بررسی عملکرد پروژهٔ به‌سازی خاک به‌روش پیش-بارگذاری با استفاده از نتایج آنالیز برگشتی حاصل از مدل‌سازی عددی و ابزارگذاری- مطالعهٔ موردی

خسرو مهرشاهی، حمید علی الهی*؛
گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۵/۰۵ **پذیرش** ۹۵/۱۱/۱۶

چکیده

به‌منظور به‌سازی خاک در محل مخازن نفت پرژهٔ انبار نفت ماهشهر، به‌علت وجود لایه‌های زیرسطحی نرم رسی و بالا بودن تراز آب زیرزمینی در ناحیهٔ بررسی شده، برای نداشتن خسارات ناشی از نشست‌های تحکیمی دراز مدت در اثر ساخت مخازن، از روش پیش بارگذاری به‌کمک خاک‌ریز به‌همراه زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (PVD) با الگوی مثلثی استفاده شده است. برای کنترل نتایج محاسباتی و عملکرد مناسب خاک‌ریزها از ابزار دقیق‌هایی نظیر نشست‌سنج‌ها و پیزومترها که در تمامی نقاط خاک‌ریز نصب شده‌اند، بهره گرفته شده است. در این مقاله آنالیز برگشتی با استفاده از نتایج ابزار دقیق و به‌کمک نرم‌افزار تفاضل محدود Settle 3D انجام شده و نتایج به‌دست آمده با یک‌دیگر مقایسه شده است. در این راستا پارامترهای تأثیرگذار ژئوتکنیکی اولیهٔ حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی با استفاده از این روش تصحیح شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که پارامترهای آزمایشگاهی مؤثر در نظر گرفته شده برای محاسبات اولیهٔ نشست تحکیمی خاک نظیر (C_c) و (Pc)، به‌ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده است و پارامترهای آزمایشگاهی مؤثر در نظر گرفته شده برای محاسبات زمان تحکیم خاک (K_h و K_v) از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده کم‌تر پیش‌بینی شده است. هم‌چنین نتایج حاصل بر مبنای بررسی‌های پارامتریک انجام شده در مورد آرایش و عمق زهکش‌های قائم، نشان داد که با افزایش طول زهکش‌ها نسبت به فواصل آن‌ها می‌توان کارایی این روش را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: روش پیش بارگذاری، زهکش‌های پیش ساخته قائم، نشست تحکیمی، مدل‌سازی عددی، مخازن انبار نفت

* **نویسنده مسئول** h.alielahi@iauz.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

مقدمه

از زیر مجموعه‌های پرکاربرد به‌سازی خاک که قدمت آن به سال‌ها قبل از دههٔ ۱۹۳۰ بر می‌گردد، روش "پیش بارگذاری[1]" است که یکی از روش‌های ساده و اقتصادی در افزایش شاخص‌های مقاومتی خاک‌های ریزدانه اشباع است [۱]. 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 است. هم‌چنین این روش با استفاده از زهکش‌های قائم به‌منظور افزایش سرعت نشست تحکیمی به دو شکل استفاده از خاکریز[2] و یا مکش[3] قابل انجام است [۲].

به‌طورکلی خاک‌های رسی نرم به‌علت تراوایی کم به زمان زیادی برای نشست تحکیمی نیاز دارند. برای افزایش سرعت تحکیم در این خاک‌ها، زهکش‌های قائم پیش ساخته (PVD[4]) در خاک نصب می‌شوند. زهکش‌های قائم با کوتاه کردن مسیر زهکشی موجب افزایش سرعت فرآیند تحکیم شده که این عمل به‌نوبه خود سبب افزایش مقاومت خاک رس به‌صورت سریع شده و توانایی پذیرش بار جدید خاک را افزایش می‌دهد [۱]، [۲].

امروزه پژوهش‌*های* متعددی روی این روش به‌منظور به‌سازی خاک نرم انجام شده است که از نمونه‌های موفق پیش بارگذاری با استفاده از زهکش‌های قائم پیش‌ساخته در پروژه‌های به‌سازی خاک می‌توان به تحقیقات بوشان[5] و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۰ اشاره کرد. پروژهٔ مورد نظر انبار ذخیرهٔ مایعات در کشور اندونزی به مساحت ۲۵۳۰۰ مترمربع بر 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، نشستی معادل ٦۰ الی ۱۷۰ سانتی‌متر به‌وقوع پیوسته است. ایندراراتنا[6] و ردانا[7] [٤] در سال ۱۹۹۸ ابراز داشتند که در عملیات پیش بارگذاری با نصب زهکش‌های نواری انجام شده، اثر ناحیه به‌هم خورده[8] اطراف زهکش‌های قائم در

1. Preloading
2. Embankment
3. Vacuum
4. Prefabricated Vertical Drain
5. Bhushan
6. Indraratna
7. Redana
8. Smear Zone

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

مدت زمان کم (چنده روز) چشم‌گیر است ولی در مدت زمان زیاد (حدود ۴۰۰ روز) اثری نداشته است. هم‌چنین ایندراراتنا و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۵ بررسی‌های تحلیلی و عددی بر تحکیم خاک رس نرم انجام دادند و متوجه شدند که کاهش درجه اشباع خاک اطراف مندرل[1] یا هادی زهکش قائم در موقع نصب می‌تواند در مرحلهٔ اولیه تحکیم موجب کاهش سرعت محو اضافه فشار آب حفره‌ای شود. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند که تعیین پارامترهای خاک در نزدیکی زهکش بسیار راحت تر از داخل و خارج ناحیه دست‌خورده اطراف زهکش است.

ساتانانتان[2] و ایندراراتنا [۶] در سال ۲۰۰۶، ویژگی منطقهٔ دست‌خورده اطراف زهکش ایجاد شده به‌وسیلهٔ مندرل زهکش‌های قائم‌پیش ساخته را بررسی کردند و دریافتند که وسعت ناحیهٔ دست‌خورده اطراف زهکش در خاک‌های رسی مرویا[3] حدوداً ۲/۵ برابر شعاع معادل زهکش است. به هر حال وسعت ناحیه دست‌خورده به‌علت شکل زهکش، سرعت نصب زهکش و هم‌چنین سختی خاک قابل تغییر است.

از پروژه‌های موفق دیگر می‌توان به تحقیقات روجیکیاتکامجرن[4] و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد. ایشان با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس[5] و با استفاده از مدل رفتاری کم– کلی اصلاح شده[6] به مدل‌سازی انبار ذخیره مایعات در بندر تیانجین[7] 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 پیش بارگذاری به سرباری معادل ۱۴۰ کیلو پاسکال نیاز بوده است. ایشان با ترکیب پیش بارگذاری از نوع خاکریز و مکش، مشکل ارتفاع زیاد خاکریز را حل کردند و با مقایسهٔ نتایج ابزار دقیق و پیش‌بینی‌های انجام شده به این نتیجه رسیدند که استفاده از ترکیب خاکریز و مکش به‌طور هم‌زمان می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کوتاه کردن زمان پیش بارگذاری و هم‌چنین کاهش ارتفاع خاکریز و جابه‌جایی جانبی خاک

1. Mandrel
2. Sathananthan
3. Moruya
4. Rujikiatkamjorn
5. ABAQUS
6. Modified Cam-Clay
7. Tianjin

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

داشته باشد. سائوواپاکپیبون[1] و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰، تأثیر پیش بارگذاری با روش ایجاد مکش در تسریع عمل تحکیم رس نرم بانکوک با استفاده از PVD در مقایسه با نتایج متناظر این آزمایش بدون پیش بارگذاری مکش را ارایه کردند.

دار[2] و همکاران (۲۰۱۱) [۹]، روند پیش بارگذاری بندر چیتاگونگ[3] در کشور بنگلادش را بررسی کردند. 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 است. تدجاکوسوما[4] (۲۰۱۲) [۱۰] با استفاده از سیستم پیش بارگذاری و زهکش‌های قائم به بررسی خاک‌های نرم و رسی منطقه سورابایا[5] در کشور اندونزی پرداختند. ایشان در این تحقیق دریافتند که استفاده از پیش بارگذاری در به‌سازی خاک این منطقه بسیار مؤثر بوده است و در مدت زمانی حدود ۲۸۰ روز میزان نشست با استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته در مقایسه 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 بیش‌تر خاک است. کاسکون و و بیوندی [۱۱] در سال ۲۰۱۳ در یک مطالعه موردی به بررسی عملکرد روش پیش بارگذاری با خاکریز و زهکش‌های قائم (PVD) به‌منظور ساخت مخازن ذخیره نفت پرداختند. در محل بررسی شده آزمایش‌های متنوع آزمایشگاهی و صحرایی و هم‌چنین از ابزارگذاری در حین خاکریزی و پس از آن استفاده شده است. سپس، پس از برداشت خاکریزهای پیش بارگذاری، با کمک آزمایش هیدرواستاتیک[6] با آب، رفتار مخازن و نشست‌های آن را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان از عملکرد مناسب عملیات پیش بارگذاری و ایجاد نشست‌های مجاز پس از ساخت مخازن داشته است.

برگادو[7] و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱٤، زهکش‌های پیش ساخته معمولی را با زهکش‌های پیش‌ساخته مکشی[8] را مقایسه کردند و دریافتند که زهکش‌های پیش ساخته مکش‌شونده در

1. Saowapakpiboon
2. Dhar
3. Chittagong Sea Port
4. Tedjakusuma
5. Surabaya
6. Hydrostatic test
7. Bergado
8. Vacuum PVDs

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

حدود ۱/۷ الی ۱/۸ برابر زهکش‌های معمولی سرعت نشست را افزایش می‌دهند. هم‌چنین با استفاده از این زهکش‌ها می‌توان دست‌خوردگی کم‌تری در خاک اطراف زهکش ایجاد کرد. به‌منظور بررسی عمق مؤثر زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (PVD)، چن و همکاران ۲۰۱۶ [۱۳] به بررسی عملکرد این نوع از زهکش‌ها در خاک‌های رسی نرم در قالب یک مطالعه موردی در کشور چین به‌کمک نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی پرداختند. نتایج بررسی‌های پارامتریک آن‌ها نشان داد که افزایش عمق زهکش‌ها از مقادیر به‌دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی و نتایج ابزارگذاری در محل، موجب افزایش هزینهٔ پروژه بدون افزایش در درجه تحکیم خاک می‌شود.

