/۰۷ خواهد بود. تدجاکوسوما [10] با استفاده از سیستم پیش‌بارگذاری و زهکش‌های شعاعی به بررسی خاک‌های نرم و رسی منطقه سورابایا (Surabaya) در کشور اندونزی پرداختند. ایشان در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که استفاده از پیش‌بارگذاری در بهسازی خاک این منطقه بسیار مؤثر بوده است و در مدت زمانی حدود ۲۸۰ روز میزان نشست با استفاده از

قرار گرفته است.



شکل ۱ نقشه جانمایی مخازن پروژه انبار نفت ماهشهر



شکل ۲ نمایی از خاکریز EM-2B

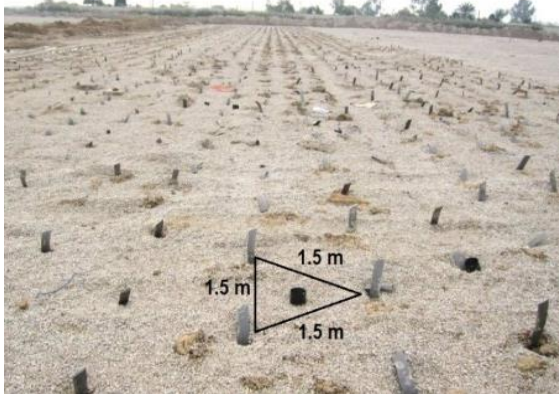
به منظور بهسازی خاک مخزن مذکور از خاکریز EM-2B به مساحتی معادل ۹۵۵۰ مترمربع مطابق شکل (۲) استفاده شده است. فاصله زهکش‌های شعاعی ۱/۵ متر و طول هر زهکش ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. زهکش‌های شعاعی (PVD) از نوع نواری (Colbondrain CX1000) [2] به ابعاد ۱۰ در ۰/۳۶ سانتی‌متر بوده است که این زهکش‌ها مطابق شکل (۳) به صورت آرایش مثلی در محل نصب شده‌اند.

از این رو، با استفاده از آنالیز برگشتی نتایج حاصل از ابزار دقیق و به کمک نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis 3D پارامترهای ژئوتکنیکی واقعی برآورد شده است و پارامترهای اولیه پیش‌بینی شده تأثیرگذار حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی با استفاده از این روش تصحیح گردیده و برای ادامه روند طراحی و عملیات اجرایی پیشنهاد شده است. در انتها نیز کارایی روش پیش‌بارگذاری با مقایسه نشست‌های پیش‌بینی شده خاک نرم و نشست‌های ناچیز قابل اغماض بعد از عملیات پیش‌بارگذاری در اثر احداث مخازن نفت، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

پروژه انبار نفت ماهشهر

معرفی پروژه

پروژه بندر ماهشهر در استان خوزستان و شهرستان ماهشهر با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۳ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است. ارتفاع ماهشهر از سطح دریا ۲/۶ متر و ارتفاع محل پروژه از سطح دریا ۱/۲ متر الی ۲/۲ متر می‌باشد. این پروژه شامل مخازن ذخیره سوخت و همچنین تأسیسات و ساختمان‌های مسکونی مجاور آنها می‌باشد که نقشه جانمایی پروژه در شکل (۱) ارائه شده است. مخزن ذخیره سوخت مورد مطالعه در این تحقیق شامل مخازن Tank 403 (خاکریز EM-2B) با توجه به دردسترس بودن نتایج ابزار دقیق می‌باشد. با توجه به نوع لایه‌های خاک و شرایط زیرسطحی در محل پروژه و قرارگیری لایه‌های تحکیم‌پذیر در زیر مخازن یادشده، حجم بهسازی مورد نیاز برای اصلاح خواص خاک به منظور جلوگیری از نشست و گسیختگی خاک در اثر بارهای ناشی از مخازن، بسیار زیاد است. همچنین با توجه به وسعت بالای منطقه مورد نظر، استفاده از شالوده عمیق (شمع) و همچنین استفاده از روش‌های دیگر بهسازی خاک با توجه به نوع خاک، غیراقتصادی و زمان‌بر بوده است. لذا در این پروژه، گزینه بهسازی خاک به روش پیش‌بارگذاری با خاکریز به همراه نصب زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) در دستور کار

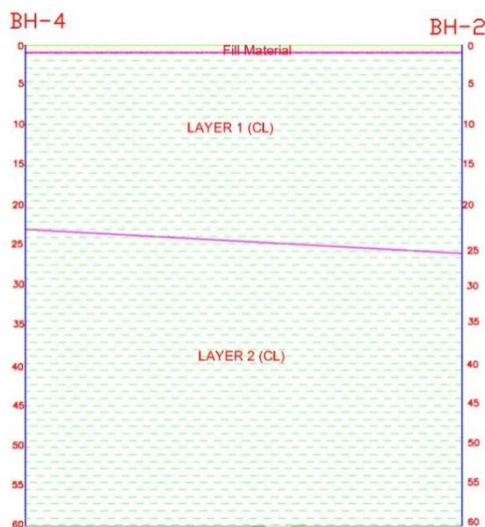


(ب)

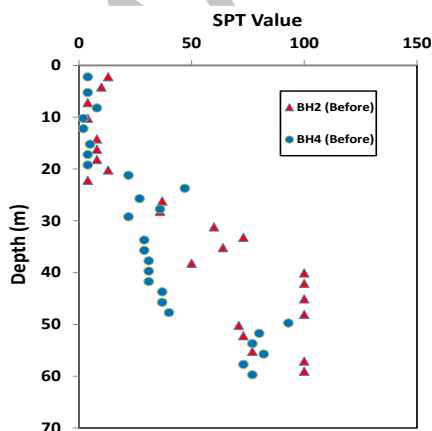


(الف)

شکل ۳ الف) نمایی از اجرای زهکش‌های نواری در زیر خاکریزها، ب) آرایش زهکش‌ها در پلان



