بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدل سازی عددی زهکش‌های پیش‌ساخته قائم به همراه روش پیش‌بارگذاری و زهکشی خلاء جهت بهسازی خاک‌های ریزدانه

نگارنده: علی بنار

استاد راهنما:

دکتر محسن کرامتی

مرداد ۱۴۰۰

شماره: ت ت ع / ۵۱۳
تاریخ: ۴۰۰/۶/۸
ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علی بنار با شماره دانشجویی ۹۷۰۳۷۵۴ رشته عمران گرایش ژئوتکنیک تحت مدل سازی عددی زهکش‌های پیش‌ساخته قائم به همراه روش پیش‌بارگذاری و زهکشی خلاء جهت بهسازی خاک‌های ریزدانه که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۰۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۸ ■
ج) درجه خوب: نمره۱۷/۹۹– ۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ■ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استاد راهنمای اول	دکتر محسن کرامتی	استادیار	
۴- استاد داور اول	دکتر امیر بذرافشان مقدم	استادیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر فهیمه رفیعی	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر ابراهیم زمانی بیدختی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی شاهرود

ت

تقدیم به وجود مقدس پدر ومادر عزیزتر از جانم، آنان که ناتوان شدند تا من به توانایی برسم. مو، سپید کردند تا من روسفید شوم و قامتشان خمیده شد تا من سربلند بمانم. به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودتان که در سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است و به پاس محبت‌های بی دریغتان که هرگز فروکش نمی‌کند این مجموعه را به شما تقدیم می‌کنم.

و همچنین تقدیم به برادر عزیزم که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و تکیه‌گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودش مایه دلگرمی من می‌باشد.

این مجموعه را به خانواده عزیزم تقدیم می‌کنم...

تشکر و قدردانی:

از استاد ارجمند و بزرگوارم جناب آقای دکتر محسن کرامتی که هدف و انگیزه این پروژه را در بنده ایجاد کردند کمال قدردانی را دارم. تلاش‌های بی‌دریغشان همواره شامل حال اینجانب بوده است. برای ایشان آرزوی سلامتی، سعادت و توفیق روز افزون از خداوند متعال خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب علی بنار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه (مدل سازی عددی زهکش‌های پیش‌ساخته قائم به همراه روش پیش‌بارگذاری و زهکشی خلاء جهت بهسازی خاک‌های ریزدانه) تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محسن کرامتی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

چکیده

به طور کلی ایمنی هر سازه‌ای که بر روی خاک ساخته شده به مقاومت و شرایط هیدرولیکی خاک زیرسطحی موردنظر وابسته است. بدین صورت که با افزایش تراز آب زیرزمینی در خاک، فشار آب منفذی اضافی ناشی از بارگذاری سازه افزایش و مقاومت خاک کاهش یافته که منجر به ناپایداری شده است. نشست ناشی از بارگذاری به عنوان عاملی برای پایش پایداری مدنظر بوده که از دو مرحله تشکیل شده، بخشی از نشست در هنگام بارگذاری رخ داده (نشست آنی) و بخشی از آن پس از بارگذاری در دراز مدت رخ داده (نشست تحکیمی) و بر حسب شرایط موجود زمان آن از چند روز تا چندین سال نیز ممکن است به طول بیانجامد، به عنوان مثال در صورتی که خاک زیرسطحی شامل خاک اشباع رسی باشد، نشست خاک در این مرحله به اتمام نرسیده و ممکن است تا مدت‌ها پس از بهره برداری سازه نیز ادامه یابد. روش‌های رایج که برای زهکشی آب زیرزمینی و به دنبال آن افزایش نرخ نشست تحکیمی به کار گرفته شده شامل ستون سنگی (ستون شنی) و احداث خاکریز است. در سال‌های گذشته با استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته به همراه ساخت خاکریز به عنوان پیش‌بارگذاری سرعت زهکشی و نرخ نشست تحکیمی افزایش یافته است. با گذشت زمان با اعمال خلاء در زهکش‌های قائم پیش ساخته به فرآیند تحکیم سرعت بیشتری بخشیده شده است. در این پژوهش به منظور بررسی اثر جنس خاک بستر بر انتخاب روش بهسازی (خاکریز، خاکریز به همراه زهکش قائم پیش ساخته، زهکش قائم پیش ساخته به همراه خلاء، خاکریز به همراه زهکش قائم پیش ساخته و خلاء) از مدلسازی عددی با نرم افزار پلکسیس استفاده شده است. چهار نوع زمین به منظور بررسی اثر جنس خاک در نظر گرفته شده که در هر نوع یک روش بهسازی بهینه معرفی شده است. نتایج حاصله نشان داد که جنس خاک تأثیر بسزایی بر تعیین روش بهسازی خاک دارد، به طوری که در زمین نوع یک روش پیش بارگذاری خاکریز، در زمین نوع دو روش پیش بارگذاری خاکریز به همراه زهکش قائم پیش ساخته، در زمین نوع سه روش پیش بارگذاری فشار خلاء به همراه زهکش قائم پیش‌ساخته و در زمین نوع چهار روش‌های پیش بارگذاری خاکریز و فشار خلاء به صورت توأماً همراه با زهکش قائم پیش‌ساخته، موثرترین روش بهسازی بوده، که میزان کاهش زمان در فرآیند بهسازی زمین‌های نوع ۲، ۳ و ۴ نسبت به حالتی که خاکریز استفاده شده، به ترتیب ۸۹/۴، ۹۹/۷۱، ۹۹/۲ درصد بوده است.

واژه‌های کلیدی: زهکش قائم پیش‌ساخته، پیش بارگذاری، فشار خلاء، نشست تحکیمی، مدلسازی عددی

فهرست مطالب

فهرست اشکال

فهرست جداول

فصل ۱:

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

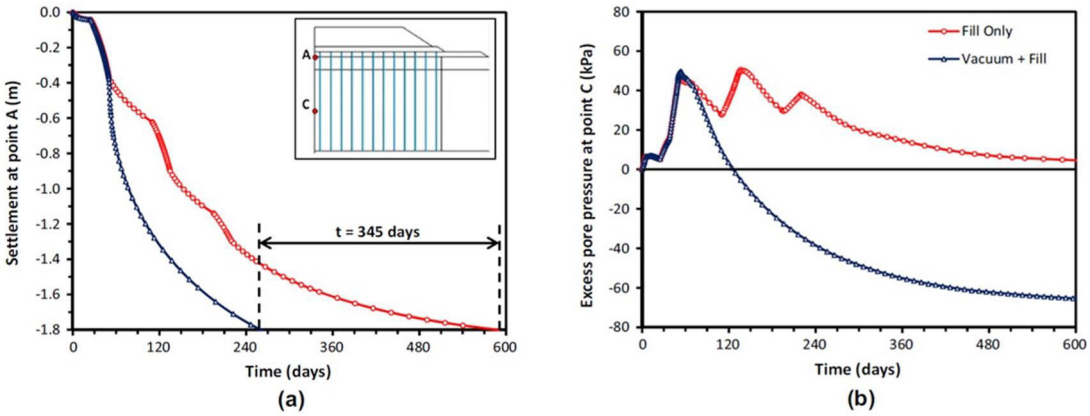
افزایش جمعیت و گسترش شهرها، ایجاد محل اقامت جدید و پیشرفت صنعت و تکنولوژی نیاز بشر را به استفاده هرچه بهینه تر از زمین برای ایجاد تاسیسات و راه ها و کارخانه جات افزایش داده است. همچنین مهندسان نیز برای ساختن ساختمان، زیرساخت ها و ساختارهای دیگر به دلیل کمبود زمین به محل هایی که حاوی خاک های نرم تراکم پذیر است مواجه می باشند[۱]. از طرفی با توجه به محدودیت زمین های مرغوب در اطراف شهرها و مراکز صنعتی امکان استفاده از زمین های نامرغوب مورد توجه قرار گرفته است. نهشته های خاکی نرم مقاومت برشی کم، تراکم پذیری بالا و هدایت هیدرولیکی کمی دارند[۲]. در خاک‌های اشباع مثل رس یا رس سیلتی که حفره‌های آن‌ها از آب پر شده است در یک دوره طولانی از زمان، نشست‌های بزرگ اتفاق می‌افتد. در طول این فرآیند که تحکیم نامیده می‌شود بار به تدریج به ذرات خاک انتقال یافته، حجم حفره‌ها را کاهش می‌دهد و به صورت نشست نمایان می‌شود. تحکیم در خاک های اشباع و ریزدانه خیلی آهسته اتفاق می افتد چون نفوذپذیری کم این خاک‌ها مانع فرار آب از حفره های خاک می‌شود و حتی تحت بارهای اضافی موقت نشست سال‌های زیادی طول می‌کشد، زیرا حرکت آب کند است و آب باید برای خروج از خاک فاصله زیادی را طی کند. با توجه به نشست بلند مدت و غیرقابل پیش بینی این خاک‌ها، بدون بهسازی این خاک‌ها ساخت و ساز روی آن‌ها غیر عملی است[۱]. در چنین مواردی لازم است که قبل از ساختن هرگونه سازهای بر روی آن‌ها، خاک‌های نرم تراکم پذیر بهبود یابند. در این مناطق خاک‌های سست (خاک‌های رسی) به دلیل نفوذپذیری بسیار کم و اشباع بودن، در هنگام احداث سازه‌ها، بستر خاکی باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل نشست بیش از حد و افزایش فشار آب حفره‌ای اضافی می‌شود. برای این که بتوان از این زمین‌های ناکارامد استفاده کرد، از روش پیش‌بارگذاری (فشار خلاء – خاکریز) استفاده می‌شود. پیش‌بارگذاری توسط خلاء یک روش بهسازی برای زمین‌هایی با خاک نرم است که توسط مهندسان و متخصصان ژئوتکنیک برای سرعت بخشیدن به نرخ تحکیم و برطرف کردن مسئله ناپایداری با استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته در طول پیش بارگذاری به کمک اعمال خاکریز، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است[۳].

۱-۲- بیان مسئله و اهمیت موضوع

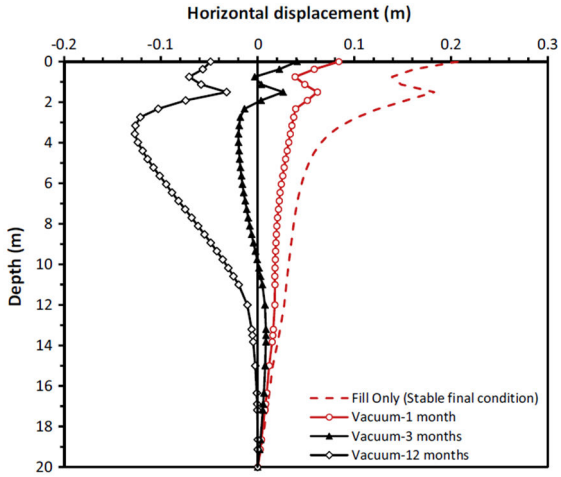
یکی از معضلات ساخت سازه‌ها بر روی زمین‌های سست ایجاد نشست است که موجب ترک یا کج شدن سازه می‌گردد. به عنوان مثال برج پیزا در کشور ایتالیا، همان طور که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود به دلیل وجود لنز رسی در عمق، سازه دچار نشست نامتقارن شده است. برای جلوگیری از این اتفاق‌ها می‌توان از روش پیش بارگذاری استفاده کرد. با استفاده از پیش بارگذاری می‌توان نسبت خلاء خاک را از طریق تحکیم (یعنی اتلاف فشار آب حفره‌ای اضافی) کاهش داد سپس سازه اصلی ساخته شود. اما همان طور که در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است روش پیش بارگذاری با استفاده از خاکریز بسیار زمان بر است به همین سبب می‌توان از فشار خلاء[1] هم استفاده کرد. در پیش بارگذاری خلاء امکان خرابی وجود ندارد. فشار خلاء در امتداد زهکش‌های قائم، گرادیان هیدرولیکی شعاعی را به سمت زهکش افزایش می‌دهد، که تحکیم با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد و خطر شکست برشی را به حداقل می‌رساند. همچنین روش پیش‌بارگذاری خلاء از لحاظ میزان زمان لازم برای فرآیند تحکیم و هزینه اجرا مقرون به صرفه‌تر است. استفاده از فشار خلاء به صورت جداگانه یا به همراه خاکریز باعث می‌شود تا از جابجایی جانبی بیش از حد جلوگیری شود، همان طور که در شکل (۱-۳) و (۱-۴) نشان داده شده است به ترتیب با ساخت مرحله‌ای خاکریز سپس اعمال فشار خلاء و ساخت مرحله‌ای خاکریز به همراه فشار خلاء، فشار جانبی به حداقل رسیده است. با توجه به شکل (۱-۳) اعمال خلاء باعث می‌شود تا فشار آب حفره‌ای اضافی به سرعت نازل شده اما مادامی که از خاکریز استفاده شود فشار آب حفره‌ای اضافی در هر گام بارگذاری افزایش می‌یابد و با سرعت بسیار کمی فشار آب حفره‌ای اضافی زائل می‌شود[۴]. به همین سبب پیشنهاد می‌گردد از تکنولوژی فشار خلاء استفاده گردد.

[1] Vacuum Pressure

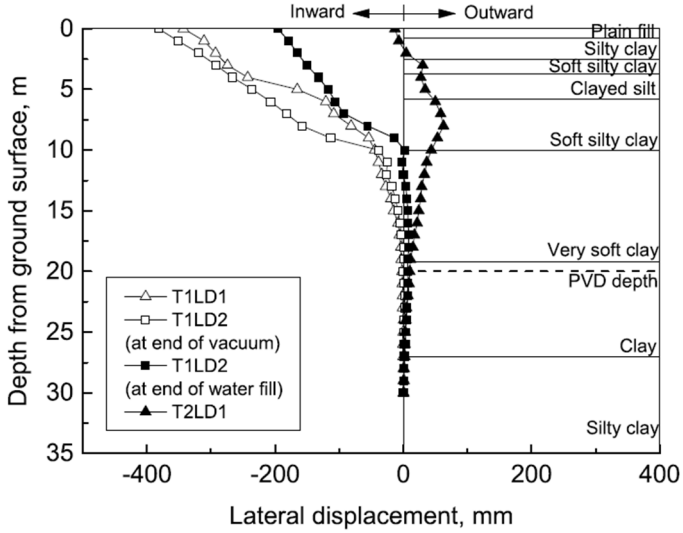
شکل (۱-۱) برج پیزا، رخ دادن نشست به علت عدم بهسازی خاک بستر



شکل (۱-۲) مقایسه بهسازی توسط خاکریز تک و خاکریز به همراه فشار خلاء [۵]



شکل (۱-۳) پروفیل جابجایی‌های جانبی در پنجه خاکریز دایره ای [۵]



شکل (۱-۴) جابجایی جانبی نواحی مورد آزمایش [۴]

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با افزایش جمعیت و در پی آن گسترش شهرها سبب می‌شود تا از زمین‌هایی با خاک سست به خصوص خاک‌های مناطق ساحلی بهسازی شوند تا بتوان حداکثر استفاده را از زمین‌های مسئله دار کرد. زمین‌های با خاک سست به دلیل قابلیت فشردگی بالا و ظرفیت باربری بسیار کم می‌بایست قبل از احداث سازه اصلی با استفاده از روش‌های بهسازی مقدار نشست بعد از ساخت سازه اصلی را به حداقل رساند. امروزه با استفاده از روش پیش‌بارگذاری توسط خاکریز و یا فشار خلاء به صورت جداگانه و تواماً می‌توان خاک‌ها را بهسازی کرد اما در هر پروژه با توجه به زمان مورد نیاز انجام پروژه و میزان تخصیص بودجه و نوع خاک بستر می‌تواند در انتخاب روش بهسازی تأثیر چشم‌گیری داشته باشد. در این تحقیق به میزان اهمیت نوع خاک بستر در انتخاب روش‌های بهسازی پرداخته می‌شود.

۱-۴- اهداف تحقیق

در این تحقیق هدف بررسی و مقایسه چهار روش برای بهسازی به واسطه پیش‌بارگذاری خاکریز تک، خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته[2]، خلاء و تاثیر خلاء و خاکریز به صورت همزمان است. با توجه به اینکه اعمال خاکریز از نظر زمان اجرا و افزایش هزینه به دلیل تطویل اجرا پروژه مقدار چشم گیری به خودش اختصاص داده است می‌توان با اجرای زهکش‌های قائم پیش ساخته به همراه خلاء هزینه تطویل اجرا پروژه و زمان پروژه را به کمترین مقدار رساند. همچنین گاهی مواقع به دلیل لجنی بودن جنس خاک بستر امکان اجرای خاکریز وجود ندارد و در این مواقع اجرای زهکش به همراه خلاء پیشنهاد می‌گردد.

۱-۵- روش تحقیق :

با توجه به ادبیات فنی در زمینه بهسازی بستر به وسیله زهکش‌های قائم پیش ساخته و پیش بارگذاری (خاکریز – فشار خلاء) نشان می‌دهد که جنس خاک بستر در انتخاب روش بهسازی بسیار مؤثر بوده بنابراین در این تحقیق جهت شبیه سازی زهکش‌های قائم، فشار خلاء و سربار خاکریز به چهار روش بهسازی (خاکریز تک – خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته – فشار خلاء به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته – خاکریز و فشار خلاء به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته) در چهار تیپ زمین مختلف و میزان تأثیر در هر جنس خاک از نرم افزار پلکسیس دو بعدی ورژن ۲۰.۰۴ استفاده شده است. جهت صحت سنجی این نرم افزار از پروژه دیوار خاک مسلح به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته در شانگهای چین استفاده شد.

[2] Prefabricated vertical drain

۱-۶- ساختار تحقیق :

در فصل یک توضیح مختصری از روش پیش بارگذاری، ضرورت انجام تحقیق و اهداف تحقیق بیان گردیده است. در فصل دوم به تحقیقات انجام شده در زمینه روش پیش‌بارگذاری توسط خاکریز و خلاء و همچنین زهکش‌های قائم پیش ساخته اشاره شده است. در فصل سوم مبانی تحکیم بیان شده و سپس تاریخچه‌ای از زهکش‌های قائم، انواع زهکش‌های قائم و نحوه اجرا آن مطرح شده است. در فصل چهارم مشخصات مدل و نتایج صحت سنجی عنوان شده و نحوه مدلسازی بهسازی خاک به روش پیش‌بارگذاری خاکریز و پیش‌بارگذاری خلاء بیان شده و در انتها نتایج حاصل از مدلسازی آورده شده است. در فصل پنجم نتایج بدست آمده جمع بندی شده و پیشنهادات مربوط به ادامه تحقیقات در این زمینه ارائه شده است.

فصل ۲:

مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- مقدمه

روش‌های مدرن بهسازی زمین از دهه ۱۹۲۰ توسعه یافته است. به عنوان مثال، استفاده از زهکش‌های ماسه‌ای قائم برای تسریع در تحکیم خاک نرم ابتدا در سال ۱۹۲۵ پیشنهاد شد و سپس در سال ۱۹۲۶ توسط دانیل دی موران[۳] در ایالات متحده ثبت اختراع شد. پارچه پنبه‌ای توسط بخش بزرگراه کارولینای جنوبی در ایالات متحده برای ساخت راه در سال ۱۹۲۶ به عنوان تقویت کننده استفاده شد. اولین نوع زهکش قائم پیش ساخته توسط والتر کیلمن[۴] در سوئد در سال ۱۹۴۷ ساخته شد[۶]. در طول تاریخ بشریت استفاده از کاه به عنوان پر کننده مخلوط با خاک برای استحکام بیشتر در طول تمدن‌های روم باستان، و استفاده از فیل‌ها برای تراکم سدهای خاکی در تمدن‌های اولیه آسیا، مفاهیم زمین تقویت شده با ژئوسنتتیک، استفاده از الکتروکینتیک و تغییرات حرارتی خاک‌ها مسیری طولانی پیشرفت بهسازی را طی کرده‌اند. استفاده از ستون‌های سنگی بزرگ و سخت و زهکش‌های ماسه‌ای در گذشته و اکنون با نصب سریع تر و موثرتر زهکش‌های قائم پیش ساخته جایگزین شده است، که این امر همچنین نیاز به روش‌های گران قیمت بهسازی خاک را از بین می برد[۷]. خاک‌های نرم مانند ماسه و رس از ذرات ریز تشکیل شده و غالباً فضای منافذ بین ذرات از آب پر می‌شود. این حالت در مکانیک خاک به عنوان یک محیط متخلخل اشباع یا نیمه اشباع نشان داده می‌شود. تغییر شکل چنین محیط‌های متخلخل به سختی مواد متخلخل، همچنین به رفتار سیال در منافذ بستگی دارد. اگر نفوذپذیری مواد کم باشد، ممکن است از تغییر شکل به طور قابل توجهی توسط مایع منافذ جلوگیری شود، یا حداقل به تعویق بی‌افتد. تغییر شکل همزمان مواد متخلخل و جریان مایع منافذ، موضوع تئوری تحکیم است که اغلب به عنوان خاصیت تخلخل شناخته می‌شود. این تئوری در ابتدا توسط ترزاقی[۵] (۱۹۲۵) برای مورد یک بعدی ساخته شد و توسط بایوت[۶] (۱۹۴۱) به سه بعد گسترش یافت، و از آن زمان به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است[۸].

[3] Daniel D. Moran
[4] Walter Kjellman
[5] Terzaghi
[6] Biot

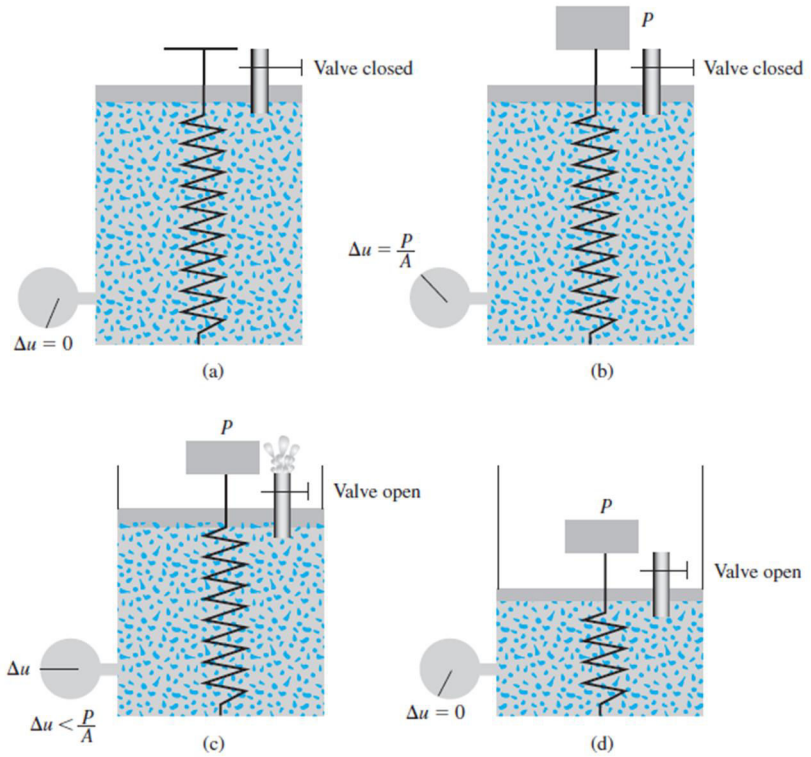
هنگامی که یک لایه خاک اشباع تحت اضافه تنش قرار بگیرد، فشار آب منفذی به طور ناگهانی افزایش می-یابد. در خاک‌های شنی- ماسه‌ای که بسیار نفوذپذیر هستند زهکشی ناشی از افزایش فشار آب منفذی بلافاصله رخ می‌دهد. زهکش شدن آب منفذی با کاهش حجم توده خاک همراه است که منجربه نشست می‌گردد. به دلیل سرعت بالای زهکشی فشار آب منفذی در خاک‌های شنی و ماسه‌ای نشست الاستیک و تحکیم به طور هم زمان رخ می‌دهد. مادامی که یک لایه خاک رس اشباع تحت اضافه تنش قرار بگیرد بلافاصله نشست الاستیک رخ می‌دهد، از آن جایی که ضریب نفوذپذیری خاک رس به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر از شن و ماسه است، فشار آب منفذی تولید شده توسط بارگذاری در خاک رس به تدریج در مدت طولانی زائل می‌شود و بعد از نشست الاستیک تغییرات حجم (تحکیم) در دراز مدت ادامه دارد و حتی مقدار نشست تحکیمی می‌تواند چندین برابر بیشتر از نشست الاستیک باشد. برای درک بهتر تغییر شکل در خاک رس اشباع می‌توان یک سیلندر به همراه یک فنر که درون سیلندر قرار دارد که در شکل (۲-۱) قابل مشاهده می‌باشد، در نظر گرفت. اگر باری بر روی پیستون قرار داده شود و شیر بسته نگه داشته شود، کل بار توسط آب موجود در سیلندر جذب می‌شود، زیرا آب غیر قابل تراکم است و فنر هیچ تغییر شکلی نمی‌دهد و فشار اضافی هیدرواستاتیک در این هنگام از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$\Delta u = \frac{P}{A} \qquad (۲-۱)$$

در مجموع می‌توان نوشت :

$$P = Ps + Pw \qquad (۲-۲)$$

Ps فشاری است که توسط فنر تحمل می‌شود و Pw فشاری است که توسط آب تحمل می‌شود.



شکل (۲-۱) مدل فنر و سیلندر [۹]

با توجه به شکل (۲-۱) (b) زمانی که شیر بسته است :

$$Ps = 0 \quad و \quad P = Pw \tag{۳-۲}$$

همچنین در شکل (۲-۱) (c) نشان داده شده است زمانی که شیر باز باشد فشار وارد شده از طرف پیستون باعث می‌شود تا آب از سیلندر خارج شود و با افزایش فشار، فنر داخل سیلندر دچار فشردگی و تغییر شکل می‌شود.

$$Ps > 0 \quad و \quad Pw < P \quad \rightarrow \quad \Delta u < \frac{P}{A} \tag{۴-۲}$$

در شکل (۲-۱) (d) با گذشت زمان فشار هیدرواستاتیک اضافی صفر می‌شود و سیستم به حالت تعادل می-رسد.

$$Ps = P \quad و \quad Pw = 0 \tag{۵-۲}$$

با این تفاسیر می‌توان کرنش یک لایه رس اشباع شده تحت افزایش تنش را تجزیه تحلیل نمود.

تنش کل شامل فشار آب حفره‌ای و تنش بین دانه‌های جامد خاک می‌شود.

$$\Delta\sigma = \Delta \tag{۶-۲}$$

رفتار تغییر تنش مؤثر (تنش بین دانه‌های جامد خاک) مانند فنر و رفتار تغییر فشار آب منفذی مانند فشار هیدرواستاتیک اضافی در شکل (۲-۱) خواهد بود.

۲-۲- مبانی تحکیم:

در خاک‌های درشت دانه در اثر اعمال سربار به علت ضریب نفوذپذیری بالای خاک، تمام سربار به تنش مؤثر افزوده می‌شود و هیچ گونه اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد نمی‌گردد. در خاک‌های ریزدانه رسی ضریب نفوذپذیری کم است به همین علت در صورتی که در سطح خاک سربار اعمال شود در کوتاه مدت خاک فرصت زهکشی ندارد و تمام سربار به فشار آب حفره‌ای تبدیل می‌شود. اما با گذشت زمان خاک فرصت زهکشی پیدا می‌کند، از فشار آب حفره‌ای کاسته شده و به تنش مؤثر اضافه می‌گردد[۹].

تئوری تحکیم بیشتر برای آنالیز تغییر شکل در موارد زیر مورد توجه قرار می‌گیرد:

الف) محیط‌های متخلخل

ب) مکانیک خاک و سنگ

ج) جریان متغیر آب و فرونشست ناشی از بازگردانی آب زیر زمینی

د) تخلیه مخازن گاز یا روغن[۱۰].

تئوری تحکیم یک بعدی ابتدا در سال ۱۹۲۳ توسط ترزاقی ارائه شد. در این تئوری فرض بر این است که خاک به صورت جانبی محدود شده است به طوری که فشار اضافی هیدرواستاتیک و کرنش هر دو به صورت عمودی تغییر می‌کنند[۱۱]. در سال ۱۹۲۵ این تئوری توسط وی توسعه یافت و به منظور مطالعه بر روی تغییر شکل ناشی از خروج آب از طریق منافذ در مصالح با نفوذپذیری کم (خاک رس) تحت بار فشاری مطرح شد. وی برای حالت یک بعدی بر اساس قانون دارسی برای جریان سیال از طریق یک محیط متخلخل و بیان مفهوم تنش مؤثر از دیدگاه خودش، پدیده تحکیم را به زبان ریاضی بیان کرد. او فهمید که در خاک نرم مانند خاک رس تغییر شکل‌ها ناشی از تنش‌های مؤثر است که از اختلاف تنش کل و فشار آب منفذی حاصل می‌شود[۸].

در عمل مهندسی خاکی که تحت بارگذاری قرار بگیرد تغییر شکل فوری تحت آن بار اصلا در نظر گرفته نمی‌شود. اما به مرور زمان نشست با نرخ متغیر رخ می‌دهد. این نشست به دلیل سازگار شدن خاک با بارگذاری به صورت تدریجی رخ می‌دهد. به این فرآیند تحکیم گویند. مکانیسم ساده‌ای برای توصیف پدیده تحکیم برای اولین بار توسط ترزاقی ارائه شد. وی فرض کرده است که دانه‌ها یا ذرات تشکیل دهنده خاک کم و بیش توسط نیروهای مولکولی معین به یک دیگر متصل شده و ماده‌ای متخلخل با ویژگی الاستیک را تشکیل می‌دهند. یک مثال مناسب از چنین مدلی می‌توان به یک اسفنج لاستیکی اشباع شده از آب اشاره کرد. باری که به این سیستم وارد می‌شود، بسته به سرعت فشرده شدن و خارج شدن آب از حفره‌ها، نشست تدریجی رخ می‌دهد. محدودیت نظریه ترزاقی یک بعدی بودن مدل آن است[۱۲]. در اغلب مسائل واقعی بارگذاری سطحی سبب فشار آب منفذی اضافی می‌گردد که ممکن است هم به صورت افقی هم به صورت قائم تغییر کند. در نتیجه تحکیم از جریان سیال و کرنش در جهت افق و قائم ناشی می‌شود. به چنین تحکیمی تحکیم سه بعدی گفته می‌شود[۱۱].

تئوری تحکیم در سال ۱۹۴۱ توسط بایوت به حالت سه بعدی و مصالح کلی‌تر از جمله سنگ متخلخل تعمیم داده شد. تئوری اصلی تحکیم به رفتار تغییر شکل الاستیک محیط متخلخل محدود شده بود اما این محدودیت بعدا برداشته شد، خصوصا از زمان توسعه روش‌های عددی مدرن. اکنون مدل‌های رایانه‌ای در دسترس هستند که شامل مدل‌های واقع بینانه‌تری از رفتار خاک از جمله تغییر شکل پلاستیک و خزشی هستند[۱۰].

تحکیم محیط‌های متخلخل اشباع شده یکی از مهم‌ترین مشکلات مهندسی ژئوتکنیک است. به طور کلی تحکیم را می‌توان فرآیندی تعریف کرد که در آن فشار آب حفره‌ای از طریق یک اسکلت متخلخل پراکنده می‌شود و باعث ایجاد تغییراتی در وضعیت تنش می‌شود.

۲-۳- تئوری تحکیم غیرکوپل _ کوپل

تئوری تحکیم به دو دسته تقسیم می‌گردد:

۲-۳-۱- تئوری تحکیم غیرکوپل:

در این تئوری فرض بر این است که تنش کل در طول فرآیند تحکیم در همه جا ثابت باقی می‌ماند و کرنش-ها فقط در اثر تغییر فشار منافذ ایجاد می‌شوند.

۲-۳-۲- تئوری تحکیم کوپل بایوت:

در این تئوری اثر متقابل بین اسکلت جامد و آب حفره‌ای در فرمول بندی گنجانده شده است، که منجربه معادلات پیچیده تری برای حل می‌شود.

نمونه متداول استفاده از تحکیم سه بعدی، نصب زهکش‌های ماسه‌ای است. حالت تحکیم سه بعدی ترکیبی از زهکش شعاعی (دو بعدی) در صفحه‌ی افقی و زهکشی در راستای قائم (یک بعدی) است[۱۳].

۲-۴- زهکش‌های قائم

زهکش‌های قائم به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۲-۴-۱- زهکش‌های قائم ماسه‌ای:

مهندس آمریکایی، دی جی موران، برای اولین بار در سال ۱۹۲۵ تکنولوژی زهکش ماسه‌ای را برای بهبود زمین‌های سست ارائه داد[۶]. در گذشته استفاده از ستون‌های سنگی بزرگ و سخت[7] سپس استفاده از زهکش‌های ماسه‌ای[8] مرسوم بود. استفاده از زهکش‌های ماسه‌ای روشی مناسب برای سرعت بخشیدن به نشست تحکیمی لایه‌های رس نرم و دستیابی به پیش تحکیمی قبل از ساخت پی مورد نظر است. زهکش‌های ماسه‌ای با حفاری در لایه رسی در فواصل منظم ساخته می شود سپس گمانه‌ها با ماسه پر می-

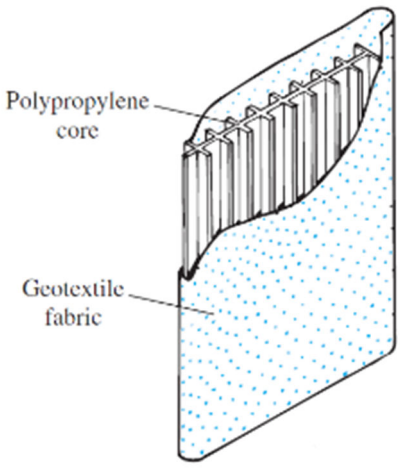
[7] stiff stone columns
[8] sand drains

شود. زهکش‌های ماسه‌ای را می‌توان با چندین روش اجرا کرد، مانند: الف) حفاری چرخشی و سپس پر کردن گمانه ایجاد شده با ماسه (ب) حفاری توسط اوگر مارپیچ و پر کردن گمانه از ماسه توسط غلاف (ج) با رانده شدن شمع های فولادی توخالی به داخل زمین، شمع از خاک زمین پر شده سپس خاک داخل شمع تخلیه می شود و پس از آن پر کردن ماسه انجام می شود. پس از پر کردن حفره غلاف از ماسه ، در سطح زمین سربار اعمال می شود. اعمال سربار باعث افزایش فشار آب منفذی در خاک رس می‌شود. فشار آب منفذی اضافی در خاک رس چه به صورت عمودی و چه به صورت شعاعی از طریق زهکش‌های ماسه‌ای زایل می‌گردد و در نتیجه تسریع در نشست لایه رس ایجاد می‌شود[۱۴]. زهکش ماسه‌ای باعث جابجایی هم در جهت قائم و هم در جهت افقی می‌شود. نصب زهکش‌های ماسه‌ای باعث دست خوردگی به خصوص در رس‌های نرم و حساس می‌شود که مقاومت برشی و نفوذپذیری افقی را کاهش می‌دهد.