در پروژهٔ انبار نفت ماهشهر به‌منظور به‌سازی خاک از روش پیش بارگذاری با خاکریز به‌همراه زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (PVD) استفاده شده که در این مقاله بررسی شده است. با توجه به نوع لایه‌های خاک و شرایط زیرسطحی در محل پروژه و قرارگیری لایه‌های تحکیم‌پذیر، حجم به‌سازی مورد نیاز برای اصلاح خواص خاک به‌منظور جلوگیری از نشست وگسیختگی خاک در اثر اعمال بارهای ناشی از مخازن بسیار زیاد بوده است. با توجه به این‌که یکی از مشکلات اکثر پروژه‌های عملیات به‌سازی خاک به‌روش پیش بارگذاری، دقت نداشتن در برآوردهای نشست خاکریز و هم‌چنین زمان‌بر بودن عملیات پیش بارگذاری است، از این رو، با استفاده از انتخاب صحیح پارامترهای تأثیرگذار از جمله پارامترهای نشست تحکیمی نظیر (C_s , C_c و Pc) و زمان تحکیم خاک (K_h و K_v)، می‌توان روش پیش بارگذاری را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب و کاربردی برای به‌سازی خاک مورد توجه قرار داد. از این رو، در این مقاله با استفاده از آنالیز برگشتی (معکوس) نتایج حاصل از ابزار دقیق به‌کمک نرم‌افزار تفاضل محدود Settle 3D، پارامترهای ژئوتکنیکی واقعی برآورد شده و پارامترهای اولیه پیش‌بینی شده تأثیرگذار حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی با استفاده از این روش تصحیح و برای ادامه روند طراحی و عملیات اجرایی پیشنهاد شده است. در انتها نیز کارایی روش پیش‌بارگذاری با مقایسهٔ نشست‌های پیش‌بینی شده خاک نرم و نشست‌های ناچیز قابل اغماض بعد از عملیات پیش‌بارگذاری در اثر احداث مخازن نفت، ارزیابی شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

مروری بر تئوری تحکیم شعاعی

روش‌های مختلفی برای در نظر گرفتن توام تحکیم قائم و شعاعی ارایه شده است که ساده‌ترین آن را کاریلو[1] [۱٤] در سال ۱۹٤۲ با رابطهٔ (۱) بیان کرده است.

$$(1-U)=(1-U_v)(1-U_h) \qquad (۱)$$

که در این رابطه، U درصد تحکیم متوسط کل، U_v درصد تحکیم متوسط در جهت قائم و U_h درصد تحکیم متوسط شعاعی است. هم‌چنین روابطی برای به‌دست آوردن درجهٔ تحکیم متوسط همراه با زهکش قائم پیشنهاد شده است [۲]، [۱۵] که در روابط (۲) و (۳) آورده شده است. مقادیر U_v و U_h را می‌توان به‌ترتیب از روابط (۲) و (۳) محاسبه کرد:

$$\frac{U_v\%}{100}=\frac{\left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{0.5}}{\left[1+\left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{2.8}\right]^{0.179}},\ T_v=\frac{C_v t}{H^2} \qquad (۲)$$

$$U_h=1-\exp\left[\left(\frac{-8T_h}{Fn}\right)\right],\ T_h=\frac{C_v t}{d_e^2} \qquad (۳)$$

که در آن U_v درصد تحکیم متوسط قائم، T_v عامل زمان بدون بُعد برای زهکشی قائم، C_v ضریب تحکیم در جهت قائم، H طول حداکثر مسیر زهکشی قائم، t زمان محاسبه درجه تحکیم، U_h درصد تحکیم متوسط شعاعی، T_h عامل زمان بدون بُعد برای زهکشی شعاعی، C_h ضریب تحکیم در جهت شعاعی و d_e قطر دایره معادل مربوط به تأثیر زهکش مطابق شکل ۱ است که برای آرایش مثلثی زهکش‌ها ۱/۰۵ برابر فاصله زهکش‌ها (S) و برای آرایش مربعی ۱/۱۳ برابر فاصله زهکش‌ها پیشنهاد شده است [۲].

$F(n)$ پارامتری است که در برگیرنده فواصل، قطر معادل، ظرفیت دبی خروجی زهکش و ناحیهٔ دست‌خورده خاک اطراف زهکش است که در ساده‌ترین حالت با استفاده از رابطهٔ (٤) به‌دست می‌آید [۲].

$$F(n)=\frac{n^2}{n^2-1}\ln(n)-\frac{3n^2-1}{4n^2}\cong\ln(n)-\frac{3}{4},\ n=\frac{d_e}{d_w} \qquad (٤)$$

1. Carillo

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

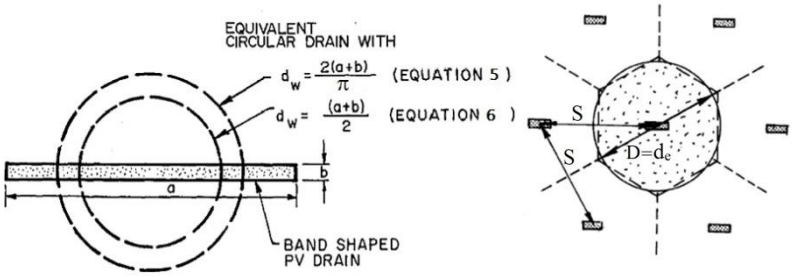
n نسبت قطر دایره معادل به قطر چاه زهکش، d_e قطر دایره معادل مربوط به تأثیر زهکش و d_w قطر چاه زهکش است.

برای زهکش‌های نواری (Band-shaped PV drain)، قطر معادل چاه زهکش d_w که به‌منظور استفاده در محاسبات از رابطهٔ (۵) به‌دست می‌آید:

$$d_w = \left(\frac{2(a+b)}{\pi}\right) \qquad (۵)$$

کاهش قطر معادل چاه زهکش را برای زهکش‌های نواری با نسبت a/b کوچک‌تر از ۵۰ بر اساس رابطهٔ ٦ پیشنهاد شده است [۲]. پارامترهای رابطه‌های (۵)و(٦) در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$d_w = \frac{(a+b)}{2} \qquad (٦)$$



شکل ۱. چاه‌های زهکش [۲] **شکل ۲. قطر معادل زهکش نواری [۲]**

برای در نظر گرفتن تأثیر دست‌خوردگی خاک در اثر نصب زهکش و هم‌چنین مقاومت زهکش در فرآیند تحکیم شعاعی، رابطهٔ (۷) پیشنهاد شده است [۲]:

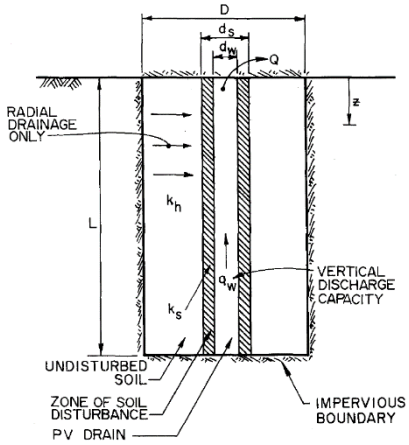
$$\frac{U_h\%}{100} = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n) + F_s + Fr}\right] \qquad (۷)$$

در رابطهٔ مذکور، F_s فاکتور دست‌خوردگی خاک است و از رابطهٔ (۸) قابل محاسبه است:

$$F_s = \left(\left(k_h/k_s\right)-1\right)\ln(d_s/d_w) \qquad (۸)$$

که در آن d_s قطر ناحیهٔ دست‌خورده اطراف زهکش، k_h ضریب نفوذپذیری خاک در جهت افقی در ناحیهٔ دست‌نخورده وk_s ضریب تراوایی خاک در جهت افقی در ناحیهٔ دست‌خورده است. مطابق شکل ۳ پارامترهای دخیل در رابطهٔ (۸) ارایه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]



شکل ۳. زهکش نواری و دست‌خوردگی خاک اطراف به‌همراه پارامترهای مربوط [۲]

پارامتر F_r در رابطهٔ (۷) فاکتور مقاومت زهکش است که از رابطهٔ (۹) می‌توان محاسبه کرد:

$$F_r = \pi z\,(L-z)\left(\frac{k_h}{q_w}\right) \qquad (۹)$$

که در آن z فاصله قائم از سطح لایهٔ تراکم‌پذیر، q_w ظرفیت تخلیه زهکش، L طول مؤثر زهکش، که در صورت زهکشی یک‌طرفه برابر با ضخامت لایهٔ تراکم‌پذیر و در صورت زهکشی دوطرفه برابر با نصف این مقدار در نظر گرفته می‌شود. معمولاً محدودهٔ مقادیر F_r نسبت به F(n) و F_s بسیار کوچک است و در محاسبات صرف‌نظر می‌شود [۲].

پروژهٔ انبار نفت ماهشهر- مطالعه موردی

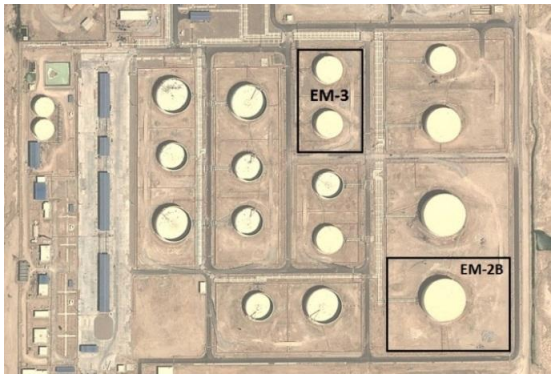
معرفی پروژه

پروژهٔ بندر ماهشهر در استان خوزستان و شهرستان ماهشهر با طول جغرافیایی ٤۹ درجه و ۱۳ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است. ارتفاع ماهشهر از سطح دریا ۲/٦ متر و ارتفاع محل پروژه از سطح دریا ۱/۲ متر الی ۲/۲ متر است.