شکل ۴ پروفیل ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B



شکل ۵ اعداد SPT در محل خاکریز EM-2B

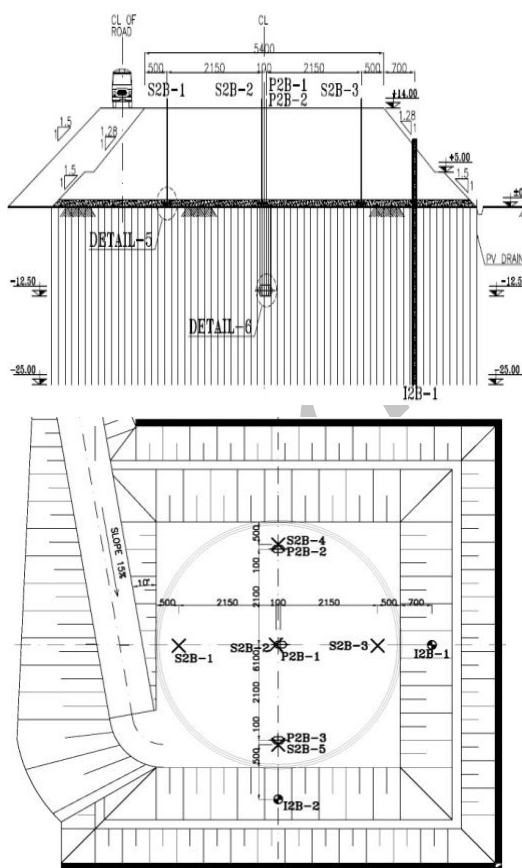
ویژگی‌های ژئوتکنیکی پروژه انبار نفت ماهشهر

باتوجه به مطالعات ژئوتکنیکی انجام‌شده در محل خاکریز (EM-2B)، وضعیت لایه‌های خاک عمدتاً از جنس رس با خاصیت خمیری کم (CL) می‌باشد. برای این منظور از دو گمانه BH-2 و BH-4 به اعماق ۶۰ متری به همراه آزمایش‌های صحرائی نظیر SPT و CPTu استفاده شده است. پروفیل ژئوتکنیکی آن در شکل (۴) و اعداد SPT در شکل (۵) نشان داده شده است و همچنین مشخصات ژئوتکنیکی و لایه‌بندی خاک محل پروژه در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است که این پارامترها برای طراحی اولیه قبل از اجرای خاکریز و بر مبنای نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرائی و آزمایشگاهی در گمانه‌ها پیشنهاد و استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی پروفیل خاک متشکل از دو لایه اصلی به همراه زیرلایه‌های مربوط با ویژگی‌های متفاوت است که از عمق ۰ تا ۲۲ متر شامل رس نرم لای دار با خاصیت خمیری کم (CL-1) و از عمق ۲۲ متری تا عمق ۶۰ متری خاک از نوع رس نرم با خاصیت خمیری کم (CL-2) با ویژگی‌های متفاوت تشکیل شده است. باتوجه به بارگذاری ناشی از ساخت مخازن، مشخصات خاک حاکی از نشست‌پذیری پروفیل لایه خاک داشته است.

جدول ۱ پارامترهای ژئوتکنیکی مربوط خاکریز EM-2B

عمق لایه خاک (m)	نوع خاک	v (sat)	C_c	C_s	P_c (kPa)	γ_d (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	K_h (m/day)	K_v (m/day)	K_h/K_v	e_0
0 – 10	(CL-1)	0.45	0.17	0.03	70	15.7	20.16	20.59	0.0086	0.0043	2	0.85
10 – 22	(CL-1-1)	0.45	0.17	0.03	180	15.7	20.16	20.59	0.0086	0.0043	2	0.85
22 – 38	(CL-2)	0.45	0.16	0.03	350	16.87	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6
38 – 48	(CL-2-1)	0.45	0.16	0.03	450	16.87	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6
48 – 60	(CL-2-2)	0.45	0.16	0.03	580	16.87	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6

شکل (۱۰) قابل مشاهده است فشار آب حفره‌ای حاصل از پیژومترها در مرکز خاکریز EM-2B در پایان زمان خاکریزی به بیشترین مقدار خود رسیده است و با گذشت زمان انتظار، میزان فشار آب حفره‌ای به تدریج کاسته شده و فشار آب حفره‌ای به صفر رسیده است که این موضوع نشانگر پایان زمان تحکیم می‌باشد.



شکل ۶ موقعیت ابزارگذاری خاکریز EM-2B

ابزارگذاری و انواع آنها

به منظور بررسی و کنترل عملکرد عملیات بهسازی خاک به روش پیش‌بارگذاری در خاکریز مورد مطالعه از ابزارگذاری‌های مختلفی استفاده شده است. این ابزارها منجر به کسب اطلاعات مفید و در نتیجه تسریع در عملیات ساختمانی با حداقل مخاطره می‌گردند. ابزارهای مورد استفاده در این پروژه شامل صفحات نشست‌سنج (Settlement plates) می‌شوند برای اندازه‌گیری نشست‌های سطح زمین طبیعی به کار می‌روند و پیژومترها، (Piezometers) برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی می‌باشند و همچنین انحراف‌سنج‌ها (Inclinometers) که به منظور اندازه‌گیری حرکات جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر موارد فوق، از چاه‌های مشاهده‌ای نیز به منظور اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی طبیعی و فشار آب هیدرواستاتیک در منطقه استفاده شده است. در خاکریز EM-2B به شکل مربعی به ابعاد ۹۷/۷۴ در ۹۷/۷۴ متر و به ارتفاع ۱۴/۶۶، برای اندازه‌گیری نشست از پنج نشست‌سنج و برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی از سه پیژومتر مطابق شکل (۶) و (۷) استفاده شده است. در این شکل‌ها "S" نشان‌دهنده صفحات نشست‌سنج و "P" پیژومترها می‌باشند.

در شکل (۸) نمودار خاکریزی مرحله‌ای خاکریز EM-2B نشان داده شده است. همچنین شکل (۹) نشان‌دهنده میزان نشست حاصل از تمامی ابزار دقیق‌ها در محل خاکریز EM-2B می‌باشد که پس از گذشت زمان انتظار، میزان نشست خاک واقع در زیر خاکریزها تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است. همان‌طور که در

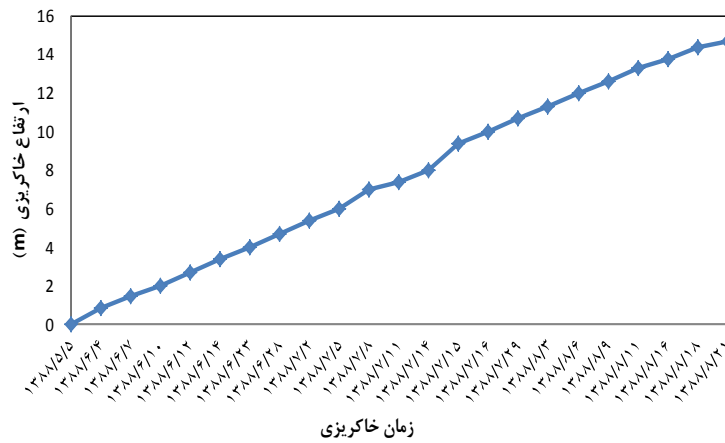


(ب)