۲-۴-۲- زهکش قائم پیش ساخته :

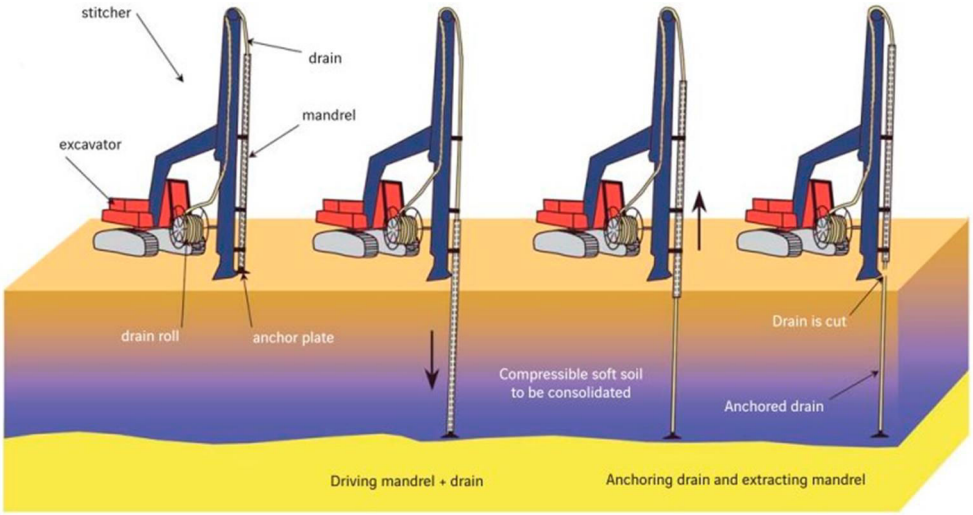
در اواخر دهه ۱۹۳۰، کیلمن در سوئد فناوری زهکش‌های عمودی نوار شکل پیش ساخته را توسعه داد، هر زهکش از یک هسته مقوایی و یک ژاکت فیلتر کاغذی ساخته شده بود. ژاکت فیلتر کاغذی بعداً با ژئوتکستایل غیربافته جایگزین شد[۶]. نصب زهکش قائم به فاصله بین زهکش‌ها و ظرفیت زهکش بستگی دارد[۱۵]. در کارهای بهسازی خاک، زهکش‌های قائم تنها به روند تحکیم اولیه لایه‌های زیرین سرعت می-بخشند و باعث کاهش تحکیم ثانویه نمی‌شوند[۱۶]. برای افزایش سرعت تحکیم در خاک‌های با نفوذپذیری بسیار کم و کوتاه شدن مسیر زهکشی، از زهکش‌های قائم پیش ساخته استفاده می‌شود[۱]. نصب زهکش‌های قائم باعث از بین رفتن فشار آب منفذی اضافی تولید شده در هنگام پیش بارگذاری می‌شود. جریان آب در خاک عمدتا در جهت افقی قرار دارد (به استثنای نزدیک سطح زمین یا نزدیک به درز لای و ماسه بسیار نفوذپذیر) به همین سبب نصب زهکش قائم بیشتر به روند زهکشی کمک می‌کند[۲]. زهکش عمودی پیش ساخته که به آن زهکش‌های فتیله‌ای یا نواری نیز گفته می‌شود، در اصل به عنوان جایگزینی مناسب برای زهکش‌های ماسه‌ای که معمولاً استفاده می‌شود، توسعه داده شد. با ظهور علم مواد، این زهکش‌ها از پلیمرهای مصنوعی مانند پلی پروپیلن و پلی اتیلن با چگالی بالا تولید می‌شوند. زهکش قائم

پیش ساخته به طور معمول با یک هسته مصنوعی کانال دار محصور در یک فیلتر ژئوتکستایل تولید می شود، همانطور که در شکل (۲-۲) به صورت شماتیک نشان داده شده است. نرخ نصب گزارش شده در منابع، به استثنای آماده سازی تجهیزات و زمان راه اندازی ، از ۰.۱ تا ۰.۳ متر بر ثانیه است. زهکش قائم پیش ساخته در گذشته به طور گسترده‌ای برای تحکیم مناسب خاک با نفوذپذیری کم به همراه سربار استفاده شده است. مزیت اصلی زهکش‌های قائم پیش ساخته نسبت به زهکش‌های ماسه‌ای این است که نیازی به حفاری ندارند. بنابراین، نصب بسیار سریع‌تر است[۱۴]. زهکش‌های قائم پیش ساخته معمولاً از یک هسته پلاستیکی (با فیلتر پارچه‌ای محافظت شده) با یک مجرا طولی تشکیل شده است. بیشترین اندازه زهکش‌های قائم پیش ساخته موجود در بازار دارای عرض بین ۹۰-۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۳-۷ میلی متر است[۱۷].



شکل (۲-۲) زهکش قائم پیش ساخته[۱۸]

زهکش‌های قائم به دو روش استاتیکی و دینامیکی نصب می‌شوند. در روش دینامیکی لوله فولادی با استفاده از چکش مرتعش به داخل خاک رانده می‌شود و در روش استاتیکی زهکش به همراه لوله فولادی داخل زمین رانده می‌شود. هر چند روش دینامیکی سریع‌تر است ولی باعث دست خوردگی بیشتر خاک پیرامون زهکش قائم در طول نصب می‌شود. شکل (۲-۳) مراحل نصب زهکش‌های قائم پیش ساخته را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳) مراحل اجرا و نصب زهکش قائم پیش ساخته پیش بارگذاری

۲-۴-۲-۲- مزایا استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته:

۱) افزایش مقاومت برشی خاک از طریق کاهش نسبت تخلخل و میزان رطوبت

۲) کاهش زمان پیش بارگذاری و به حداقل رساندن مقدار نشست پس از ساخت سازه اصلی

۳) کاهش نشست در طول تحکیم اولیه

۴) به حداقل رساندن ارتفاع خاکریز به منظور تامین فشار مورد نیاز عملیات پیش بارگذاری[۱۸].

۲-۴-۲-۳- علل کاهش ظرفیت تخلیه زهکش‌های قائم :

۱) افزایش فشار جانبی زمین

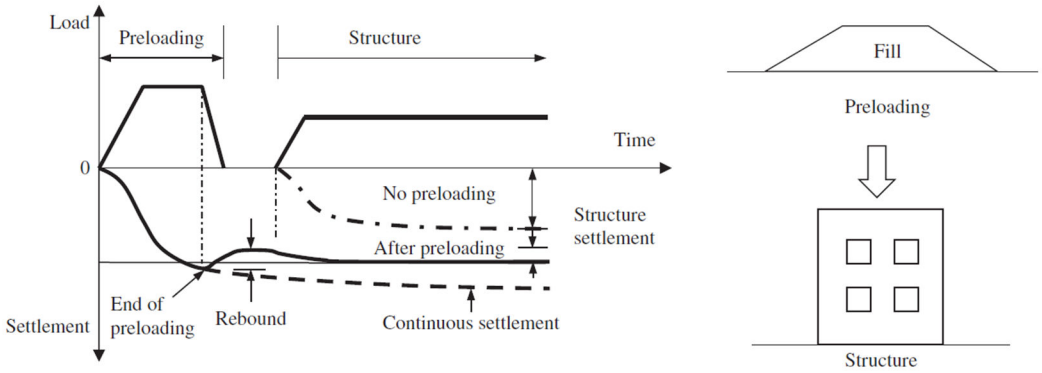
۲) تاشو و چین دار شدن زهکش به دلیل نشست بیش از حد

۳) نفوذ ذرات ریز رس و لای یا لجن از طریق فیلتر [۱۹].

۲-۵- پیش بارگذاری :

پیش بارگذاری در عمل یکی از روش‌های بهسازی سنتی زمین است که هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. مفهوم اساسی پیش بارگذاری کاهش نسبت خلاء (یعنی قابلیت انعطاف پذیری) خاک از طریق تحکیم (یعنی اتلاف فشار آب حفره‌ای اضافی) با اعمال بار روی سطح زمین برای مدت زمان مشخص و سپس حذف آن برای ساخت یک سازه دائمی است. شکل (۲-۴) پیش بارگذاری توسط خاکریز و به دنبال آن ساخت سازه دائمی را نشان می‌دهد. در هنگام پیش بارگذاری، نشست با بارگذاری و زمان افزایش می‌یابد. هنگامی که

خاکریز در پایان پیش بارگذاری حذف می‌شود، یک برگشت به وجود می‌آید. ساخت سازه دائمی به دلیل افزایش بار باعث نشست جدید می‌شود. با این حال، انتظار می‌رود که نشست ناشی از سازه دائمی پس از پیش بارگذاری بسیار کوچکتر از میزان بدون پیش بارگذاری باشد. شکل (۲-۴) نشست مداوم و بدون حذف پیش بارگذاری را نشان می‌دهد. تعیین زمان پایان پیش بارگذاری در طراحی مهم است. برای رس‌های نرم، به دلیل نفوذپذیری کم ممکن است مدت زمان بیشتری طول بکشد تا تحکیم رخ دهد. اگر زمان پیش بارگذاری و ساخت سازه بیش از زمان موجود باشد، می توان زهکش‌های عمودی را نصب کرد تا فاصله زهکشی را کاهش دهد، بنابراین سرعت تحکیم را افزایش می‌دهد و زمان تحکیم و نشست خاک را کاهش می‌دهد[۶]. پیش بارگذاری به طور کلی به دو نوع تقسیم می‌شود که در بند بعد مطرح می‌شود.



شکل (۲-۴) روند اجرای پیش بارگذاری و سربار سازه اصلی[۶]

۲-۵-۱- پیش بارگذاری توسط خاکریز :

ساده ترین روش برای پیش‌بارگذاری اعمال خاکریز می‌باشد. وقتی بار روی خاک نرم قرار داده می‌شود این بار ابتدا به آب داخل منافذ خاک وارد می‌شود. وقتی نفوذپذیری خاک بسیار پایین باشد، فشار آب منفذی اضافی با سرعت کم در جهت قائم جریان پیدا کرده و زائل می‌شود. برای جلوگیری از مشکلات پایداری مثل ایجاد لغزش صفحه‌ای، بار باید به صورت مرحله ای بارگذاری یا با استفاده از شبکه فولادی[۹]، مش سیم شش

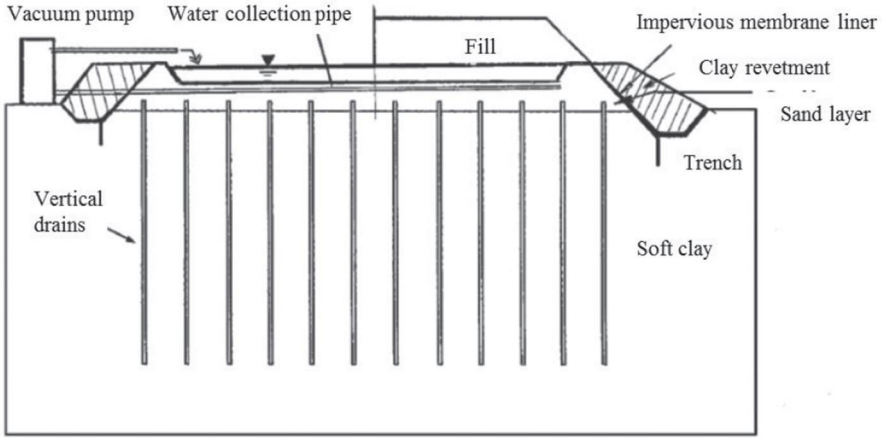
[9] steel grid

ضلعی[10]، ژئوگرید[11] خاکریز مسلح شود. این بارگذاری وقتی در بستر نشست مورد نیاز را ارضا کرد می‌تواند برداشته شود. خاکریزهای مورد استفاده در این روش به طور متوسط دارای ۱۰_۳ متر ارتفاع هستند و اغلب ۳_۱ متر نشست ایجاد می‌کنند.

۲-۵-۲- پیش بارگذاری توسط خلاء :

پیش بارگذاری با خاکریز نیاز به مقدار قابل توجهی خاک دارد. حمل و نقل خاک و خاکریزی کردن زمان بر است و هزینه زیادی دارد. گاهی اوقات، اعمال خاکریز باعث شکست و حرکت‌های بزرگ می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات، یکی دیگر از پیشرفت‌های مهم تکنولوژی پیش بارگذاری، ایده پیش بارگذاری توسط خلاء است که توسط کیلمن در سال ۱۹۵۲ ارائه شد. متفاوت از پیش بارگذاری توسط خاکریز، سیستم پیش بارگذاری توسط خلاء با استفاده از مکش داخل سیستم عایقی که داخل زمین نصب شده است استفاده می‌شود. شکل (۲-۵). سیستم پیش بارگذاری توسط خلاء معمولاً شامل پمپ خلاء، آستر غشایی غیر قابل نفوذ، لایه زهکش ماسه‌ای، لوله جمع آوری آب، زهکش‌های عمودی و ترانشه و پوشش رسی برای آب بند کردن و جلوگیری از تراوش است. هنگامی که فشار خلا کافی نیست، ممکن است از خاکریز هم به صورت تواما استفاده شود تا فشار پیش بارگذاری افزایش یابد[۶].

[10] hexagonal wire mesh
[11] geogrid



شکل (۲-۵) سیستم پیش بارگذاری توسط خلاء [۶]

بار اعمال شده در پیش بارگذاری می‌تواند اعمال سربار، فشار خلاء یا ترکیبی از سربار و فشار خلاء باشد. آب زهکش شده از زمین را می‌توان در مخازن ذخیره کرد و از آن به عنوان پیش بارگذاری استفاده کرد. فشار خلاء پس از اتمام پیش بارگذاری برداشته می‌شود در حالی که ممکن است سربار برداشته شود یا به عنوان بخشی از سازه اصلی روی زمین باقی بماند. سازه‌های دائمی پس از پیش بارگذاری احداث می‌شوند و انتظار می‌رود که بستر نشست کمی داشته باشد. رس‌های نرم معمولاً مقاومت برشی کمی دارند که ممکن است مقدار بار اعمالی را محدود کند. در چنین شرایطی، ساخت مرحل‌های برای افزایش بار مجاز مورد نیاز است. برای افزایش میزان نشست تحکیمی اولیه در هنگام پیش بارگذاری خلاء و به حداقل رساندن نشست ثانویه پس از پیش بارگذاری، می‌توان از سربار استفاده کرد. پیش بارگذاری معمولاً برای بهسازی خاک رس اشباع تراکم‌پذیر، لای و لجن با مقاومت کم، هنگامی که زمان انجام پروژه مد نظر نباشد مقرون به صرفه است، در صورت اهمیت زمان انجام پروژه، می‌توان از زهکش‌های قائم برای کاهش زمان پیش بارگذاری استفاده کرد. زهکش‌های قائم معمولاً تا عمق ۳۰ متری نصب می‌شوند (در بعضی از پروژه‌ها بیش از ۶۰ متر). پیش بارگذاری هنگامی مؤثر است که مقدار بارگذاری بیشتر از تنش پیش تحکیمی خاک باشد. اگر مصالح خاکریز ارزان یا به راحتی در دسترس باشد و یا به عنوان سازه دائمی باشد (مانند سد خاکی)، پیش بارگیری‌گذاری توسط خاکریز مناسب‌تر است. پیش بارگذاری خلاء برای مناطقی مناسب است که خاک مقاومت کافی برای تحمل بار تجهیزات ساخت و خاکریز به عنوان پیش‌بارگذاری را نداشته باشد یا مصالح خاکریزی گران است و به راحتی در دسترس نیست. حداکثر فشار وارد شده توسط پیش بارگذاری خلاء به فشار جو محدود می‌شود.

در شرایطی که فشار پیش بارگذاری بیشتر از فشار جو مورد نیاز باشد می‌توان از خاکریز هم به صورت تواماً استفاده کرد تا فشار پیش بارگذاری افزایش یابد. وقتی لایه‌های نفوذپذیری در نزدیکی سطح زمین وجود داشته باشند، ممکن است برای حفظ فشار خلاء مشکلاتی ایجاد شود. عدم نیاز به منابع قرضه مصالح، دوره ساخت کوتاه و عدم نیاز به تجهیزات سنگین از مزایای پیش بارگذاری به روش خلاء است[۶]. اعمال فشار خلاء می‌تواند مقدار خاکریز مورد نیاز برای نشست تحکیمی را کاهش دهد زیرا فشار خلاء سبب افزایش تنش مؤثر بین دانه‌های خاک و سرعت تحکیم می‌شود[۱۸].

۲-۶- خصوصیات زهکش

۲-۶-۱- قطر ناحیه نفوذ[۱۲]:

همانطور که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است، قطر معادل ناحیه نفوذ (De) را می‌توان به کمک فاصله زهکش (S) به شرح زیر یافت (هانسبو،۱۹۸۱):

برای زهکش‌های نصب شده با الگوی مربعی:

$$De = 1.13\ S \qquad (۲-۷)$$

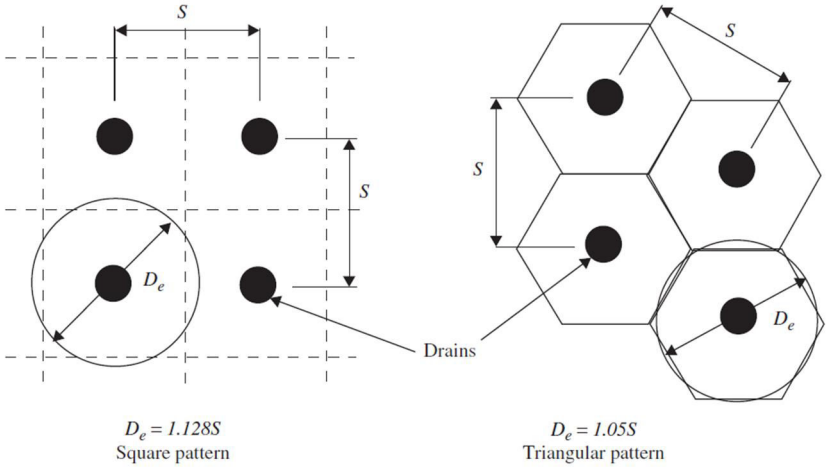
و

برای زهکش‌های نصب شده با الگوی مثلثی:

$$De = 1.05\ S \qquad (۲-۸)$$

پخش کردن زهکش‌ها در سطح سایت و پایش آن‌ها در یک الگوی مربعی ممکن است هنگام نصب در سایت آسان‌تر باشد اما یک الگوی مثلثی معمولاً تحکیم یکنواخت‌تری را بین زهکش‌ها ایجاد می‌کند.

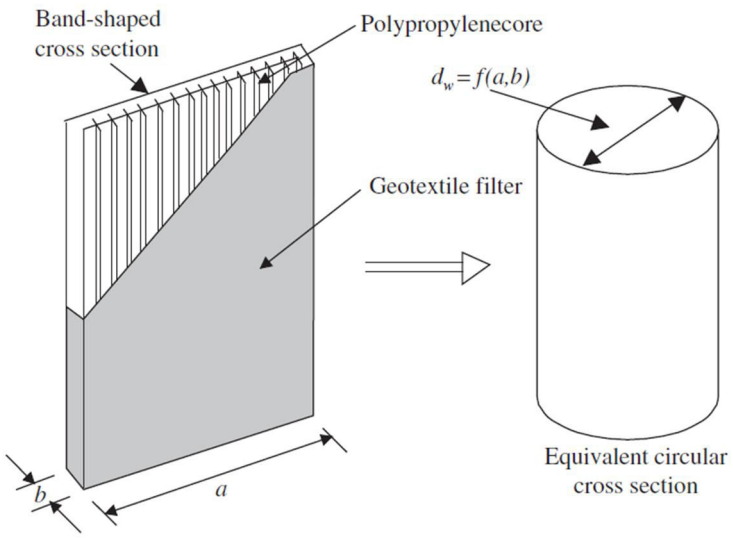
[12] influence zone



شکل (۲-۶) الگوهای نصب زهکش و قطرهای معادل آن [۱۸]

۲-۶-۲- قطر زهکش معادل زهکش قائم نواری شکل:

بیشتر زهکش‌های پیش ساخته دارای مقطع مستطیل شکل هستند (نواری شکل)، شکل (۲-۷)، اما برای اهداف طراحی، مقطع مستطیل (عرض a ، ضخامت b) باید به یک دایره معادل با قطر dw تبدیل شود، زیرا تئوری مرسوم از تحکیم شعاعی فرض می‌کند که زهکش‌ها دایره‌ای هستند.



شکل (۲-۷) ترسیم مفهومی یک زهکش قائم پیش ساخته نواری شکل و قطر معادل چاه.[۱۸]

از معادله (۲-۹) که در سال ۱۹۷۹ توسط هانسبو بیان شد برای تعیین قطر معادل زهکش استفاده می‌شود:

$$dw = 2\,(a + b)/\pi \qquad (۹-۲)$$

اتکینسون و اِلدرِد (۱۹۸۱) پیشنهاد کردند که باید ضریب کاهش $\pi/4$ در معادله (۲-۹) اعمال شود. برای در نظر گرفتن اثر گوشه‌ای، جایی که خطوط جریان به سرعت همگرا می‌شوند. از مطالعات اجزا محدود، ریکسنر و همکاران (۱۹۸۶) معادله (۲-۱۰) را پیشنهاد کردند:

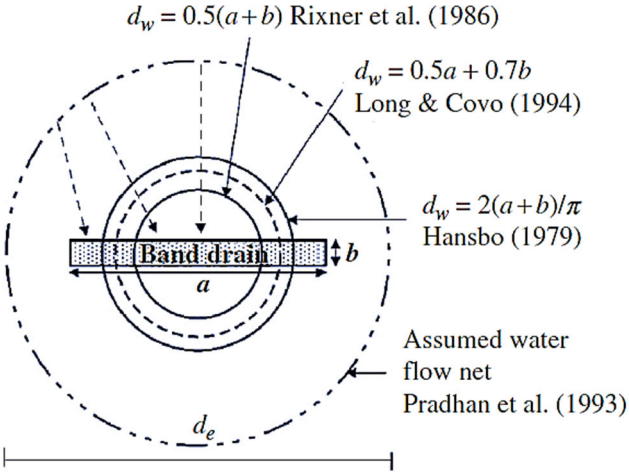
$$dw = (a + b) / 2 \qquad (۲-۱۰)$$

پرادهان و همکاران (۱۹۹۳) مطابق رابطه (۲-۱۱) پیشنهاد کردند که قطر معادل زهکش‌های نواری شکل باید با در نظر گرفتن شبکه جریان در اطراف استوانه خاک با قطر de (شکل (۲-۸)). منفی توان دوم فاصله شبکه جریان آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S^{-2} = \frac{1}{4}\,de^2 + \frac{1}{12}\,a^2 + \frac{2a}{\pi^2}\,de \qquad \text{Then,} \qquad dw = de - 2\sqrt{S^{-2}} + b \qquad (۲-۱۱)$$

اخیراً لانگ و کُو (۱۹۹۴) مطابق با رابطه (۲-۱۲) دریافتند که قطر معادل dw می‌تواند با استفاده از یک رسام الکتریکی آنالوگ محاسبه شود:

$$dw = 0.5\,a + 0.7\,b \qquad (۲-۱۲)$$



شکل (۲-۸) قطرهای معادل زهکش‌های عمودی نواری شکل.[۱۸]

۲-۷- عوامل مؤثر بر کارایی زهکش قائم

۲-۷-۱- ناحیه اغتشاش[13]:

در زمین، زهکش‌های عمودی با استفاده از یک سنبه فولادی نصب می‌شوند، که به صورت استاتیک یا دینامیکی به داخل زمین رانده می‌شود و سپس سنبه فولادی خارج شده و نوار زهکش در زیر خاک باقی می‌ماند. این فرآیند باعث دست خوردگی قابل توجهی از لایه زیرین، به ویژه بلافاصله در مجاورت سنبه فولادی می‌شود. ناحیه اغتشاش حاصل، نفوذپذیری جانبی را کاهش می‌دهد که بر روند تحکیم تأثیر منفی می‌گذارد. اثر ترکیبی نفوذپذیری و قابلیت فشردگی در ناحیه اغتشاش باعث می‌شود تا رفتاری متفاوت از خاک دست نخورده به وجود آید. پیش بینی رفتار خاک اطراف زهکش نیاز به برآورد دقیق خصوصیات ناحیه اغتشاش دارد. در بسیاری از راه حل‌های کلاسیک، تأثیر ناحیه اغتشاش با یک مدل دو بخشی ایده آل در نظر گرفته شده است.

برای مشخص کردن اثر ناحیه اغتشاش، دو پارامتر قطر ناحیه اغتشاش (ds) و نسبت نفوذپذیری (kh / ks) لازم است، نفوذپذیری ناحیه دست نخورده (kh) نفوذپذیری ناحیه اغتشاش (ks). اندازه گیری قطر ناحیه اغتشاش و نفوذ پذیری از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی دشوار است و تاکنون روش جامع یا استانداردی برای اندازه‌گیری آن‌ها مطرح نشده است. میزان ناحیه اغتشاش و نفوذپذیری با توجه به روش نصب ، اندازه و شکل سنبه، نوع و حساسیت خاک متفاوت است. مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی، تغییرات مداوم نفوذپذیری خاک با فاصله شعاعی از خط مرکزی زهکش است. همچنین قطر ناحیه اغتشاش (ds) در زمینه زهکش قائم پیش ساخته مورد بحث بسیاری قرار گرفته است.

تحقیقات هولتز و هولم (۱۹۷۳) و آکاگی (۱۹۷۷) نشان می دهد که:

$$ds = 2\,dm \qquad (۱۳-۲)$$

که در رابطه (۲-۱۳) ds قطر ناحیه اغتشاش و dm قطر دایره‌ای که مساحتش معادل با مساحت سطح مقطع سنبه است.

[13] Smear zone

جامیولکوفسکی و همکاران (۱۹۸۱) معادله (۲-۱۴) را پیشنهاد کردند:

$$ds = (2.5 - 3)\ dm \qquad (۱۴-۲)$$

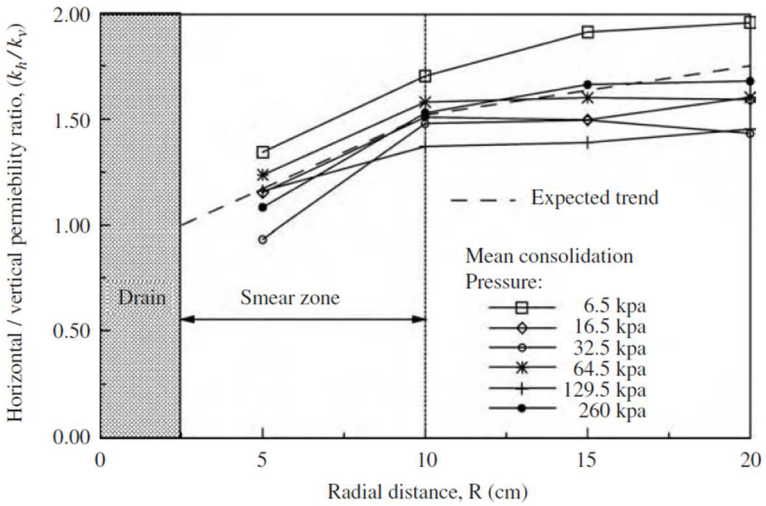
هانسبو (۱۹۸۱ ، ۱۹۹۷) رابطه متفاوتی را مطابق با معادله (۲-۱۵) ارائه داد:

$$ds = (1.5 - 3)\ dw \qquad (۱۵-۲)$$

که dw قطر معادل که بر پایه مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل بازگشتی است. برگادو و همکاران (۱۹۹۱) پیشنهاد کردند که رابطه (۲-۱۶) را می‌توان فرض کرد:

$$ds = 2\ dw \qquad (۱۶-۲)$$

ایندراراتنا و رِدانا (۱۹۹۸) پیشنهاد کردند که ناحیه اغتشاش تخمین زده شده می‌تواند به اندازه (۴-۵) dw باشد. این رابطه پیشنهادی با استفاده از یک دستگاه تحکیم بزرگ مقیاس طراحی شده تأیید شد (ایندراراتنا و رِدانا ، 1995). شکل (۲-۹) تغییر نسبت k_h / k_v در طول فاصله شعاعی از زهکش مرکزی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۹) نسبت kh / kv در امتداد فاصله شعاعی از زهکش مرکزی (اصلاح شده پس از ایندراراتنا و رِدانا، 1998).[۱۸]

نتایج اخیر نشان می‌دهد که برای اکثر رس‌های نرم وسعت ناحیه اغتشاش بین ۴dw و ۶dw است. پارامترهای ناحیه اغتشاش توصیه شده توسط محققان مختلف در جدول (۲-۱) ذکر شده است.

جدول (۲-۱) پارامترهای پیشنهادی ناحیه اغتشاش [۱۸]

Source	Extent	Permeability	Remarks
Barron (1948)	$r_s = 1.6r_m$	$k_H/k_s = 3$	Assumed
Hansbo (1979)	$r_s = 1.5\sim3r_m$	Open	Based on available literature at that time
Hansbo (1981)	$r_s = 1.5r_m$	$k_H/k_s = 3$	Assumed in case study
Bergado et al. (1991)	$r_s = 2r_m$	$k_H/k_v = 1$	Laboratory investigation and backanalysis for soft Bangkok clay
Onoue (1991)	$r_s = 1.6r_m$	$k_H/k_s = 3$	From test interpretation
Almeida et al. (1993)	$r_s = 1.5\sim2r_m$	$k_H/k_s = 3\sim6$	Based on experience
Indraratna et al. (1998)	$r_s = 4\sim5r_m$	$k_H/k_v = 1.15$	Laboratory investigation (for Sydney clay)
Chai and Miura (1999)	$r_s = 2\sim3r_m$	$k_H/k_s = C_f(k_H/k_s)$	C_f the ratio between lab and field values
Hird et al. (2000)	$r_s = 1.6r_m$	$k_H/k_s = 3$	Recommend for design
Xiao (2000)	$r_s = 4r_m$	$k_H/k_s = 1.3$	Laboratory investigation (for Kaolin clay)

r_s شعاع ناحیه اغتشاش و r_m شعاع دایره‌ای که مساحتش معادل با مساحت سطح مقطع سنبه است.

۲-۷-۲- پتوی ماسه[۱۴]:

بخشی یا کل ورودی آب به زهکش‌ها ابتدا به زمین می‌ریزد و سپس از طریق پتو ماسه زهکش می‌شود. از آن‌جا که رسانایی هیدرولیکی شن و ماسه به طور قابل توجهی بالاتر از رس است، معمولاً می‌توان تصور کرد که هیچ مقاومت هیدرولیکی در پتو ماسه وجود ندارد. با این حال در برخی موارد بسته به مصالح محلی، ممکن است از شن و ماسه رسی با کیفیت پایین به عنوان پتو ماسه استفاده شود. در این موارد، مقاومت هیدرولیکی در پتو ماسه ممکن است بر میزان تحکیم لایه زیرین خاک رس که تابعی از رسانایی هیدرولیکی ماسه و همچنین هندسه خاکریز است، تأثیر بگذارد[۱۸].

۲-۷-۳- مقاومت چاه[۱۵]:

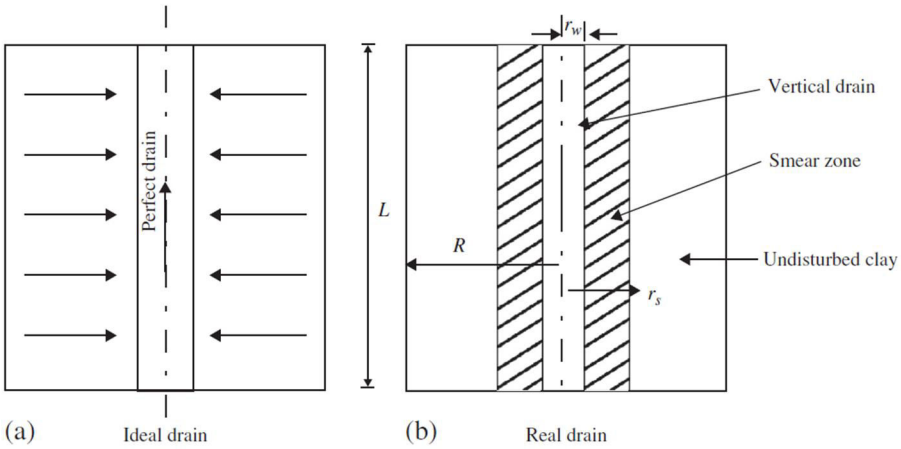
مقاومت چاه به نفوذپذیری محدود زهکش قائم با توجه به خاک بستگی دارد. کاهش یافتن هد هنگامی اتفاق می‌افتد که آب در امتداد زهکش جریان داشته و تحکیم شعاعی را به تأخیر بیندازد. لازم به ذکر است که

[14] sand mat
[15] Well resistance

مقاومت چاه نه تنها توسط ظرفیت زهکش، بلکه همچنین توسط نفوذپذیری خاک kh ، حداکثر طول زهکش و هرگونه نقص‌های هندسی (خم شدن ، انحراف و غیره) کنترل می‌شود[۱۸].

۲-۸- توسعه نظریه تخلیه عمودی

راه حل‌های تحلیلی که پیش از این برای تحکیم سطح زمین اصلاح شده با زهکش‌های قائم، بدون شک از مدل "سلول واحد" استفاده می‌کردند. همانطور که در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است، بسیاری از محققان تئوری تحکیم زهکشی شعاعی را مورد توجه قرار داده اند.



شکل (۲-۱۰) مدل سلول واحد زهکش اطراف استوانه خاک [۱۸]

۲-۸-۱- تئوری انتشار (نفوذ) رندولیچ و کاریلو (۱۹۳۶):

رندولیچ (۱۹۳۶) معادلات دیفرانسیل برای متراکم سازی قائم یک بعدی را با جریان شعاعی فرموله و حل کرد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) \qquad (۲-۱۷)$$

که در آن r مختصات و Ch ضریب افقی تحکیم $(k_h/\gamma_w m_v)$ است.

کاریلو (۱۹۴۲) نشان داد که برای زهکشی شعاعی و تحکیم یک بُعدی، فشار آب حفره‌ای اضافی $U_{r,z}$ توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) + C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۲-۱۸)$$

$$u_{r,z} = u_r u_z / u_0 \qquad (۲-۱۹)$$

که در آن u_r و u_z فشار آب حفره‌ای اضافی است که فقط به دلیل جریان شعاعی و جریان قائم است و u_0 فشار آب حفره‌ای اولیه است. با جایگزینی فشار آب حفره‌ای اضافی متوسط در رابطه (۲-۱۹)، می‌توان با ترکیب u_r و u_z، درجه متوسط تحکیم لایه تراکم پذیر را بدست آورد، بنابراین:

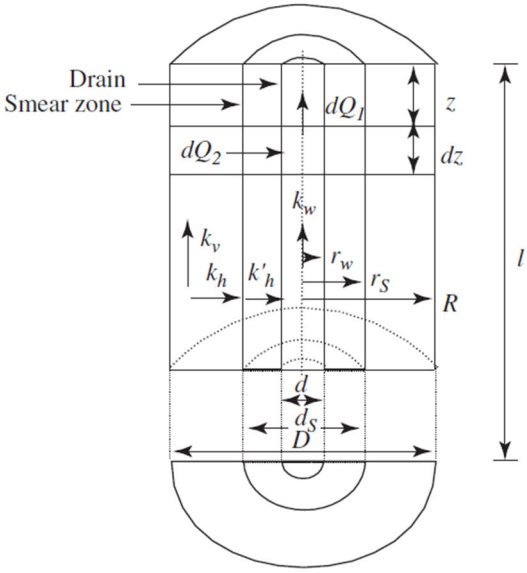
$$(1-\bar{U}) = (1-\bar{U}_z)(1-\bar{U}_r) \qquad (۲-۲۰)$$

که در آن $\bar{U}$ میانگین درجه تحکیم رس در زمان t برای جریان قائم و شعاعی ترکیبی است، $\bar{U}_z$ و $\bar{U}_r$ به ترتیب متوسط درجه تحکیم در زمان t برای جریان قائم و شعاعی هستند. لازم به ذکر است که راه حل‌های رندولیچ و کاریلو فقط برای زهکش "ایده آل" (ظرفیت زهکشی بی نهایت و بدون ناحیه اغتشاش) است.

۲-۸-۲- راه حل کرنش معادل همه جانبه – بارون

بارون (۱۹۴۸) به اثرات ناحیه اغتشاش و مقاومت چاه که می‌تواند عملکرد زهکش قائم را کاهش دهد پرداخت. وی برای دو حالت خاص برای تحکیم ناشی از زهکش شعاعی، یعنی کرنش آزاد و کرنش برابر، راه حل‌هایی به صورت فُرمِ بسته ارائه داد و نشان داد که متوسط تحکیم بدست آمده در هر دو مورد تقریباً یکسان است. فرضیه کرنش آزاد فرض می‌کند که بار به صورت یکنواخت در یک منطقه دایره‌ای برای هر زهکش قائم تاثیر می‌گذارد. تغییرات نشست رخ داده در این منطقه بر توزیع مجدد تنش‌های ناشی از قوس دار شدن حاصل از افزایش بار تأثیر نمی‌گذارد. در مقابل، کرنش برابر فرض می‌کند که قوس دار شدن در لایه فوقانی در حین تحکیم بدون هیچ گونه تغییرات نشستی در لایه رس رخ می‌دهد. سادگی آن باعث شده است که معمولاً توسط محققان استفاده می‌شود.

شکل (۲-۱۱) تصویر شماتیک یک استوانه خاک با یک زهکش قائم مرکزی را نشان می‌دهد، جایی که r_w شعاع تخلیه است ، r_s شعاع ناحیه اغتشاش است، R شعاع استوانه خاک است و l طول زهکش نصب شده در زمین نرم است. ضریب نفوذپذیری در جهت قائم و افقی به ترتیب k_v ، k_h و k_h' ضریب نفوذ پذیری در ناحیه اغتشاش است.