پروژهٔ انبار نفت ماهشهر شامل مخازن ذخیره سوخت و هم‌چنین تأسیسات و ساختمان‌های مسکونی مجاور آن‌ها است که نقشهٔ جانمایی پروژه در شکل ٤ ارایه شده است. در این شکل موقعیت مخازن سوخت و تأسیسات جانبی نشان داده شده است. مخازن ذخیره سوخت بررسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

شده شامل مخازن Tank 403 (خاکریز EM-2B) و Tank 601,602 (خاکریز EM-3) هستند. با توجه به‌نوع لایه‌های خاک و شرایط زیرسطحی در محل پروژه و قرارگیری لایه‌های تحکیم‌پذیر در زیر مخازن یاد شده، حجم به‌سازی مورد نیاز برای اصلاح خواص خاک به‌منظور جلوگیری از نشست و گسیختگی خاک در اثر بارهای ناشی از مخازن، بسیار زیاد است. هم‌چنین با توجه به‌وسعت زیاد منطقهٔ مورد نظر، استفاده از شالوده عمیق (شمع) و هم‌چنین استفاده روش‌های دیگر به‌سازی خاک با توجه به نوع خاک، غیراقتصادی و زمان‌بر بوده است. از این‌رو، در این پروژه، گزینهٔ به‌سازی خاک به‌روش پیش بارگذاری با خاکریز به‌همراه نصب زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (PVD) در دستورکار است. با توجه به موارد ذکر شده به‌منظور به‌سازی خاک زیر این مخازن به‌روش پیش بارگذاری به‌ترتیب از خاکریز EM-2B به مساحتی معادل ۹۵۵۰ متر مربع و ارتفاع ١٤/٦٦ و باری معادل ٢٦٣/٨٨ کیلونیوتن بر مترمربع و خاکریز EM-3 به مساحتی معادل ١٠٧٨١ مترمربع و ارتفاع ١٣/٨٩ و باری معادل ٢٥٠ کیلونیوتن بر مترمربع مطابق شکل ۵ استفاده شده است.



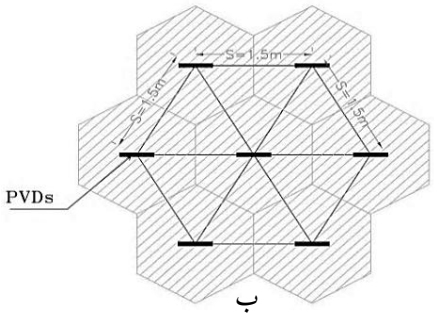
شکل٤. نقشهٔ جانمایی مخازن پروژهٔ انبار نفت ماهشهر

فاصلهٔ زهکش‌های قائم ۱/۵ متر و طول هر زهکش ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. زهکش‌های قائم (PVD) از نوع نواری (Colbonddrain CX1000) [۲] به ابعاد ۱۰ در ۰/۳٦ سانتی‌متر است که این زهکش‌ها مطابق شکل ٦ به‌صورت آرایش مثلثی در زمین محل پروژه نصب شده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

الف ب

شکل ۵. الف) نمایی از خاکریز EM-2B، ب) نمایی از خاکریز EM-3



الف ب

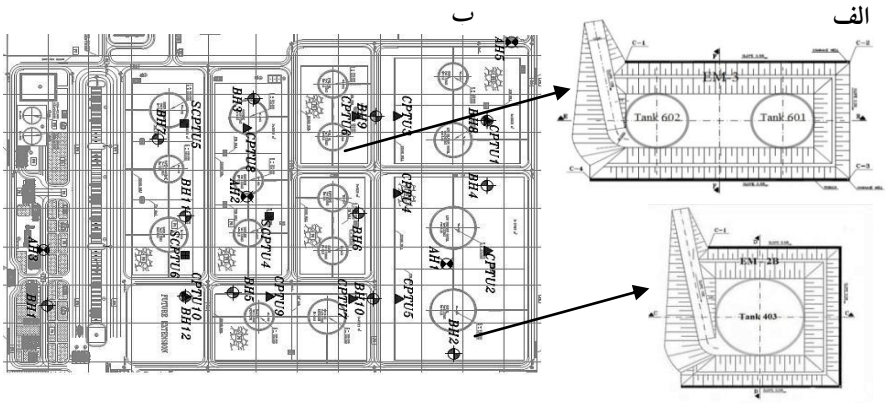
شکل ٦. الف) نمایی از اجرای زهکش‌های نواری در زیر خاکریزها ب) آرایش زهکش‌ها در پلان

مشخصات ژئوتکنیکی پروژه

با توجه به بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام شده در محل پروژه، وضعیت لایه‌های خاک عمدتاً از جنس رس با خاصیت خمیری کم (CL) است که در اکثر اعماق درصدی از سیلت (ML) در ترکیب خاک یافت می‌شود. با توجه گمانه‌های حفر شده، خاک محل پروژه به لحاظ ژئوتکنیکی به سه ناحیهٔ متفاوت تقسیم‌بندی شده است که خاکریزهای بررسی شده این پژوهش (EM-2B) در ناحیهٔ سه ژئوتکنیکی و (EM-3) در ناحیهٔ دو ژئوتکنیکی واقع شده است. برای شناسایی ناحیه سه ژئوتکنیکی، سه گمانه BH-2، BH-4 و BH-8 و برای شناسایی ناحیه دو ژئوتکنیکی، سه گمانه BH-10، BH-6 و BH-9 به اعماق مختلف ۳۰ الی ٦۰ متری حفاری شده که در شکل ۷ موقعیت گمانه‌ها و خاکریزهای بررسی شده نشان داده شده است. در این شکل علامت "BH" نشان‌دهندهٔ گمانه و "CPTu" نشان‌دهندهٔ آزمایش صحرایی نفوذ مخروط است. هم‌چنین پروفیل ژئوتکنیکی نواحی بررسی شده در شکل ۸ ارایه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

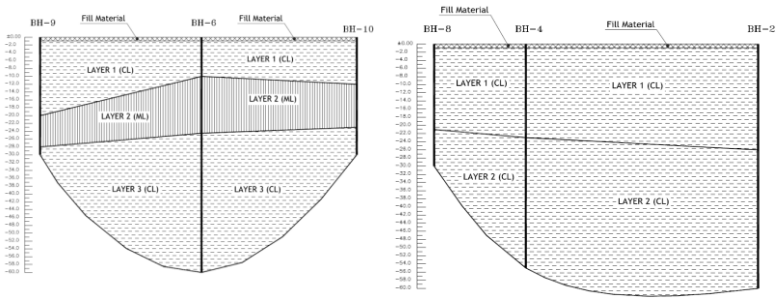
چنان‌که مشاهده می‌شود در ناحیهٔ سه از عمق ۰ تا ۲۲ متر شامل رس نرم لای‌دار با خاصیت خمیری کم (CL-1) و از عمق ۲۲ متری تا عمق ٦۰ متری خاک از نوع رس نرم با خاصیت خمیری کم (CL-2) با ویژگی‌های متفاوت تشکیل شده است. هم‌چنین خاکریز EM-3 در ناحیهٔ دو ژئوتکنیکی واقع شده است که در این ناحیه از عمق ۰ تا ۱۲ متر دارای رس نرم با خاصیت خمیری کم (CL-1) و از عمق ۱۲ تا ۲٤ متری لای با خاصیت خمیری کم (ML) و از عمق ۲٤ متری تا عمق ٦۰ متری خاک از نوع رس با خاصیت خمیری کم (CL-2) با مشخصات متفاوت تشکیل شده است. با توجه به بارگذاری ناشی از ساخت مخازن، تحقیقات نشان داد که این نوع لایه‌بندی خاک پتانسیل زیادی برای نشست تحکیمی در ناحیهٔ مورد نظر دارد.



شکل ۷. الف) پلان موقعیت خاکریزهای EM-2B و EM-3، ب) محل گمانه‌های ناحیه دو و سه ژئوتکنیکی

مشخصات ژئوتکنیکی و لایه‌بندی خاک محل پروژه در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که این پارامترها برای طراحی اولیه قبل از اجرای خاکریز بر مبنای نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی در گمانه‌ها پیشنهاد و استفاده شده است. به‌طورکلی پروفیل ژئوتکنیکی گمانه‌های BH-2 و BH-9 که به‌ترتیب در زیر خاکریزهای EM-2B و EM-3 قرار گرفته‌اند در شکل ۸ نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]



ب الف

شکل ۸. الف) پروفیل ژئوتکنیکی ناحیه دو ژئوتکنیکی، ب) پروفیل ژئوتکنیکی ناحیه سه ژئوتکنیکی

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی مربوط به ناحیه دو ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-3 (شامل گمانه‌های ۱۰ ، ٦ ، ۹)

عمق لایه خاک (m)	نوع خاک	ν (sat)	C_c	C_s	Pc (kPa)	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	K_h (m/day)	K_v (m/day)	K_h/K_v	e_0
0 - 6	(CL-1)	0.45	0.17	0.035	60	19.68	20.11	0.0069	0.00345	2	0.7
6 - 12	(CL-1-1)	0.45	0.17	0.035	120	19.68	20.11	0.0069	0.00345	2	0.7
12 - 24	(ML)	0.3	0.17	0.03	200	20.4	21.28	0.00864	0.00432	2	0.75
24 - 38	(CL-2-1)	0.45	0.17	0.03	350	20.82	21.13	0.00172	0.00086	2	0.57
38 - 70	(CL-2-2)	0.45	0.17	0.03	550	20.82	21.13	0.00172	0.00086	2	0.57

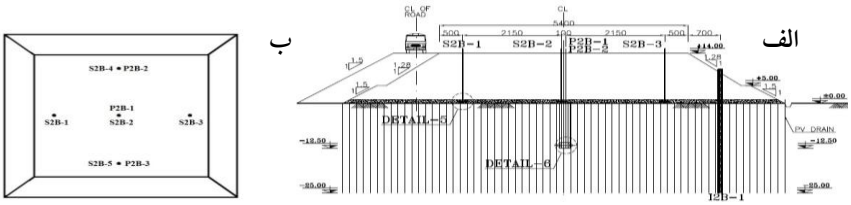
جدول ۲. پارامترهای ژئوتکنیکی مربوط به ناحیه سه ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B (شامل گمانه‌های ۲ ، ٤ ، ۸)