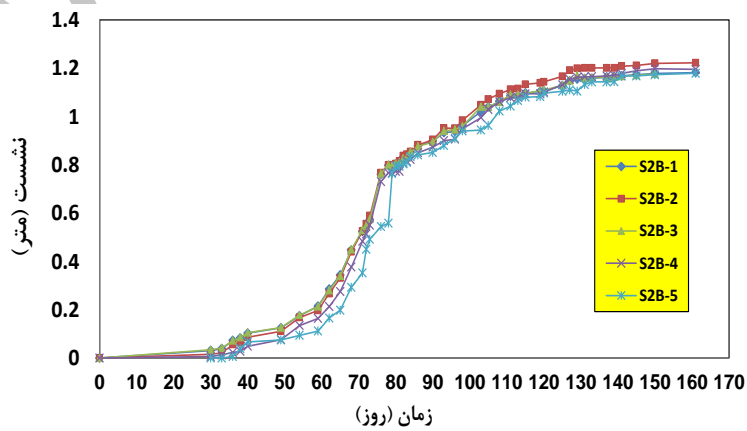
(الف)

شکل ۷ (الف) بالای میله نشان‌دار متصل به صفحه نشست‌سنج، (ب) لوله پیزومتر در بالای خاکریز

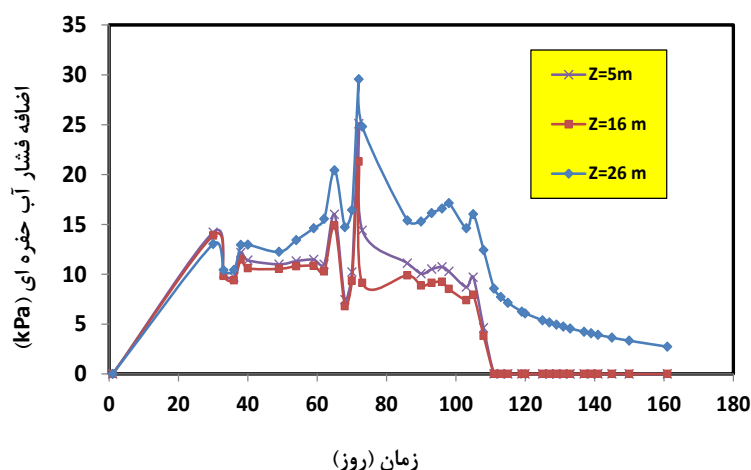


زمان خاکریزی

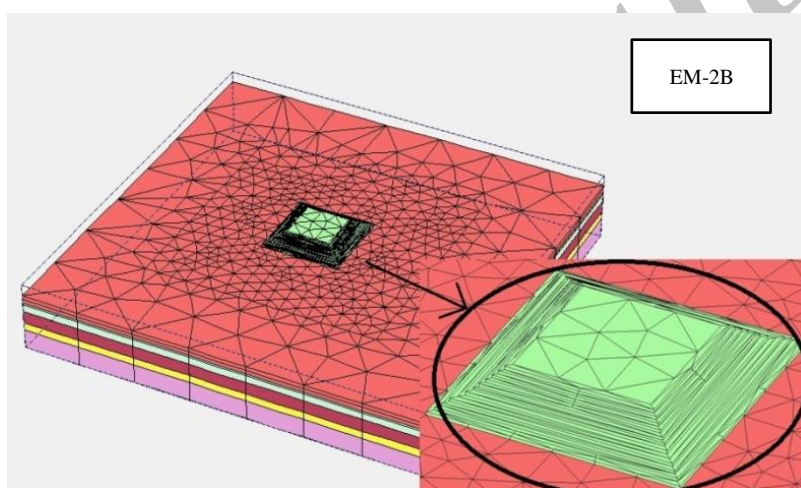
شکل ۸ نمودار تاریخچه خاکریزی خاکریز EM-2B



شکل ۹ مقادیر نشست اندازه‌گیری شده توسط صفحات نشست‌سنج در محل خاکریز EM-2B



شکل ۱۰ مقادیر فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده توسط پیزومترها در محل خاکریز EM-2B



شکل ۱۱ تصویر مدل‌سازی سه‌بعدی خاکریز EM-2B با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D

لحاظ شده است. همچنین سطح آب زیرزمینی ۱/۵ متر پایین‌تر از سطح زمین طبیعی برطبق داده‌های ثبت شده در گمانه‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱) تصویر مدل عددی خاکریز EM-2B در نرم‌افزار Plaxis 3D نشان داده شده است.

به منظور مش‌بندی مدل عددی از المان‌های ۱۵ گره‌ای مثلثی استفاده شده است. همچنین مدل رفتاری خاک از نوع مدل نرم-خزش (Soft Soil Creep) انتخاب شده است [12]. با توجه به عدم در نظرگیری مدل‌سازی مستقیم

شبیه‌سازی عددی

به منظور مدل‌سازی عددی نشست تحکیمی خاک در اثر ساخت خاکریز مورد نظر از نرم‌افزار Plaxis 3D مبتنی بر روش اجزای محدود استفاده شده است. این نرم‌افزار برای محاسبات تحکیم از روابط بایوت [14] استفاده می‌نماید.

فواصل مرزهای جانبی در مدل عددی برای خاکریز EM-2B سه برابر عرض خاکریز در نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. همچنین برای ارتفاع ناحیه ژئوتکنیکی قرار گرفته در زیر خاکریز متأثر از ایجاد خاکریز، ارتفاعی معادل ۶۰ متر بر مبنای عمق گمانه‌ها،

در این روابط k_{ve} نفوذپذیری معادل، k_v نفوذپذیری عمودی خاک، D_e قطر دایره معادل مربوط به تأثیر زهکش، k_h نفوذپذیری افقی خاک، L طول مؤثر زهکش، n نسبت قطر دایره معادل به قطر چاه زهکش، d_w قطر چاه زهکش، q_w ظرفیت تخلیه زهکش، k_s نفوذپذیری افقی خاک دست‌خورده، F_s فاکتور دست‌خوردگی خاک است و S فاصله زهکش‌ها می‌باشد. همچنین $(k_h)_f$ نفوذپذیری افقی خاک محل، $(k_h)_1$ نفوذپذیری افقی خاک آزمایشگاهی و C_f نسبت نفوذپذیری خاک محل به آزمایشگاه می‌باشد. لازم به ذکر است که ابعاد زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) دارای ۱۰ سانتی‌متر طول و ۰/۳۶ سانتی‌متر عرض با دبی خروجی ۱۴۰ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشند که مشخصات کامل آنها در جدول (۳) ارائه شده است. در اشکال (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مقادیر نشست و اضافه‌فشار آب حفره‌ای ناشی از ساخت مرحله‌ای خاکریز به صورت دوبعدی نشان داده شده است.