شکل (۲-۱۱) تصویر شماتیک از استوانه خاک با تخلیه عمودی [۱۸]

بر اساس کرنش برابر، بارون (۱۹۴۸) راه حلی با در نظر گرفتن اثر ناحیه اغتشاش برای معادله (۲-۱۷) ارائه داد که به شرح زیر است:

$$u_r = \bar{u}\frac{1}{v}\left[\ln\left(\frac{r}{r_s}\right) - \frac{(r^2 - r_s{}^2)}{2R^2} + \frac{k_h}{k_h{}'}\left(\frac{n^2 - s^2}{n^2}\right)\ln(s)\right] \qquad (۲-۲۱)$$

که در آن فاکتور ناحیه اغتشاش (v) توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$v = F(n, s, k_h, k_h{}') = \left[\frac{n^2}{n^2 - s^2}\ln\left(\frac{n}{s}\right) - \frac{3}{4} + \frac{s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_h{}'}\left(\frac{n^2 - s^2}{n^2}\right)\ln(s)\right] \qquad (۲-۲۲)$$

و

$$\bar{u} = u_0 \exp(-8\,T_h/v) \qquad (۲-۲۳)$$

در معادلات (۲-۲۱) تا (۲-۲۳) ، $s = r_s / r_w$ ، $n = R / r_w$ ، T_h فاکتور زمانی است که توسط رابطه $T_h = c_h t / 4R^2$ بدست می‌آید، $\bar{u}$ میانگین فشار آب حفره‌ای اضافی است و u_0 فشار آب حفره‌ای اضافی اولیه است. درجه متوسط تحکیم، $\bar{U}_r$، در بدنه خاک توسط رابطه زیر داده می شود:

$$\bar{U}_r = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{v}\right) \qquad (۲-۲۴)$$

۲-۸-۳- آنالیز با ناحیه اغتشاش و مقاومت چاه – هانسبو

هانسبو (۱۹۸۱) با در نظر گرفتن مقاومت چاه و ناحیه اغتشاش، راه حل تقریبی برای زهکش قائم بر پایه کرنش برابر ارائه داد. $\bar{U}_r$، ارائه شده توسط هانسبو (۱۹۸۱)، می‌تواند چنین بیان شود[۱۸]:

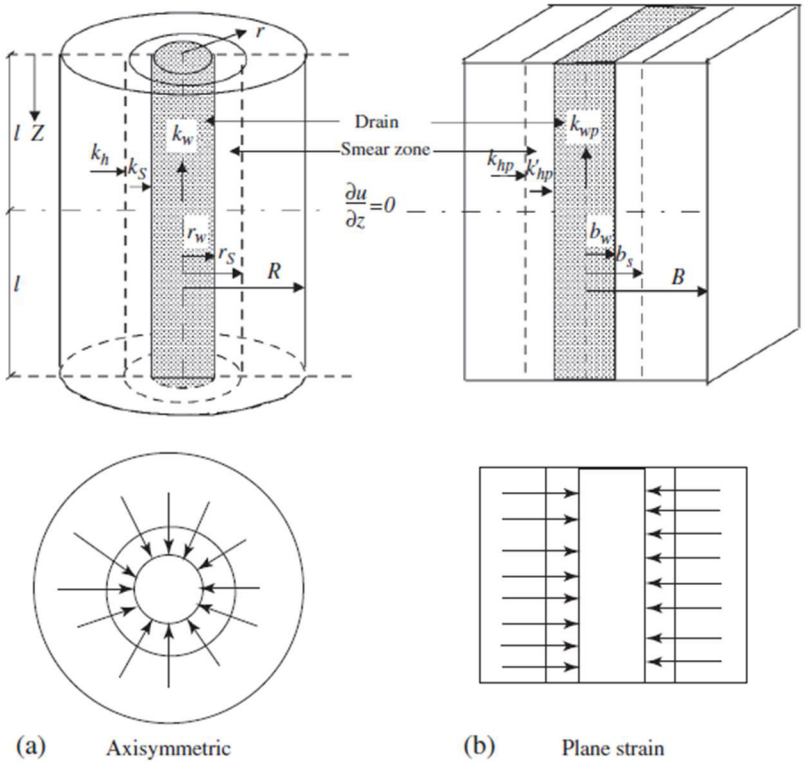
$$\bar{U}_r = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{\mu}\right) \quad (۲-۲۵)$$

که μ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\mu = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_h}{k_h'}\right)\ln s - 0.75 + \pi z\,(2l - z)\frac{k_h}{q_w} \quad (۲-۲۶)$$

۲-۹- مدل سازی دو بعدی زهکش‌های قائم

حتی اگر هر زهکش قائم متقارن محوری باشد، آنالیز اجزا محدود که با خاکریزهای چند زهکشه کار می‌کنند، معمولاً تحت شرایط کرنش مسطحه برای بهینه سازی بازده محاسباتی انجام شده است. بنابراین برای استفاده از آنالیز کرنش مسطحه دو بعدی واقع بینانه برای زهکش‌های قائم، لازم است از نظر نشست تحکیمی بین آنالیز کرنش مسطحه و تقارن محوری معادل سازی مناسب ایجاد شود. شکل (۲-۱۲) تبدیل یک زهکش قائم تقارن محوری به یک دیواره زهکش معادل را نشان می‌دهد. این امر از چند طریق قابل دست‌یابی است، به عنوان مثال: (۱) مطابقت هندسی - فاصله زهکش با حفظ ضریب نفوذپذیری یکسان مطابقت دارد. (۲) تطابق نفوذپذیری - ضریب نفوذپذیری با حفظ همان فاصله زهکش مطابقت دارد. و (۳) ترکیبی از (۱) و (۲) - با نفوذپذیری کرنش مسطحه یک فاصله زهکش مناسب محاسبه شده است[۱۸].



شکل (۲-۱۲) تبدیل سلول واحد تقارن محوری به شرایط کرنش مسطحه [۱۸]

۲-۹-۱- تبدیل نفوذپذیری - شینشا و همکاران

شینشا و همکاران (۱۹۸۲) ابتدا معیار تطبیق قابل قبول برای تبدیل ضرایب نفوذپذیری را ارائه دادند. ضریب نفوذپذیری معادل با این فرض محاسبه شد که زمان مورد نیاز برای درجه تحکیم ۵۰٪ در هر دو روش یکسان باشد، بدین ترتیب:

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \left(\frac{B}{D_e}\right)^2 \frac{T_{h50}}{T_{r50}} \qquad (۲-۲۷)$$

که در آن $T_{h50} = 0.197$ یک عامل زمان بدون بُعد در تحکیم ۵۰٪ جریان آرام[۱۶] است و T_{r50} جریان شعاعی متناظر است[۱۸].

[16] Laminar Flow

۲-۹-۲- تطبیق هندسه و نفوذپذیری - هیرد و همکاران

با استفاده از نظریه هانسبو (۱۹۸۱) برای مورد کرنش مسطحه، هیرد و همکاران (۱۹۹۲) نشان دادند که در صورت نادیده گرفتن مقاومت در برابر چاه، میانگین درجه تحکیم،U، در هر عمق و زمان در دو سلول واحد از نظر تئوری یکسان است:

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{2B^2}{3R^2\left[\ln\left(\frac{R}{r_s}\right) + \left(\frac{k_{ax}}{k_s}\right)\ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) - \frac{3}{4}\right]} \qquad (۲-۲۸)$$

که در آن زیرنویس‌های "ax" و "pl" به ترتیب شرایط تقارن محوری[۱۷] و کرنش مسطحه[۱۸] را نشان می-توجه شود که تطبیق هندسی با جایگزینی $k_{pl} = k_{ax} = k_h$ در معادله (۲-۲۸) حاصل می‌شود. در حالی که تطبیق نفوذپذیری با جایگزینی $B = R$ بدست می‌آید. برای ادغام کردن مقاومت چاه، می‌توان از عبارت بدون بعد زیر استفاده کرد[۱۸]:

$$\frac{Q_w}{q_w} = \frac{2B}{\pi R^2} \qquad (۲-۲۹)$$

۲-۹-۳- مفهوم تخلیه معادل[۱۹] - بِرگادو و لانگ

نفوذپذیری تبدیل شده، از جمله اثر ناحیه اغتشاش، بر اساس شرایط نرخ تخلیه معادل[۲۰] (بِرگادو و لانگ ، ۱۹۹۴) در هر دو طرح و با این فرض که ضریب نفوذپذیری مستقل از حالت تراوش است، معرفی می‌شود:

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{\pi D(1-a_s)}{2S\left[\ln\left(\frac{\alpha D}{d_s}\right) + \left(\frac{k_{ax}}{k_s}\right)\ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right)\right]} \qquad (۲-۳۰)$$

که $a_s = t / D$ ، t ضخامت دیواره‌ها در مدل دو بُعدی است، D و S به ترتیب فاصله ردیف و فاصله شمع حالت واقعی هستند و مقادیر $\alpha = De / D$ ، $S = D$ و $\alpha = 1.05$ برای الگوی مربعی، و $S = 0.866D$ و $a = 1.13$ برای الگوی مثلثی در نظر گرفته شده است[۱۸].

[17] axisymmetric
[18] Plane Strain
[19] equal discharge
[20] equal discharge rate

۲-۹-۴- مقاومت چاه و مسدود شدن آن – چای و همکاران

چای و همکاران (۱۹۹۵) با موفقیت آنالیز توسط هیرد و همکاران که شامل اثر مقاومت و انسداد چاه است (۱۹۹۲) را گسترش دادند. در این روش ظرفیت تخلیه زهکش در کرنش مسطحه (q_{wp}) برای تطبیق دادن با درجه تحکیم افقی متوسط رابطه زیر به کار گرفته می‌شود[۱۸]:

$$q_{wp} = \frac{4k_h l^2}{3B\left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_h}{k_s}\ln(s) - \frac{17}{12} + \frac{2l^2\pi k_h}{3q_{wa}}\right]} \qquad (۲-۳۱)$$

۲-۹-۵- آنالیز فاکتور زمان – کیم و لی

کیم و لی (۱۹۹۷) تصور می‌کنند که مدت زمان دو سیستم (کرنش مسطحه و تقارن محوری) برای دستیابی به درجه تحکیم ۵۰٪ و ۹۰٪ یکسان است. سپس عبارت (۲-۳۲) بدست می‌آید[۱۸]:

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \left(\frac{B}{R}\right)^3 \frac{T_{r50}}{T_{h50}} \frac{T_{r90}}{T_{h90}} \frac{S}{\pi d_w} \qquad (۲-۳۲)$$

۲-۹-۶- راه حل دقیق برای دیوار زهکش موازی – ایندراراتنا و رِدانا

ایندراراتنا و رِدانا (۱۹۹۷) با تطبیق ضریب نفوذپذیری خاک، سیستم زهکش قائم نشان داده شده در شکل (۲-۱۲) را به دیواره زهکش موازی معادل تبدیل کردند. آن‌ها فرض کردند که نیمی از عرض سلول واحد B ، نیمی از زهکش b_w و نیمی از ناحیه اغتشاش b_s به ترتیب با شعاع تقارن محوری R ، r_w و r_s برابر است. سپس نفوذپذیری معادل مدل توسط معادله (۲-۳۳) بدست می‌آید[۱۸]:

$$k_{hp} = \frac{k_h\left[\alpha + (\beta)\frac{k_{hp}}{k'_{hp}} + (\theta)\left(2lz - l^2\right)\right]}{\left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_h}{k'_{hp}}\right)\ln(s) - 0.75 + \pi(2lz - l^2)\frac{k_h}{q_w}\right]} \qquad (۲-۳۳)$$

پارامترهای مرتبط به هندسه α و β و مولفه جریان θ توسط روابط زیر تعریف می‌شود:

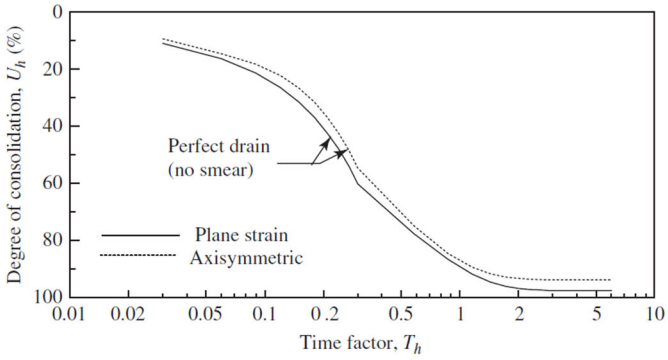
$$\alpha = \frac{2}{3}\frac{(n-s)^3}{(n-1)n^2} \qquad (۲-۳۴)$$

$$\beta = \frac{2}{3}\frac{(s-1)}{(n-1)n^2}\left[3n(n-s-1) + (s^2+s+1)\right] \qquad (۲-۳۵)$$

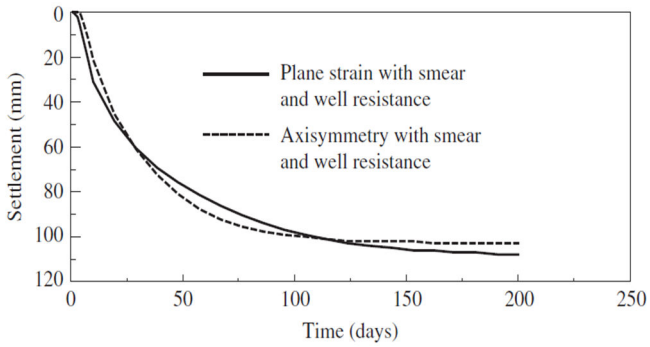
$$\theta = \frac{2k_{hp}}{Bq_z}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \qquad (۳۶-۲)$$

که در آن $q_z = \frac{2q_w}{\pi B}$ ظرفیت تخلیه کرنش مسطحه معادل است. در معادله (۲-۳۳)، همانطور که ملاحظه می‌شود k_{hp} در هر دو طرف معادله ظاهر شده است، برای حل این معادله باید با کمک آزمون و خطا یک مقدار اولیه برای کسر $\frac{k_{hp}}{k'_{hp}}$ فرض کرد مادامی که معادله به جواب رسد. برای صحت سنجی این مدل، آنالیز اجزا محدود برای هر دو مدل تقارن محوری و کرنش مسطحه معادل آن انجام شد. به عنوان مثال، یک زهکش واحد با زهکش نصب شده به عمق ۵ متر زیر سطح زمین با فاصله ۱.۲ متر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پارامترهای مدل و خصوصیات خاک $r_w = 0.03\ m$ ، $r_m = 0.05\ m$ ، $k_h = 1 \times 10^{-8}\frac{m}{s}$ و $k'_h = 5 \times 10^{-9}\ \frac{m}{s}$ ضرایب متناظر مربوط به نفوذ پذیری کرنش مسطحه بر اساس معادله (۲-۳۳) $k'_{hp} = 5.02 \times 10^{-9}\ \frac{m}{s}$ و $k_{hp} = 2.97 \times 10^{-9}\frac{m}{s}$ است. سطح آب در روی سطح زمین فرض شده است و $r_s = 5\ r_m$ ، بر اساس نتایج آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. برای تجزیه و تحلیل اجزا محدود الاستو پلاستیک، از مدل MCC[۲۱] به شرح زیر استفاده شده است: $\square = 0.2$ ، $k = 0.04$ ، $M = 1$ ، $e_{cs} = 2$ و نسبت پواسون $\square = 0.25$ با وزن مخصوص اشباع $18\ \frac{KN}{m^3}$. نتایج تجزیه و تحلیل تقارن محوری و کرنش مسطحه در شکل (۲-۱۳) رسم شده است. درجه تحکیم شعاعی متوسط U_h (٪) در برابر فاکتور زمان T_h برای شرایط زهکشی کامل رسم شده است. همانطور که نشان داده شده است، تحلیل کرنش مسطحه پیشنهادی کاملاً با تحلیل تقارن محوری مطابقت دارد و حداکثر انحراف بین دو روش کمتر از ۵٪ است. همان‌طور که نشان داده شده است، شکل‌های (۲-۱۴) و (۲-۱۵) نشست‌ها و تغییرات فشار منافذ اضافی را در طول زمان ، از جمله ناحیه اغتشاش به علاوه مقاومت چاه برای یک زهکش را نشان می‌دهد ، و تحلیل کرنش مسطحه کاملاً با تحلیل تقارن محوری هم پوشانی دارد. بر اساس تجزیه و تحلیل پیشین زهکش منفرد، شکل (۲-۱۳) تا (۲-۱۶) شواهد مشخصی را ارائه می‌دهد که مدل کرنش مسطحه معادل (تبدیل شده) جایگزین مطلوبی برای مدل تقارن محوری است. در مدل سازی اجزا محدود، انتظار می‌رود که تجزیه و تحلیل کرنش مسطحه دو بعدی نسبت به زمان گرفته شده توسط یک مدل تقارن محوری سه بعدی، به ویژه در تجزیه و تحلیل چند زهکشی، زمان محاسباتی را بطور قابل توجهی کاهش دهد[۱۸].

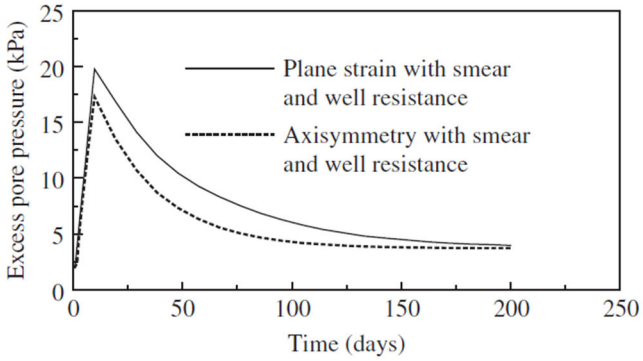
[21] modified cam clay



شکل (۲-۱۳) درجه تحکیم متوسط در برابر عامل زمان[۱۸]



شکل (۲-۱۴) مقایسه نشست سطحی در حالت کرنش مسطحه با نشست سطحی در حالت تقارن محوری[۱۸]

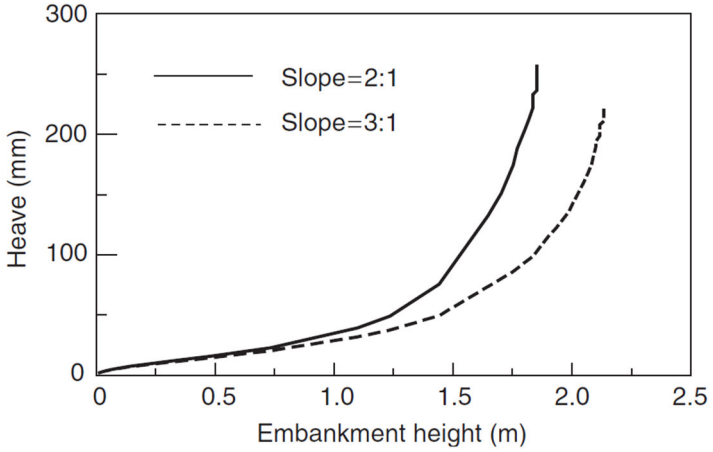


شکل (۲-۱۵) مقایسه فشار منفذی اضافی در حالت کرنش مسطحه با فشار منفذی اضافی در حالت تقارن محوری[۱۸]

۲-۱۰- مروری بر ادبیات فنی

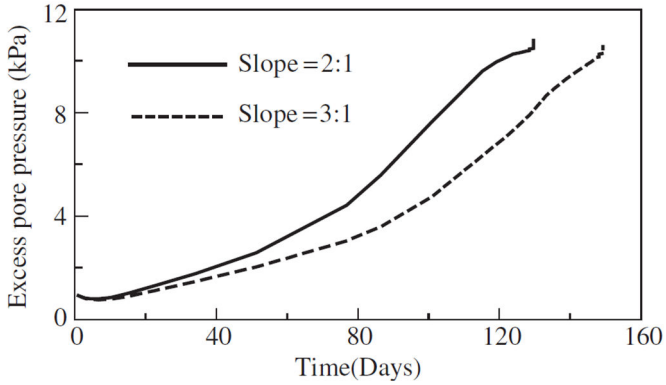
به منظور بررسی ادبیات فنی موضوع مورد بحث مجموعه‌ای از پروژه‌هایی که در آن خاک بستر با استفاده از روش‌های نوین (زهکش‌های قائم پیش ساخته – پیش بارگذاری خلاء) بهسازی شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

در سال ۲۰۰۵ بودیما و همکاران به بررسی تاثیر شیب خاکریز - سرعت ساخت - فاصله زهکش‌ها بر روی خرابی فونداسیون از جنس خاک رس نرم پرداختند. این تحقیق با مدل سازی خاکریز و زهکش به واسطه کد المان محدود برای نرم افزار آباکوس انجام شد. ابتدا خاکریزی با سرعت ۰.۱ متر در هفته بر روی خاک رسی نرم بدون بهسازی با دو شیب ۱:۲ و ۱:۳ مدل سازی شد. با توجه به شکل (۲-۱۶)، خرابی زمانی اتفاق می‌افتد که بدون افزایش بارگذاری جابجایی چشمگیری رخ دهد.

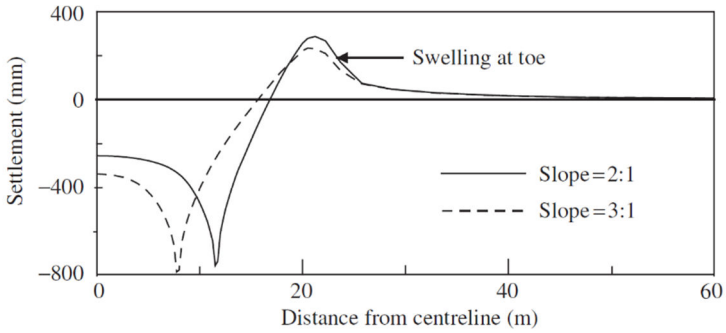


شکل (۲-۱۶) اثر شیب خاکریز بر خرابی در قسمت پنجه خاکریز [۱۸]

کاهش شیب خاکریز باعث افزایش ارتفاع خاکریز در زمان خرابی از ۱.۸ به ۲.۱ متر شده است. شکل (۲-۱۷) و (۲-۱۸) به ترتیب توزیع فشار آب حفره‌ای اضافی در عمق ۲ متر زیر پنجه خاکریز در منطقه خرابی و نشست سطحی را نشان می‌دهد.

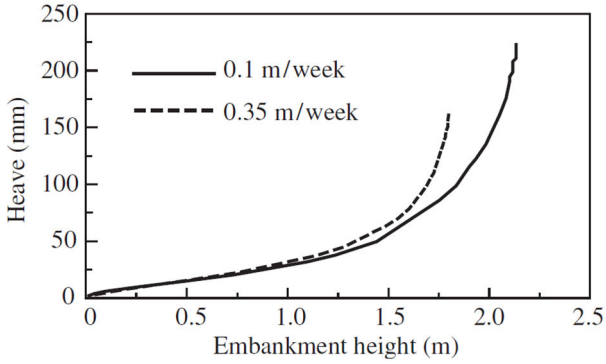


شکل (۲-۱۷) توزیع فشار آب حفره‌ای اضافی ۲ متر زیر پنجه خاکریز [۱۸]



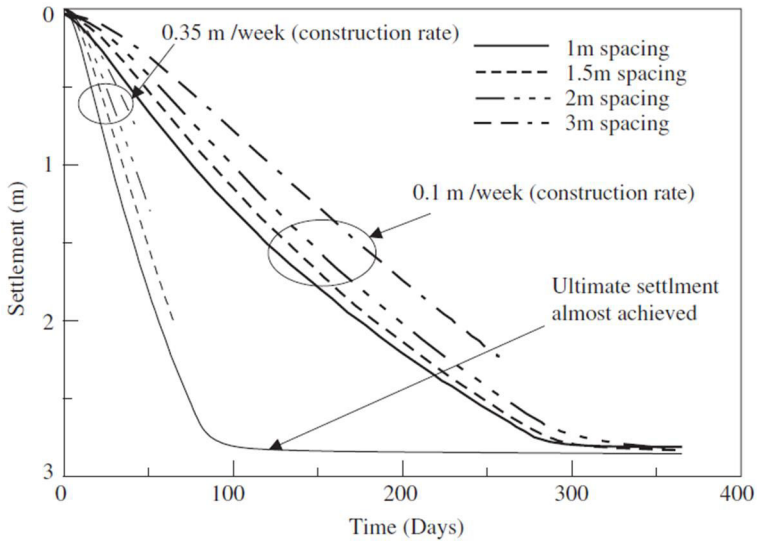
شکل (۲-۱۸) پروفیل نشست سطحی در ناحیه شکست [۱۸]

شکل (۲-۱۹) اثر سرعت بارگذاری بر روی ارتفاع شکست خاکریز را با دو سرعت بارگذاری ۰.۱ و ۰.۳۵ متر در هفته با شیب یکسان ۱:۳ نشان می‌دهد. سرعت کم ساخت خاکریز اجازه می‌دهد تا خاکریز با ارتفاع بیشتری تخریب شود. زیرا زمانی که خاکریز به صورت تدریجی بارگذاری می‌شود به بستر اجازه داده می‌شود تا فشار آب حفره‌ای اضافی کاهش یابد و مقاومت برشی بستر هم به همین ترتیب افزایش یابد.



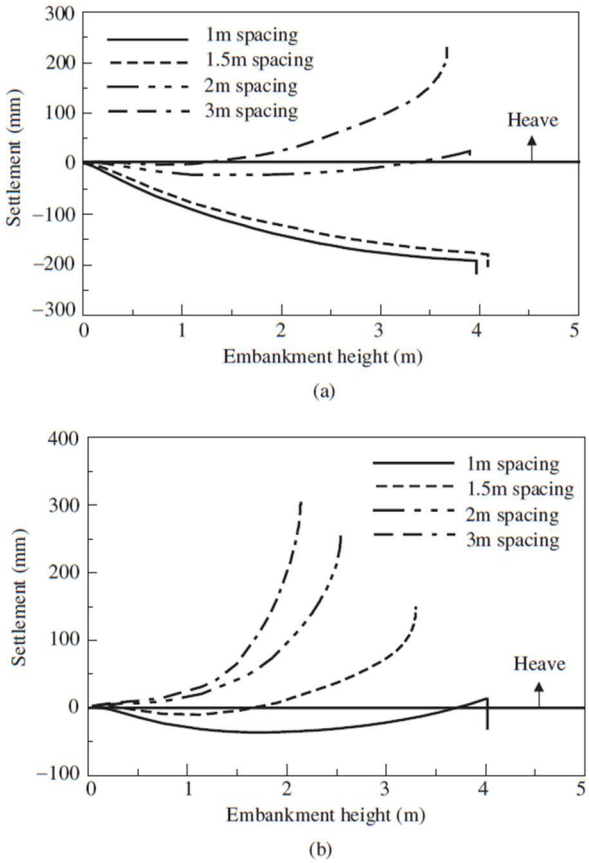
شکل (۲-۱۹) اثر سرعت بارگذاری خاکریز بر خرابی در قسمت پنجه خاکریز [۱۸]

برای بررسی تاثیر فاصله زهکش‌ها بر پایداری خاکریز، فاصله‌های زهکش، ۱-۱.۵-۲-۳ متر در آنالیز در نظر گرفته شد. خاکریز با دو سرعت ۰.۱ و ۰.۳۵ متر بر هفته با شیب ۱:۲ ساخته شد و حداکثر ارتفاع ۴ متر رسیده است. شکل (۲-۲۰) نشان می‌دهد که اگر فاصله زهکش‌ها یک متر در نظر گرفته شود، سرعت بارگذاری ۰.۱ متر در هفته در ۳۰۰ روز و سرعت بارگذاری ۰.۳۵ متر در هفته در ۱۰۰ روز نشست حدودا ۲.۸ متر را ارضا می‌کند.



شکل (۲-۲۰) نشست سطحی در فواصل و سرعت بارگذاری مختلف [۱۸]

ولی با توجه به شکل (۲-۲۱) b سرعت بارگذاری ۰.۳۵ متر بر هفته با فاصله ۱ متر زهکش‌ها ارتفاع خاکریز به ۴ متر نمی‌رسد ولی در شکل (۲-۲۱) a سرعت بارگذاری ۰.۱ متر بر هفته واضح است که فواصل زیر ۲ متر زهکش‌ها ارتفاع ۴ متر خاکریز را ارضا می‌کنند.



شکل (۲-۲۱) نشست سطحی در زیر پنجه خاکریز با فاصله‌های متفاوت (a) سرعت بارگذاری ۰.۱ متر بر هفته ، (b) سرعت بارگذاری ۰.۳۵ متر بر هفته [۱۸]

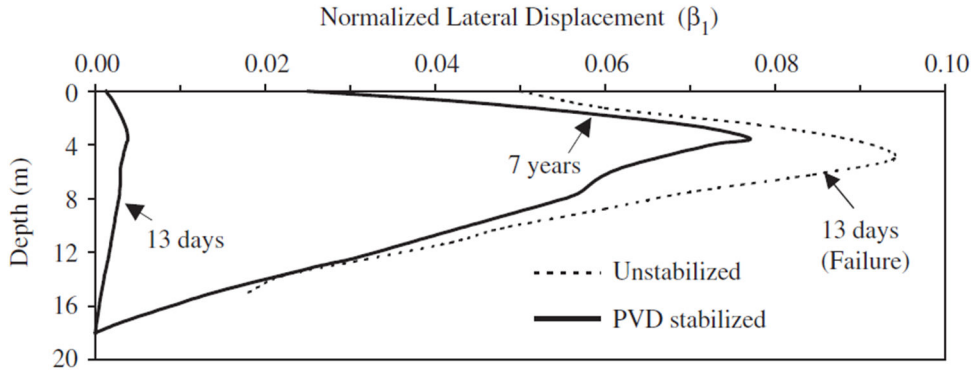
مدل سازی دیگری در این زمینه صورت گرفت و ساخت خاکریز در دو مرحله بارگذاری انجام شد. (مرحله ۱) در طول ۱۴ روز اول ارتفاع به ۲.۵۷ متر افزایش یافت، (مرحله ۲) و پس از ۹۰ روز استراحت ارتفاع در ۲۴ روز به ۴.۷۴ متر افزایش یافت. برای بررسی میزان اثر بخشی روش بهسازی، جابجایی جانبی و نشست را می‌توان با توجه به ارتفاع خاکریز متناظرشان نرمالیزه کرد. بنابراین شاخص‌های پایداری به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{\beta 1}{\beta 2} = \frac{\text{جابجایی جانبی}}{\text{نشست}} \qquad (۳۷-۲)$$

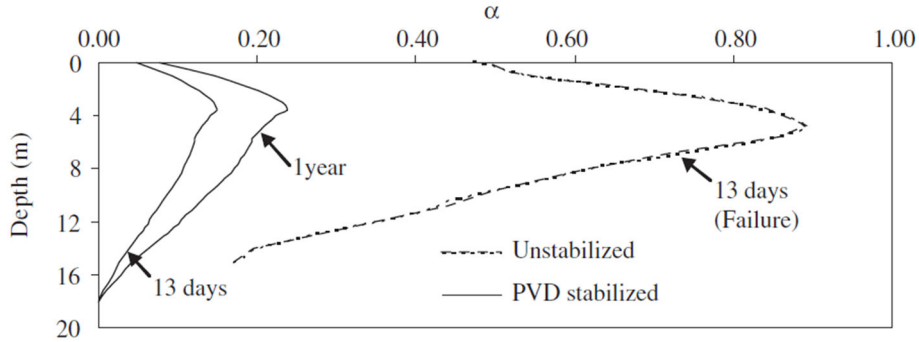
$$\frac{\text{جابجایی جانبی}}{\text{ارتفاع خاکریز}} \qquad (۳۸-۲)$$

$$\frac{\text{نشست}}{\text{ارتفاع خاکریز}} \qquad (۳۹-۲)$$

شکل (۲-۲۲) تغییرات با عمق و شکل (۲-۲۳) تغییرات با عمق را نشان می‌دهد. نتایج به وضوح نشان می‌دهند که زهکش‌های قائم به طور مؤثری تغییر شکل‌های جانبی را کاهش داده‌اند و ارتفاع بحرانی خاکریز را افزایش داده‌اند. با توجه به شکل (۲-۲۲) خاکریزی که بسترش بهسازی نشده است پس از ۱۳ روز با جابجایی جانبی بزرگ از بین می‌رود. خاکریزی که بسترش با زهکش قائم پیش ساخته بهسازی شده است ۷ سال طول می‌کشد تا جابجایی جانبی‌اش مشابه جابجایی جانبی خاکریز بدون بهسازی بستر شود.



شکل (۲-۲۲) جابجایی جانبی نرمالیزه شده [۱۸]



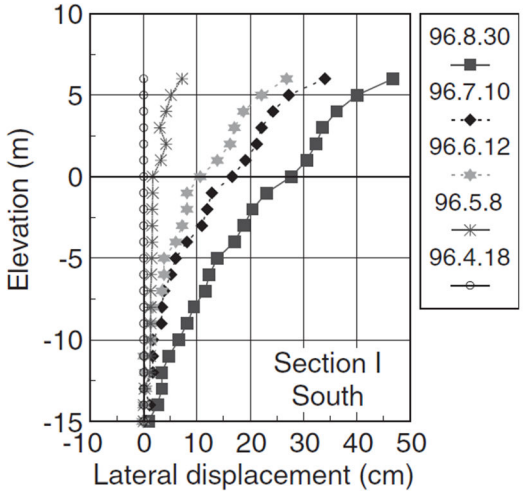
شکل (۲-۲۳) تغییرات نسبت جابجایی جانبی به نشست با عمق [۱۸]

فاکتورهای نرمالیزه شده تغییر شکل برای چند خاکریز آزمایشی در جدول (۲-۲) مقایسه شده است. فاکتور به تنهایی شاخص مناسبی برای قضاوت نیست بلکه در کنار فاکتور می‌توان تصمیم گیری کرد که آیا روش بهسازی مورد نظر مناسب است یا خیر[۱۸].

جدول (۲-۲) فاکتورهای نرمالیزه شده تغییر شکل (اصلاح شده توسط بودیما و همکاران، ۱۹۹۷ [۱۸]

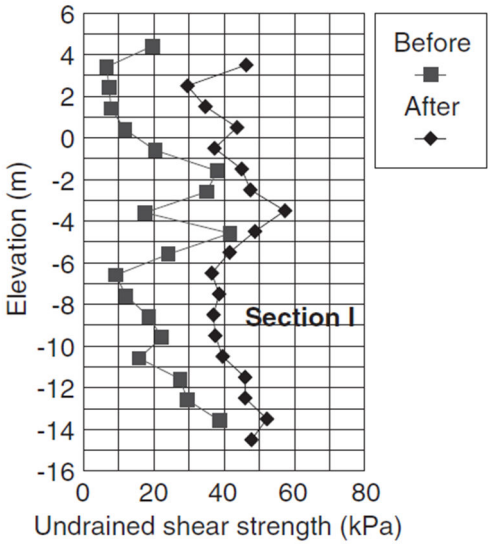
روش بهسازی زمین	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ساخت سریع خاکریزی که بسترش بهسازی نشده و دچار خرابی شده است. (h=5.5 m)	۰.۶۹۵	۰.۰۸۹	۰.۱۲۸
استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته با الگوی مثلثی به فواصل ۱.۳ متر (h=4.75 m)	۰.۱۲۷	۰.۰۳۵	۰.۲۷۵
استفاده از ژئوگرید + زهکش‌های قائم پیش ساخته با الگوی مربعی به فواصل ۲ متر (h=8.7 m)	۰.۱۴۱	۰.۰۲۱	۰.۱۴۹

در سال ۲۰۰۵ چو و یان بر روی کاربرد روش پیش بارگذاری خلاء در پروژه‌های بهسازی خاک فعالیت کردند. در این تحقیق دو پروژه با به کارگیری روش خلاء مورد بررسی قرار گرفت. گام‌های پیش بارگذاری به صورت زیر صورت گرفته است: پروژه اول: زهکش های قائم به فاصه ۱ متر و به طول ۲۰ متر نصب شده‌اند و میانگین فشار خلاء ۸۰ کیلو پاسکال است. کل سربار برابر است با جمع فشار خلاء و ۲ متر خاکریز و ۰.۳ متر پتو زهکش که معادل ۱۲۰ کیلوپاسکال است. پروژه دوم : فشار خلاء ۸۰ کیلو پاسکال است. خاکریز و خلاء به صورت ترکیبی اعمال شده است. ارتفاع خاکریز بین ۲.۵۳ متر تا ۳.۵ متر و ۰.۳ متر هم پتوی زهکش است. ۳ تا ۴ هفته فشار خلاء اعمال شده است. بار خلاء در خاک سبب ایجاد حرکت جانبی به سمت داخل می‌شود. جابجایی‌های جانبی در اعماق مختلف و در زمان‌های مختلف در شکل (۲-۲۴) نشان داده شده است. برخلاف نشست سطحی، نرخ جابجایی جانبی با گذشت زمان به سرعت کاهش نمی‌یابد. این موضوع بیانگر این است که جابجایی جانبی زمین نه تنها تحت تاثیر تحکیم اولیه است، بلکه تحت تاثیر برش و تحکیم ثانویه هم قرار می‌گیرد.



شکل (۲-۲۴) جابجایی جانبی در زمان و عمق‌های مختلف[۲۰]

آزمایش برش پره قبل و بعد از پیش بارگذاری خلاء انجام شده و نتایج در شکل (۲-۲۵) بیانگر افزایش ۲ تا ۳ برابری مقاومت برشی بعد از اعمال خلاء است.