عمق لایه خاک (m)	نوع خاک	ν (sat)	C_c	C_s	Pc (kPa)	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	20.16	20.59	0.0086	0.0043	2	0.85
10 – 22	(CL-1-1)	0.45	0.17	0.03	180	20.16	20.59	0.0086	0.0043	2	0.85
22 – 38	(CL-2)	0.45	0.16	0.03	350	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6
38 – 48	(CL-2-1)	0.45	0.16	0.03	450	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6
48 – 60	(CL-2-2)	0.45	0.16	0.03	580	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

موقعیت ابزارگذاری و انواع آن‌ها

به‌منظور بررسی و کنترل عملکرد عملیات به‌سازی خاک به‌روش پیش‌بارگذاری در خاکریزهای بررسی شده از ابزارگذاری‌های مختلفی استفاده شده است. این ابزارها منجر به کسب اطلاعات مفید و در نتیجه تسریع در عملیات ساختمانی با حداقل مخاطره می‌شوند. ابزارهای استفاده شده در این پروژه شامل: صفحات نشست‌سنج[1] که از نوع میله‌ای و برای اندازه‌گیری نشست‌های سطح زمین طبیعی با دقت میلی‌متر و پیزومترها[2] که از نوع پیزومتر لوله صاف و با دقت سانتی‌متر برای اندازه‌گیری ارتفاع آب داخل پیزومتر و برآورد فشار آب منفذی هستند. هم‌چنین انحراف‌سنج‌ها[3] که به‌منظور اندازه‌گیری حرکات جانبی استفاده می‌شوند. علاوه بر موارد مذکور، از چاه‌های مشاهده‌ای نیز به‌منظور اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی طبیعی و فشار آب هیدرواستاتیک بهره گرفته شده است. در خاکریز EM-2B به شکل مربعی به ابعاد ۹۷/۷٤ در۹۷/۷٤ متر، برای اندازه‌گیری نشست از پنج نشست‌سنج و برای اندازه گیری فشار آب منفذی از سه پیزومتر مطابق شکل ۹ استفاده شده است. در این شکل‌ها "S" نشان‌دهندهٔ صفحات نشست سنج و"P" پیزومترها هستند. هم‌چنین در خاکریز EM-3 به ابعاد ۱٤۳/۷۵ در ۷۵ متر، برای اندازه‌گیری نشست از هفت نشست‌سنج و برای اندازه گیری فشار آب منفذی از پنج پیزومتر مطابق شکل ۱۰ استفاده شده است.



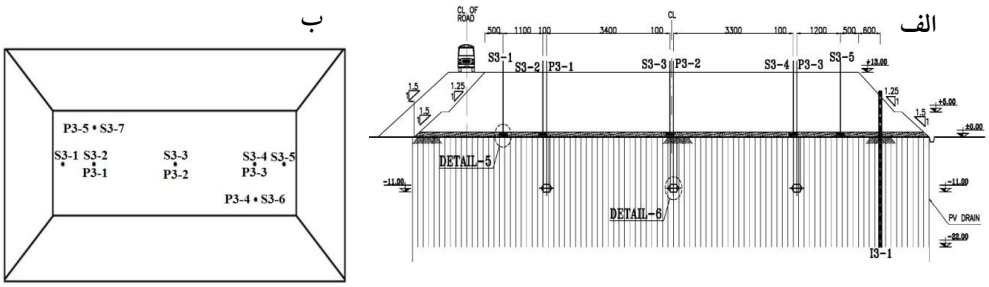
شکل ۹. الف) موقعیت ابزارگذاری در مقطع خاکریز EM-2B، ب) پلان خاکریز EM-2B

شکل ۱۱ نشان‌دهندهٔ نمودار خاکریزی مرحله‌ای خاکریزهای EM-2B و EM-3 است و هم‌چنین شکل ۱۲ میزان نشست حاصل از ابزار دقیق (S2) و (S3) به‌ترتیب در مرکز خاکریز EM-2B و EM-3 را نشان می‌دهد که پس از گذشت زمان انتظار، میزان نشست خاک واقع در زیر

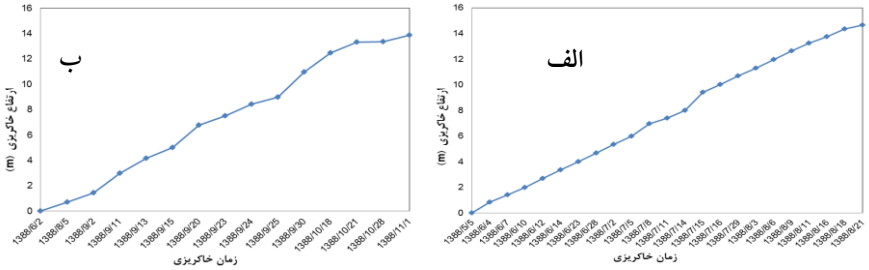
1. Settlement plates
2. Piezometers
3. Inclinometers

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

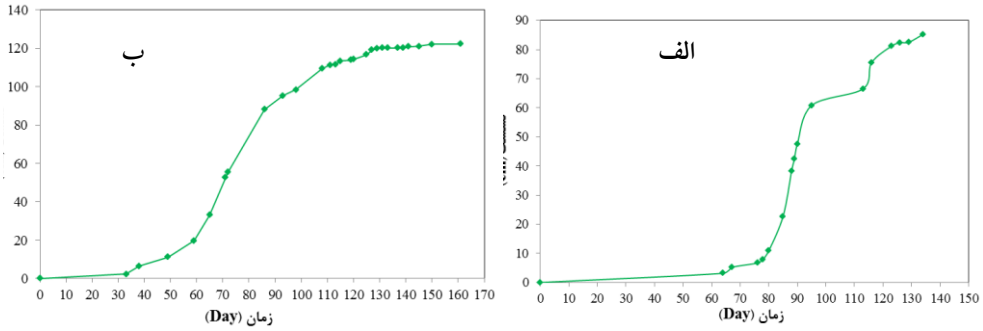
خاکریزها تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است. چنان‌که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود فشار آب حفره‌ای حاصل از پیزومتر (P1) و (P2) به‌ترتیب در مرکز خاکریزهای EM-2B و EM-3 در پایان زمان خاکریزی به بیش‌ترین مقدار خود رسیده است و با گذشت زمان انتظار، میزان فشار آب حفره‌ای به‌تدریج کاسته شده و فشارآب حفره‌ای به صفر رسیده است که این موضوع نشان‌گر پایان زمان تحکیم است.



شکل ۱۰. الف) موقعیت ابزارگذاری در مقطع خاکریز EM-3، ب) پلان خاکریز EM-3

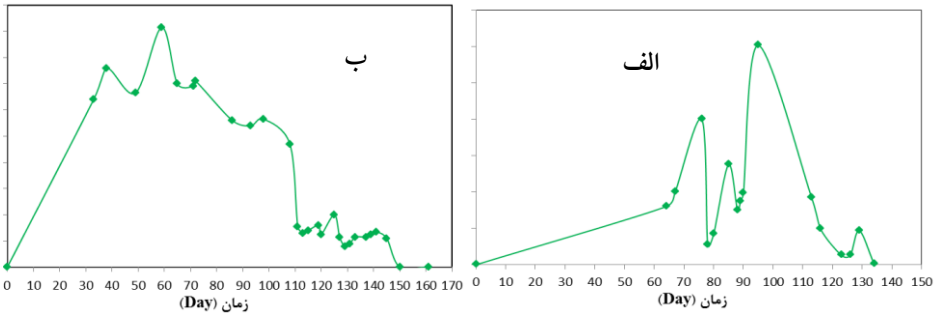


شکل ۱۱. الف) نمودارتاریخچه خاکریزی خاکریز EM-2B، ب) نمودارتاریخچهٔ خاکریزی خاکریز EM-3



شکل ۱۲. الف) نشست ثبت شده با استفاده از صفحه نشست‌سنج S2 در مرکز خاکریز EM-2B، ب) نشست ثبت شده با استفاده از صفحه نشست‌سنج S3 در مرکز خاکریز EM-3

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]



شکل ۱۳. الف) تغییرات فشار آب حفره‌ای ثبت شده با استفاده از پیزومتر P1 در مرکز خاکریز EM-2B، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای ثبت شده با استفاده از پیزومتر P2 در مرکز خاکریز EM-3

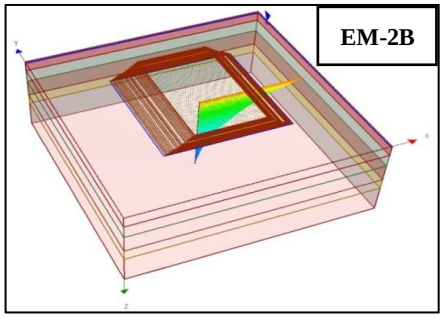
مدل‌سازی عددی

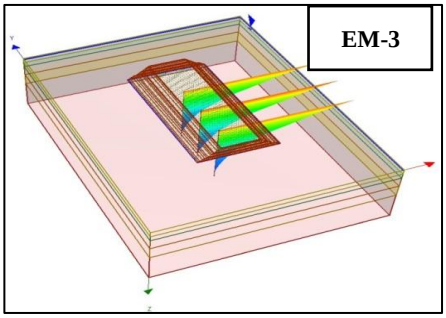
به‌منظور مدل‌سازی عددی، از نرم‌افزار Settle 3D بر مبنای روش تفاضل محدود[1] استفاده شده است.این نرم افزار مبتنی بر تئوری تحکیم ترزاقی همراه با تحکیم شعاعی بوده است و پارامترهای مؤثر در نشست تحکیمی خاک نظیر: فشار پیش تحکیمی (Pc)، نشانه فشردگی (Cc)، شاخص تورم (Cs) و هم‌چنین نفوذپذیری خاک در دو جهت افقی و قائم در این نرم افزار معرفی می‌شوند. برای مدل‌سازی سه‌بعدی خاکریزهای EM-2B و EM-3، ابعاد مدل از طرفین خاکریز باید طوری در نظر گرفته شود که شرایط واقعی زمین لحاظ شده و در رفتار کلی خاکریز کم‌ترین تأثیر را داشته باشد. خاکریز EM-2B دارای ارتفاع ١٤/٦٦ متر و دارای ابعاد ٩٧/٧٤ در ٩٧/٧٤ متر است و هم‌چنین خاکریز EM-3 به ابعاد ١٤٣/٧٥ در ٧٥ متر و به ارتفاع ١٣/٨٩ متر است. شرایط مرزی در این نرم افزار به‌صورت خودکار در نظر گرفته می‌شود، بدین‌ترتیب که عرضی معادل سه برابر عرض و طولی معادل دو برابر طول خاکریز و هم‌چنین برای عمق آبرفت زیر خاکریز، ارتفاعی معادل پنج برابر ارتفاع خاکریزی با توجه به اطلاعات ژئوتکنیکی در محل، برای هر دو خاکریز لحاظ شده است. هم‌چنین سطح آب زیر زمینی ١/٥ متر پایین‌تر از سطح زمین طبیعی بر طبق داده‌های ثبت شده در گمانه‌ها لحاظ شده است. شکل ١٤ تصویر مدل عددی خاکریزهای EM-2B و EM-3 را در نرم‌افزار Settle3D