زهکش‌ها در این نرم‌افزار، از روش پیشنهاد چای و همکاران [15] استفاده شده است. در این روش پیشنهادی از نفوذپذیری معادل خاک به همراه زهکش‌های شعاعی استفاده می‌شود. از این‌رو نفوذپذیری معادل به‌عنوان نفوذپذیری محدوده‌ای از خاک که دارای زهکش می‌باشد به‌عنوان نفوذپذیری معادل به نرم‌افزار معرفی شده است. نفوذپذیری معادل شده به این روش و همچنین نسبت نفوذپذیری محل (حاصل از آنالیز برگشتی) به نفوذپذیری آزمایشگاه از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد. همچنین پارامترهای این روابط در جدول (۲) آورده شده است.

$$k_{ve} = (1 + \frac{2.5L^2}{\mu D_e^2} \times \frac{k_h}{k_v}) k_v \quad (1)$$

$$\mu = \ln\left(\frac{n}{S}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln(S) - \frac{3}{4} + \frac{\pi 2L^2 k_h}{3q_w} \quad (2)$$

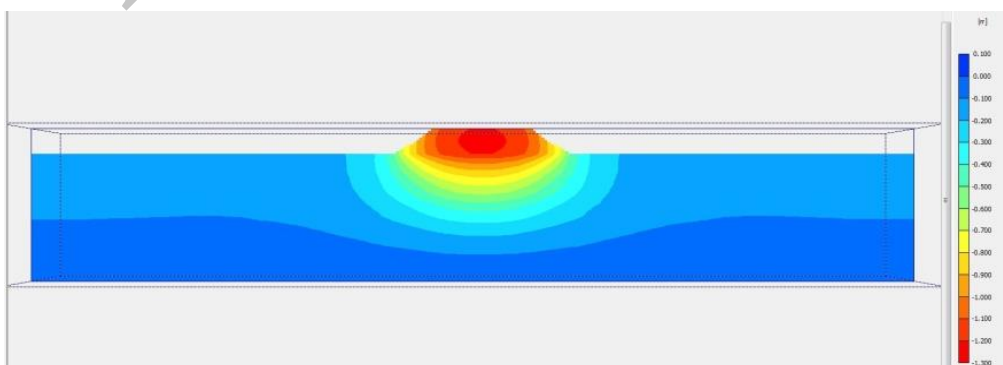
$$(k_h)_f = C_f (k_h)_1 \text{ or } (k_v)_f = C_f (k_v)_1 \quad (3)$$

جدول ۲ پارامترهای مورد نیاز برای تبدیل شرایط زهکشی با استفاده از روش چای و همکاران [13]

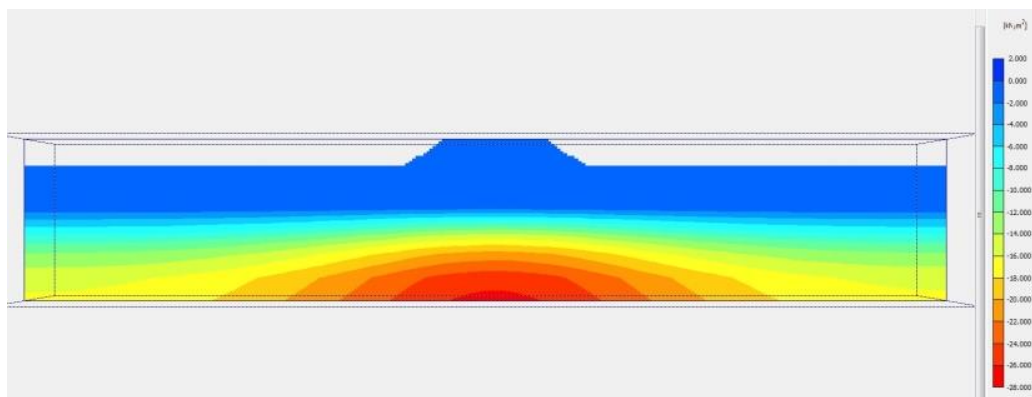
d_w (cm)	d_s (cm)	k_h/k_s	n	S	L (m)	q_w (m ³ /year)	μ	k_h/k_v	k_h (m/day)	K_v (m/day)	K_{ve} (m/day)
5.18	28.49	3	30.38	5.5	25	12.096	6.14	2	0.0086	0.0043	0.6880

جدول ۳ مشخصات زهکش‌های نواری Colbondrain Cx1000 [2]

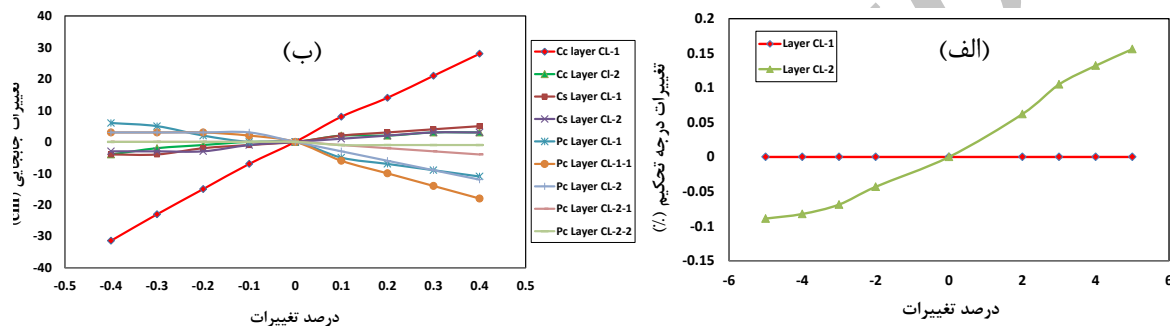
طول مقطع، a (mm)	عرض مقطع، b (mm)	ظرفیت تخلیه Discharge capacity q_w (ml/s)	نفوذپذیری فیلتر k_f (mm/s)	Opening size O_{90} (μ m)	ازدیاد طول در نیروی کششی ۱٪ کیلونیوتن (%)
100	3.6	140	70	75	3%