شکل (۲-۲۵) مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش پره قبل و بعد از اعمال فشار خلاء [۲۰]

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

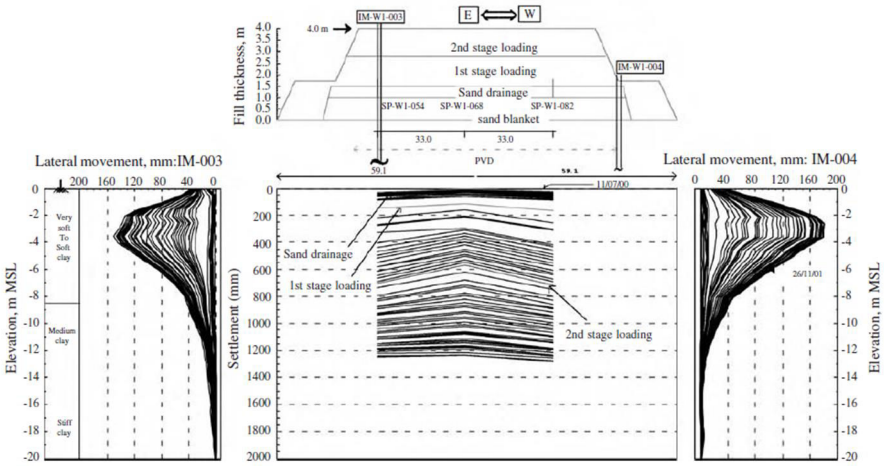
۱) فشار خلاء در عمق زمین به هیچ عنوان کاهش پیدا نمی‌کند. ۲) با اعمال خلاء مقاومت برشی زهکشی نشده آزمایش برش پره میدانی ۲ برابر می‌شود ۳) در حالت خلاء به تنهایی در زمین‌های اطراف

جابجایی‌های جانبی زیادی رخ داده است به همین خاطر در هنگام استفاده از این روش باید به این نکته توجه شود.

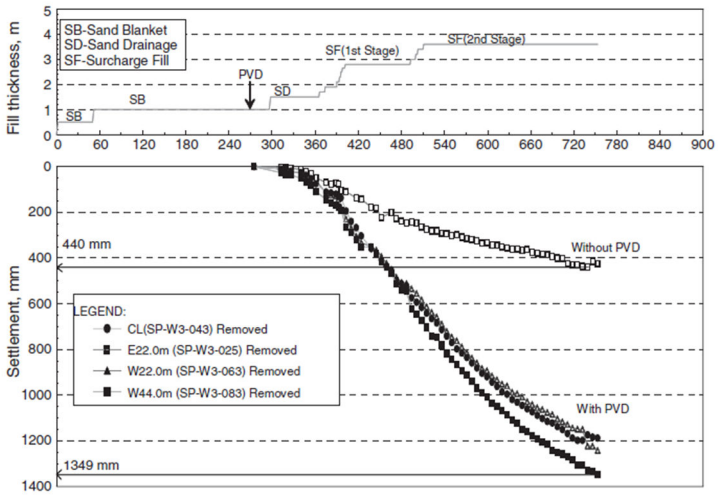
۴) اعمال خلاء و خاکریز به صورت همزمان باعث به حداقل رساندن جابجایی‌های جانبی می‌شود. ۵) درجه تحکیم متوسط تخمین زده شده بر اساس داده‌های نشست به طور معمول بالاتر از داده های فشار آب منفذی است[۲۰].

در سال ۲۰۰۵ چیه مو و پنچی لین بر روی بهسازی زمین فرودگاه سوارنابهومی[۲۲] واقع در کشور تایلند تحقیق کردند. در این پروژه بیش از ۶۰ میلیون متر زهکش قائم پیش ساخته در سایت نصب شده است. مشکل خاک در این پروژه: ۱) قابلیت انعطاف پذیری بالا ۲) مقاومت کم خاک رس دریایی است. سه خاکریز آزمایشی با مقیاس واقعی به ارتفاع ۴.۲ متر ساخته شد و زهکش‌های قائم پیش ساخته با فواصل ۱-۱.۲-۱.۵ متر در الگوی مربعی به طول ۱۰ متر نصب شدند. بر اساس بررسی و مقایسه‌ها، نرخ نشست و زمان مورد نیاز برای نشست و هزینه‌ها، فاصله زهکش‌ها ۱ متر انتخاب شد و با الگوی مربعی نصب شدند. طول زهکش از ۱۲ متر به ۱۰ متر کاهش یافت تا مبادا زهکش تماس هیدرولیکی با لنز ماسه‌ای ایجاد کند. کاهش طول زهکش باعث کاهش مقدار نشست در طول دوره پیش بارگذاری می‌شود. با توجه به نشست تخمین زده شده در انتهای دوره پیش بارگذاری با ۹۰-۸۰ ٪ سربار خاکریز، به ترتیب ۱۰ و ۱۵ ماه زمان ساخت طول می‌کشد. نشست در ۱۰ ماه برابر ۱.۵ متر و نشست در ۱۵ ماه برابر ۱.۷۵ متر است.

[22] Suvarnabhumi



شکل (۲-۲۶) سطح مقطع خاکریز به همراه پروفیل نشست و جابجایی جانبی [۲۱]

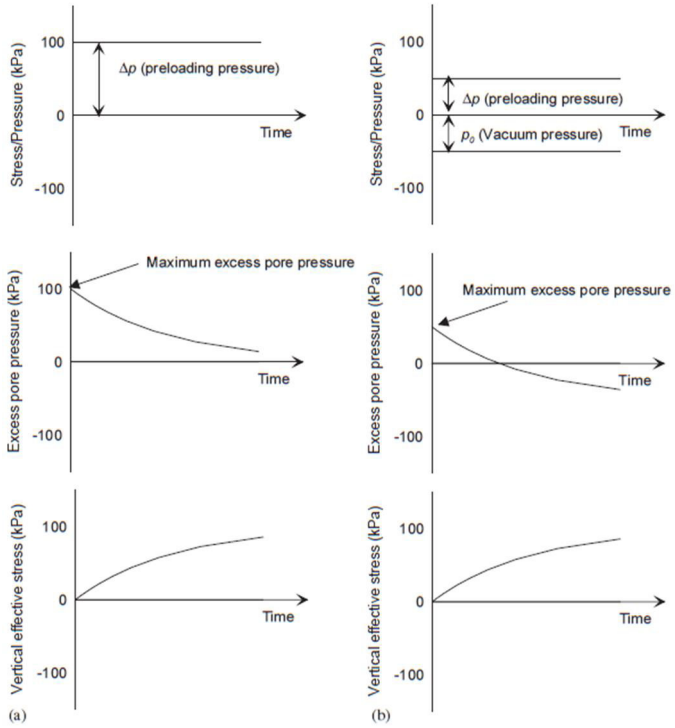


شکل (۲-۲۷) نمودار نشست متناسب با گام‌های بارگذاری با و بدون زهکش قائم پیش ساخته[۲۱]

نتایج حاصل از این تحقیق مطابق با شکل‌های (۲-۲۶) و (۲-۲۷) به شرح زیر می‌باشد: ۱) داده‌های بدست آمده از نشست نسبت به داده‌های اندازه گیری شده فشار آب منفذی قابل اطمینان تر هستند. ۲) نشست اندازه گیری شده قبل از برداشتن سربار خاکریز حدودا ۱۵-۱۳٪ کمتر از مقدار بدست آمده در طراحی است. ۳) نشست منطقه بدون زهکش قائم پیش ساخته یک سوم برابر نشست منطقه با زهکش قائم پیش ساخته (تحت شرایط پیش بارگذاری و زمان یکسان) است. ۴) نسبت متوسط نشست در عمق های ۲-۵-۸-۱۲-۱۶ متر به کل نشست سطحی به ترتیب ۹۵٪-۵۰٪-۱۷٪-۱۰٪ است. ۵) حداکثر حرکت جانبی عمدتا در اعماق

۶-۳ متر بستر خاک رس نرم اتفاق افتاده است. ۶) برای کنترل ایمنی ساخت خاکریز نسبت حرکت جانبی به حرکت قائم برابر ۰.۲۵ معایر مناسبی است[۲۱].

در سال ۲۰۰۵ بودیما و همکاران به پیش بینی‌ها و مشاهدات فنداسیون‌های رس نرم که با زهکش‌های ژئوسنتتیک و فشار خلاء تثبیت شده اند پرداختند. در این تحقیق از نرم افزار بر پایه المان محدود در شرایط تقارن محوری و کرنش مسطحه استفاده شده است. عملکرد مناسب زهکش‌های قائم پیش ساخته بستگی به توزیع خوب فشار خلاء و همچنین به میزان محافظت از نشتی هوا دارد. برای تحکیم خاک‌های با نفوذپذیری خیلی کم نیاز به پیش بارگذاری می‌شود که اگر از خاکریز به عنوان پیش بارگذاری استفاده شود زمان تحکیم بسیار طولانی خواهد شد و همچنین اگر با سرعت زیادی بخواهد این عملیات انجام شود ممکن است خاکریز از بین برود. بنابراین برای سرعت بخشیدن به عملیات تحکیم از زهکش‌های قائم پیش ساخته استفاده می‌شود تا مسیر زهکشی کوتاه شود. عملکرد انواع زهکش‌های عمودی شامل: زهکش‌های ماسه‌ای، شمع‌های متراکم شده ماسه‌ای، زهکش‌های قائم پیش ساخته (زهکش‌های ژئوسنتتیک) و شمع‌های شنی در گذشته مورد مطالعه قرار گرفت. استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته به دلیل نصب سریع آن‌ها با ماشین آلات ساده به گزینه‌ای اقتصادی و مناسب تبدیل شده است. به دلیل کمبود مصالح مورد نیاز برای خاکریز به عنوان پیش بارگذاری و همچنین هزینه‌ی نسبتاً کم برق در برخی از مناطق، از روش پیش بارگذاری به کمک خلاء همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته برای دست‌یابی به تحکیم سریع‌تر و کاهش ارتفاع خاکریز استفاده شده است. در سال ۲۰۰۰ از سیستم خلاء برای توزیع فشار خلاء به لایه‌های زیرین عمیق استفاده شد و در نتیجه افزایش نرخ تحکیم را به همراه داشت. شکل (۲-۲۸) روند تحکیم به روش خاکریز و خلاء را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲۸) فرآیند تحکیم: (a)پیش بارگذاری توسط خاکریز، (b) پیش بارگذاری توسط خلاء با فرض عدم اتلاف خلاء[۲۲]

ویژگی‌های پیش بارگذاری توسط خلاء در مقایسه با پیش بارگذاری توسط خاکریز:

الف) تنش مؤثر ایجاد شده توسط خلاء به صورت محوری افزایش می‌یابد و جابجایی جانبی ناشی از خلاء، فشاری است در نتیجه خطر شکست برشی را می‌توان حتی در نرخ بالاتر ساخت خاکریز به حداقل رساند.

ب) هد فشار خلاء را با استفاده از زهکش قائم پیش ساخته می‌توان به عمق بیشتری از سطح زیرین توزیع کرد.

ج) بسته به میزان بازدهی فشار خلاء (میزان کنترل نشت خلاء) می‌توان میزان سربار خاکریز را برای رسیدن به همان درجه تحکیم مورد نظر کاهش داد.

د) از آن جایی که می‌توان با استفاده از خلاء ارتفاع خاکریز را کاهش داد، حداکثر فشار آب منفذی اضافی ایجاد شده توسط خلاء با توجه به شکل (۲-۲۸) کمتر از روش خاکریز است.

یان و چو در سال ۲۰۰۳ اظهار داشتند که هزینه بهسازی خاک با پیش بارگذاری خلاء ۳۰ درصد کمتر از هزینه پیش بارگذاری خاکریز تک است.

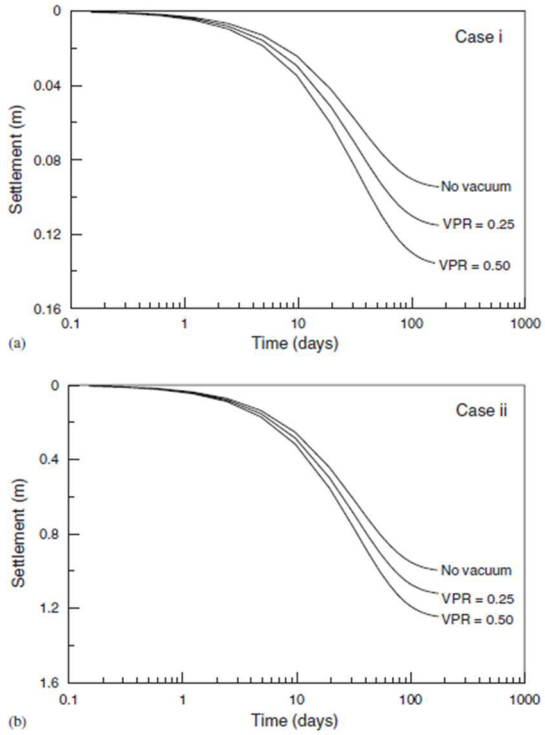
جهت بازدهی مطلوب در روش خلاء باید موارد زیر را مد نظر گرفت:

الف) عایق بودن غشا در برابر هوا به صورت یک پارچه

ب) ایجاد اتصال مناسب بین لبه‌های غشا و سطح زمین

ج) شرایط خاک و موقعیت تراز آب زیر زمینی

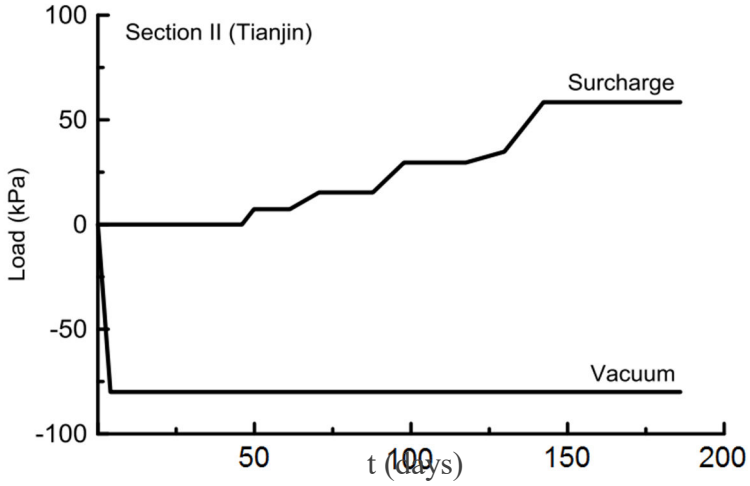
اثر مقدار فشار خلاء و توزیع فشار خلاء در امتداد زهکش قائم پیش ساخته: مقایسه نشست با مقادیر مختلف نرخ فشار خلاء[۲۳] برای دو مورد و حالت خاکریز تک انجام گرفت، همان طور که انتظار می‌رفت سرعت نشست با فشار خلاء بیشتر از فشار خاکریز تک است. همچنین در شکل (۲-۲۹) نشان می‌دهد که در نرخ‌های بالاتر فشار خلاء نرخ نشست نهایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این اعمال فشار خلاء باعث افزایش گرادیان فشار جانبی منافذ و جریان شعاعی می‌شود[۲۲].



شکل (۲-۲۹) نتایج نشست حاصل از راه حل‌های تحلیلی :(a) مورد i زهکش کوتاه ،(b) مورد ii زهکش بلند.[۲۲]

[23] vacuum pressure ratio (VPR)

در سال ۲۰۱۶ روجیکیامجورن به بررسی مدلسازی عددی تحکیم زمین نرم به کمک زهکش قائم پیش‌ساخته پرداخت. در این تحقیق پروژه بندر تیانجین در کشور چین به عنوان پروژه مطالعه موردی انتخاب شده است که در سه مقطع I ، II و III توسط پیش‌بارگذاری خاکریز و فشار خلاء که در شکل (۲-۳۰) مراحل بارگذاری را نشان داده شده، بهسازی صورت گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با مقطع عرضی mm^2 ۳ × ۱۰۰ و به طول ۲۰ متر با چیدمان مربعی به فواصل m^2 ۱ × ۱ در زمین به کار گرفته شده‌اند. با توجه به شکل‌های (۲-۳۱) و (۲-۳۲)، وی با مقایسه نتایج خروجی نشست و فشار آب حفره‌ای اضافی مدلسازی دو و سه بعدی زهکش‌های قائم با مقادیر ابزار دقیق دریافت که نتایج هم‌پوشانی مطلوبی با مقادیر ابزار دقیق دارند. همچنین مدلسازی دو بعدی با حجم کمتر محاسبات و دقت اندازه‌گیری مطلوب‌تری نسبت به مدلسازی سه بعدی روش مناسبی برای مدلسازی زهکش‌های قائم پیش ساخته است[۲۳].



شکل (۲-۳۰) مراحل پیش بارگذاری خاکریز و فشار خلاء[۲۳]

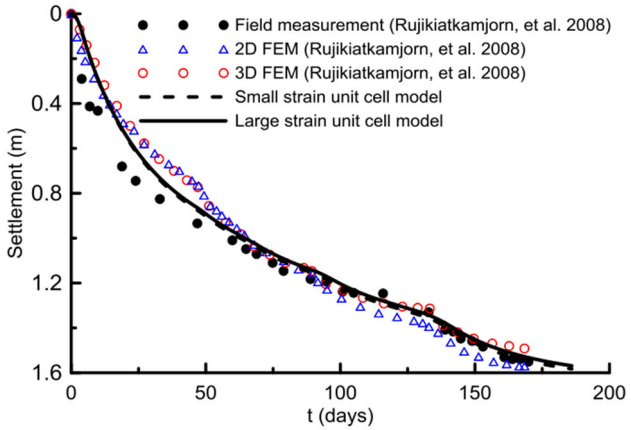


Figure 7: Predicted and measured settlement in Section II at Tianjin Port.

شکل (۲-۳۱) مقادیر اندازه گیری شده نشست در مقطع II بندر تیانجین توسط مدلسازی دو و سه بعدی و ابزار دقیق[۲۳]

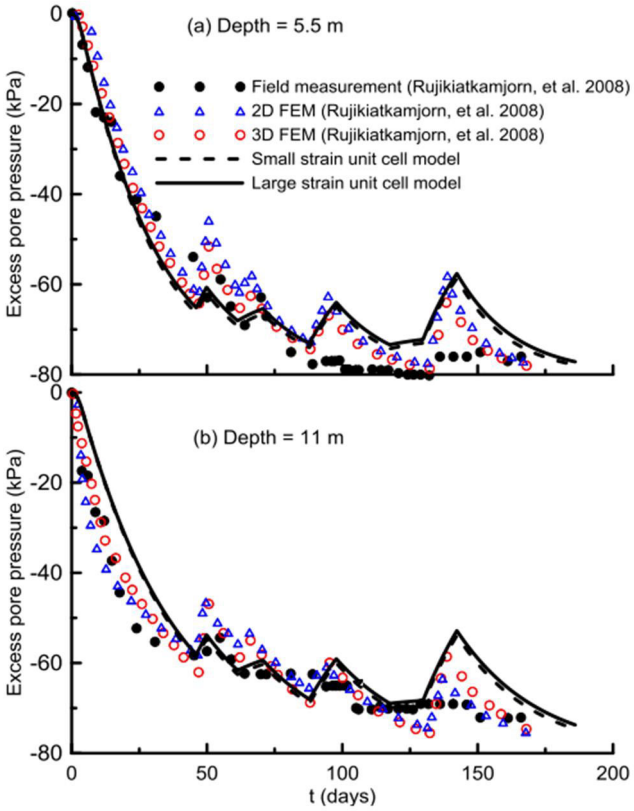
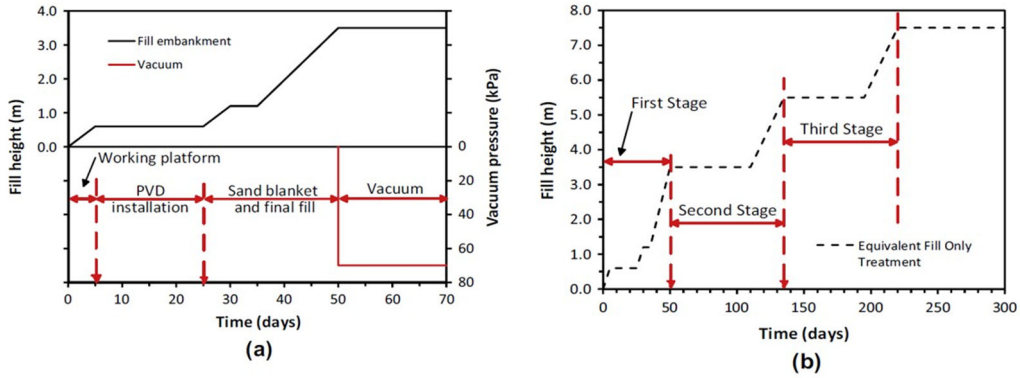


Figure 8: Predicted and measured excess pore pressure in Section II at Tianjin Port.

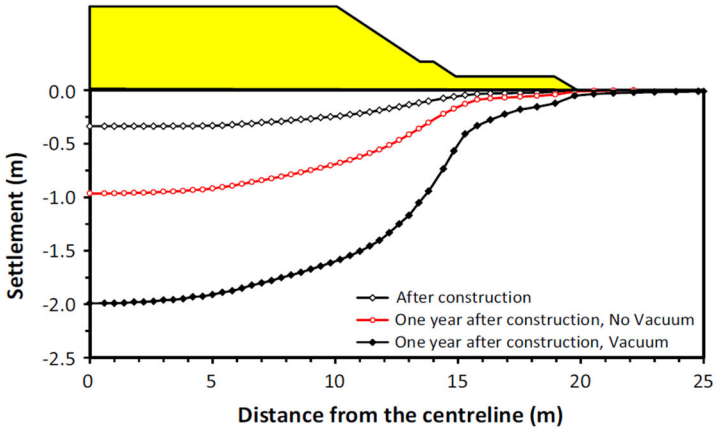
شکل (۲-۳۲) مقادیر اندازه گیری شده فشار آب حفره‌ای اضافی در مقطع II بندر تیانجین توسط مدلسازی دو و سه بعدی و ابزار دقیق در دو عمق ۵.۵ متر و ۱۱ متر [۲۳]

در سال ۲۰۱۶ بودیما و همکاران تحکیم به وسیله خلاء توسط زهکش‌های قائم در زیر خاکریزهای دایره‌ای را با نرم افزار المان محدود شبیه سازی کردند. مدل سازی به دو صورت خاکریز بدون فشار خلاء و با فشار خلاء صورت گرفت. مقدار کل سربار خاکریز ۳.۵ متری و خلاء ۷۰ کیلو پاسکال برابر ۱۳۰ کیلو پاسکال است. این مقدار معادل یک خاکریز با ارتفاع ۷.۵ متری می‌باشد. ساخت چنین خاکریز مرتفعی همان طور که در شکل (۲-۳۳) نشان داده شده است می‌تواند بسیار وقت گیر باشد.



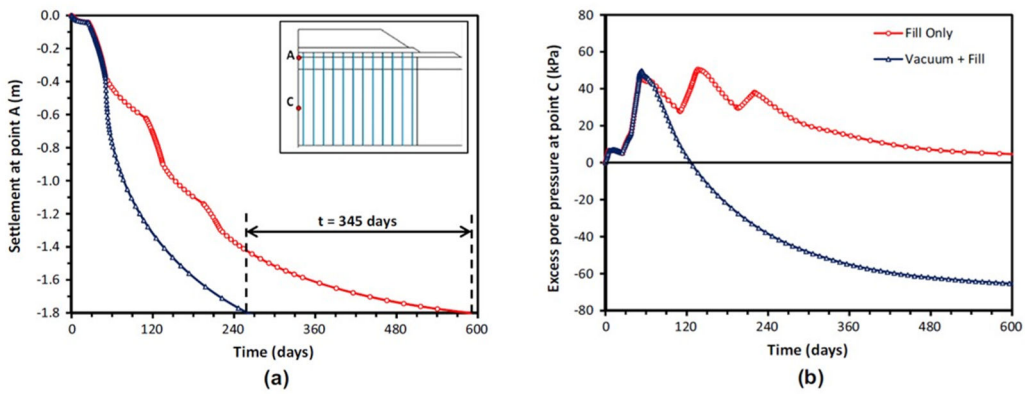
شکل (۲-۳۳) تاریخچه ساخت خاکریز و اجرای خلاء (a) خاکریز ۳.۵ متری به همراه خلاء (b) خاکریز تک ۷.۵ متری[۵]

با استفاده از خلاء مقاومت برشی بسیج شده از ۱.۵ به ۳ کیلو پاسکال از بالا به سمت پایین خاک رس نرم رسیده است. اگر خاکریز با ارتفاع بلند در مدت زمان کوتاهی ساخته شود آن‌گاه خاکریز دچار لغزش می‌شود. ساخت خاکریز ۷.۵ متری به صورت مرحل‌های انجام شده است به طوری که با اعمال هر لایه از خاکریز در وسط لایه رس نرم ۶۰ درصد فشار آب منفذی اضافی اتلاف می‌شود تا خاک رس نرم مقاومت برشی کافی برای تحمل بار گام بعدی را بدست آورد تا خرابی صورت نگیرد و بیشترین نشست بدست بیاید. الگوی نشست سطح زمین بعد از گذشت یک سال از تحکیم با و بدون خلاء در شکل (۲-۳۴) نشان داده شده است.



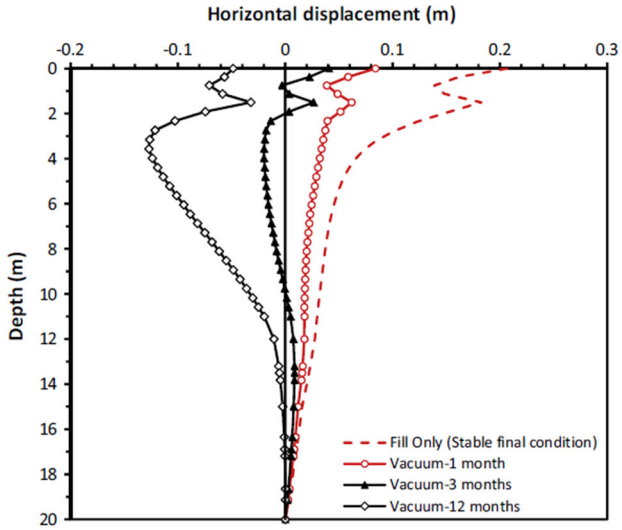
شکل (۲-۳۴) الگوی نشست سطح زمین در زیر خاکریز دایره‌ای با و بدون پیش بارگذاری خلاء[۵].

می‌توان مشاهده کرد که مقدار حداکثر نشست تحکیمی پس از یک سال استفاده از خلاء ۱.۹۹ متر است یعنی دو برابر مقدار نشست تحکیمی پس از یک سال بدون استفاده از خلاء است. در شکل (۲-۳۵) مشاهده می‌شود که میزان نشست خاکریز ۳.۵ متری به همراه خلاء ۱.۸ متر بعد از گذشت ۲۸۰ روز بدست می‌آید در حالی که برای خاکریز تک ۳.۵ متری میزان نشست بعد از ۶۲۵ روز به مقدار مورد نظر می‌رسد، تقریبا یک سال بیشتر از حالت استفاده از خلاء می‌شود. در شکل (۲-۳۵) میزان نرخ نشست منحنی مرتبط به خاکریز ۳.۵ متری به همراه خلاء بعد از گذشت تقریبا سه ماه با استفاده از خلاء کاهش می‌یابد. همین موضوع را می‌توان در نمودار فشار اضافی آب منفذی در وسط لایه رس متوجه شد. فشار اضافی آب منفذی در انتهای تحکیم در حالت خاکریز تک ۳.۵ متری به صفر می‌رسد اما در حالت خاکریز ۳.۵ متری به همراه خلاء به ۷۰- کیلو پاسکال می‌رسد.



شکل (۲-۳۵) مقایسه تحکیم بین پیش بارگذاری خاکریز با و بدون خلاء (a) نشست (b) اضافه فشار آب منفذی[۵]

در شکل (۲-۳۶) جابجایی افقی در پنجه خاکریز در دو حالت خاکریز ۳.۵ متری به همراه خلاء با دوره‌های زمانی یک، سه و دوازده ماه و خاکریز با ارتفاع ۷.۵ متری بدون فشار خلاء نمایش داده شده است. در حالت خاکریز تک کل جابجایی جانبی به اندازه ۰.۲۱ متر به طرف خارج است. استفاده از خلاء باعث کاهش جابجایی‌های به طرف خارج در خاک رس نرم می‌شود. در حالت خاکریز به همراه خلاء کل جابجایی جانبی بعد از گذشت یک سال به اندازه ۰.۱۲۶ متر به سمت داخل است.



شکل (۲-۳۶) پروفیل جابجایی های افقی در پنجه خاکریز دایره‌ای[۵]

یکی از محاسن استفاده از خلاء کاهش زمان تحکیم اولیه است. شکل (۲-۳۵) نشان می‌دهد که سرعت تحکیم اولیه در ۱۲۰ روز اول بیشترین مقدار بود اما بعد از آن به محض قطع کردن خلاء سرعت تحکیم کاهش یافت. بهترین زمان برای پایان دادن فشار خلاء زمانی است که فشار اضافی آب منفذی صفر یا مقدار کمی منفی شود. بنابراین بعد از اتمام فشار خلاء وقتی سربار گذاشته شود بستر دیگر نشستی ندارد[۵].

۲-۱۱- جمع بندی

پیش‌بارگذاری به دو صورت ساخت خاکریز و ایجاد خلاء صورت می‌گیرد. ساده‌ترین روش برای پیش‌بارگذاری اعمال خاکریز می‌باشد. در پیش‌بارگذاری به روش خاکریز به مقدار قابل توجهی خاک نیاز است، حمل و نقل خاک و خاکریزی کردن زمان‌بر است و گاهاً هزینه زیادی دارد. گاهی اوقات ساخت

خاکریز باعث شکست و حرکت‌های بزرگ می‌گردد. وقتی خاکریز بر روی خاک نرم وارد می‌شود ابتدا این بار به آب داخل منافذ خاک وارد می‌شود. زمانی که نفوذپذیری خاک بسیار پایین باشد، فشار آب منفذی اضافی با سرعت کم در جهت قائم جریان پیدا کرده و زائل می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات و همچنین سرعت بخشیدن به زائل شدن فشار آب منفذی از پیش‌بارگذاری خلاء استفاده می‌شود. برای ایجاد پیش‌بارگذاری خلاء از زهکش‌های قائم پیش‌ساخته استفاده می‌شود زیرا زهکش‌های قائم می‌توانند در عمق‌های زیاد مسیر زهکشی با نفوذپذیری مشخص برای زائل کردن فشار آب منفذی اضافی ایجاد کند.

زهکش‌های قائم به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱) زهکش‌های قائم ماسه‌ای

۲) زهکش‌های قائم پیش ساخته

در بهسازی خاک، زهکش‌های قائم تنها به روند تحکیم اولیه لایه‌های زیرین سرعت می‌بخشند و باعث کاهش تحکیم ثانویه نمی‌شوند. در گذشته استفاده از ستون سنگی و سپس استفاده از زهکش‌های ماسه‌ای برای بهسازی زمین سست مرسوم بود. برای افزایش سرعت تحکیم در خاک‌های با نفوذپذیری بسیار کم و کوتاه شدن مسیر زهکشی، از زهکش‌های قائم پیش‌ساخته استفاده می‌شود. زهکش‌های قائم پیش‌ساخته در اصل به عنوان جایگزین مناسبی برای زهکش‌های ماسه‌ای که معمولاً استفاده می‌شود، توسعه داده شد.

با توجه به مطالعات محققین پیشین می‌توان نتیجه گرفت :

کاهش شیب خاکریز باعث افزایش ارتفاع خاکریز در زمان خرابی می‌گردد. با کاهش سرعت ساخت خاکریز اجازه داده می‌شود تا خاکریز با ارتفاع بیشتری تخریب شود. با بارگذاری تدریجی به بستر اجازه داده می‌شود تا فشار آب حفره‌ای اضافی کاهش یابد و مقاومت برشی بستر هم به همین ترتیب افزایش یابد. با کاهش فاصله زهکش‌ها مقدار نشست افزایش می‌یابد. استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته تغییر شکل‌های جانبی را کاهش و ارتفاع خاکریز را افزایش می‌دهند. نشست منطقه‌ای که توسط زهکش‌های قائم پیش ساخته بهسازی شده‌اند سه برابر نشست منطقه‌ای که بدون زهکش‌های قائم پیش ساخته (تحت شرایط یکسان پیش‌بارگذاری و در زمان معین) است. استفاده تواماً از پیش‌بارگذاری خلاء و خاکریز حرکت‌های جانبی را به حداقل می‌رسانند، زیرا تنش مؤثر ایجاد شده توسط خلاء به صورت محوری افزایش می‌یابد و جابجایی جانبی ناشی از خلاء فشاری است و فشار خاکریز باعث جابجایی جانبی کششی می‌شود. سرعت

نشست در حالتی که پیش‌بارگذاری به صورت اعمال فشار خلاء باشد از حالتی که پیش‌بارگذاری به صورت ساخت خاکریز باشد بیشتر است. فشار خلاء در عمق زمین به هیچ عنوان کاهش پیدا نمی‌کند. با اعمال فشار خلاء می‌توان خطر شکست برشی را حتی در نرخ بالاتر ساخت خاکریز می‌توان به حداقل رساند.

با توجه به دلایل فوق می‌توان نتیجه گرفت مطالعه عددی گزینه مناسبی برای توصیف میزان اهمیت جنس و رفتار خاک بستر در تعیین نوع روش بهسازی است.

فصل ۳:

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

یکی از روش‌های مطالعه و بررسی رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی استفاده از روش‌های عددی می‌باشد. در گذشته محققین ترجیح می‌دادند از مدل‌های آزمایشگاهی و روش‌های تحلیلی استفاده نمایند، ولی با گسترش روش‌های عددی و استفاده از رایانه‌ها با قدرت پردازش بالا، کاربرد روش‌های عددی در حل مسائل ژئوتکنیکی، در سال‌های اخیر توسعه چشم گیری داشته است و با توجه به مشکلات موجود در شبیه سازی عددی این مسائل به لحاظ رفتارهای پیچیده و متفاوت خاک، وجود آب در خاک، افزایش فشار آب حفره‌ای و نیز اندرکنش خاک و سازه همچنان از مباحث روز دنیا می‌باشد. نرم افزارهای عددی براساس داده‌های آزمایشگاهی جهت تحلیل سازه‌های واقعی با مقیاس اصلی می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند[۲۴]. در این تحقیق جهت مدلسازی از نرم‌افزار پلکسیس ورژن ۲۰.۰۴ استفاده شده است که این نرم افزار بر پایه روش عددی اجزا محدود می‌باشد. علت استفاده از این نرم‌افزار به دلیل وجود پیش‌بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم پیش ساخته است که به راحتی در این نرم‌افزار مدل می‌شود.

۳-۲- روش حل مسائل فیزیکی

روش‌های عددی با توجه به محیط سازه و وضعیت توده سنگ، به دو گروه کلی روش‌های پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند. در روش‌های پیوسته، توده خاک و سنگ پیوسته در نظر گرفته شده و تمامی ویژگی مقاومتی و تغییر شکل پذیری سنگ در همه جهات یکسان فرض می‌شود. در صورتی که توده خاک و سنگ به صورت ناپیوسته در نظر گرفته شود در این صورت توجه زیادی در مراحل طراحی به ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها و درزه‌های موجود در توده سنگ می‌گردد. در این روش توده سنگ و خاک به صورت بلوک-های مجزا مدلسازی شده و هر یک از بلوک‌ها از طریق ناپیوستگی‌ها بر بلوک‌های مجاور خود اثر می‌گذارد.