1. Finite Difference Method

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

نشان می‌دهد. در این نرم افزار می‌توان با قراردادن زهکش در خاک، سرعت تحکیم را بهبود بخشید. در خاکریزهای EM-2B وEM-3، با توجه به طرح اولیه، طول زهکش به‌ترتیب برابر با ۲۵ و۲۲ متر و فاصله زهکش‌ها از یک‌دیگر در هر خاکریز ۱/۵ متر با آرایش مثلثی در نظر گرفته شده است. ابعاد زهکش‌های قائم پیش ساخته (PVD) دارای ۱۰ سانتی‌متر طول و ۰/۳٦ سانتی‌متر عرض با دبی خروجی ۱٤۰ میلی‌لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند که مشخصات کامل آن‌ها در جدول ۳ ارایه شده است.





شکل ١٤. تصویر مدل‌سازی سه‌بعدی خاکریزهای EM-2B و EM-3 با استفاده از نرم‌افزارSettle 3D

جدول ۳. مشخصات زهکش‌های نواری Colbonddrain Cx1000 [۲]

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} (□m)	ازدیاد طول در نیروی کششی ۱/. کیلونیوتن (٪)
۱۰۰	۳/٦	۱٤۰	۷۰	۷۵	۳/.

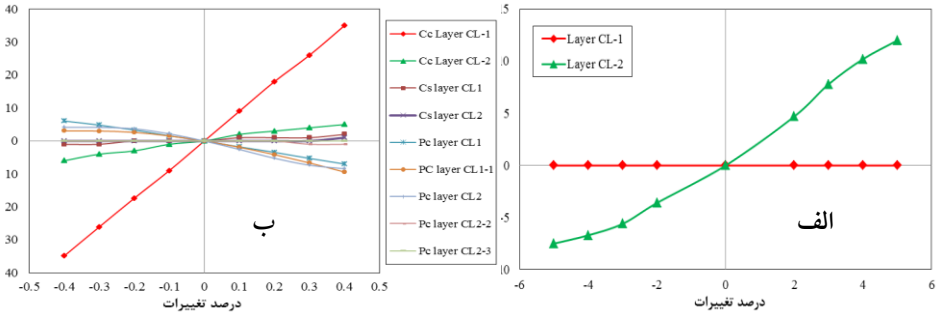
تحلیل حساسیت برای تعیین پارامترهای مؤثر خاک

در این بخش با استفاده از نتایج ابزاردقیق نصب شده در محل خاکریزهای پیش‌بارگذاری، به انجام تحلیل حساسیت به‌کمک نرم‌افزار Settle 3D پرداخته شد. روش تحلیل حساسیت انتخابی برای این منظور، استفاده از روش مستقیم مبتنی بر سعی و خطا انتخاب شده است. با توجه به تعداد پارامترهای دخیل در مسئله، ابتدا تحلیل حساسیت بر پارامترهای لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی مربوط به هر خاکریز انجام شده تا مؤثرترین پارامترها در مقدار نشست و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

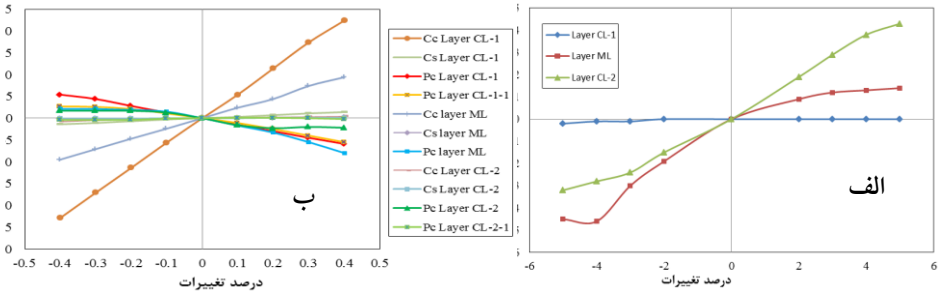
زمان تحکیم تعیین شوند و سپس با توجه به آنالیزهای برگشتی پارامترهای حاصل از آن محاسبه می‌شود.

فرآیند انجام پژوهش‌های حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی بدین‌صورت است که در گام اول برای محاسبه مؤثرترین پارامتر در زمان نشست تحکیمی (K_h ضریب افقی تراوایی) مدلی با اطلاعات اولیه ایجاد شده و میزان درجه تحکیم به‌دست آمده ثبت شده است. سپس هر پارامتر به‌طور جداگانه تغییر داده شده و پس از جای‌گذاری هر پارامتر به‌دست آمده در مدل عددی، مجدداً شبیه‌سازی عددی با پارامتر مورد نظر آماده تحلیل‌های بعدی شده است. به همین ترتیب تحلیل حساسیت بر پارامترهای مؤثر در مقدار نشست تحکیمی (P_c , C_c, C_s به‌ترتیب فشار پیش تحکیمی، شیب منحنی تحکیم در بارگذاری (نشانه فشردگی) و باربرداری) انجام شده است. نتایج تحلیل حساسیت انجام شده با کمک مدل‌سازی عددی و نتایج ابزار دقیق در محل خاکریز EM-2B و EM-3 به‌ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارایه شده است.



شکل ۱۵. الف) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر نفوذپذیری (k_h) در لایه‌های مختلف ناحیه سه ژئوتکنیکی، ب) نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای تحکیمی در لایه‌های مختلف ناحیه سه ژئوتکنیکی (محل خاکریز EM-2B)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]



شکل ۱٦. الف) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر نفوذپذیری (k_h) در لایه‌های مختلف ناحیه دو ژئوتکنیکی، ب) نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای تحکیمی در لایه‌های مختلف ناحیه دو ژئوتکنیکی (محل خاکریز EM-3)

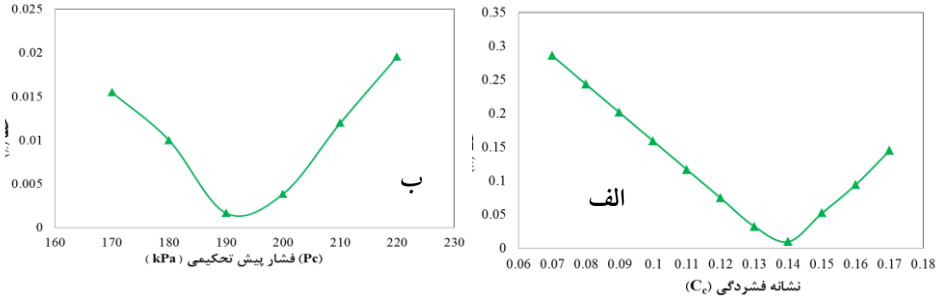
مطابق شکل ۱۵ الف در ناحیهٔ سه ژئوتکنیکی (خاکریز EM-2B)، پارامتر نفوذپذیری (K_h) در لایهٔ دوم (CL-2) که بیش‌ترین شیب تغییرات درجه تحکیم را دارد به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در زمان پدیده تحکیم و بر مبنای شکل ۱۵ ب پارامتر C_c (نشانهٔ فشردگی) در لایه رسی اول (CL-1) با توجه به افزایش شیب تغییرات درجه تحکیم، حساس‌ترین پارامتر در مقدار نشست تحکیمی هستند. هم‌چنین با توجه به شکل ۱٦، در ناحیهٔ دو ژئوتکنیکی (خاکریزEM-3)، پارامتر نفوذپذیری (k_h) که دارای بیش‌ترین شیب تغییرات در لایه سوم پروفیل خاک (CL-2) به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در زمان تحکیم و پارامتر C_c در لایهٔ اول (CL-1) با بیش‌ترین شیب تغییرات درجهٔ تحکیم، حساس‌ترین پارامتر در مقدار نشست تحکیمی به‌دست آمده است.

نتایج آنالیز برگشتی (معکوس)

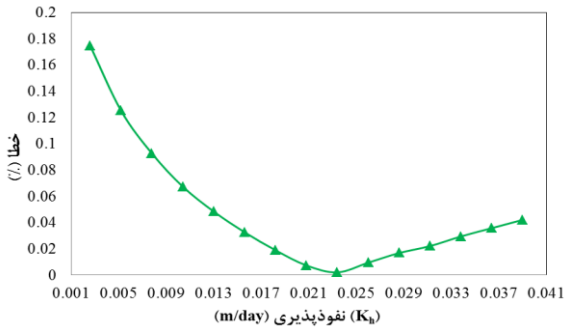
پس از انجام تحلیل حساسیت در بخش قبل و مشخص شدن مؤثرترین پارامترها در مقدار و زمان نشست تحکیمی خاکریزهای یاد شده، در این بخش به آنالیز برگشتی (معکوس) از طریق کمینه‌سازی تابع خطا به‌منظور دست‌یابی به پارامتر بهینه و صحیح پرداخته شده است. در این تحقیق ابزارهای نصب شده در مرکز خاکریز EM-2B و EM-3 که به‌صورت روزانه و هفتگی برداشت شده‌اند، بررسی شده است. مطابق شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آنالیز برگشتی با روش کمینه‌سازی تابع خطا بدین‌صورت انجام شده است که هر یک از پارامترها آن‌قدر تغییر داده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

شده و مقادیر نشست به‌دست آمده از مدل عددی با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده است که کم‌ترین درصد خطا برای پارامتر مورد نظر به‌دست آید. چنان‌که مشخص است برای ناحیهٔ سه ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B، تابع خطا برای پارامترهای نشانهٔ فشردگی (Cc) و فشار پیش تحکیمی (Pc) به‌ترتیب در لایه‌های CL-1 و CL-1-1 به‌ترتیب در مقادیر ۰/۱٤و ۱۹۰ کیلو پاسکال کمینه شده است.