شکل ۱۲ کانتور نشست در مرکز خاکریز EM-2B در نرم‌افزار Plaxis 3D



شکل ۱۳ کانتور اضافه فشار آب در مرکز خاکریز EM-2B در نرم افزار Plaxis 3D



شکل ۱۴ نمودار تحلیل حساسیت پارامتر نفوذپذیری در جهت افقی (K_H) در لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی، (ب) نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای تحکیمی در لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی (محل خاکریز EM-2B)

برای محاسبه مؤثرترین پارامتر در زمان نشست تحکیم (K_H - ضریب افقی تراوایی) مدلی با اطلاعات اولیه ایجاد شده و میزان درجه تحکیم به دست آمده ثبت شده است. سپس هر پارامتر به طور جداگانه آن قدر تغییر داده می شود تا با توجه به نتایج ابزار دقیق کمترین مقدار خطا حاصل شود. پس از آن، با جای گذاری هر پارامتر به دست آمده در مدل عددی، مجدداً شبیه سازی عددی با پارامتر مورد نظر آماده تحلیل های بعدی شده است. به همین ترتیب تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر در مقدار نشست تحکیمی (C_c, C_s, P_c) - به ترتیب فشار پیش تحکیمی، شیب منحنی تحکیم در بارگذاری (نشانه فشردگی) و بار برداری انجام شده است.

نتایج تحلیل حساسیت انجام شده با کمک مدل سازی عددی و نتایج ابزار دقیق در محل خاکریز EM-2B در شکل (۱۴) ارائه شده است. نتیجه به دست

تعیین پارامترهای تأثیرگذار خاک

در این بخش با استفاده از نتایج ابزار دقیق، به انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای تحکیمی تأثیرگذار پروفیل خاک در عملیات پیش بارگذاری به کمک نرم افزار Plaxis 3D پرداخته شده است. روش تحلیل حساسیت انتخابی برای این منظور، استفاده از روش مستقیم مبتنی بر سعی و خطا می باشد. با توجه به تعدد پارامترهای دخیل در مسئله، ابتدا تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای لایه های مختلف ژئوتکنیکی مربوط به هر خاکریز انجام می شود تا مؤثرترین پارامترها در مقدار نشست و زمان تحکیم تعیین شوند و سپس با توجه به آنالیزهای برگشتی پارامترهای حاصل از آن محاسبه خواهند شد.

فرایند انجام مطالعات حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی بدین صورت بوده است که در گام اول

$$\text{Error} = \frac{\sum_{K=1}^N (U_k - U'_k)^2}{\sum_{K=1}^N U'_k} \quad (4)$$

در این رابطه U_k مقدار جابه‌جایی محاسبه‌شده از طریق تحلیل عددی در نقاط متناظر و U'_k جابه‌جایی اندازه‌گیری‌شده در نقطه ابزار دقیق و N تعداد نقاط اندازه‌گیری می‌باشد.

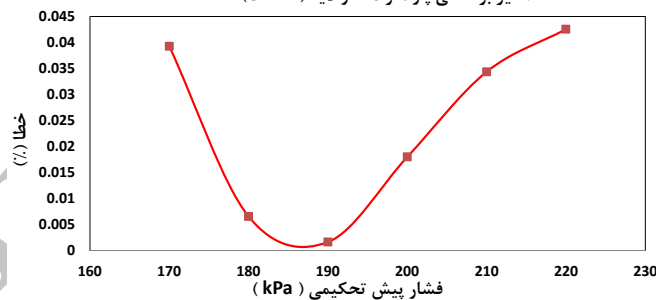
در این تحقیق از متوسط داده‌های ابزارهای نصب‌شده در خاکریز EM-2B که به‌صورت روزانه و هفتگی برداشت شده‌اند، استفاده شده است. مطابق شکل‌های (۱۵) و (۱۶) آنالیز برگشتی با روش کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامترهای مؤثر تحکیمی انجام گردیده است. همان‌طور که مشخص است برای خاکریز EM-2B، تابع خطا برای پارامترهای نشانه فشردگی (C_c) و فشار پیش تحکیمی (P_c) به‌ترتیب در لایه‌های CL-1 و CL-1-1 به‌ترتیب در مقادیر ۰/۱۲ و ۱۹۰ کیلوپاسکال کمینه شده است. همچنین مقدار ضریب افقی نفوذپذیری در لایه (CL-2) برابر ۰/۰۲۱ متر در روز به‌دست آمده است.

آمده نشان می‌دهد که پارامتر نفوذپذیری در جهت افقی (K_H) در لایه دوم (CL-2) که دارای بیشترین شیب تغییرات درجه تحکیم می‌باشد به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در زمان پدیده تحکیم (شکل ۱۴-الف) می‌باشد و مطابق شکل (۱۴-ب) پارامتر C_c (نشانه فشردگی) در لایه رسی اول (CL-1) با توجه به افزایش شیب تغییرات درجه تحکیم، حساس‌ترین پارامتر در مقدار نشست تحکیمی می‌باشند.

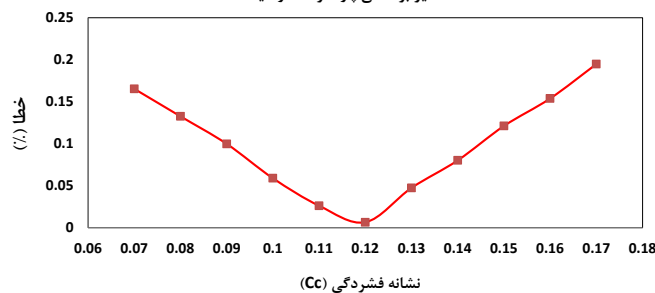
آنالیز برگشتی

پس از انجام تحلیل حساسیت در بخش قبل و مشخص نمودن مؤثرترین پارامترها در مقدار و زمان نشست تحکیمی خاکریزهای یادشده، در این بخش به آنالیز برگشتی (معکوس) از طریق کمینه‌سازی تابع خطا به‌منظور دستیابی به پارامتر بهینه و صحیح پرداخته شده است. در این راستا تابع خطای زیر به‌منظور کمینه‌سازی اختلاف اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط ابزار دقیق و مقادیر محاسبه‌شده از طریق مدل‌سازی عددی معرفی شده است.