از جمله متداول‌ترین روش‌های عددی برای حل مسائل مکانیک خاک و سنگ به شرح زیر است:

۳-۲-۱- روش‌های پیوسته

روش اجزا محدود[۲۴]

روش تفاضل محدود[۲۵]

روش اجزا مرزی[۲۶]

۳-۲-۲- روش اجزا محدود

در این روش ابتدا کل محیط به زیرساخت‌ها[۲۷] تقسیم می‌شود که در هر یک از این زیرساخت‌ها، رفتار مواد و مشخصات هندسی ثابت می‌باشد. سپس هر یک به اجزاهای کوچک‌تر تقسیم می‌شوند به طوری که هر اجزا از نظر مشخصات رفتاری در یک ناحیه خاص قرار می‌گیرند. هر اجزا به وسیله گره‌های اطراف خود تعریف می‌شود. ارتباط بین آن‌ها از طریق گره‌های مشترک برقرار شده و بایستی با مشخصات هندسی، سازه-ای و رفتاری هر اجزا تعریف گردد. حال با توجه به این ویژگی‌ها، یک ماتریس سختی کل برای هر زیرساخت و ترکیب ماتریس‌های سختی زیرساخت‌های تشکیل دهنده ماتریس هدف یا ماتریس سختی عمومی مدل خواهد شد. سپس بر اساس یک معادله ماتریس کلی، پارامترهای مشخص را به پارامترهای نامشخص ارتباط داده و از این طریق مقادیر تنش‌ها و تغییر شکل‌ها، ابتدا در نقاط مرزی و تکیه‌گاهی و سپس برای کلیه گره-های تشکیل دهنده در مدل محاسبه می‌شود. در روش اجزا محدود در اثر تغییر در شرایط اولیه زمین نظیر فرآیند حفر تونل، تنش، کرنش و تغییر شکل‌ها در اجزا ایجاد می‌شود. به طوری که تنش، کرنش و تغییر شکل القا شده در یک جزء، در رفتار جزءهای مجاور خود تأثیر می‌گذارد و به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا سایر اجزا را نیز تحت پوشش قرار دهد. روش اجزا محدود را روش ضمنی[۲۸] نیز می‌نامند بدین جهت که

[24] Finite Element Method
[25] Finite difference method
[26] Border element method
[27] Substructure
[28] Implicit Approach

هنگام تحلیل در این روش ماتریس تشکیل می‌شود که در آن کل اجزا با هم ارتباط داشته و به طور مشترک مدنظر قرار می‌گیرند[۲۵].

۳-۲-۲-۱- روش تفاضل محدود :

این روش در کل مشابه روش اجزا محدود است و شامل تقسیم مدل به زیرساخت و اجزا می‌باشد. با این تفاوت که برای تحلیل مدل، شرایط بارگذاری و تحلیل به صورت یک مرحله‌ای انجام نمی‌شود بلکه شرایط اعمال بار و تحلیل مدل در فواصل زمانی بسیار کوتاه انجام می‌شود و در هر مرحله فرض برآن است که هر جز مستقل رفتار می‌کند. روش ارتباط معلومات با مجهولات مسئله بر مبنای روابط حرکت نیوتن در ریاضیات است. روش تفاضل محدود را روش صریح[۲۹] می‌نامند بدین معنی که اجزا به طور مجزا تحلیل شده و تأثیر آن‌ها بر اجزا بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد[۲۵]. در روش تفاضل محدود، با استفاده از معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزیی[۳۰] جابجایی در نقاط مختلف شبکه بدست می‌آید. در این روش نیازی به تشکیل ماتریس نبوده و شکل‌گیری و حل معادلات در این روش به صورت محلی انجام می‌گیرد؛ بنابراین نسبت به سایر روش‌های عددی که از ماتریس استفاده می‌کنند، به زمان اجرا و حافظه کمتری جهت محاسبات نیاز دارد. این روش با شبکه منظم دارای کاستی‌هایی است که بیشتر آن‌ها عدم انعطاف‌پذیری در برخورد با شکستگی‌ها، شرایط مرزی پیچیده و ناهمگنی مواد می‌باشد. به طوری که در تحلیل محیط‌های غیرسیال نسبت به روش اجزا محدود ضعیف‌تر عمل کرده و اگر برای تحلیل‌های استاتیکی استفاده شود نسبت به روش اجزا محدود زمان بیشتری صرف می‌شود[۲۶].

۳-۲-۲-۲- روش اجزا مرزی :

روش اجزا مرزی نسبت به روش های اجزا محدود و تفاضل محدود، روش جدیدتری است. در این روش محیط مدل به شکل پیوسته در نظر گرفته می‌شود با این تفاوت که تنها مرزهای اطراف محیط به جزءهای کوچک‌تر تقسیم می‌شوند مگر اینکه در محیط مورد نظر تغییراتی در مشخصات مواد وجود داشته باشد که در این صورت این نواحی نیز به صورت اجزا مرزی باید مدل شود. در این روش در ابتدا واکنش اجزا نسبت به

[29] Explicit Approach
[30] Partial Differential Equations

شرایط بارگذاری خارجی محاسبه شده و رفتار اجزا مرزی براساس معادلات دیفرانسیل جزئی مدلسازی و تحلیل می‌شود و اگر مقادیر تنش‌ها و تغییر شکل‌ها را در داخل محیط موردنظر خواسته باشیم با انتگرال-گیری از معادلات دیفرانسیل جزئی بدست می‌آیند[۲۵]. از جمله مزایای روش اجزا مرزی نسبت به روش‌های قبلی می‌توان به کاهش ابعاد مدل، استفاده از مش‌بندی بسیار ساده‌تر و آماده‌سازی داده‌ها در ورودی اشاره کرد. همچنین در این روش راه حل‌های داخل دامنه پیوسته بوده که این امر بر خلاف روش‌های اجزا محدود و تفاضل محدود است که راه حل ناپیوسته و نقطه به نقطه دارند. به طور کلی روش اجزا مرزی در حل مسائل ناهمگن و خطی الاستیک کارآمدتر است. اما این روش به اندازه روش اجزا محدود در مواجهه با ناهمسان‌گردی‌ها کارآمد نیست بلکه بسیاری از دامنه‌های روش اجزا محدود را ندارد. همچنین روش اجزا مرزی به اندازه روش اجزا محدود در برخورد با موادی که رفتاری غیر خطی (مانند شکل‌پذیری و فرآیند شکست) دارند، عملکرد مناسبی ندارد[۲۶].

۳-۲-۳- روش‌های گسسته

روش اجزا گسسته[۳۱]

روش شبکه گسستگی‌های مجزا[۳۲]

۳-۲-۳-۱- روش اجزا گسسته

روش اجزا مجزا با توجه به تقسیم محدوده مسئله به سیستمی از بلوک‌ها، مشابه روش اجزا محدود است. در این روش امکان بررسی عوارض ساختاری مانند لایه بندی، گسل‌ها، درزه‌ها و انواع ناپیوستگی‌ها وجود دارد. طرح کلی این روش مشابه روش صریح تفاضل محدود است که برای تحلیل‌های عددی پیوسته به کار می‌رود. روش اجزا مجزا با توجه به منطق شکل‌گیری آن، روش قدرتمندی برای آنالیز مسائل در توده سنگ‌های ناپیوسته یا مواد سنگی با رفتار غیرخطی می‌باشد[۲۷].

[31] Discrete element method
[32] Discrete Fracture Network

۳-۲-۳-۲- روش شبکه گسستگی‌های مجزا

این روش در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی جهت مطالعه جریان در شبکه شکستگی‌های دو و سه بعدی، که مدل کردن آن با روش‌های پیوسته دشوار است، ارائه گردید. امروزه برای معادلات پیوسته جریان و جابجایی خواص شکستگی‌های سنگ از این روش استفاده می‌شود. این روش برنامه گسترده‌ای برای مسائل شکستگی در مکانیک سنگ ارائه می‌دهد که ممکن است دلیل جذابیت این روش باشد[۲۶].

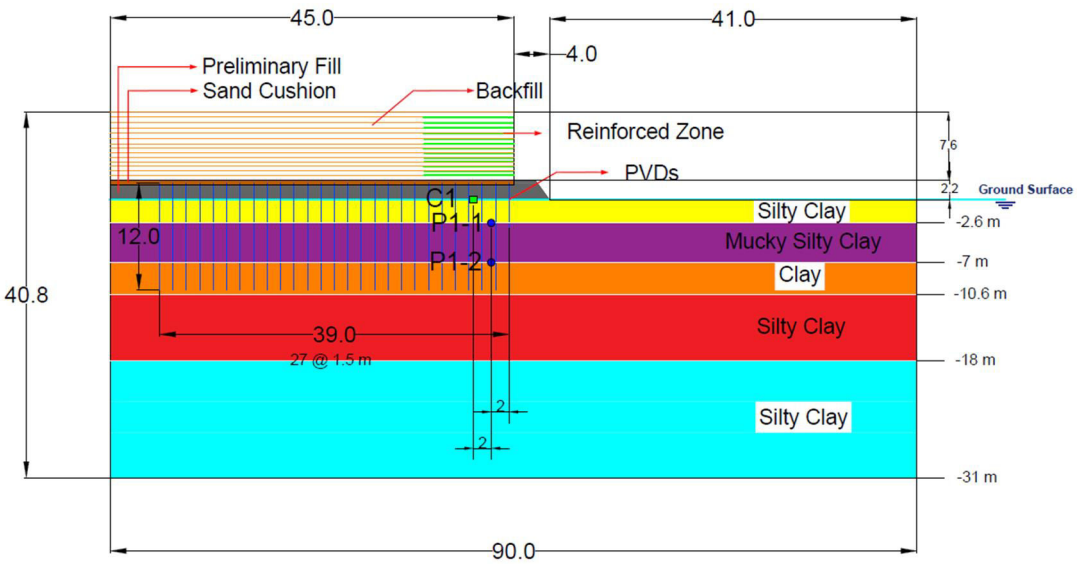
۳-۳- نرم افزار پلکسیس دو بعدی:

نرم افزار پلکسیس در سال ۱۹۸۷ توسط دانشگاه صنعتی دلف هلند تهیه شد و امروزه یکی از قوی‌ترین نرم افزارهای موجود بر پایه روش اجزا محدود در محیط‌های خاکی و سنگی می‌باشد. استفاده از این نرم افزار به تدریج گسترش بیشتری یافته است و با همکاری دیگر متخصصین ژئوتکنیک در اروپا همانند متخصصین دانشگاه اشتوتگارت نیز ادامه یافت و تکمیل این برنامه هم‌چنان ادامه دارد. نرم افزار پلکسیس قادر است انواع مسائل کرنش مسطح، تقارن محوری و نیز الگوهای سه بعدی که از لحاظ هندسی دارای تقارن محوری ولی تحت بارگذاری نا متقارن هستند را الگو سازی و تحلیل نماید. با این نرم‌افزار می‌توان خاکبرداری و خاکریزی مرحل‌های با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از اجزا مثلثی شش گرهی و پانزده گرهی مدلسازی نمود. با توجه به امکانات ویژه نرم افزار پلکسیس در الگو سازی رفتارهای مختلف و اساسی خاک و سنگ نظیر الگو رفتاری موهر-کولمب[۳۳] می‌توان به خوبی از این نرم افزار در مسائل ژئوتکنیک استفاده کرد. نرم افزار پلکسیس الگوهای رفتاری دیگر هم مانند الگوی خاک نرم شونده[۳۴]، الگوی کم-کلی[۳۵]، الگوی خاک سخت شونده[۳۶] و الگوی خاک نرم شونده خزشی[۳۷] را نیز دارا است که می‌توان از هر کدام از آن‌ها با توجه به نوع خاک و رفتارهای گوناگون از آن استفاده کرد.

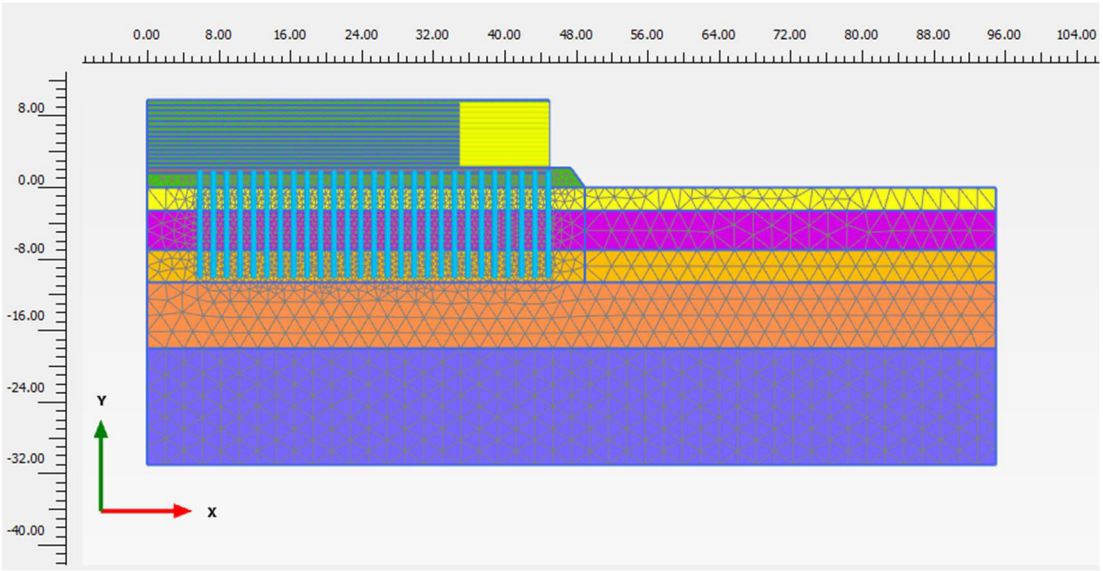
[33] Mohr-Coulomb
[34] Soft Soil
[35] Cam Clay
[36] Hardening Soil
[37] Soft Soil Creep

۳-۴- صحت سنجی

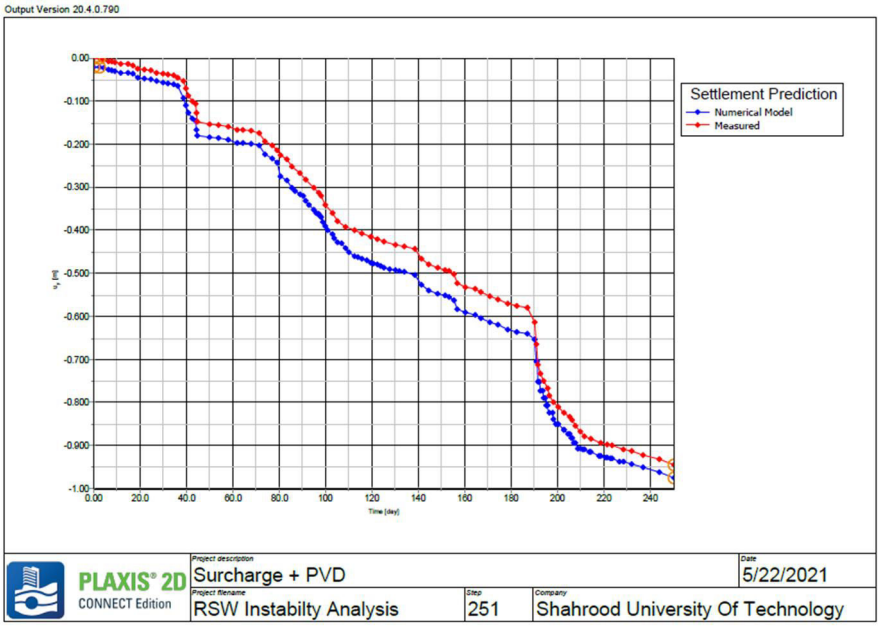
به منظور اطمینان از صحت نتایج نرم افزار پلکسیس ورژن ۲۰.۰۴ مورد استفاده در این پژوهش از مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۴ در راستای پروژه زهکش‌های قائم پیش ساخته در شهر شانگهای کشور چین بوده، استفاده شده است. هندسه مدل در شکل (۴-۱) و نحوه مش بندی در شکل (۴-۲) آورده شده است. دیوار خاک مسلح در چهارده لایه بارگذاری شده است و ارتفاع خاکریز ۹.۸ متر است که ۲.۲ متر پتو زهکش و ۷.۶ متر دیوار خاک مسلح اجرا شده است. سطح آب زیر زمینی در سطح زمین قرار دارد و طول زهکش‌های قائم ۱۲ متر به فاصله ۱.۵ متر است. با توجه به مدل سازی دیوار خاک مسلح شانگهای چین که در نرم افزار پلکسیس انجام شد، نتایج به دست آمده از نشست در شکل (۴-۳) و فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل‌های (۴-۴) و (۴-۵) نشان می‌دهد که هم‌پوشانی مطلوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق دارد به همین سبب نتایج مدل‌های اصلی مورد اطمینان هستند[۲۸].



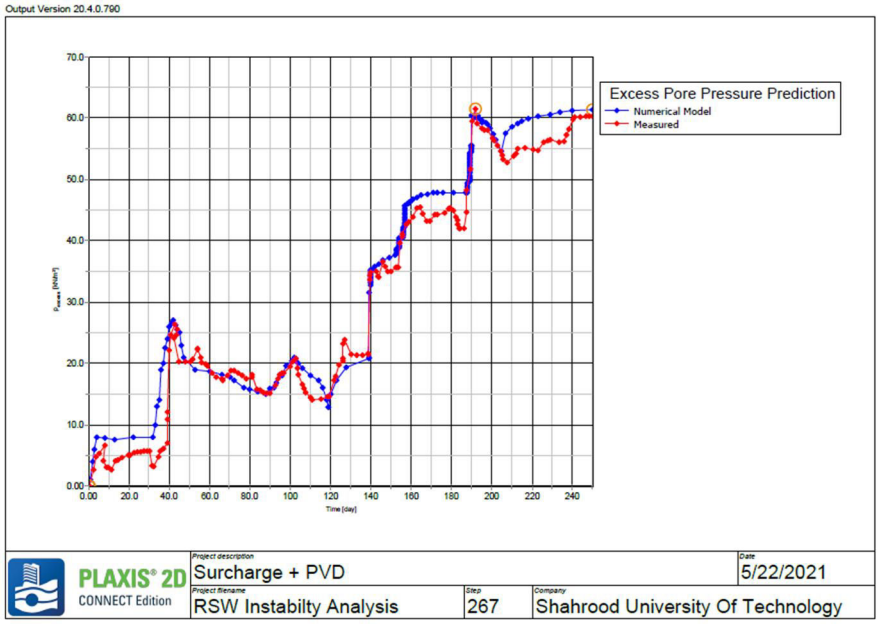
شکل (۳-۱) ابعاد مدل دو بعدی دیوار خاک مسلح شانگهای چین



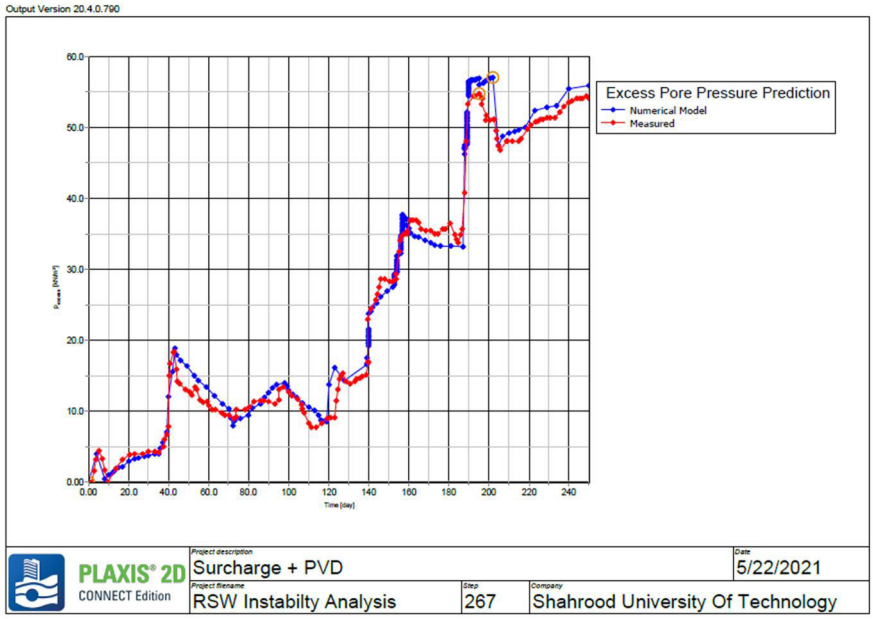
شکل (۳-۲) مش بندی مدل دیوار خاک مسلح شانگهای چین



شکل (۳-۳) مقایسه مقدار نشست اندازه گیری شده و نشست در مدلسازی در نقطهC1



شکل (۳-۴) مقایسه مقدار فشار آب حفره‌ای اضافی اندازه گیری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی در مدلسازی در نقطه P1-1



شکل (۳-۵) مقایسه مقدار فشار آب حفره‌ای اضافی اندازه گیری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی در مدلسازی در نقطه P1-2

۳-۵- مدلسازی بهسازی خاک بستر به همراه پیش بارگذاری

توسعه سریع شهرنشینی، مهندسان را مجبور به ساخت سازه‌های خاکی، از جمله بزرگ‌راه‌های اصلی بر روی رسوبات رس نرم با ظرفیت باربری اندک و نشست بیش از حد کرده است. از آن‌جا که خاک‌های نرم ضعیف هستند، خاکریزهای غیر مسلح فقط می‌توانند ۴-۵ متر ساخته شوند. برای این‌که بتوان خاکریز را با ارتفاع بیشتر و با سرعت بالاتری ساخت می‌توان از تکنیک‌هایی چون: تسطیح کردن پای خاکریز، سبک کردن وزن خاکریز نسبت به حالت معمول و ساخت خاکریز به صورت مرحله‌ای استفاده کرد. استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته به همراه پیش‌بارگذاری (فشار خلاء یا خاکریز) یکی از مؤثرترین روش‌های بهسازی زمین است. معمولاً برای تسریع در تحکیم با کمک زهکش‌های قائم، یک سربار معادل یا بیشتر از مقدار بارگذاری اصلی اعمال می‌شود. اعمال فشار خلاء می‌تواند مقدار مصالح خاکریز مورد نیاز برای بدست آوردن نشست مورد نظر را کاهش دهد زیرا با ایجاد خلاء تنش مؤثر افزایش یافته و به تحکیم سرعت می-بخشد[۱۸].

۳-۵-۱- پیش بارگذاری و بهسازی خاک بستر

۳-۵-۱-۱- خاکریز تک :

پیش بارگذاری توسط خاکریز یک روش موفقیت آمیز برای بهسازی زمین در خاک‌های نرم بوده است. به طور معمول به یک دوره استراحت بین چهار ماه تا یک سال نیاز دارد که بستگی به میزان تحکیم و مقدار سربار دارد. در این روش برای کاهش دادن زمان تحکیم می‌بایست سربار را افزایش داد که این موضوع در مناطقی که بدست آوردن منبع قرضه دشوار است، اتخاذ این روش محدودیت قابل توجهی در پروژه ایجاد می‌کند[۲۹].

۳-۵-۱-۲- خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

روش زهکش‌های قائم پیش ساخته به همراه سربار یکی از محبوب‌ترین روش‌های بهسازی زمین نرم است. در سال ۱۹۸۲ با نصب زهکش‌های قائم ماسه‌ای با مقطع دایره‌ای مسیر زهکشی را کوتاه کردند. در سال ۱۹۹۴ استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته ژئوسنتتیک جایگزین زهکش‌های ماسه‌ای شد. این

روش به دلیل نصب سریع با استفاده از تجهیزات ساده میدانی، به گزینه‌ای مقرون به صرفه و مناسب تبدیل شده است. فاصله زهکش‌های قائم پیش ساخته تأثیر مستقیم در تعیین میزان تحکیم را دارد. به طور معمول فاصله زهکش‌های قائم از ۱ – ۲.۵ متر متغیر است[۱۷].

۳-۵-۱-۳- زهکش‌های قائم پیش ساخته به همراه خلاء :

حداکثر فشار خلاء تا ۱۰۰ کیلو پاسکال است که باعث افزایش تنش مؤثر می‌شود. به طور مؤثر این فشار خلاء حداکثر تا عمق ۱۰ متر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای جلوگیری از نشت هوا در حین فرآیند پیش بارگذاری نیاز به کنترل خوب مکانیسم آب بندی دارد[۱۸].

۳-۵-۱-۴- خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته و خلاء :

زهکش قائم پیش ساخته معمولاً همراه با پیش بارگذاری خلاء استفاده می‌شود. هنگامی که بار سربار (خاکریز) بیشتر از بار خلاء باشد، از روش پیش بارگذاری خلاء به همراه خاکریز استفاده می‌شود. مکانیسم روش پیش بارگذاری خلاء و خاکریز با بررسی فشار آب منفذی و تغییرات تنش مؤثر صورت می‌گیرد[۲۰].

۳-۶- مدلسازی عددی

در این تحقیق برای این که برای هر نوع زمین بتوان مناسب‌ترین و بهینه‌ترین روش بهسازی را انتخاب کرد، چهار نوع زمین مد نظر گرفته شد و برای هر نوع زمین چهار روش بهسازی خاک بستر (خاکریز تک- خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته- زهکش‌های قائم پیش ساخته به همراه پیش بارگذاری خلاء- خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته و پیش بارگذاری خلاء) در نرم افزار پلکسیس دو بعدی به صورت کرنش مسطحه[۳۸] مدلسازی شد که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

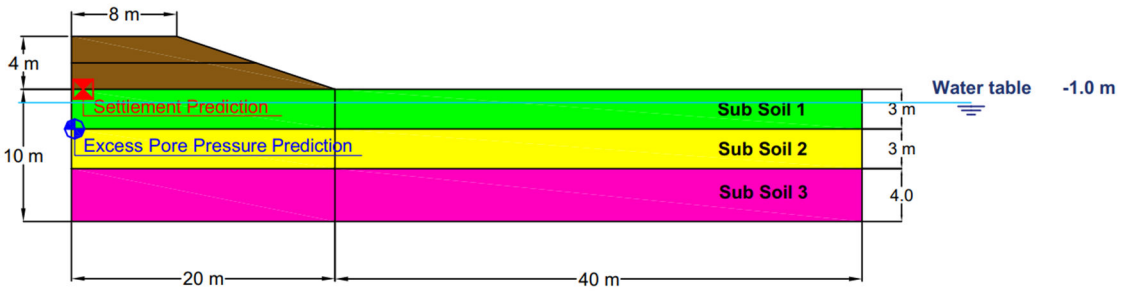
[38] Plane strain

۳-۶-۱- مدل خاک بستر به همراه خاکریز (زمین نوع یک):

در این زمین از بهسازی، به دلیل این که نشست تحکیمی با پیش بارگذاری خاکریز در مدت ۹ روز صورت می‌گیرد، دیگر نیازی به روش بهسازی دیگری وجود ندارد بلکه در اجرا هیچ توجیهی ندارد بنابراین باقی روش‌های بهسازی مدلسازی نشده است به همین جهت بهینه‌ترین روش بهسازی در این زمین بهسازی به واسطه پیش بارگذاری خاکریز صورت گرفته است.

۳-۶-۱-۱- پیش بارگذاری خاکریز

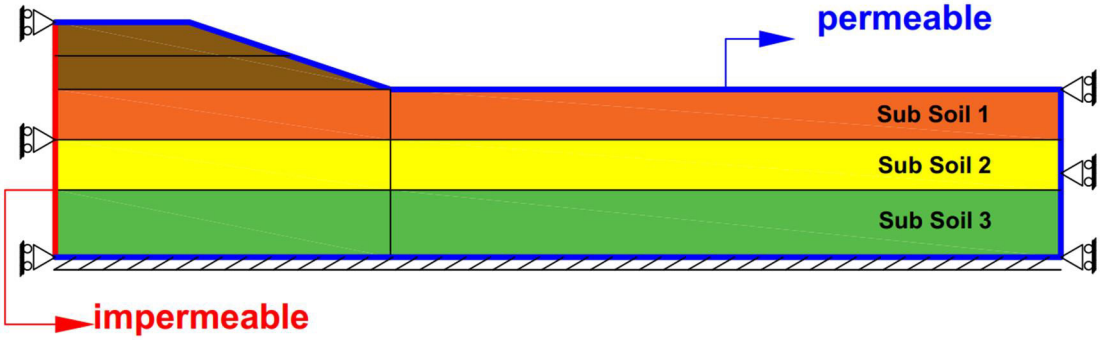
مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده ۱۴m × ۶۰m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۱) خاک بستر در ۳ لایه که لایه اول و دوم با مدل رفتاری خاک نرم و لایه سوم با مدل رفتاری خاک سخت شونده و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل(۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.



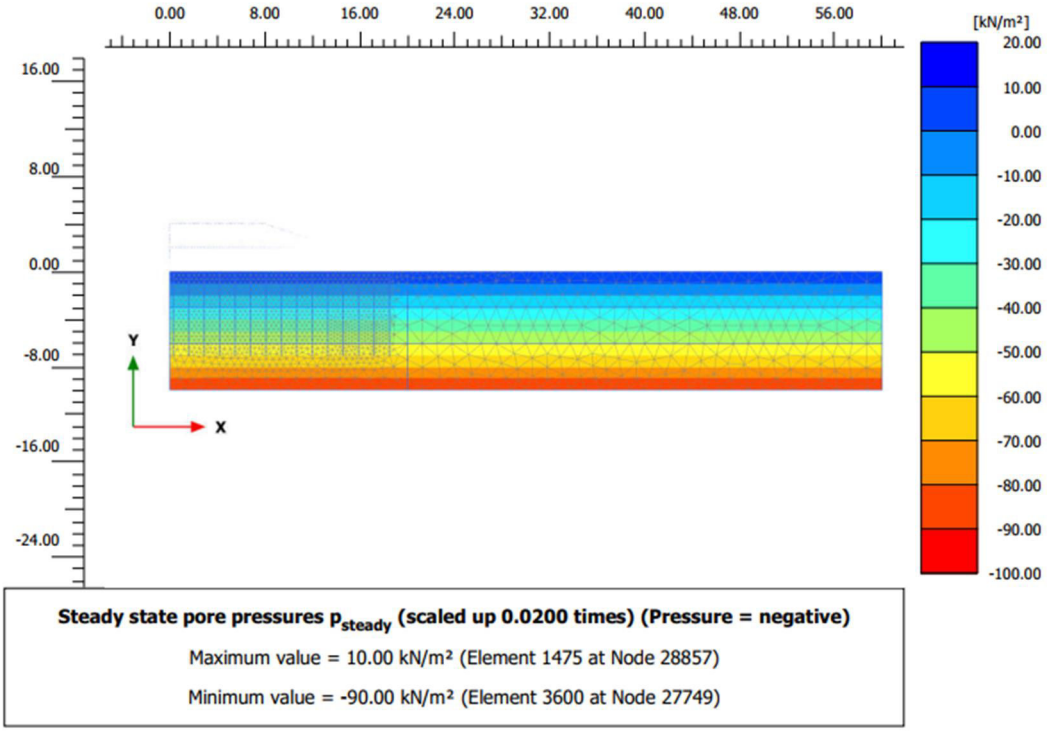
شکل (۳-۶) مدل ساخته شده در فضای دو بعدی نرم افزار پلکسیس _ خاک بستر به همراه خاکریز

جدول (۳-۱) مشخصات خاک بستر و خاکریز (زمین نوع یک)

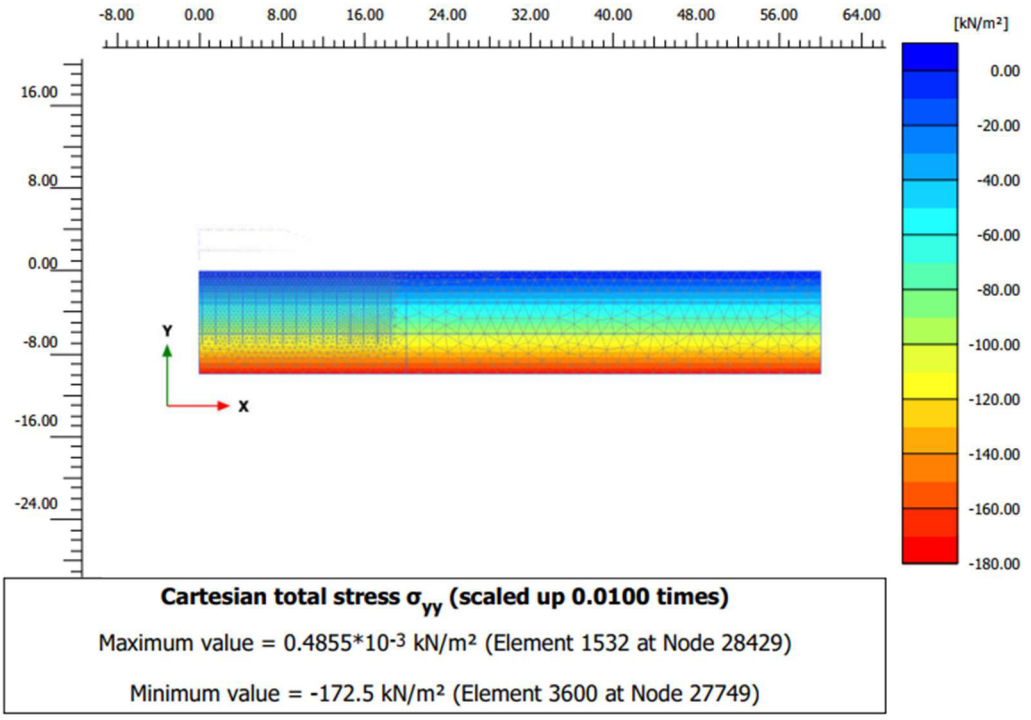
پارامترها	واحد	خاکریز	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم
		مدل رفتاری خاک سخت شونده	مدل رفتاری خاک نرم	مدل رفتاری خاک نرم	مدل رفتاری خاک سخت شونده
وزن مخصوص غیر اشباع	KN/m^3	۱۶	۱۱	۱۵	۱۸
وزن مخصوص اشباع	KN/m^3	۱۹	۱۴	۱۹	۲۰
نسبت تخلخل	-	۰.۵	۱.۵	۱.۱	۰.۵
E_{50}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	۴۸
E_{oed}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	۴۸
E_{ur}^{ref}	M Pa	۷۵	-	-	۱۴۴
C'	K Pa	۱	۱.۴	۱	۰
ϕ	-	۳۰°	۲۰°	۲۴°	۳۲°
[illegible]	m/day	۳.۴۹۹	۰.۸	۰.۰۹	۱۰.۲
[illegible]	m/day	۳.۴۹۹	۰.۱	۰.۰۸	۱۰.۲



شکل (۳-۷) شرایط مرزی اعمال شده درمدل دو بعدی نرم افزار پلکسیس



شکل (۳-۸) شرایط اولیه تنش هیدرولیکی در مدل دو بعدی نرم افزار پلکسیس



شکل (۳-۹) شرایط اولیه تنش برجا مدل دو بعدی نرم افزار پلکسیس

۳-۶-۲- مدلسازی خاک بستر به همراه خاکریز و زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (زمین نوع دو):

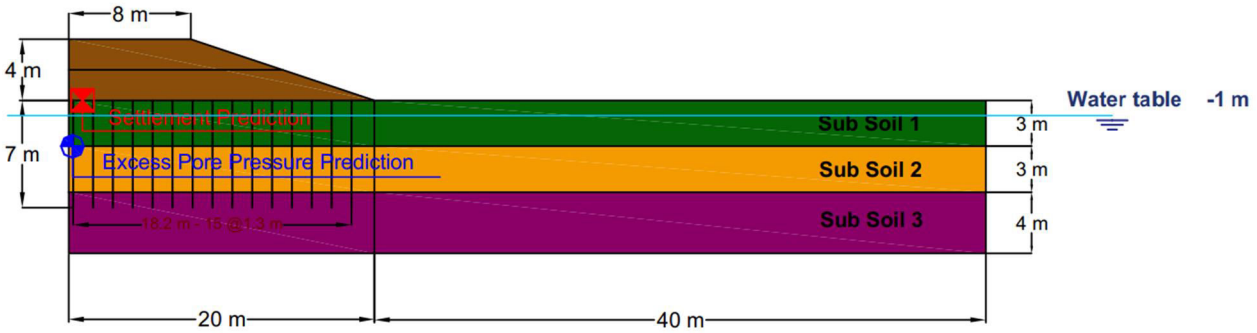
در این زمین، بهینه‌ترین روش بهسازی روش پیش بارگذاری خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته انتخاب می‌شود زیرا در مدت ۵۲ روز به مقدار نشست تحکیمی ۱.۰۲ متر می‌رسد.

۳-۶-۲-۱- پیش بارگذاری خاکریز :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده ۱۴m × ۶۰m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۲) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.

۳-۶-۲-۲- پیش بارگذاری خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

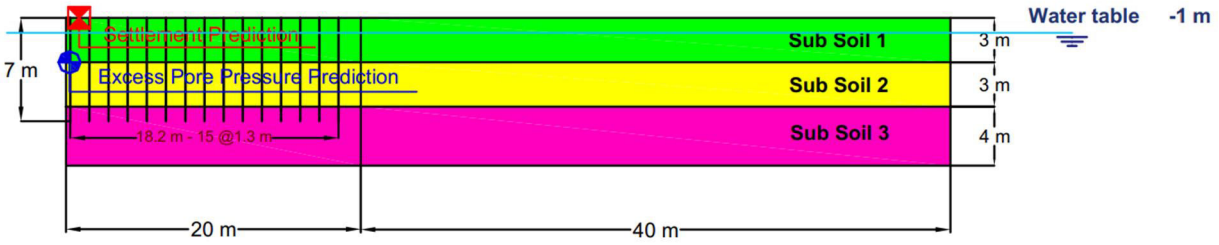
مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده ۱۴m × ۶۰m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۲) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱۰) مدل ساخته شده در فضای دو بعدی نرم افزار پلکسیس _ خاک بستر به همراه خاکریز و زهکش‌های قائم (پیش‌بارگذاری خلاء)

۳-۶-۲-۳- پیش بارگذاری خلاء به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده ۶۰m × ۱۰m است. طبق جدول (۳-۲) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند و فشار خلاء اعمال شده ۷۰- کیلو پاسکال است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱۱) مدل ساخته شده در فضای دو بعدی نرم افزار پلکسیس _ خاک بستر به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم

۳-۶-۲-۴- پیش بارگذاری خاکریز به همراه فشار خلاء به واسطه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده ۱۴m × ۶۰m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۲) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند و فشار خلاء اعمال شده ۷۰- کیلو پاسکال است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.