شکل ۱۷. الف) نمودار کمینه سازی تابع خطا برای پارامترهای نشانه فشردگی (C_c) ب) نمودار فشار پیش تحکیمی Pc در لایه CL-1-1 ناحیه سه ژئوتکنیکی (محل خاکریز EM-2B)

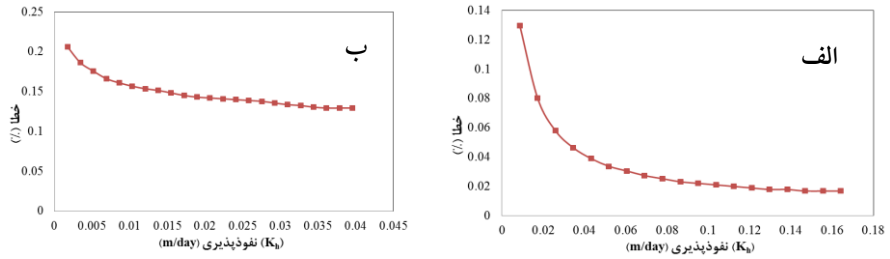


شکل ۱۸. نمودار کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامتر نفوذپذیری(k_h) در لایه CL-2 ناحیهٔ دو ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B

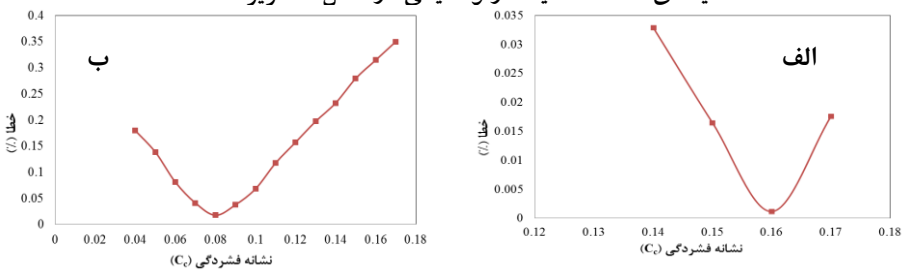
هم‌چنین با توجه به شکل ۱۸، تابع خطا برای پارامتر K_h (ضریب تراوایی در راستای افق) در نرم افزار Settle 3D در مقدار ۰/۰۲۳٤ (m/day) کمینه شده است. نتایج به‌دست آمده برای خاکریز EM-3 در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ ارایه شده است. هم‌چنین این مقادیر در لایهٔ ML برابر ۰/۱٤٦۸۸ (m/day) و در لایهٔ CL-2 برابر ۰/۰۳٦۱۲ حاصل شده است. در شکل ۲۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

کمینه‌سازی تابع خطا برای پارمتر C_c در لایه‌های CL-1 و ML که در ناحیهٔ دو ژئوتکنیکی با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده دارای بیش‌ترین حساسیت در نشست تحکیم هستند، نشان داده شده است. چنان‌که مشخص است پارامتر C_c در لایه ML در مقدار ۰/۱٦ و پارامتر C_c در لایه CL-1 ناحیهٔ دو ژئوتکنیکی در مقدار ۰/۰۸ کم‌ترین خطا را دارد و بهینه شده است.



شکل ۱۹. الف) نمودار کمینه سازی تابع خطا برای پارامتر K_h در لایه‌های ML ناحیه ۲ ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-3، ب) نمودار کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامتر K_h در لایه‌های CL-2 ناحیهٔ ۲ ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-3



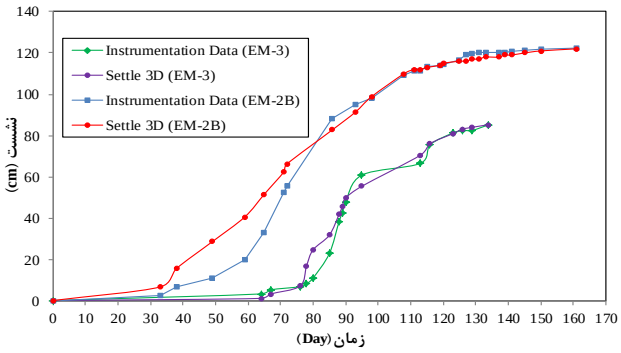
شکل ۲۰. الف) نمودار کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامتر نشانهٔ فشردگی (C_c) در لایهٔ ML ناحیهٔ ۲ ژئوتکنیکی، ب) نمودار کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامتر نشانهٔ فشردگی (C_c) در لایه CL-1 ناحیهٔ ۲ ژئوتکنیکی

پس از انجام بررسی‌های عددی و آنالیزهای حساسیت پارامترهای خاک در لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی، مطابق نتایج به‌دست آمده از آنالیز معکوس در جدول‌های ٤ و ٥، به‌ترتیب مقدار C_f (نسبت نفوذپذیری محل به نفوذپذیری آزمایشگاه) در لایهٔ CL-2 نه برابر و در لایه CL-2 به مقدار بیست یک برابر و در لایه ML به مقدار هفده برابر حاصل شده است. به‌عبارت دیگر ضریب نفوذپذیری صحیح حاصل از آنالیز برگشتی ابزار دقیق در حدود نه الی بیست و یک برابر بیش‌تر از ضریب نفوذپذیری به‌دست آمده از مقادیر پارامترهای طراحی اولیه و بر

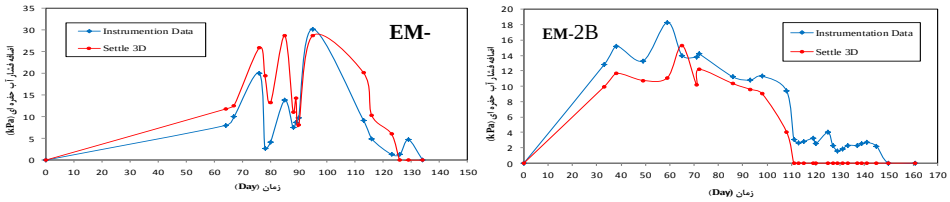
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

مبنای نتایج آزمایشگاهی قبل از عملیات پیش بارگذاری می‌باشد که این موضوع نشان می‌دهد مقدار نفوذپذیری واقعی بسیار بیش‌تر از مقدار تخمین اولیه در محاسبات بوده است.

در ادامه تمامی پارامترهای صحیح به‌دست آمده از نتایج آنالیزهای برگشتی در جدول‌های ٤ و ٥ در نواحی مختلف ژئوتکنیکی با توجه به خاکریز مربوط ارایه شده است. هم‌چنین مقایسهٔ نتایج نشست و اضافه فشارآب حفره‌ای حاصل از مدل‌سازی عددی و ابزارگذاری در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ با یک‌دیگر پس از دست‌یابی به پارامترهای اصلاح شده حاصل از آنالیز برگشتی با یک‌دیگر مقایسه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود با اصلاحات انجام شده روی پارامترهای ژئوتکنیکی، نتایج مدل‌سازی عددی هم‌خوانی مناسبی با نتایج حاصل از ابزار دقیق دارد.



شکل ۲۱. نمودار مقایسهٔ نشست خاکریزهای EM-2B و EM-3 در مدل‌سازی عددی و ابزاردقیق بعد ازآنالیز برگشتی



شکل۲۲. مقایسهٔ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای خاکریزهایEM-2B وEM-3 در مدل‌سازی عددی و ابزاردقیق بعد از آنالیز برگشتی

هم‌چنین نتایج بررسی‌های عددی بر مبنای پارامترهای اصلاح شده حاصل از آنالیز برگشتی نشان داد که مقادیر نشست در مرکز خاکریز EM-2B در حدود ۱۲۲/۲ سانتی‌متر و برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

خاکریز EM-3 در حدود ۸۵/۲ سانتی‌متر حاصل شده است در صورتی که مطابق طراحی‌ها و پیش‌بینی‌های اولیه انجام شده، این مقادیر به‌ترتیب ۱۳۲سانتی‌متر و ۱٤۱ سانتی‌متر تخمین زده شده بود. از این رو، می‌توان دریافت که مقادیر نشست محاسباتی اولیه بر مبنای پارامترهای فرض شده بیش‌تر از نشست‌های اندازه‌گیری شده بوده است. از دلایل کم‌تر شدن نشست‌های اندازه‌گیری شده نسبت به نشست‌های محاسباتی می‌توان به تعیین محافظه‌کارانه پارامترهای ژئوتکنیکی محاسبات نشست تحکیمی اشاره کرد.