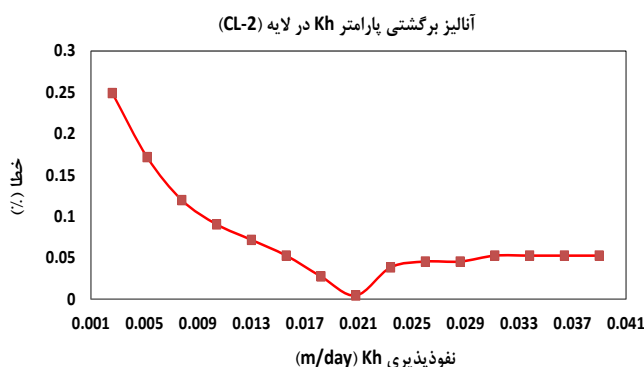
آنالیز برگشتی پارامتر P_c در لایه (CL-1-1)



آنالیز برگشتی پارامتر C_c در لایه (CL-1)



شکل ۱۵ نمودار کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامترهای فشار پیش تحکیمی P_c و نشانه فشردگی (C_c) در لایه CL-1-1 ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B



شکل ۱۶ نمودار کمیته سازی تابع خطا برای پارامتر نفوذپذیری افقی (K_h) در لایه CL-2 در محل خاکریز EM-2B

جدول ۴ نتایج حاصل از آنالیز برگشتی پارامترهای تحکیمی در ناحیه سه ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B

K_h (CL-2) (m/day)	K_v (CL-2) (m/day)	C_f (CL-2)	C_c (CL-1)	P_c (CL-1-1) (kPa)	پارامترهای نشست تحکیمی
0.0026	0.0013	0.17	180	مقادیر پارامترهای اولیه پیشنهادی
0.021	0.0104	8	0.12	190	نتایج آنالیز برگشتی با استفاده از Plaxis 3D

برابر ۱۳۲ سانتی متر تخمین زده شده بود. لذا می توان دریافت که مقادیر نشست محاسباتی اولیه بر مبنای پارامترهای فرض شده بیشتر از نشست های اندازه گیری شده بوده است. می توان از دلایل کمتر شدن نشست های اندازه گیری شده نسبت به نشست های محاسباتی، به تعیین محافظه کارانه پارامترهای اولیه ژئوتکنیکی محاسبات نشست تحکیمی اشاره نمود.

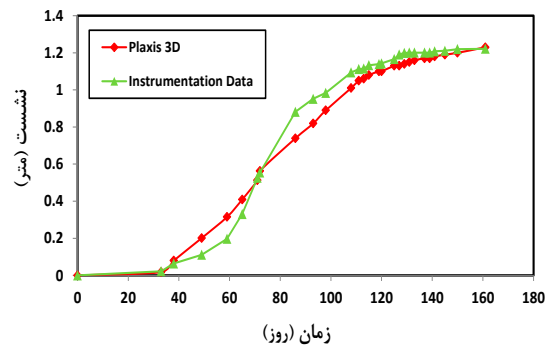
همچنین به منظور صحت گذاری بر نتایج مدل عددی، مدل سازی خاکریز مورد نظر در نرم افزار Plaxis 3D (بر مبنای پارامترهای اصلاح شده خاک) با متوسط نتایج ابزار دقیق نشست سنج ها و پیزومترها مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل های (۱۷) و (۱۸) مقایسه مقادیر نشست و فشار آب حفره ای در طول مدت زمانی ۶۱ روز برای خاکریز EM-2B از شروع بارگذاری را نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود نتایج مدل سازی عددی هم خوانی قابل قبولی با نتایج ابزار دقیق دارد.

پس از انجام مطالعات عددی و آنالیزهای حساسیت پارامترهای خاک در لایه های مختلف ژئوتکنیکی، مطابق نتایج به دست آمده از آنالیز معکوس در جدول (۴)، مقدار C_f (نسبت نفوذپذیری افقی محل به آزمایشگاه) در لایه CL-2 هشت برابر حاصل شده است. به عبارت دیگر ضریب نفوذپذیری صحیح حاصل از آنالیز برگشتی ابزار دقیق در حدود هشت برابر بیشتر از ضریب نفوذپذیری به دست آمده از مقادیر پارامترهای طراحی اولیه و بر مبنای نتایج آزمایشگاهی قبل از عملیات پیش بارگذاری می باشد. در واقع این موضوع نشان می دهد که مقدار نفوذپذیری افقی واقعی خاک بسیار بیشتر از مقدار تخمین اولیه در محاسبات بوده است.

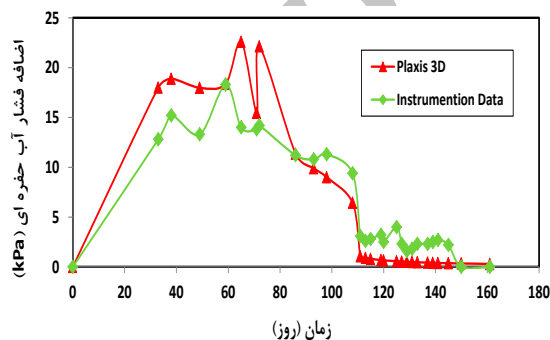
همچنین نتایج مطالعات عددی بر مبنای پارامترهای اصلاح شده حاصل از آنالیز برگشتی نشان می دهد که مقادیر نشست در مرکز خاکریز EM-2B در حدود ۱۲۲/۲ سانتی متر به دست آمده است در صورتی که مطابق طراحی ها و پیش بینی های اولیه انجام شده، این مقدار

خاکریزی طی مدت ۱۰۸ روز ادامه پیدا کرده و سپس در مدت زمان ۵۳ روز (زمان انتظار)، خاک واقع در زیر خاکریز EM-2B به ۹۵ درصد تحکیم خود رسیده است. در این مرحله نشست نهایی خاک ۱۲۲/۲ سانتی متر است و اضافه فشار آب منفذی به حداقل مقدار خود رسیده است که این موضوع نشانگر پایان زمان تحکیم خاک می باشد.