جدول (۳-۲) مشخصات خاک بستر و خاکریز (زمین نوع دو)

پارامترها	واحد	خاکریز	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم
		مدل رفتاری خاک سخت شونده	مدل رفتاری خاک نرم	مدل رفتاری خاک نرم	مدل رفتاری خاک نرم
وزن مخصوص غیر اشباع	KN/m^3	۱۶	۱۳.۵	۱۵	۱۶
وزن مخصوص اشباع	KN/m^3	۱۹	۱۶	۱۷	۱۹
نسبت تخلخل	-	۰.۵	۲.۵	۲.۹	۱.۹
E_{50}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	-
E_{oed}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	-
E_{ur}^{ref}	M Pa	۷۵	-	-	-
C'	K Pa	۱	۵	۴	۸
ϕ	-	۳۰°	۲۳°	۲۵°	۲۷°
k_x	m/day	۳.۴۹۹	۰.۰۰۳	۰.۰۰۶	۰.۰۱۵
k_y	m/day	۳.۴۹۹	۰.۰۰۱۵	۰.۰۰۳	۰.۰۰۷۵
k_z	m/day	-	۰.۰۰۰۶۰۱۳	۰.۰۰۰۹۶۱۴	۰.۰۰۱۵۰۰۵

۳-۶-۳- مدلسازی خاک بستر به همراه پیش بارگذاری خلاء به واسطه زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (زمین نوع سه):

در این زمین، بهینه‌ترین روش بهسازی روش پیش بارگذاری خلاء به واسطه زهکش‌های قائم پیش ساخته انتخاب می‌شود زیرا در مدت ۳۵ روز به مقدار نشست تحکیمی ۰.۵۵ متر می‌رسد.

۳-۶-۳-۱- پیش بارگذاری خاکریز :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده ۶۰m × ۱۴m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۳) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم خزشی و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است

همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.

۳-۶-۳-۲- پیش بارگذاری خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده ۶۰m × ۱۴m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۳) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم خزشی و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.

۳-۶-۳-۳- پیش بارگذاری خلاء به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده ۶۰m × ۱۰m است. طبق جدول (۳-۳) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم خزشی مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند و فشار خلاء اعمال شده ۷۰- کیلو پاسکال است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.

۳-۶-۳-۴- پیش بارگذاری خاکریز به همراه فشار خلاء به واسطه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده ۱۴m × ۶۰m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۳) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم خزشی و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب یک متر زیر سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند و فشار خلاء اعمال شده ۷۰- کیلو پاسکال است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) نمایش داده شده است.

جدول (۳-۳) مشخصات خاک بستر و خاکریز (زمین نوع سه)

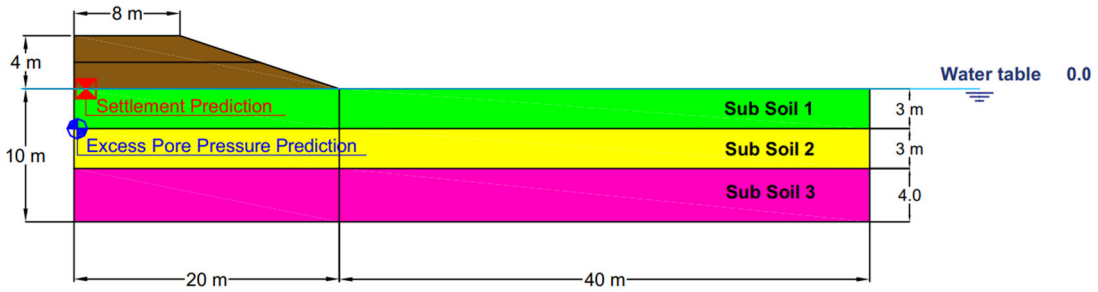
پارامترها	واحد	خاکریز	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم
		مدل رفتاری خاک سخت شونده	مدل رفتاری خاک نرم خزشی	مدل رفتاری خاک نرم خزشی	مدل رفتاری خاک نرم خزشی
وزن مخصوص غیر اشباع	KN/m^3	۱۶	۱۴	۱۳	۱۸
وزن مخصوص اشباع	KN/m^3	۱۹	۱۵	۱۴	۱۸.۵
نسبت تخلخل	-	۰.۵	۱.۹۳	۲.۹۱۰	۰.۷
E_{50}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	-
E_{oed}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	-
E_{ur}^{ref}	M Pa	۷۵	-	-	-
C'	K Pa	۱	۰	۱	۰
ϕ	-	۳۰°	۳۰°	۳۰°	۲۵°
[illegible]	m/day	۳.۴۹۹	۰.۰۰۶۷	۰.۰۰۰۱۲	۰.۰۱
[illegible]	m/day	۳.۴۹۹	۰.۰۰۰۳۵	۰.۰۰۰۰۷۸	۰.۰۱
[illegible]	m/day	-	۰.۰۰۱۰۲۵۵۸	۰.۰۰۰۰۳۱۶۹	۰.۰۰۱۲۶۴۲۳

۳-۶-۴- مدلسازی خاک بستر به همراه پیش بارگذاری خاکریز و خلاء به واسطه زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (زمین نوع چهار):

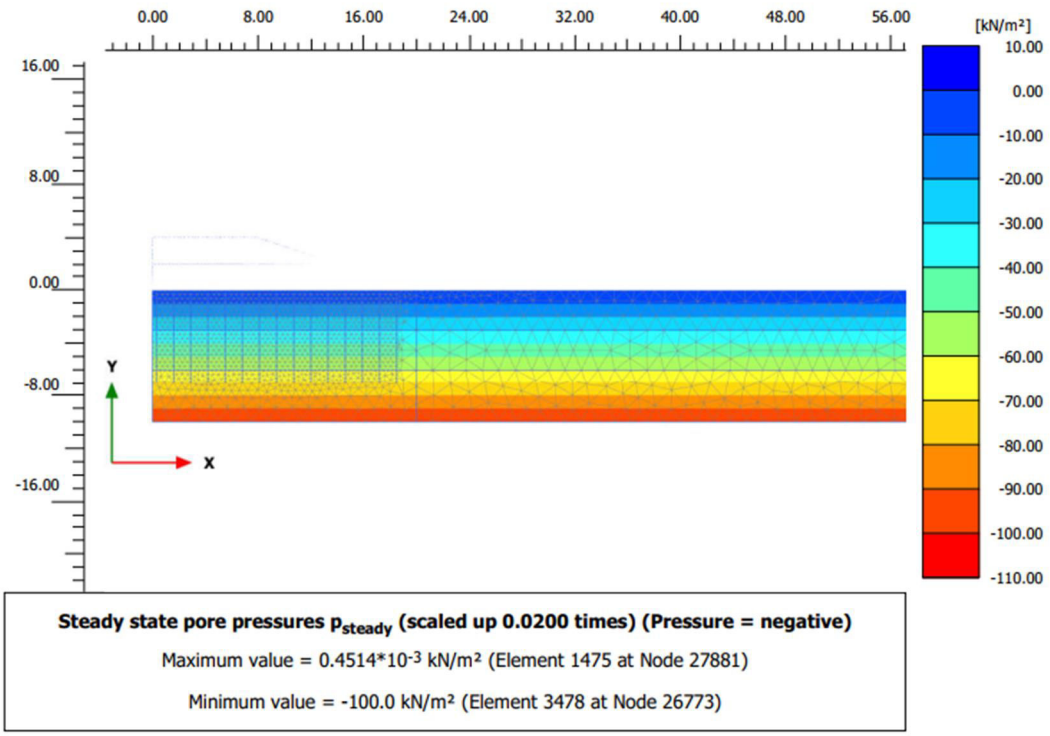
در این زمین، بهینه‌ترین روش بهسازی روش پیش بارگذاری خاکریز و خلاء به واسطه زهکش‌های قائم پیش ساخته انتخاب می‌شود زیرا در مدت ۱۲۰ روز به مقدار نشست تحکیمی ۰.۸ متر می‌رسد.

۳-۶-۴-۱- پیش بارگذاری خاکریز :

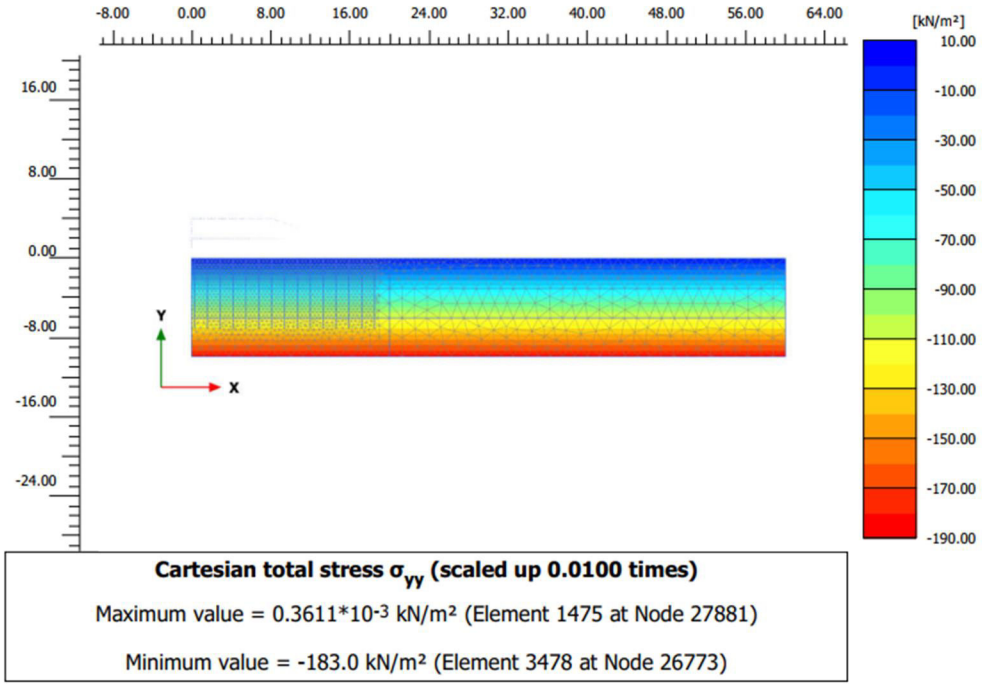
مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده ۱۴m × ۶۰m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۴) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب در سطح زمین قرار گرفته است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱۲) مدل ساخته شده در فضای دو بعدی نرم افزار پلکسیس _ خاک بستر به همراه خاکریز



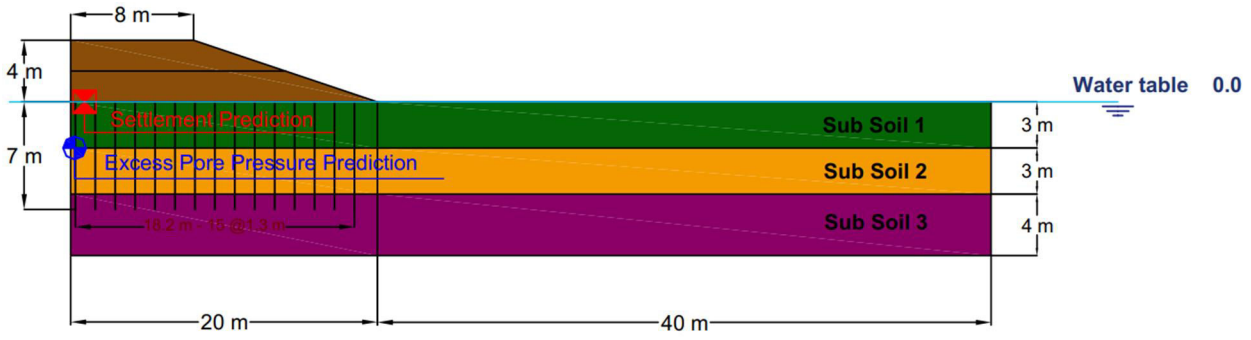
شکل (۳-۱۳) شرایط اولیه تنش هیدرولیکی در مدل دو بعدی نرم افزار پلکسیس



شکل (۳-۱۴) شرایط اولیه تنش برجا در مدل دو بعدی نرم افزار پلکسیس

۳-۶-۴-۲- پیش بارگذاری خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده ۶۰m × ۱۴m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۴) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب در سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) نمایش داده شده است.

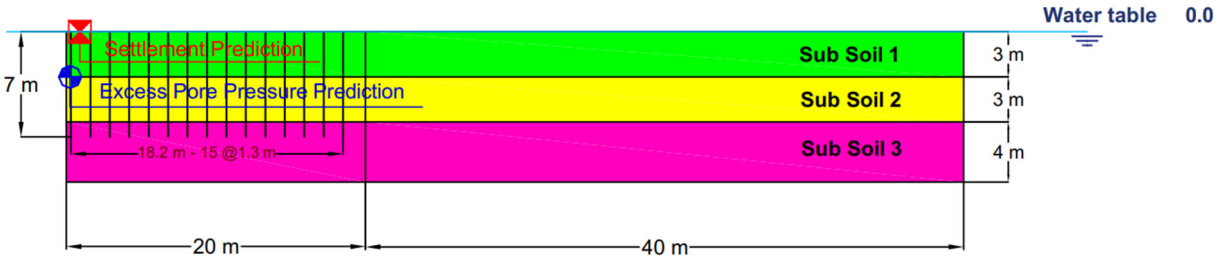


شکل (۳-۱۵) مدل ساخته شده در فضای دو بعدی نرم افزار پلکسیس _ خاک بستر به همراه خاکریز و زهکش‌های قائم (پیش‌بارگذاری خلاء)

۳-۶-۴-۳- پیش بارگذاری خلاء به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۶) نشان داده شده ۶۰m × ۱۰m است. طبق جدول (۳-۴) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم مدل شده و سطح آب در سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند و فشار خلاء اعمال شده ۷۰- کیلو پاسکال است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است

به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱۶) مدل ساخته شده در فضای دو بعدی نرم افزار پلکسیس _ خاک بستر به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم

۳-۶-۴-۴- پیش بارگذاری خاکریز به همراه فشار خلاء به واسطه زهکش‌های قائم پیش ساخته :

مدل ساخته شده در این زمین به صورت کرنش مسطحه و ۱۵ گرهی است و ابعاد مدل همان طور که در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده ۱۴m × ۶۰m است و ارتفاع خاکریز ۴ متر است که در دو گام ۲ متری و با شیب ۱:۳ بارگذاری شده است. طبق جدول (۳-۴) خاک بستر در ۳ لایه که هر سه لایه با مدل رفتاری خاک نرم و خاکریز با مدل رفتاری خاک سخت شونده مدل شده و سطح آب در سطح زمین قرار گرفته است. زهکش‌های قائم پیش ساخته با طولی معادل ۷ متر و فواصل ۱.۳ متر به تعداد ۱۵ عدد جاگذاری شده‌اند و فشار خلاء اعمال شده ۷۰- کیلو پاسکال است. شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مطابق با شکل (۳-۷) در نظر گرفته شده است به طوری که شرایط مرزی مکانیکی در طرفین مدل در جهت افق و پایین مدل در همه جهات مقید شده است همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ مدل نفوذناپذیر و باقی قسمت‌ها نفوذپذیر لحاظ شده است. شرایط اولیه (تنش برجا – تنش هیدرولیکی) در شکل‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) نمایش داده شده است.

جدول (۳-۴) مشخصات خاک بستر و خاکریز (زمین نوع چهار)

پارامترها	واحد	خاکریز	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم
		مدل رفتاری خاک سخت شونده	مدل رفتاری خاک نرم	مدل رفتاری خاک نرم	مدل رفتاری خاک نرم
وزن مخصوص غیر اشباع	KN/m^3	۱۶	۱۵	۱۵.۵	۱۶
وزن مخصوص اشباع	KN/m^3	۱۹	۱۸	۱۹	۱۸
نسبت تخلخل	-	۰.۵	۳	۳.۰۶	۱.۶
E_{50}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	-
E_{oed}^{ref}	M Pa	۲۵	-	-	-
E_{ur}^{ref}	M Pa	۷۵	-	-	-
C'	K Pa	۱	۱۰	۱۲	۲۰
ϕ	-	۳۰°	۲۱°	۲۶°	۱۷°
[illegible]	m/day	۳.۴۹۹	۰.۰۰۰۵۵۳	۰.۰۰۰۳۴۵۶	۰.۰۰۰۱۱۲۳
[illegible]	m/day	۳.۴۹۹	۰.۰۰۰۲۵۹۲	۰.۰۰۰۱۷۲۸	۰.۰۰۰۰۵۵۱۸
[illegible]	m/day	-	۰.۰۰۰۱۳۹۳۷	۰.۰۰۰۰۸۹۰۴	۰.۰۰۰۰۲۹۶۸

فصل ۴:

بحث و تفسیر نتایج

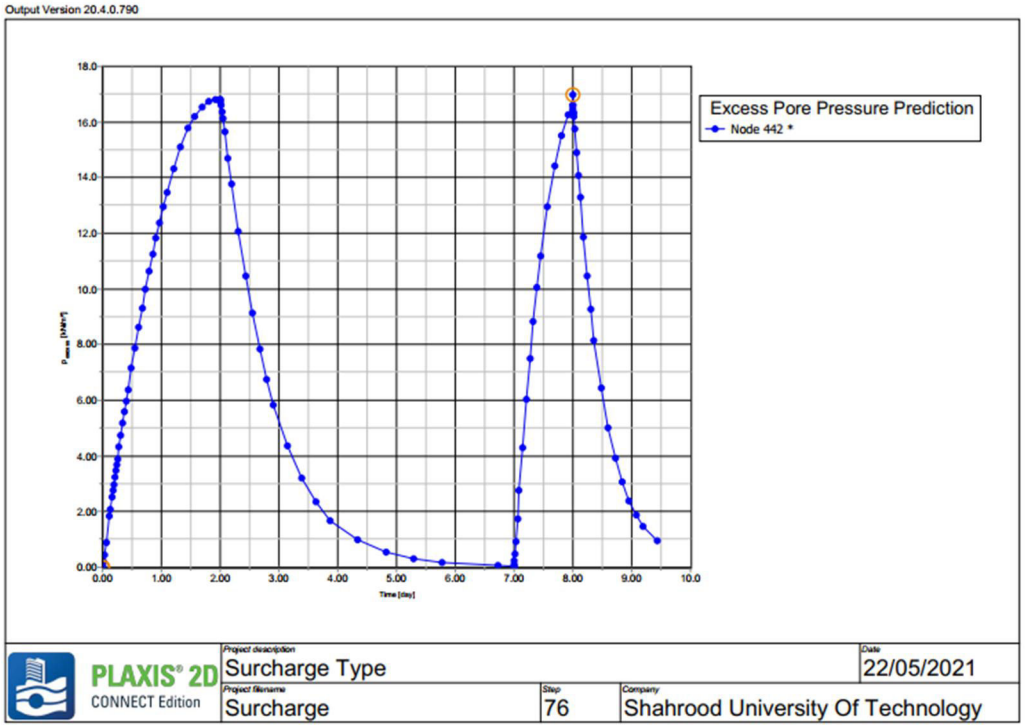
۴-۱- مقدمه :

نتایج حاصل از مدل سازی در قالب نشست و فشار آب حفره‌ای اضافی می‌باشد. همان طور که در شکل (۳-۶) در فصل قبل نشان داده شده است نقاط قرائت نشست در سطح زمین و فشار آب حفره‌ای اضافی سه متر زیر سطح زمین است که در ادامه به تفسیر آن‌ها پرداخته می‌شود.

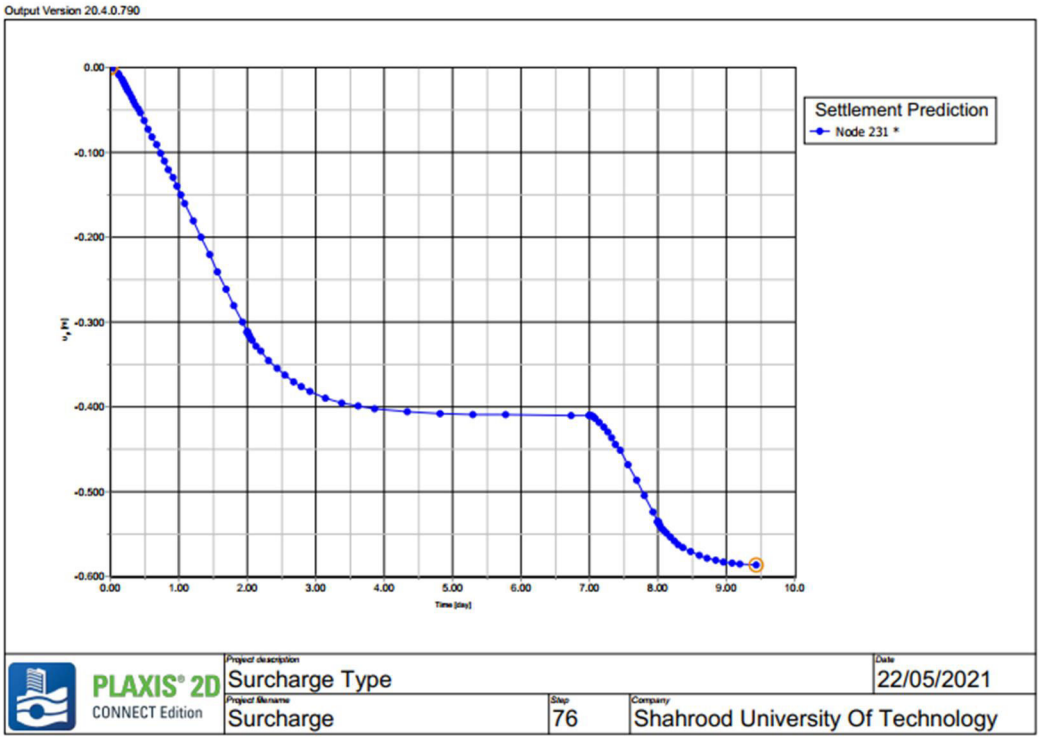
۴-۲- نتایج مدلسازی خاک بستر به همراه خاکریز (زمین نوع یک) :

۴-۲-۱- نتایج مدلسازی خاکریز :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۱) ابتدا در گام اول ۲ متر خاکریز را در ۲ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱۶.۸۱ کیلو پاسکال می‌رسد سپس با استراحت ۵ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به صفر رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۷ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۱۶.۹۶ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۲) مقدار نشست تحکیمی در ۹ روز به مقدار ۰.۵۸۷ متر می‌رسد.



شکل (۴-۱) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع یک

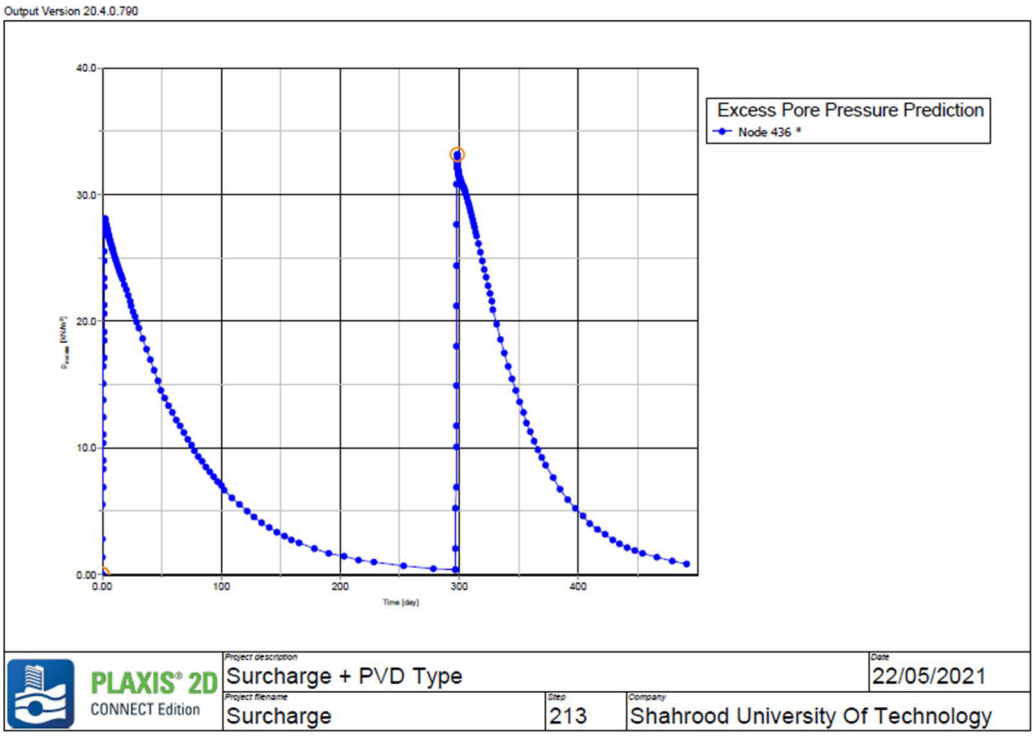


شکل (۴-۲) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع یک

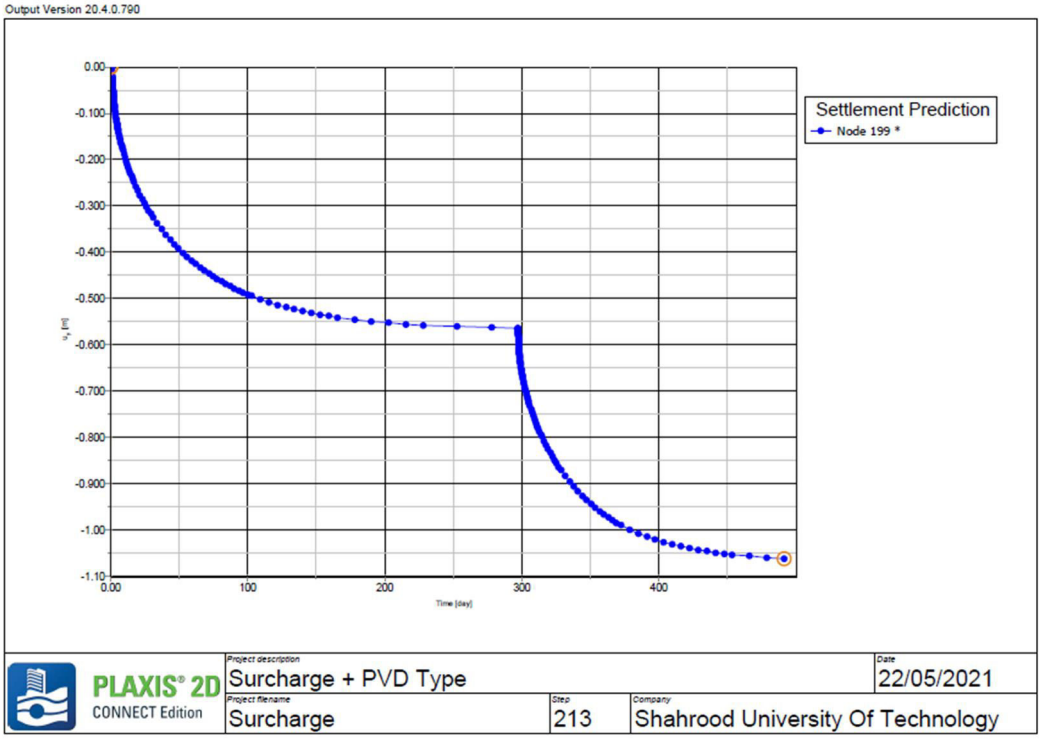
۴-۲-۲- نتایج مدلسازی خاک بستر به همراه خاکریز و زهکش‌های قائم پیش‌ساخته (زمین نوع دو) :

۴-۲-۲-۱- نتایج مدلسازی خاکریز تک :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۳) ابتدا در گام اول ۲ متر خاک ریز را در ۲ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به ۲۸.۱ کیلو پاسکال می‌رسد سپس با استراحت ۲۹۵ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به صفر رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۲۹۷ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۳۳.۱۵ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۴) مقدار نشست تحکیمی در ۴۹۱ روز به مقدار ۱.۰۶ متر می‌رسد.



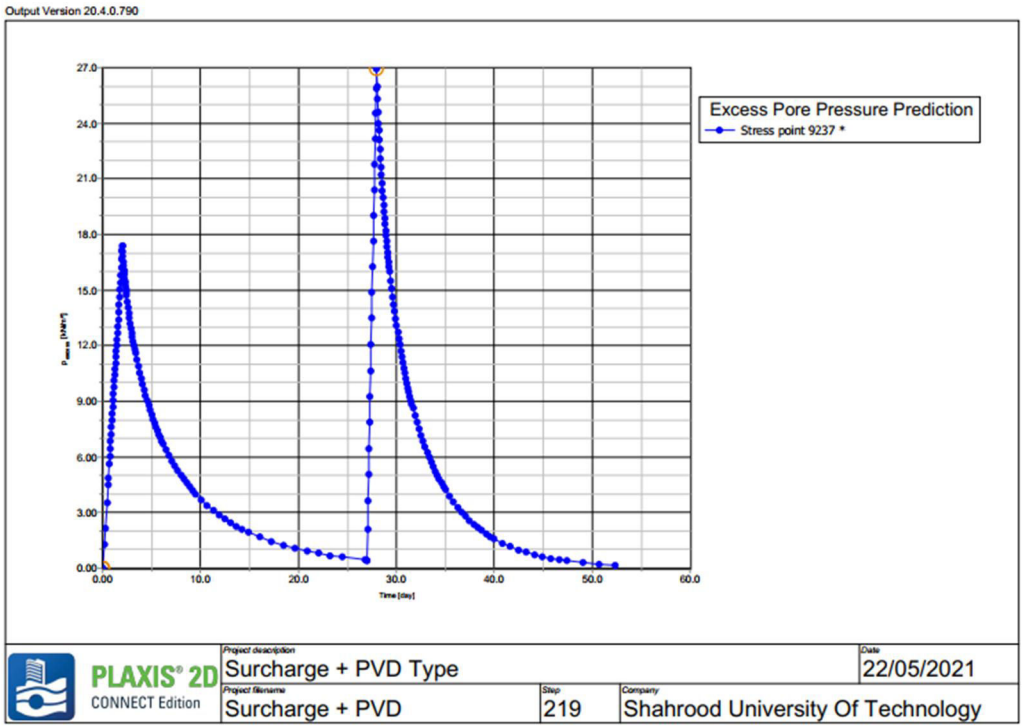
شکل (۴-۳) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع دو



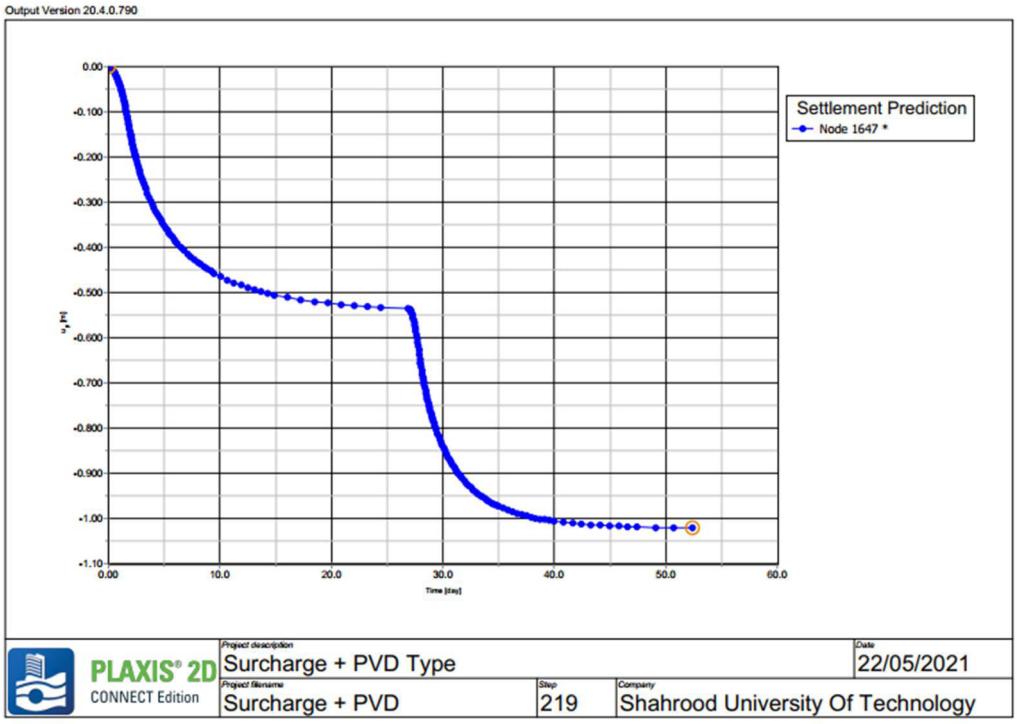
شکل (۴-۴) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع دو

۴-۲-۲-۲- نتایج مدلسازی خاکریز به همراه زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۵) ابتدا در گام اول ۲ متر خاک ریز را در ۲ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱۷.۳۷ کیلو پاسکال می‌رسد سپس با استراحت ۲۵ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به صفر رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۲۷ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۲۶.۹۵ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۶) مقدار نشست تحکیمی در ۵۲ روز به مقدار ۱.۰۲ متر می‌رسد.



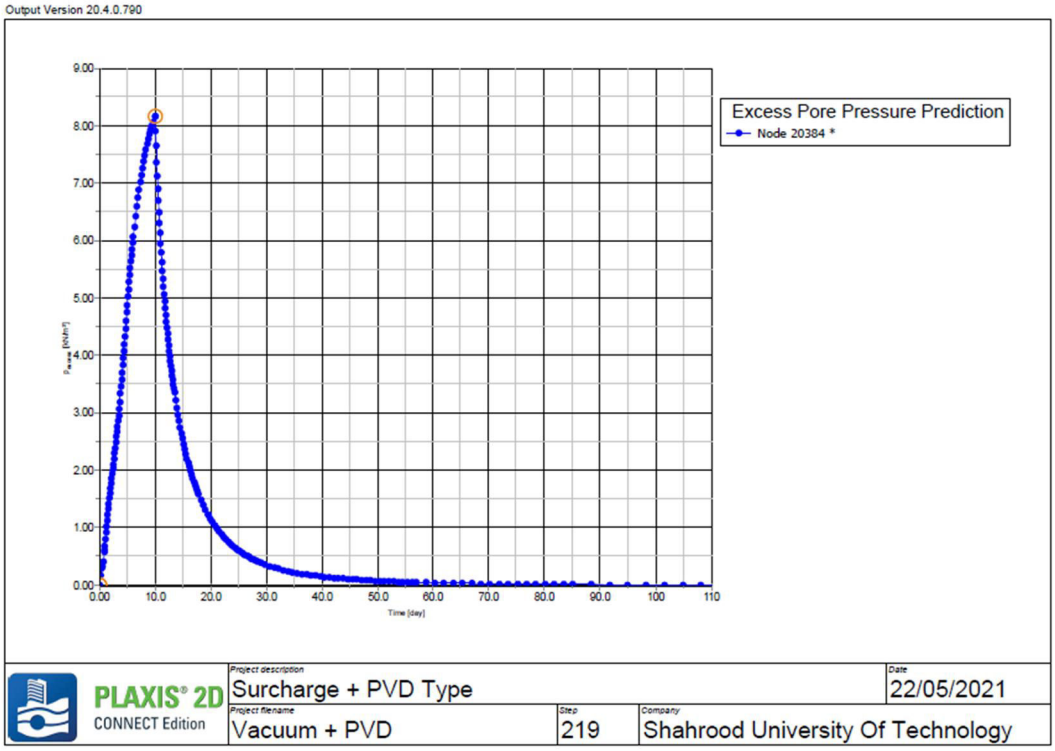
شکل (۴-۵) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز و زهکش‌های قائم _ زمین نوع دو



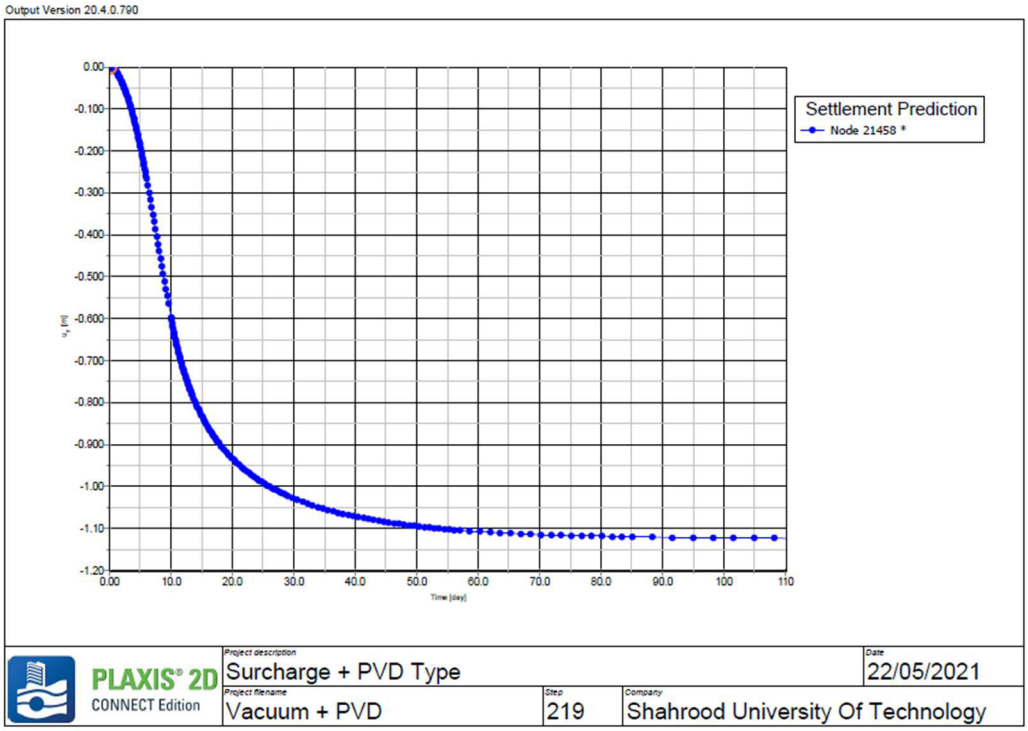
شکل (۴-۶) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز و زهکش‌های قائم _ زمین نوع دو

۴-۲-۲-۳- نتایج مدلسازی پیش بارگذاری خلاء به همراه زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۷) پس از روشن شدن خلاء با فشار ۷۰- کیلو پاسکال، به دلیل بالا بودن سرعت زهکشی در ۱۰ روز اول فشار آب حفره‌ای اضافی به ۸.۱۵ کیلو پاسکال می‌رسد سپس در مدت ۴۵ روز زائل می‌شود با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۸) مقدار نشست تحکیمی در ۵۴ روز به مقدار ۱.۱ متر می‌رسد.