جدول ٤. نتایج حاصل از آنالیز برگشتی پارامتر های تحکیمی در ناحیه دو ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-3

پارامترهای نشست تحکیمی	C_c (CL-1)	C_c (ML)	C_f (CL-2)	C_f (ML)	K_v (CL-2) (m/day)	K_h (CL-2) (m/day)	K_v (ML) (m/day)	K_h (ML) (m/day)
نتایج آنالیز برگشتی با استفاده از Settle 3D	۰/۰۸	۰/۱٦	۲۱	۱۷	۰/۰۱۸	۰/۰۳٦	۰/۰۷۳	۰/۱٤٦
مقادیر پارامترهای اولیه پیشنهادی	۰/۱۷	۰/۱۷	–	–	۰/۰۰۸٦	۰/۰۰۱۷۲	۰/۰۰٤۳۲	۰/۰۰۸٦٤

جدول ۵. نتایج حاصل از آنالیز برگشتی پارامتر های تحکیمی در ناحیه سه ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B

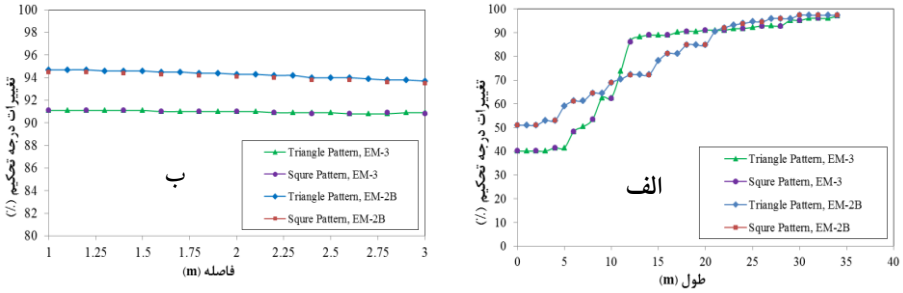
پارامترهای نشست تحکیمی	Pc (CL-1-1) (kPa)	C_c (CL-1)	C_f (CL-2)	K_v (CL-2) (m/day)	K_h (CL-2) (m/day)
نتایج آنالیز برگشتی با استفاده از Settle 3D	۱۹۰	۰/۱٤	۹	۰/۰۱۱۷	۰/۰۲۳٤
مقادیر پارامترهای اولیه پیشنهادی	۱۸۰	۰/۱۷	–	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲٦

بررسی عملکرد زهکش‌ها در خاکریزهای EM-2B و EM-3

با توجه به پارامترهای تحکیمی به‌دست آمده از نتایج آنالیز برگشتی و حصول پارامترهای اصلاح شده، با کمک مدل‌سازی عددی در این بخش از مقاله به بررسی پارامتریک رفتار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

زهکش‌های قائم با تغییرات طول (عمق) و آرایش آن‌ها پرداخته شده است. با توجه به شکل ۲۳ الف، در خاکریز EM-2B با تغییر فاصله زهکش‌ها از ۱/۵ متر به ۳ متر، درجه تحکیم از ۹٤/٦ به ۹۳/۷ و برای خاکریز EM-3 درجهٔ تحکیم از ۹۱/۱ به ۹۰/۹ تغییر یافته است.از این رو، با دو برابر کردن فاصله زهکش‌ها از یک‌دیگر، صرفاً ۰/۹ درصد برای خاکریز EM-2B و ۰/۲ درصد برای خاکریز EM-3 در درجه تحکیم تغییر ایجاد شده است که می‌توان در پروژه‌های آتی و خاکریزهای بعدی با مدنظر قرار دادن این موضوع فاصله زهکش‌ها را افزایش داد تا هزینه‌های اقتصادی آن‌ها کاهش یابد. هم‌چنین استفاده از آرایش مثلثی و مربعی زهکش‌ها تأثیر محسوسی در میزان تغییر درجه تحکیم با تغییر فاصله زهکش‌ها ندارد. در مرحلهٔ دوم آنالیزها، با افزایش طول (عمق) زهکش‌ها، نتایج تغییرات درجه تحکیم محاسبه شده است. چنان‌که از نتایج به‌دست آمده در شکل ۲۳ ب مشاهده می‌شود افزایش طول زهکش‌ها موجب تغییرات چشم‌گیری در درجهٔ تحکیم خواهد شد. از این رو، با افزایش طول زهکش‌ها تا عمق ۳۰ متری (در خاکریز EM-2B) تغییرات درجه تحکیم چشم‌گیر بوده است و با افزایش این طول، تغییرات درجهٔ تحکیم به مقدار ۳/۱ درصد می‌رسد. به‌عبارت دیگر حداکثر طول بهینه زهکش‌های پیش‌ساخته در محل خاکریزهای EM-2B تقریباً معادل ۳۰ متر و هم‌چنین برای خاکریز EM-3 این عمق بهینه زهکش‌ها عمقی معادل ۳۲ متر توصیه می‌شود.

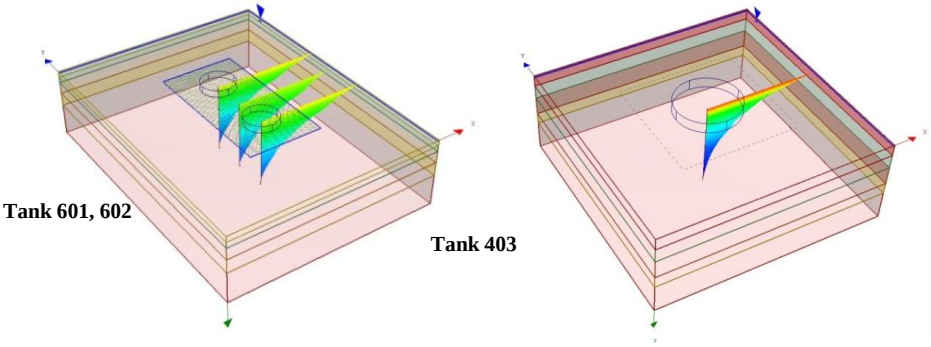


شکل ۲۳. الف) نمودار تغییرات طول زهکش‌ها در خاکریزهای EM-2B و EM-3، ب) نمودار تغییرات فاصله زهکش‌ها در خاکریزهای EM-2B و EM-3 (نرم افزار Settle 3D)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

پیش‌بینی نشست مخازن نفت پس از اتمام عملیات پیش‌بارگذاری

در این بخش پس از به‌دست آوردن پارامترهای اصلاح شده حاصل از آنالیز برگشتی به مدل‌سازی مخازن نفت و قرارگیری آن‌ها بر خاک منطقهٔ مذکور به‌منظور پیش‌بینی نشست‌های احتمالی پس از ساخت مخازن نفت می‌پردازیم. قطر مخزن Tank 403 واقع بر ناحیه سه ژئوتکنیکی و خاکریز EM-2B معادل ۵۳/٦٤ متر بوده که وزنی معادل ۳۲۹٦۹ تن را به خاک وارد میکند. هم‌چنین برای مدل‌سازی مخازن Tank 601 و Tank 602 که روی ناحیهٔ دو ژئوتکنیکی و خاکریز EM-3 واقع شده‌اند، وزنی معادل ۱۰۷۳۲ تن برای هر مخزن و قطری معادل ۳٤/۱۳ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۲٤ تصویر مدل‌سازی مخازن در نرم‌افزار Settle 3D نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مخازن مذکور با استفاده از تعریف یک بار فشاری در نرم‌افزار مدل شده‌اند. شکل ۲۵ نشان‌گر نتایج میزان نشست خاک پس از اعمال بار مخازن در قبل و بعد از عملیات پیش‌بارگذاری است. با توجه به نمودار ۲۵ الف خاکریزی طی مدت ۱۰۸ روز ادامه پیدا کرده است و سپس در مدت زمان ۵۳ روز (زمان انتظار)، خاک واقع در زیر خاکریز EM-2B به ۹۵ درصد تحکیم رسیده است. در این مرحله نشست نهایی خاک ۱۲۲/۲ سانتی‌متر است و فشار آب منفذی اضافه به حداقل خود رسیده است که این موضوع نشان‌گر پایان زمان تحکیم خاک است.

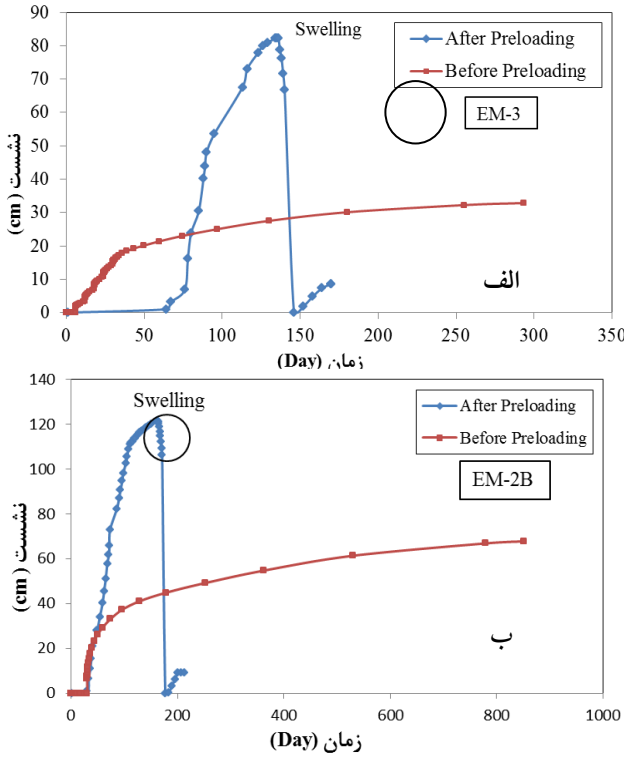


شکل ۲٤. مدل‌سازی مخازن Tank 403 و Tank 601 و Tank 602 در برنامه Settle 3D

لازم به ذکر است که در مراحل مدل‌سازی علاوه بر خاکریزی، خاک‌برداری خاکریزها به‌صورت باربرداری در مدل عددی انجام شده تا شرایط واقعی پروژه به‌طور مناسبی شبیه‌سازی شوند. مطابق شکل ۲۵ الف، در این مرحله خاک به مقدار کمی دچار تورم شده و با

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

برداشتن خاکریزها از مقدار نشست نهایی کاسته شده و پس از برداشتن کل خاکریز (EM-2B) میزان نشست خاک به مقدار ۱۰۲ سانتی‌متر رسیده است که این موضوع بیان‌گر تورم خاک پس از برداشتن خاکریز است. پس جمع‌آوری 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 می‌پردازیم پس از ساخت مخزن یاد شده در مدت زمان ۳۰ روز و قرارگیری آن روی خاک به‌سازی شده، میزان نشست خاک پس از رسیدن به زمان تحکیم نهایی در نرم‌افزار Settle 3D به ۹/۱۱ سانتی‌متر رسیده است. هم‌چنین برای خاکریزEM-3 (شکل ۲۵ ب) خاکریزی طی مدت ۱۲۳ روز ادامه پیدا کرده و پس از گذشت ۱۱ روز (زمان انتظار)، خاک واقع در زیر خاکریز EM-3 به ۹۵ درصد تحکیم خود رسیده است.