لازم به ذکر است که در مراحل مدل سازی علاوه بر خاکریزی، خاکبرداری خاکریزها به صورت باربرداری در مدل سازی عددی لحاظ شده است تا شرایط واقعی پروژه به خوبی شبیه سازی شود. مطابق شکل (۲۰)، در این مرحله خاک به مقدار کمی دچار تورم است و با برداشتن خاکریزها از مقدار نشست نهایی کاسته شده و پس از برداشتن کل خاکریز (EM-2B) میزان نشست خاک به مقدار ۱۰۲ سانتی متر رسیده است که این موضوع بیانگر تورم خاک پس از برداشتن خاکریز می باشد. پس جمع آوری خاکریز و پایان تورم نهایی خاک، مقدار تغییر مکان مدل صفر شده و در ادامه به بررسی نشست خاک در اثر قرارگیری مخزن Tank 403 پرداخته شده است. پس از ساخت مخزن یادشده در مدت زمان ۳۰ روز و قرارگیری آن بر روی خاک بهسازی شده، میزان نشست خاک پس از رسیدن به زمان تحکیم نهایی در نرم افزار Plaxis 3D به حدود ۹ سانتی متر رسیده است. همچنین باتوجه به نتایج به دست آمده از شکل (۲۰) مشاهده می شود که نشست خاک قبل از عملیات بهسازی در صورت ساخت مخزن Tank 403، پس از گذشت زمان تحکیمی، در حدود ۶۸ سانتی متر ایجاد شده است که این مقدار نشست موجب بروز مشکلات فراوان در بهره برداری و نیز ایجاد خسارت - های جبران ناپذیری در این گونه مخازن می گردد. در شکل (۲۱) تصویر مراحل ساخت مخازن نفت در زمان های مختلف نشان داده شده است. از این رو، مطابق با نتایج حاصل، نیاز به بهسازی خاک و استفاده از سیستم پیش بارگذاری می تواند تأثیر بسزایی را در کاهش میزان نشست ها و بهبود عملکرد مخازن در حین بهره برداری از آنها داشته باشد.



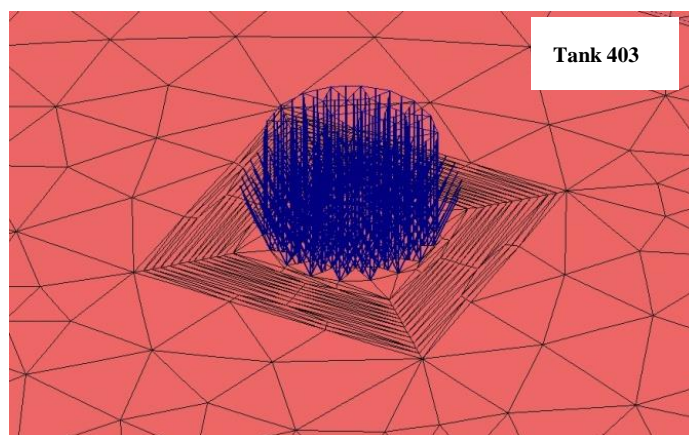
شکل ۱۷ مقایسه نمودار نشست خاکریز EM-2B در مدل سازی عددی و ابزار دقیق (نشست سنج)



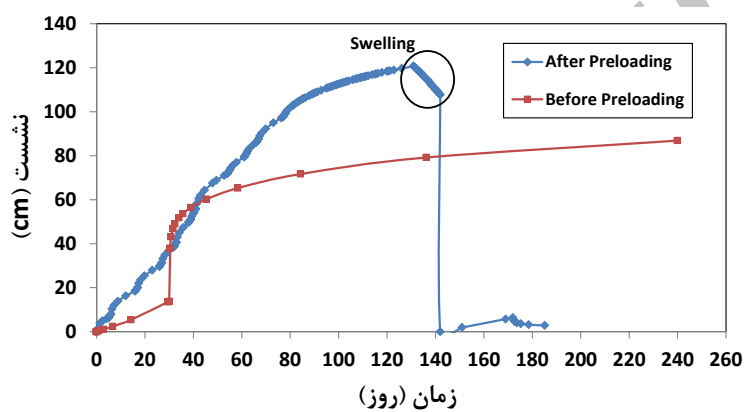
شکل ۱۸ مقایسه نمودار اضافه فشار آب حفره ای خاکریز EM-2B در مدل سازی عددی و ابزار دقیق (پیزومتر)

پیش بینی نشست مخزن نفت پس از اتمام عملیات بهسازی خاک

پس از دستیابی به پارامترهای اصلاح شده حاصل از آنالیزهای برگشتی، به مدل سازی مخزن نفت و قرارگیری آن بر روی خاک منطقه مورد نظر به منظور پیش بینی نشست های احتمالی ناشی از ساخت آن پس از اتمام عملیات پیش بارگذاری، پرداخته شده است. مخزن مورد نظر Tank 403 در محل خاکریز EM-2B دارای قطری معادل ۵۳/۶۴ متر است که وزنی در حدود ۳۲۹۶۹ تن را به خاک وارد می نماید. در شکل (۱۹) تصویر مدل سازی مخزن در نرم افزار Plaxis 3D نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مخزن مورد نظر با استفاده از تعریف یک بار فشاری معادل در نرم افزار مدل شده است. در شکل (۲۰) نتایج میزان نشست خاک پس از اعمال بار مخازن قبل و بعد از پیش بارگذاری ارائه شده است. باتوجه به این نمودار



شکل ۱۹ مدل سازی مخزن Tank 403 در برنامه Plaxis 3D



شکل ۲۰ نمودار نشست خاک قبل و بعد از پیش بارگذاری خاکریز EM-2B در نرم افزار Plaxis 3D