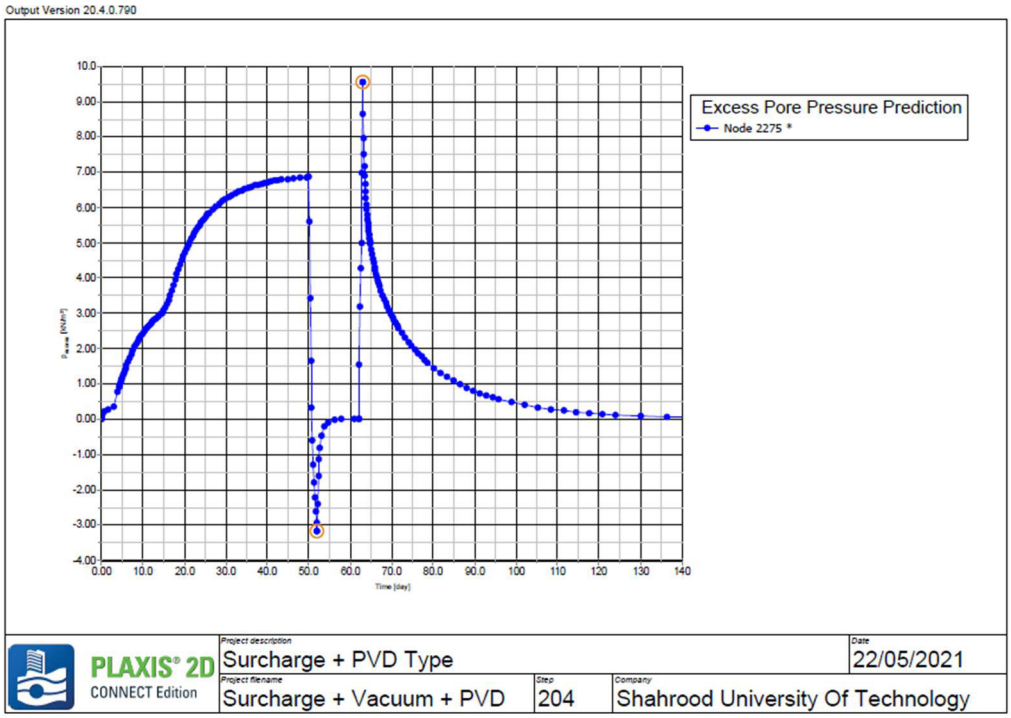
شکل (۴-۷) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع دو



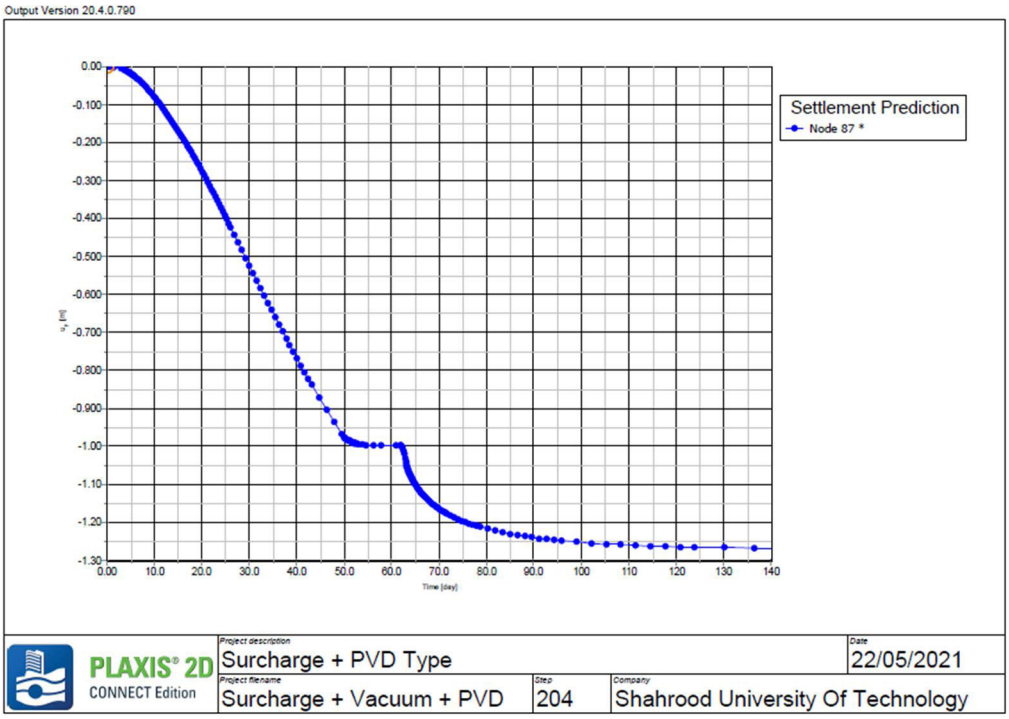
شکل (۴-۸) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع دو

۴-۲-۲-۴- نتایج مدلسازی خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۹) ابتدا خلاء با فشار ۷۰- کیلو پاسکال روشن شده، به دلیل بالا بودن سرعت زهکشی فشار آب حفره‌ای اضافی در ۵۰ روز اول به ۶.۸۷ کیلو پاسکال می‌رسد سپس فشار خلاء خاموش می‌شود و همزمان ۲ متر خاکریز در ۲ روز بارگذاری شده و به ۳.۱۶- کیلو پاسکال می‌رسد (فشار خلاء بر فشار ۲ متر خاکریز غالب شده است) سپس با استراحت ۱۰ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به صفر رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۶۲ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۹.۵۴ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۱۰) مقدار نشست تحکیمی در ۱۰۸ روز به مقدار ۱.۲۶ متر می‌رسد.

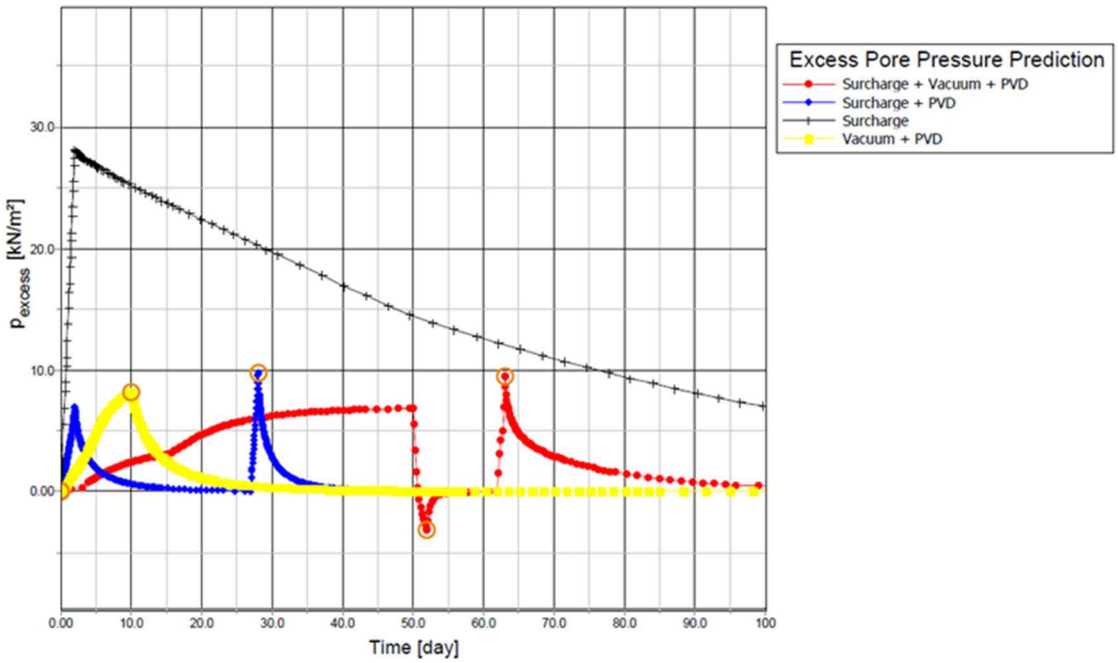


شکل (۴-۹) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع دو

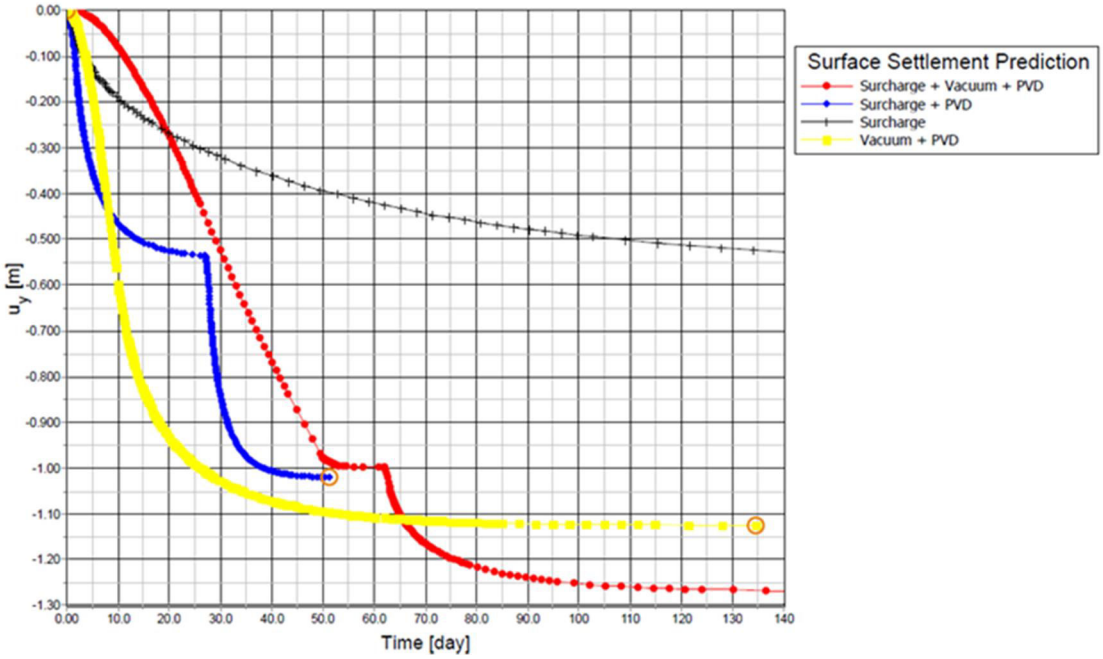


شکل (۴-۱۰) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع دو

همان طور که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است روش بهسازی خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش‌ساخته که با رنگ آبی ترسیم شده است، از دیگر روش‌ها سریع تر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده را زائل کرده است چرا که در روش خاکریز تک (رنگ سیاه) مدت زمان رسیدن به نشست تحکیمی و زائل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی بسیار زیاد است ، همچنین در روش خاکریز به همراه خلاء توسط زهکش قائم (رنگ قرمز) و روش خلاء توسط زهکش قائم (رنگ زرد) به دلیل اجرا سیستم خلاء هزینه انجام پروژه افزایش می‌یابد در صورتی که روش خاکریز به همراه زهکش قائم همان مقدار نشست را ارضا کرده است. همچنین با توجه به شکل (۴-۱۲) نمودار نشست تحکیمی می‌توان دریافت که این روش در کوتاه ترین زمان، مقدار نشست قابل توجهی نسبت به سه روش دیگر برآورده کرده است.



شکل (۴-۱۱) انتخاب خاکریز به همراه زهکش‌های قائم به عنوان بهینه‌ترین روش بهسازی بر اساس نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ زمان برای چهار روش بهسازی در زمین نوع دو

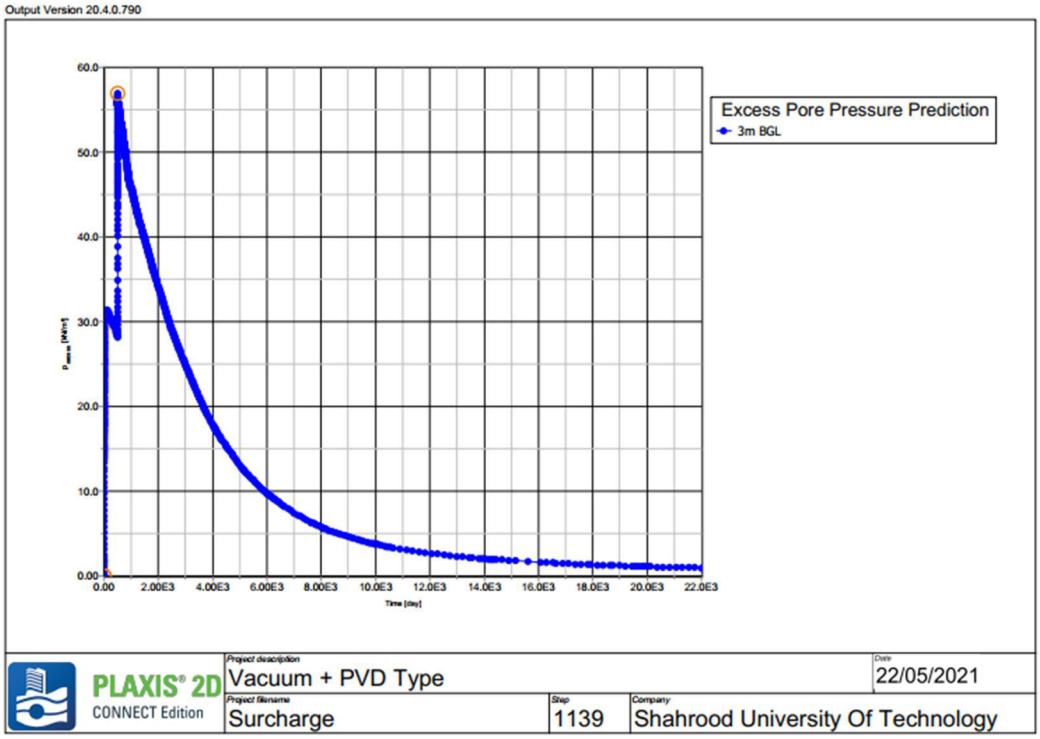


شکل (۴-۱۲) انتخاب خاکریز به همراه زهکش‌های قائم به عنوان بهینه‌ترین روش بهسازی بر اساس نمودار نشست تحکیمی _ زمان برای چهار روش بهسازی در زمین نوع دو

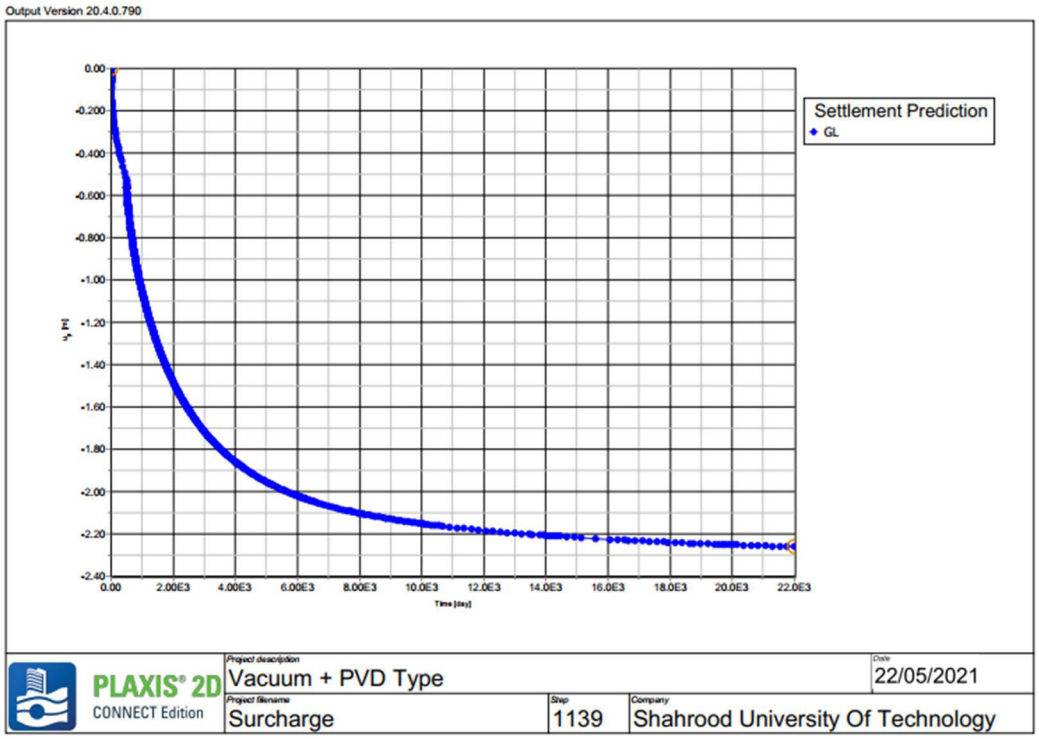
۴-۲-۳- نتایج مدلسازی خاک بستر به همراه پیش‌بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم (زمین نوع سه):

۴-۲-۳-۱- نتایج مدلسازی خاکریز تک :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۱۳) ابتدا در گام اول ۲ متر خاک ریز را در ۲ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به ۳۱.۳۹ کیلو پاسکال می‌رسد سپس با استراحت ۵۰۰ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به ۲۸.۰۸ کیلو پاسکال رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۵۰۲ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۵۶.۷۵ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۱۴) مقدار نشست تحکیمی در ۱۲۳۱۰ روز به مقدار ۲.۲ متر می‌رسد.



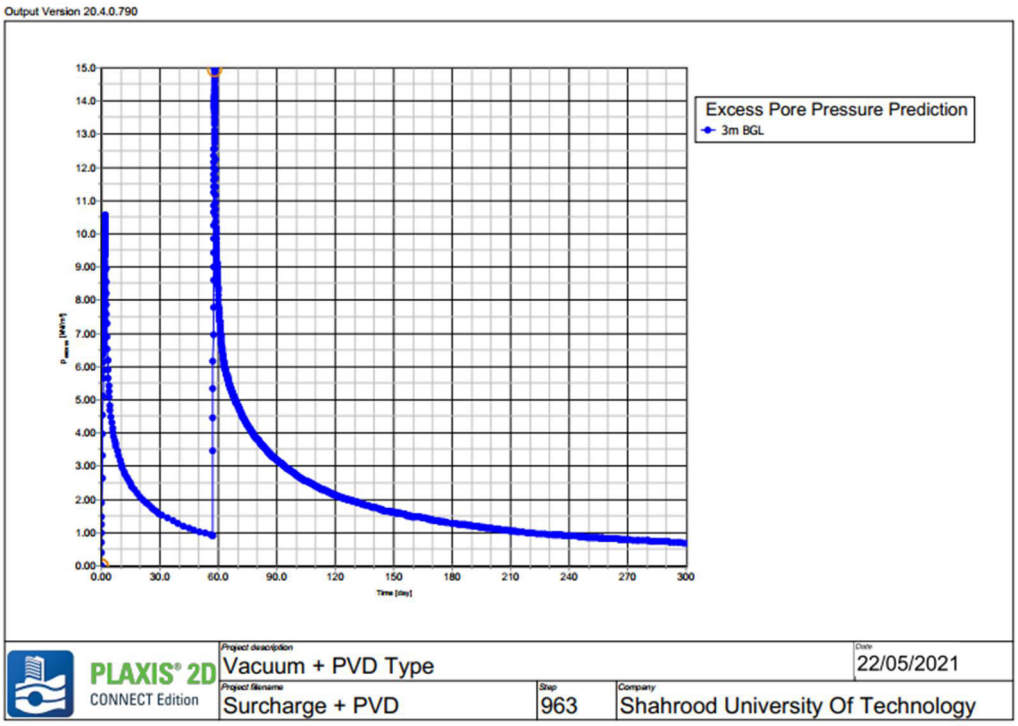
شکل (۴-۱۳) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع سه



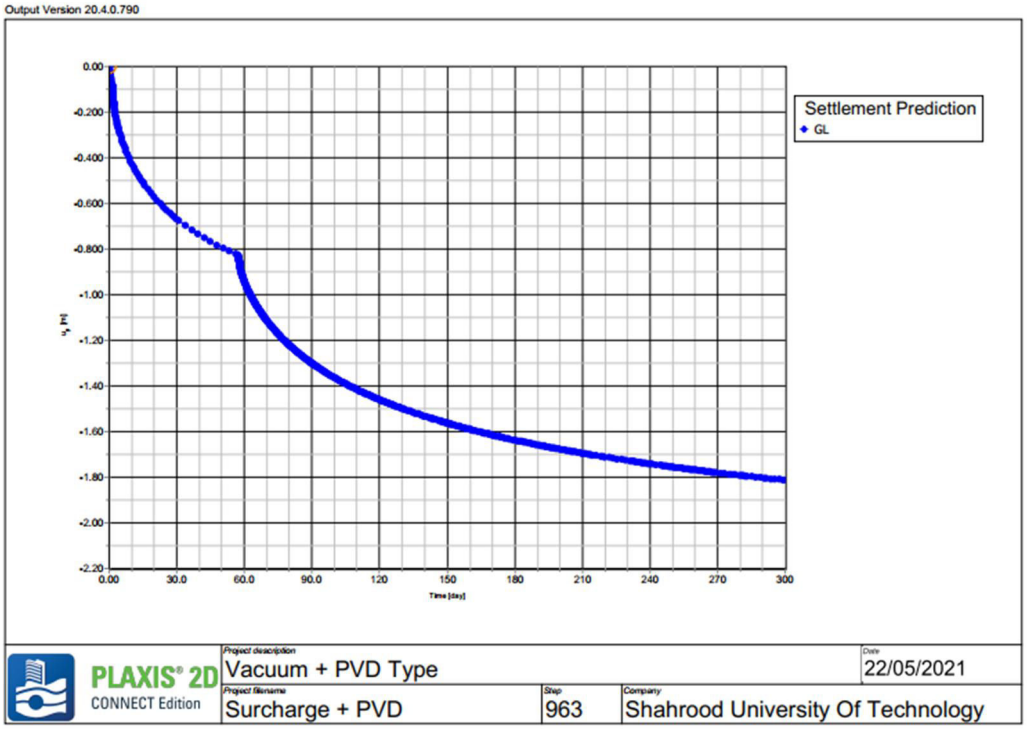
شکل (۴-۱۴) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع سه

۴-۲-۳-۲- نتایج مدلسازی خاکریز به همراه زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۱۵) ابتدا در گام اول ۲ متر خاک ریز را در ۲ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱۰.۵۴ کیلو پاسکال می‌رسد سپس با استراحت ۵۵ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به صفر رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۵۷ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۱۴.۹۷ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۱۶) مقدار نشست تحکیمی در ۳۰۰ روز به مقدار ۱.۸۱ متر می‌رسد.



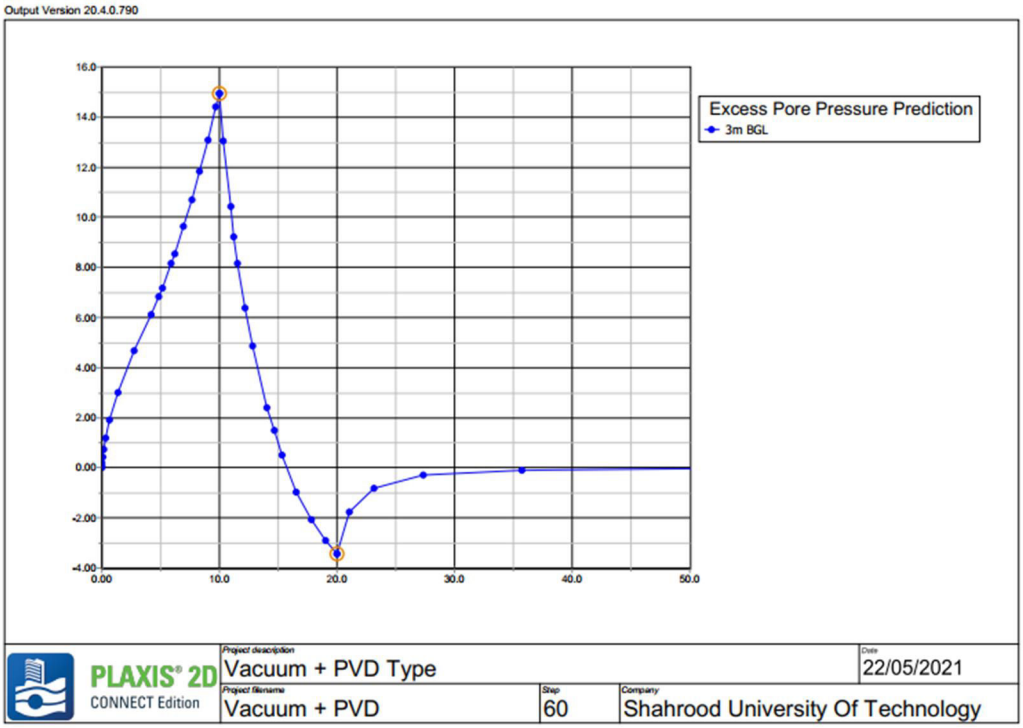
شکل (۴-۱۵) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز و زهکش‌های قائم _ زمین نوع سه



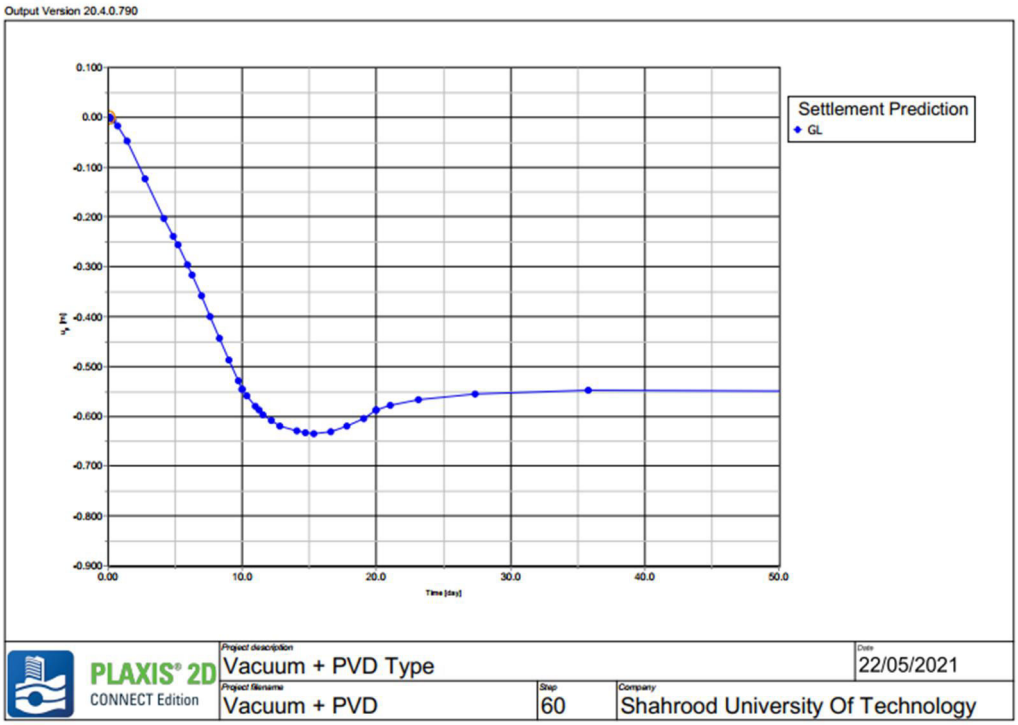
شکل (۴-۱۶) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز و زهکش‌های قائم _ زمین نوع سه

۴-۲-۳-۳- نتایج مدلسازی پیش بارگذاری خلاء به همراه زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۱۷) پس از روشن شدن خلاء با فشار ۷۰- کیلو پاسکال، به دلیل بالا بودن سرعت زهکشی در ۱۰ روز اول فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱۵ کیلو پاسکال می-رسد سپس در مدت ۲۵ روز زائل می‌شود با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۱۸) مقدار نشست تحکیمی در ۳۵ روز به مقدار ۰.۵۵ متر می‌رسد.



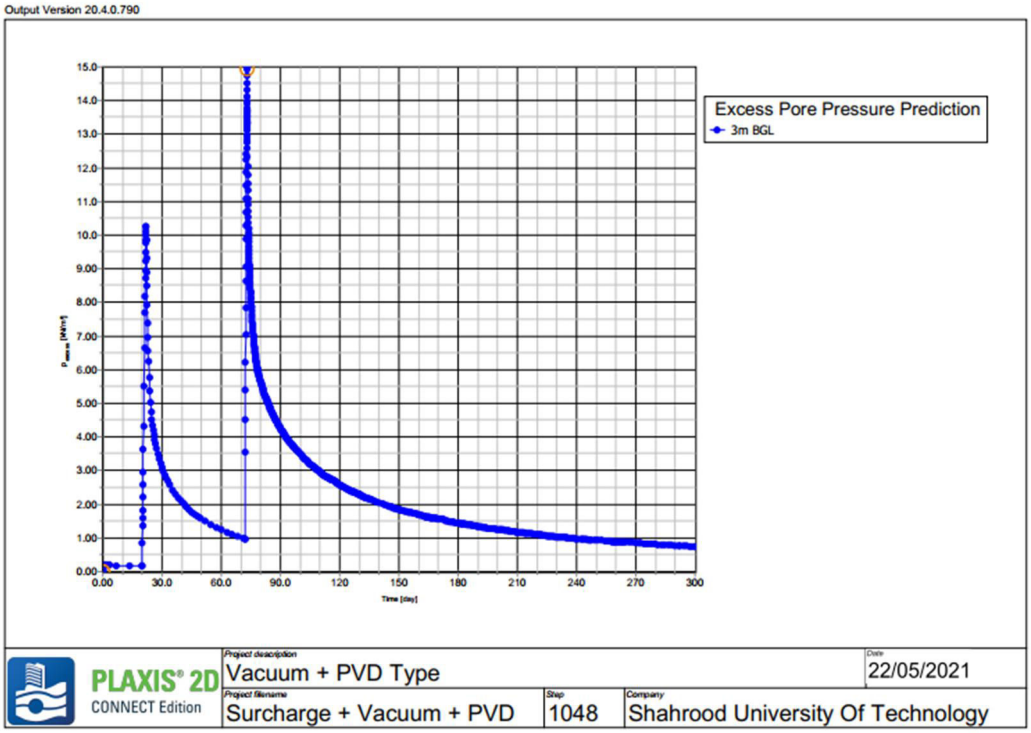
شکل (۴-۱۷) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع سه



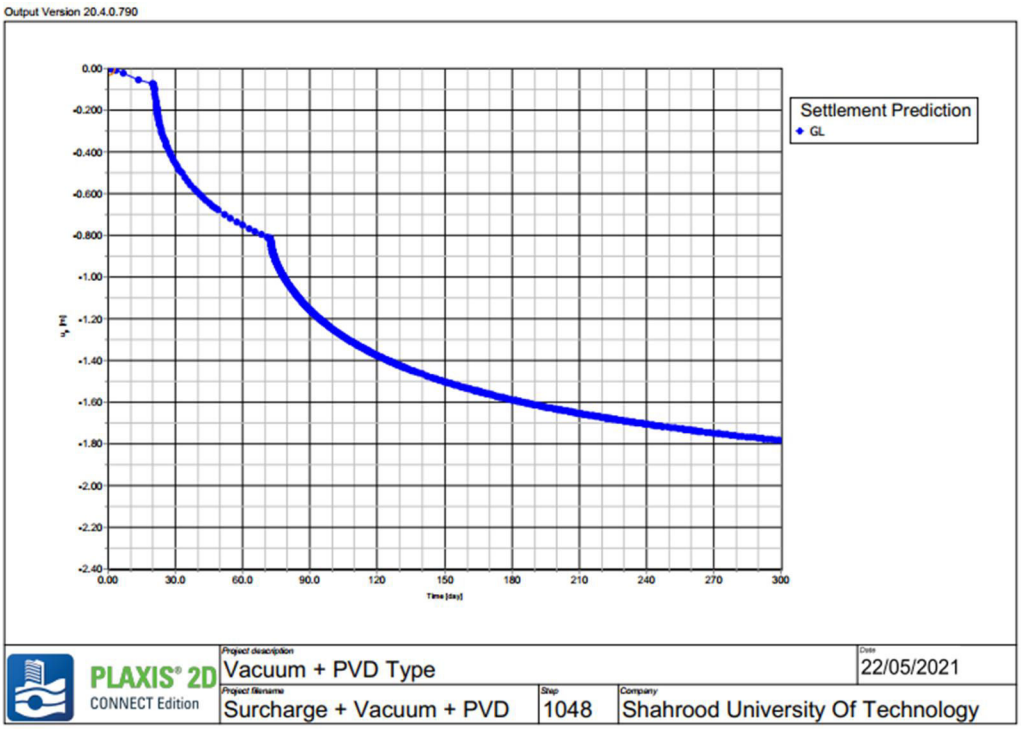
شکل (۴-۱۸) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع سه

۴-۲-۳-۴- نتایج مدلسازی خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۱۹) ابتدا خلاء با فشار ۷۰- کیلو پاسکال روشن شده، به دلیل بالا بودن سرعت زهکشی فشار آب حفره‌ای اضافی در ۲۰ روز اول به ۳.۶ کیلو پاسکال می‌رسد سپس فشار خلاء خاموش می‌شود و همزمان ۲ متر خاکریز را در ۲ روز بارگذاری شده به ۱۰۳۰۰ نیوتن بر متر مربع می‌رسد (فشار ۲ متر خاکریز بر فشار خلاء غالب شده است) سپس با استراحت ۵۰ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱ کیلو پاسکال رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۷۲ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۱۵ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۲۰) مقدار نشست تحکیمی در ۳۰۰ روز به مقدار ۱.۸ متر می‌رسد.