شکل ۲۵. نمودار نشست خاک قبل و بعد از پیش بارگذاری خاکریزهای الف) EM-2B ب) EM-3 در نرم افزار Settle 3D

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

در این مرحله نشست نهایی خاک ۸۵/۲ سانتی‌متر است و فشار آب منفذی اضافه به حداقل خود می‌رسد. پس از برداشتن کل خاکریز میزان نشست خاک به مقدار ۷۰ سانتی‌متر می‌رسد که این اختلاف ناشی از تورم خاک در اثر باربرداری است. پس جمع‌آوری خاکریز (EM-3) و پایان تورم نهایی خاک، به مدل‌سازی نشست خاک پس از قرار گیری مخازن Tank 601 و Tank 602، می‌پردازیم. چنان‌که مشخص است پس از ساخت مخازن در مدت زمان ۳۰ روز، میزان نشست به ۹/۹٦ سانتی‌متر پس از رسیدن به زمان تحکیم نهایی می‌رسد که نشان‌گر رفتار پیش تحکیمی خاک است.

هم‌چنین با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل ۲۵، مشاهده می‌شود که نشست خاک قبل از عملیات به‌سازی در صورت ساخت مخزن Tank 403، پس از گذشت زمان تحکیمی برابر ٦۷/۸٤ سانتی‌متر و در صورت ساخت مخازن Tank 601 و Tank 602 معادل ۳۲/۷ سانتی‌متر ایجاد می‌شود که این مقدار نشست موجب بروز مشکلات فراوان در بهره‌برداری و نیز ایجاد خسارت‌های جبران ناپذیری در این‌گونه مخازن می‌گردد. از این رو، مطابق با نتایج حاصل، نیاز به به‌سازی خاک و استفاده از سیستم پیش‌بارگذاری تأثیر به‌سزایی در کاهش میزان نشست‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها در حین بهره‌برداری دارد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل‌سازی عددی عملیات به‌سازی خاک به‌روش پیش‌بارگذاری با خاکریز به‌همراه با زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (PVD) در پروژهٔ انبار نفت ماهشهر (مطالعه موردی) می‌پردازیم. به‌منظور مدل‌سازی روند عملیات پیش‌بارگذاری و مقایسهٔ آن‌ها با نتایج ابزارگذاری از نرم‌افزار تفاضل محدود Settle 3D استفاده می‌شود. نتایج نشست‌های مدل عددی با مقادیر نتایج ابزار دقیق کالیبره شده است و با استفاده از آنالیز برگشتی داده‌های ابزار دقیق، پارامترهای صحیح نشست تحکیمی تأثیرگذار خاک به‌دست آمد. هم‌چنین میزان نشست خاک قبل و بعد از پیش‌بارگذاری در اثر احداث مخازن نفت با یک‌دیگر مقایسه شدند. از جمله نتایج به‌دست آمده در این پژوهش می‌توان به این موارد اشاره کرد:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

۱. مقادیر نشست ثبت شده با استفاده از ابزارگذاری در مرکز خاکریزهای EM-2B و EM-3 به‌ترتیب برابر ۱۲۲/۲ و ۸۵/۲ سانتی‌متر است در صورتی که مقدار نشست محاسباتی اولیه بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی در مرکز خاکریز EM-2B، برابر ۱۳۲سانتی‌متر و در مرکز خاکریز EM-3، معادل ۱٤۱سانتی‌متر به‌دست آمده که نشان از محافظه‌کارانه بودن مقادیر پارامترهای خاک و به‌دنبال آن میزان نشست محاسباتی نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده اولیه است.

۲. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و آنالیز برگشتی، پارامتر C_f (نسبت نفوذپذیری خاک در محل به نفوذپذیری آزمایشگاه) برای خاکریزهای EM-2B و EM-3 به‌ترتیب در حدود نه و هفده برابر بیش‌تر از ضریب نفوذپذیری به‌دست 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 پیش تحکیمی خاک (Pc) برمبنای نتایج به‌دست آمده از آنالیز معکوس مقادیر متفاوتی نسبت به پارامترهای اولیه طراحی دارند. این موضوع در پژوهش‌های برگادو و همکارانش [۱۲]، شن و همکاران [۱٦] و لام و همکاران [۱۷] نیز ذکر شده است.

۳. با توجه به نتایج بررسی‌های پارامتریک می‌توان به این موضوع پی برد که با دو برابر کردن فاصله زهکش‌ها حداکثر ۰/۹ درصد تغییر در درجه تحکیم ایجاد می‌شود که می‌توان در پروژه‌های آتی و ساخت و طراحی خاکریزهای بعدی با مدنظر قرار دادن این موضوع فاصلهٔ زهکش‌ها را افزایش داد تا هزینه‌های اقتصادی آن‌ها کاهش یابد. از طرفی با افزایش طول (عمق) زهکش‌ها تا عمق حدود ۳۰ متری در محل خاکریزها، تغییرات درجه تحکیم چشم‌گیر است و با افزایش این طول، تغییرات درجه تحکیم به مقدار ۳/۱ درصد می‌رسد. این نتیجه در پژوهش‌های کاسکون و بیوندی [۱۱] و چن و همکاران [۱۳] نیز مشاهده می‌شود. آن‌ها نشان دادند که افزایش طول بیش‌تر زهکش‌ها تا حد مشخصی می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در درجهٔ تحکیم خاک داشته باشد.

۴. شبیه‌سازی عددی مخازن نفت در محل خاکریزها نشان می‌دهد که نشست خاک قبل از عملیات به‌سازی در صورت ساخت مخزن Tank 403 (در محل خاکریز EM-2B) و پس از گذشت زمان تحکیمی برابر ٦۷/۸٤ سانتی‌متر و در صورت ساخت مخازن Tank 601 و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

Tank 602 (در محل خاکریز EM-3) معادل ۳۲/۷ سانتی‌متر ایجاد می‌شود که بعد از عملیات پیش‌بارگذاری و قرارگیری مخازن این نشست به‌ترتیب به ۹/۱۱ و ۹/۹٦ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. این موضوع در پژوهش‌های کاسکون و بیوندی [۱۲] با اندازه‌گیری نشست‌های حاصل از ساخت مخزن تحت آزمایش‌های هیدرواستاتیک با آب ارائه شده است. در واقع بررسی‌های آن‌ها حاکی از عملکرد موفقیت‌آمیز استفاده از عملیات به‌سازی خاک با استفاده از سیستم پیش‌بارگذاری در کاهش میزان نشست‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها به‌خصوص در پروژه‌ها با مقیاس بزرگ واقع در خاک‌های ریزدانه نرم بوده است.

۵. اطمینان به پارامترهای اولیه خاک به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و صحرایی منجر به خطاهای بزرگی در طراحی و پیش‌بینی اجرای مابقی خاکریزها می‌شود. از این رو، استفاده از ابزارگذاری و تجزیه و تحلیل نتایج آن تجربه‌ای مؤثر برای اجتناب از این نوع خطاها در ادامهٔ روند انجام پروژه‌های به‌سازی خاک به‌روش پیش‌بارگذاری دارد.

۶. در انتها باید یادآوری کرد با توجه به عدم‌قطعیت‌های موجود در تعیین پارامترهای خاک حاصل از نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی به‌خصوص آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی، به‌منظور کاهش خطاها در روند طراحی و اجرای پروژه‌های به‌سازی خاک به‌روش پیش‌بارگذاری با خاکریز، استفاده از ابزارگذاری و انجام آنالیزهای معکوس با مدل‌های تحلیلی و عددی امری ضروری در کاهش هزینه‌ها و زمان‌بندی پروژه‌های مشابه *است*.

قدردانی

بدین‌وسیله از مؤسسه مهندسان مشاور ساحل برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مربوط برای این پژوهش تقدیر و تشکر می‌کنیم.

منابع

۱. استاماتوپولوس، آریس و پاناگیوتیس، کوتزییاس. "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 (1986).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

3. Bhushan K., Carlos V., Saaty R., "Soil Improvement by Precompression at a Tank Farm Site in Central Java, Indonesia", Journal of Geotechnical Engineering (2000).

4. Indraratna B., Redana I. W., "Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation", J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol. 125, No. 1, (1998) 96-99.

5. Indraratna B., Rujikiatkamjorn C., Sathananthan I., Shahin M., 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 (2005) 55-86.

6. Sathananthan I., Indraratna B., "Laboratory Evaluation of Smear Zone and Correlation between Permeability and Moisture Content", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE), 132 (7) (2006) 942-945.

7. Rujikiatkamjorn Ch., Indraratna B., Chu J., "Numerical Modelling of Soft Soil Stabilized by Vertical Drains, Combining Surcharge and Vacuum Preloading for A Storage Yard", Can. Geotech. J, 44 (3) (2007) 326-342.

8. Saowapakpiboon J., Bergado D.T., 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, 28 (1) (2010) 1-11.

9. Dhar A. S., Siddique A., Amen S. F., "Ground Improvement using Preloading with Prefabricated Vertical Drains", International Journal of Geoengineering Case Histories, 2 (2) (2011) 86.

10. Tedjakusuma B. "Application of Prefabricated Vertical Drain in Soil Improvement", Civil Engineering Dimension, 14 (1) (2012) 51-56.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]

11. Cascone E., Biondi G., "A Case Study on Soil Settlements Induced by Preloading and Vertical Drains", Geotextiles and Geomembranes, 38 (2013) 51-67.

12. 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, 42 (5) (2014) 457-467.

13. Chen J., Shen S., Yin Z. Y., Xu Y. S., Horpibulsuk S., "Evaluation of Effective Depth of PVD Improvement in Soft Clay Deposit: A Field Case Study", Marine Georesources & Geotechnology (2016) DOI: 10.1080/1064119X.2015.1016638.

14. Carillo N., "Simple Two-and Three Dimentional Cases in The Theory of Consolidation of soils", Journal of Mathematics and Physics, 21 (1) (1942) 1-5.

15. Das B. M., "Advanced Soil Mechanics", 2nd edition. Taylor & Francis Inc (1997).

16. Shen S. L., Chaib J. C., Hongc Z. S., Cai F. X., "Analysis of Field Performance of Embankments on Soft Clay Deposit with and without PVD-improvement", Geotextiles and Geomembranes, 23 (6) (2005) 463-485.

17. Lam L G., Bergado D T., Hino T., "PVD Improvement of Soft Bangkok Clay with and without Vacuum Preloading using Analytical and Numerical Analyses", Geotextiles and Geomembranes, 43 (6) (2015) 547-557.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.247]