شکل ۲۱ مراحل ساخت مخازن نفت در زمانهای مختلف پروژه

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

استفاده از بهسازی خاک به روش پیش‌بارگذاری در خاک‌های رسی نرم یکی از اقتصادی‌ترین و کاراترین روش‌های موجود می‌باشد. لذا در این مقاله به مدل‌سازی عددی عملیات بهسازی خاک به روش پیش‌بارگذاری با خاکریز به همراه زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) در پروژه انبار نفت ماهشهر (مطالعه موردی) پرداخته شده است. به منظور مدل‌سازی روند عملیات پیش‌بارگذاری و مقایسه آنها با نتایج ابزارگذاری از نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis 3D استفاده شده است. نتایج نشست‌های مدل عددی با مقادیر نتایج ابزاردقیق کالیبره شده و با استفاده از آنالیز برگشتی داده‌های ابزاردقیق، مهم‌ترین پارامترهای صحیح نشست تحکیمی تأثیرگذار خاک به دست آمده است. همچنین میزان نشست تخمینی خاک قبل و بعد از پیش‌بارگذاری در اثر احداث مخازن نفت با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. از جمله نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. مقادیر نشست ثبت‌شده با استفاده از نتایج متوسط ابزارگذاری در خاکریز EM-2B برابر ۱۲۲/۲ سانتی‌متر به دست آمده است در صورتی که مقدار نشست محاسباتی اولیه براساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی اولیه در مرکز خاکریز-EM-2B، برابر ۱۳۲ سانتی‌متر به دست آمده است که نشان از محافظه‌کارانه بودن مقادیر پارامترهای خاک و به دنبال آن میزان نشست محاسباتی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده اولیه می‌باشد.
۲. باتوجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و آنالیز برگشتی، پارامتر C_f (نسبت نفوذپذیری خاک در محل به نفوذپذیری آزمایشگاه) برای خاکریزهای EM-2B در حدود هشت برابر بیشتر از ضریب نفوذپذیری به دست آمده از مقادیر پارامترهای اولیه

برمبنای نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی بوده است. همچنین پارامترهای دیگر نشست تحکیمی نظیر شاخص تراکم (C_c) و فشار پیش‌تحکیمی خاک (Pc) برمبنای نتایج به دست آمده از آنالیز معکوس مقادیر متفاوتی نسبت به پارامترهای اولیه طراحی داشته‌اند.

۳. شبیه‌سازی عددی مخزن نفت (Tank 403) در محل خاکریز (EM-2B) نشان می‌دهد که نشست خاک قبل از عملیات بهسازی در صورت ساخت مخزن و پس از گذشت زمان تحکیمی در حدود ۶۸ سانتی‌متر ایجاد می‌شود که بعد از عملیات پیش‌بارگذاری و قرارگیری مخزن این نشست به حدود ۹ سانتی‌متر کاهش یافته است. از این رو، مطابق با نتایج حاصل نیاز به بهسازی خاک و استفاده از سیستم پیش‌بارگذاری می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش میزان نشست‌ها و بهبود عملکرد آنها به خصوص در پروژه‌ها با مقیاس بزرگ و در خاک‌های ریزدانه در حین بهره‌برداری از مخازن نفت شود.

مطالعات تحقیق حاضر نشان می‌دهد که اطمینان به پارامترهای اولیه خاک حاصل از نتایج آزمایشگاهی (به خصوص آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی) و صحرایی می‌تواند منجر به خطا در پیش‌بینی طراحی و اجرای مابقی خاکریزها شود. لذا استفاده از ابزارگذاری و تجزیه و تحلیل نتایج آنها، تجربه‌ای مؤثر در کاهش هزینه‌ها و زمان‌بندی پروژه‌های مشابه خواهد بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود واجب می‌دانند که بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی را از مؤسسه مهندسان مشاور ساحل برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مربوط به این پژوهش داشته باشند.

مراجع

۱. استاماتوپولوس، آریس و پاناگیوتیس، کوتزیاس، «اصلاح خاک از طریق پیش بارگذاری»، سعید منتظرالقائم، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، (۱۳۷۸).
2. Federal Highway Administration (FHWA), "Prefabricated Vertical Drains, Vol. I, *Engineering Guidelines*" Report No. RD-86/168, pp. 1-128 (1986).
3. Bhushan, K., Carlos V., Saaty, R., "Soil Improvement by Precompression at a Tank Farm Site in Central Java, Indonesia", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 3, pp. 101-108, (2000).
4. Indraratna, B. and Redana, I W., "Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 96-99, (1998).
5. Indraratna B, Rujikiatkamjorn C, Sathananthan I, Shahin M and Khabbaz H., "Analytical and Numerical Solutions for Soft Clay Consolidation using Geosynthetic Vertical Drains with Special Reference to Embankments", *Proceedings of the 5th International Geotechnical Engineering Conference*, Cairo, Egypt, pp. 55-86, (2005).
6. Sathananthan, I. and Indraratna, B., "Laboratory Evaluation of Smear Zone and Correlation between Permeability and Moisture Content", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol.132, No. 7, pp. 942-945, (2006).
7. Saowapakpiboon, J., D.T. Bergado , Youwai, S., Chai, J.C., Wanthong, P., Voottipruex, P., "Measured and Predicted Performance of Prefabricated Vertical Drains (PVDs) with and without Vacuum Preloading", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-11, (2010).
8. Rujikiatkamjorn, Ch., Indraratna, B., and Chu, J., "Numerical Modelling of Soft Soil Stabilized by Vertical Drains, Combining Surcharge and Vacuum Preloading for A Storage Yard", *Can. Geotech. J.*, Vol. 44, No. 3, pp. 326-342, (2007).
9. Dhar, AS., Siddique, A., and Amen, SF., "Ground Improvement using Preloading with Prefabricated Vertical Drains", *International Journal of Geoenvironment Case Histories*, Vol. 2, No. 2, pp. 86, (2011).
10. Tedjakusuma, B., "Application of Prefabricated Vertical Drain in Soil Improvement", *Civil Engineering Dimension*, Vol. 14, No.1, pp. 51-56, (2012).
11. Bergado, D.T., Voottipruex, P., Lam, L.G., Hino, T., "Back-analyses of Flow Parameters of PVD Improved soft Bangkok Clay with and Without Vacuum Preloading from Settlement Data and Numerical Simulations", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 42, No. 5, pp. 457-467, (2014).
12. Gia Lam, L., Bergado, D.T., Hino, T., "PVD Improvement of Soft Bangkok Clay with and Without Vacuum Preloading using Analytical and Numerical Analyses", *Geotextiles and Geomembranes*,

- Vol.43, No. 6, pp. 547-557, (2015).
13. Plaxis 3D Foundation (version 1.6) user's Manual. Edited by Brinkgreve, R.B.J. Delf University of Technology and PLAXIS b.v., The Netherlands, (2005).
 14. Biot, M., "General Theory of Three-dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics*, Vol. 12, pp.155-164, (1941).
 15. Chai J.C, Shen S.L, Miura N.and Bergado D.T., "Simple Method of Modeling PVD Improved Subsoil", *Journal Journal of Geotechnical Engoneering*, ASCE, Vol.127, No.11, PP. 956-972, (2001).

Archive of SID

Archive of SID