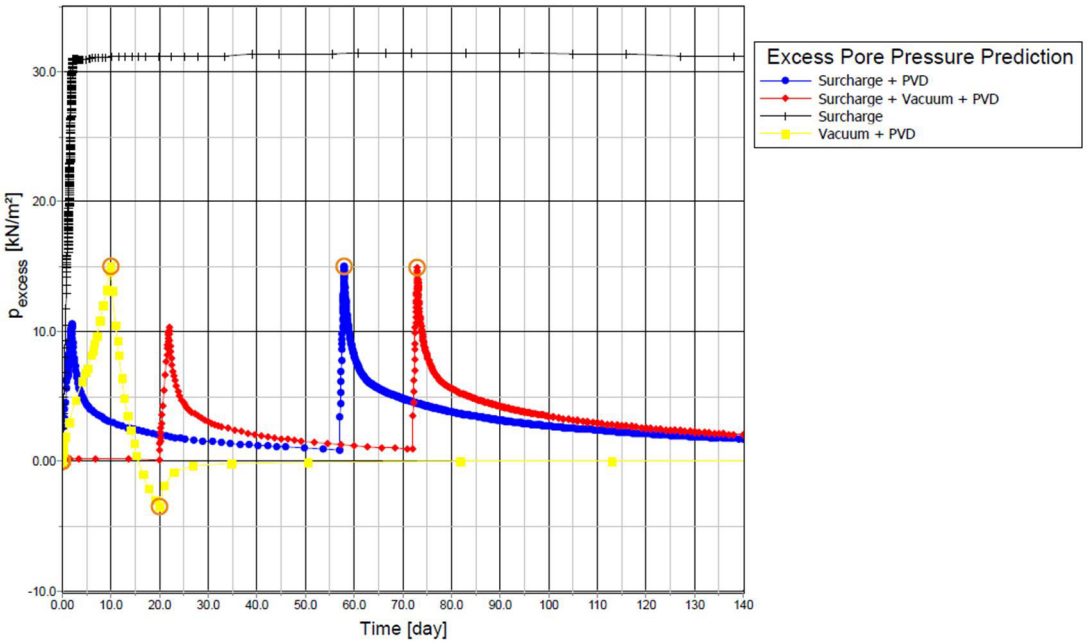


شکل (۴-۱۹) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع سه

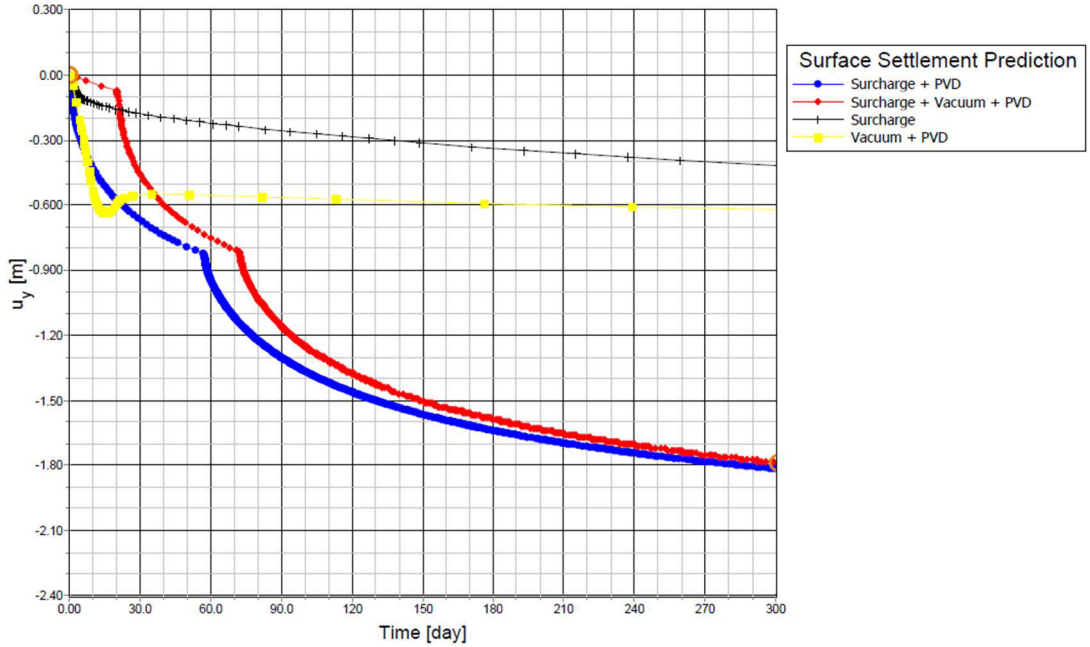


شکل (۴-۲۰) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع سه

همان طور که در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است روش بهسازی خلاء توسط زهکش‌های قائم پیش‌ساخته که با رنگ زرد ترسیم شده است، از دیگر روش‌ها سریع تر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده را زائل کرده است چرا که در روش خاکریز تک (رنگ سیاه) مدت زمان رسیدن به نشست تحکیمی و زائل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی بسیار زیاد است، همچنین در روش خاکریز به همراه خلاء توسط زهکش قائم (رنگ قرمز) و روش خاکریز به همراه زهکش قائم (رنگ آبی) به دلیل اجرا خاکریز مدت انجام پروژه افزایش می‌یابد در صورتی که روش خلاء به همراه زهکش قائم مقدار نشست قابل توجهی در مدت زمان کمی را ارضا کرده است. همچنین با توجه به شکل (۴-۲۲) نمودار نشست تحکیمی می‌توان دریافت که در این روش نشست تحکیمی نسبت به سه روش دیگر در مدت زمان کمتری رخ داده است.



شکل (۴-۲۱) انتخاب خلاء به همراه زهکش‌های قائم به عنوان بهینه‌ترین روش بهسازی بر اساس نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ زمان برای چهار روش بهسازی در زمین نوع سه

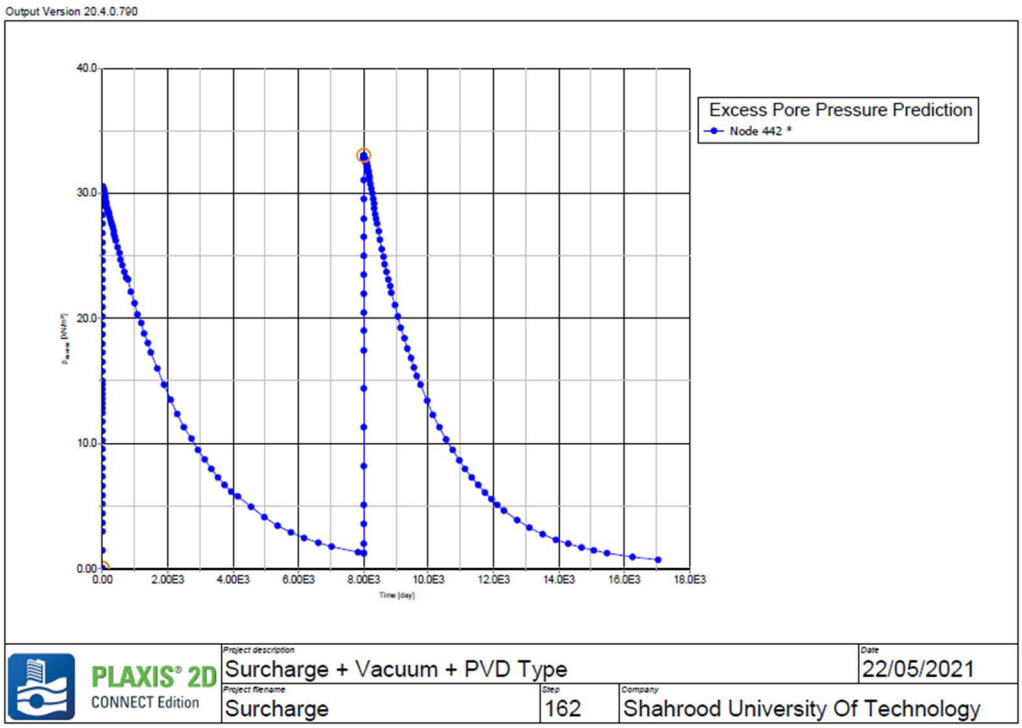


شکل (۴-۲۲) انتخاب خلاء به همراه زهکش‌های قائم به عنوان بهینه‌ترین روش بهسازی بر اساس نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ زمان برای چهار روش بهسازی در زمین نوع سه

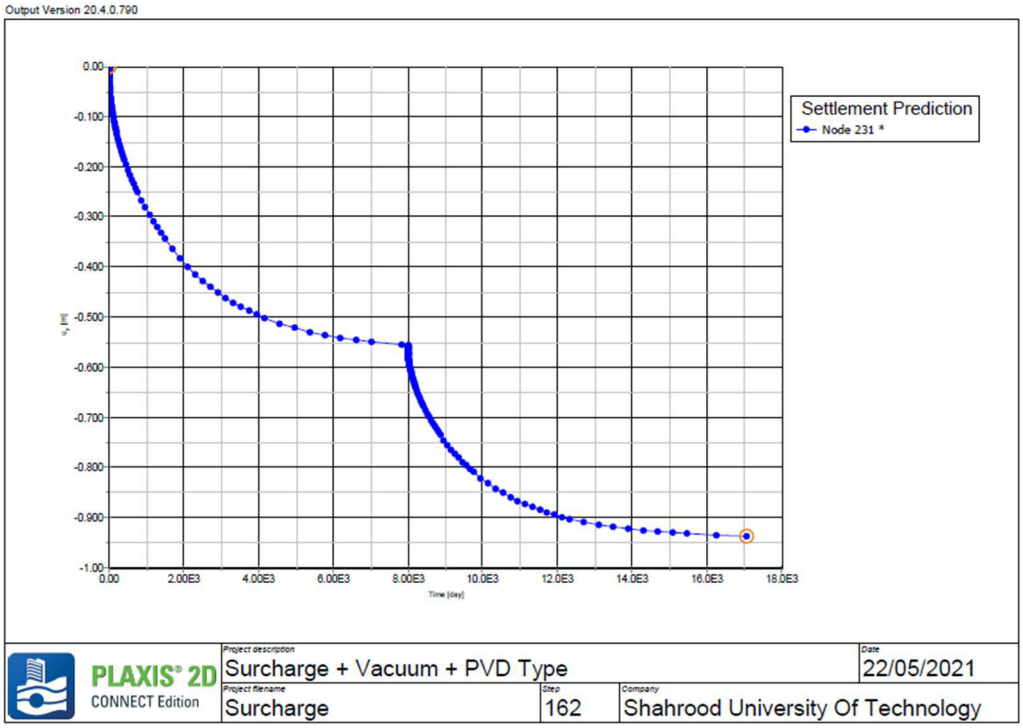
۴-۲-۴- نتایج مدلسازی خاک بستر به همراه خاکریز به همراه پیش‌بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم (زمین نوع چهار):

۴-۲-۴-۱- نتایج مدلسازی خاکریز تک :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۲۳) ابتدا در گام اول ۲ متر خاک ریز را در ۲ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به ۳۰.۵ کیلو پاسکال می‌رسد سپس با استراحت ۸۰۰۰ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱.۲ کیلو پاسکال رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۸۰۰۲ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۳۳ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۲۴) مقدار نشست تحکیمی در ۱۵۰۸۰ روز به مقدار ۰.۹۳ متر می‌رسد.



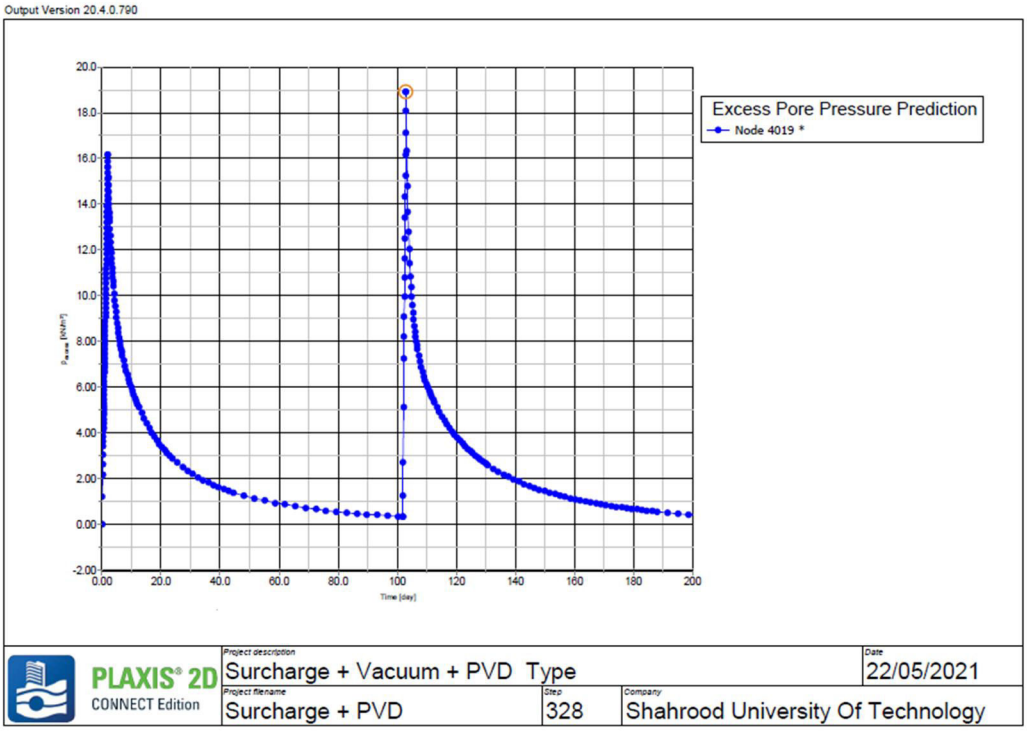
شکل (۴-۲۳) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع چهار



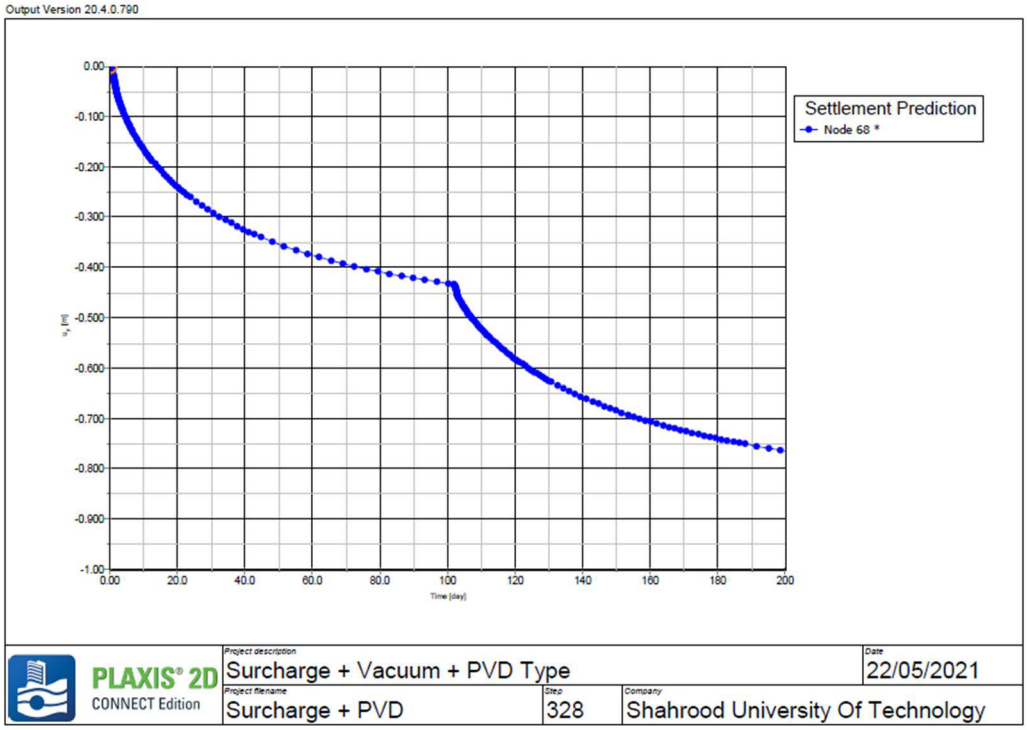
شکل (۴-۲۴) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز _ زمین نوع چهار

۴-۲-۴-۲- نتایج مدلسازی خاکریز به همراه زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۲۵) ابتدا در گام اول ۲ متر خاک ریز را در ۲ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱۶.۱۵ کیلو پاسکال می‌رسد سپس با استراحت ۱۰۰ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به صفر رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۱۰۲ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۱۸.۹۲ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۲۶) مقدار نشست تحکیمی در ۲۰۰ روز به مقدار ۰.۷۶ متر می‌رسد.



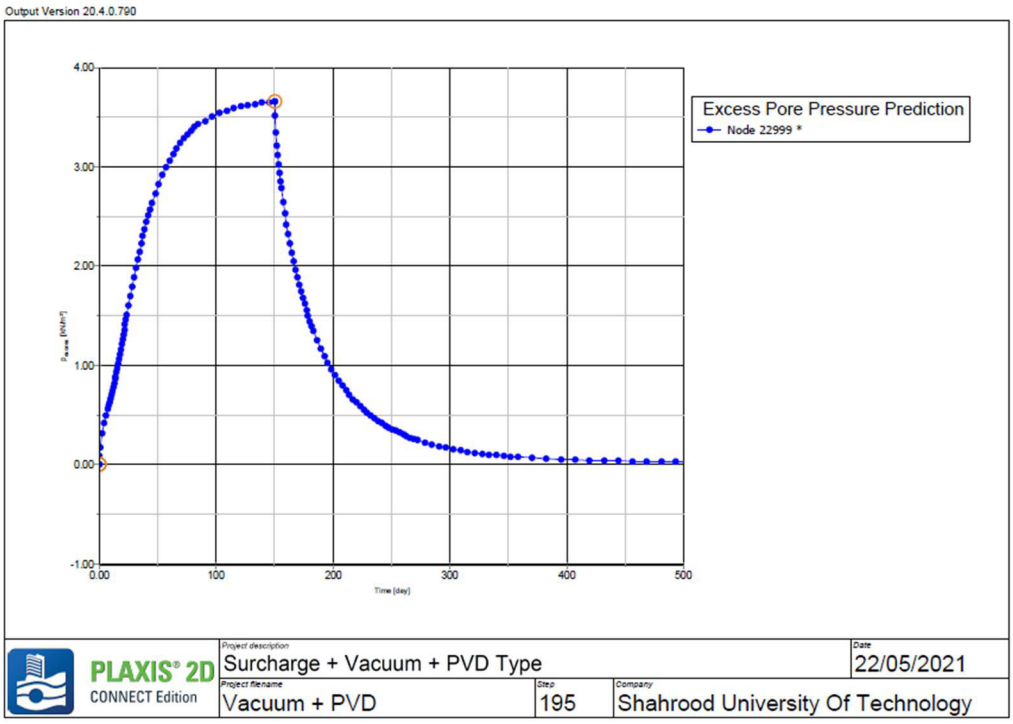
شکل (۴-۲۵) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز و زهکش‌های قائم _ زمین نوع چهار



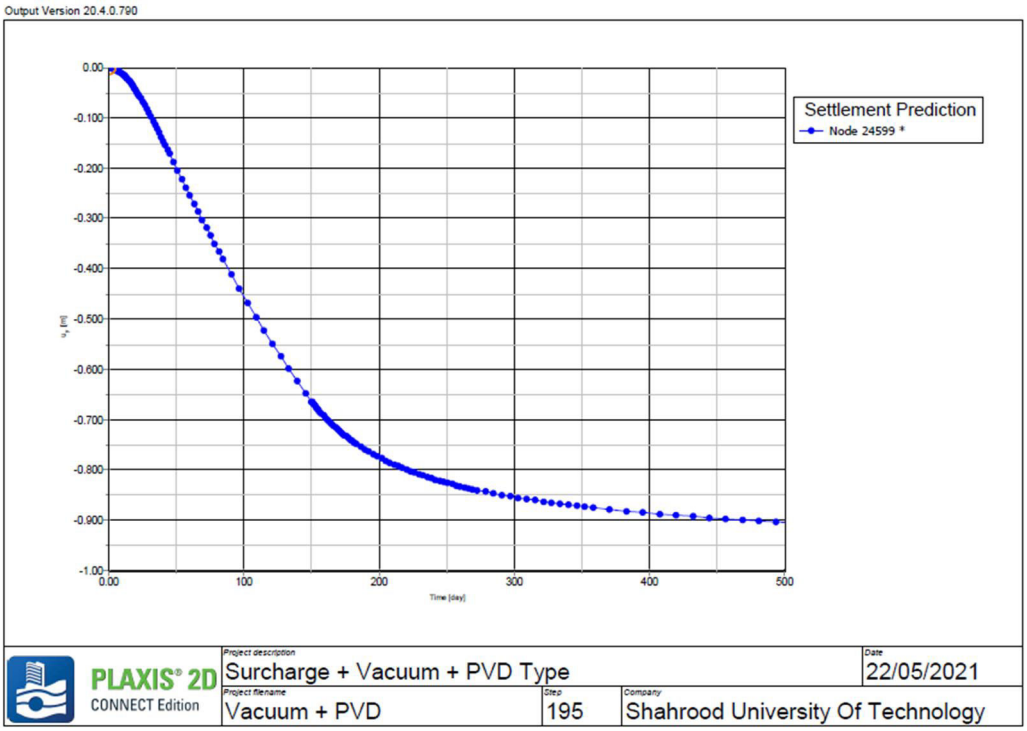
شکل (۴-۲۶) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز و زهکش‌های قائم _ زمین نوع چهار

۴-۲-۴-۳- نتایج مدلسازی پیش بارگذاری خلاء به همراه زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۲۷) پس از روشن شدن خلاء با فشار ۷۰- کیلو پاسکال، به دلیل بالا بودن سرعت زهکشی در ۱۵۰روز اول فشار آب حفره‌ای اضافی به ۳.۶ کیلو پاسکال می‌رسد سپس در مدت ۲۸۲ روز زائل می‌شود با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۲۸) مقدار نشست تحکیمی در ۴۳۲ روز به مقدار ۰.۹ متر می‌رسد.



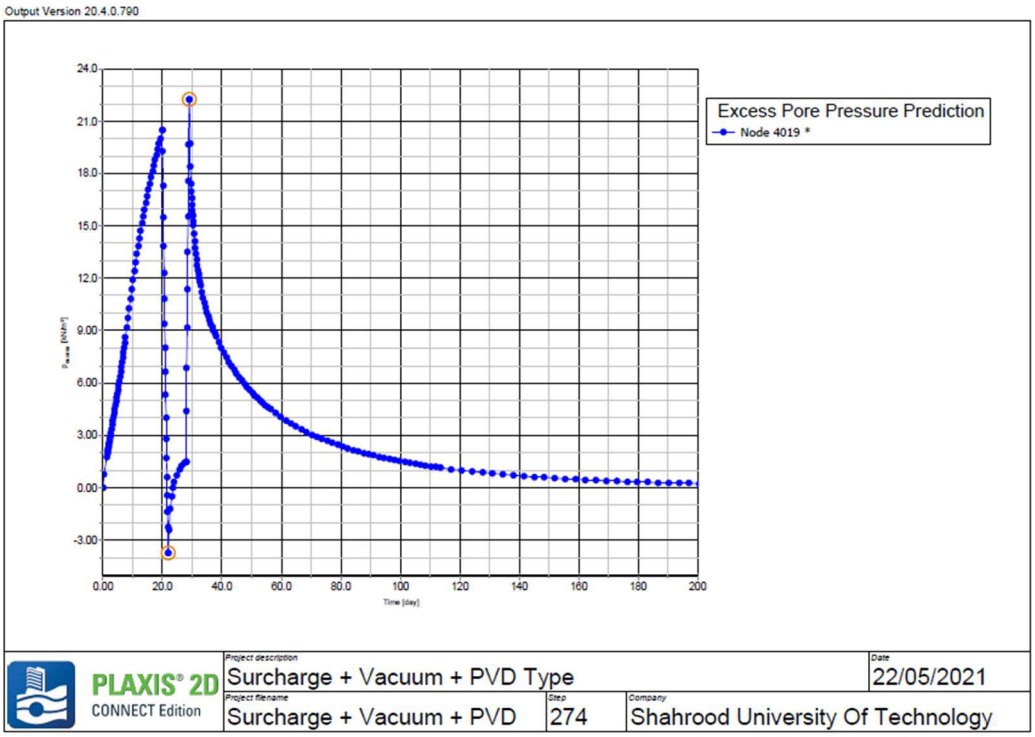
شکل (۴-۲۷) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع چهار



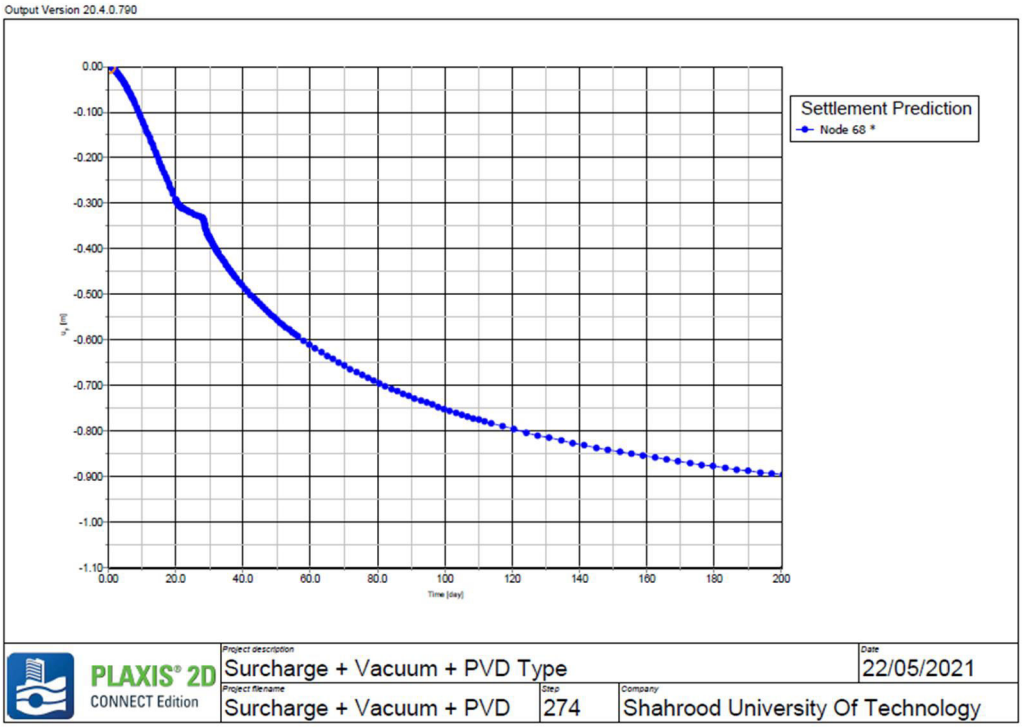
شکل (۴-۲۸) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع چهار

۴-۲-۴-۴- نتایج مدلسازی خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم :

با توجه به نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در شکل (۴-۲۹) ابتدا خلاء با فشار ۷۰- کیلو پاسکال روشن شده، به دلیل بالا بودن سرعت زهکشی فشار آب حفره‌ای اضافی در ۲۰ روز اول به ۲۰.۴۸ کیلو پاسکال می‌رسد سپس فشار خلاء خاموش می‌شود و همزمان ۲ متر خاکریز را در ۲ روز بارگذاری شده به ۳.۷۵- کیلو پاسکال می‌رسد (فشار خلاء بر فشار ۲ متر خاکریز غالب شده است) سپس با استراحت ۶ روزه فشار آب حفره‌ای اضافی به ۱.۴۷ کیلو پاسکال رسیده و مجدد ۲ متر دیگر از خاکریز را در روز ۲۸ ام به مدت ۱ روز بارگذاری شده و فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۲۲.۲۳ کیلو پاسکال می‌رسد و تا زمانی که فشار آب حفره‌ای از بین برود فرآیند تحکیم ادامه خواهد یافت. با توجه به نمودار نشست در شکل (۴-۳۰) مقدار نشست تحکیمی در ۲۰۰ روز به مقدار ۰.۹ متر می‌رسد.

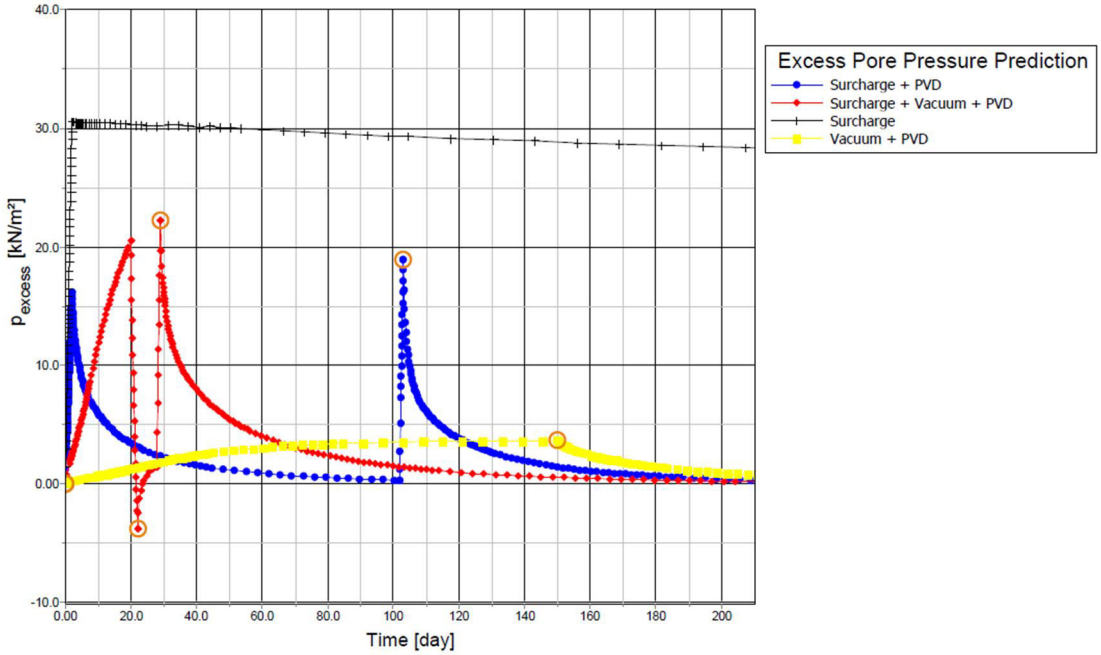


شکل (۴-۲۹) نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ بهسازی توسط خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع چهار

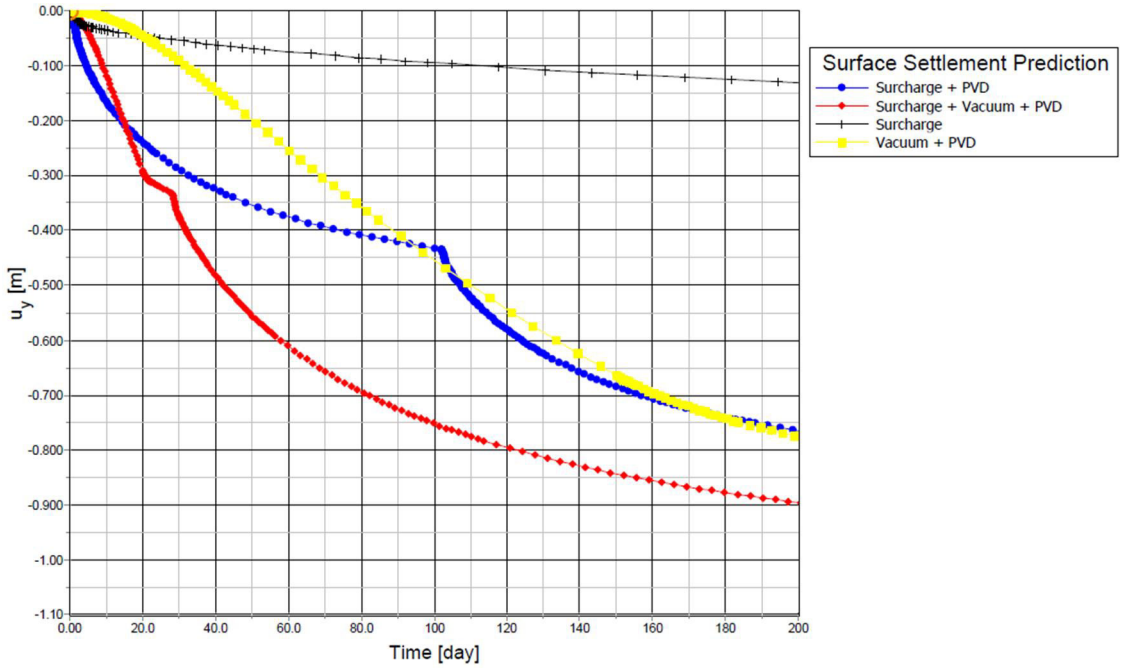


شکل (۴-۳۰) نمودار نشست تحکیمی _ بهسازی توسط خاکریز به همراه پیش بارگذاری خلاء و زهکش‌های قائم _ زمین نوع چهار

همان طور که در شکل (۴-۳۱) نشان داده شده است روش بهسازی خاکریز به همراه خلاء توسط زهکش‌های قائم پیش‌ساخته که با رنگ قرمز ترسیم شده است، از دیگر روش‌ها سریع تر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده را زائل کرده است چرا که در روش خاکریز تک (رنگ سیاه) مدت زمان رسیدن به نشست تحکیمی و زائل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی بسیار زیاد است، همچنین در روش خاکریز به همراه زهکش قائم (رنگ آبی) به دلیل اجرا خاکریز مدت انجام پروژه افزایش می‌یابد و روش خلاء به همراه زهکش قائم (رنگ زرد) در مدت زمان بیشتری به مقدار نشست مورد نظر رسیده است، در صورتی که روش خاکریز به همراه خلاء توسط زهکش قائم مقدار نشست قابل توجهی در مدت زمان کمی را ارضا کرده است. همچنین با توجه به شکل (۴-۳۲) نمودار نشست تحکیمی می‌توان دریافت که در این روش نشست تحکیمی نسبت به سه روش دیگر در مدت زمان کمتری رخ داده است.



شکل (۴-۳۱) انتخاب خاکریز به همراه خلاء توسط زهکش‌های قائم به عنوان بهینه‌ترین روش بهسازی بر اساس نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ زمان برای چهار روش بهسازی در زمین نوع چهار



شکل (۴-۳۲) انتخاب خاکریز به همراه خلاء توسط زهکش‌های قائم به عنوان بهینه‌ترین روش بهسازی بر اساس نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی _ زمان برای چهار روش بهسازی در زمین نوع چهار

۴-۳- جمع بندی نتایج

با توجه به نتایج مدلسازی می‌توان نتیجه گرفت:

۱) مناسب‌ترین روش برای بهسازی خاک بستر تیپ یک با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۳.۶۹ (متر بر روز) و در جهت قائم ۳.۴۶ (متر بر روز) استفاده از خاکریز تک است.

۲) در خاک بستر تیپ دو با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۰.۰۰۸ (متر بر روز) و در جهت قائم ۰.۰۰۴ (متر بر روز)، مناسب‌ترین روش بهسازی، اجرا خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته است.

۳) در خاک بستر تیپ سه با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۰.۰۰۵۶۰۶ (متر بر روز) و در جهت قائم ۰.۰۰۳۴۷۶ (متر بر روز)، مناسب‌ترین روش بهسازی، اجرا فشار خلاء توسط زهکش‌های قائم پیش ساخته است.

۴) در خاک بستر تیپ چهار با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۰.۰۰۰۳۳۶۹ (متر بر روز) و در جهت قائم ۰.۰۰۰۱۶۲۳ (متر بر روز)، مناسب‌ترین روش بهسازی، اجرا خاکریز به همراه فشار خلاء توسط زهکش‌های قائم پیش ساخته است.

- در نتیجه با کاهش مقدار نفوذپذیری خاک بستر استفاده از فشار خلاء ضرورت پیدا می‌کند.

فصل ۵:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه :

جهت بهسازی خاک بستر مواردی چون جنس خاک، منابع قرضه، وسعت محدوده کارگاه، میزان بودجه تخصیص یافته برای انجام پروژه و ... توجه کرد. یکی از معیارهای تاثیر گذار در انتخاب روش بهسازی، جنس خاک بستر است. ابتدا باید توسط آزمایشات ژئوتکنیکی جنس و مشخصات خاک تعیین شود تا بتوان بهینه‌ترین روش بهسازی را معین کرد سپس توسط مهندسان طراحی و اجرا شود. در این تحقیق با استفاده از روش بهسازی توسط پیش بارگذاری (خاکریز – فشار خلاء) به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته و میزان تاثیر هر کدام پرداخته شد. استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته در کنار روش پیش بارگذاری در بهسازی خاک بستر سبب می‌شود تا مسیر زهکشی کوتاه شود و در زمان کمتری فشار آب حفره‌ای اضافی از بین برود. پیش بارگذاری به وسیله خاکریز باعث ایجاد جابجایی جانبی به سمت خارج شده در مقابل استفاده از پیش بارگذاری خلاء سبب می‌شود تا جابجایی جانبی به سمت داخل باشد، استفاده از خاکریز به همراه فشار خلاء می‌تواند جابجایی جانبی را به حداقل برساند. در این تحقیق صحت سنجی نرم افزار پلکسیس دو بعدی مورد استفاده توسط پروژه دیوار خاک مسلح شانگهای چین که بستر آن توسط زهکش‌های قائم پیش ساخته بهسازی شده است صورت گرفت. در ادامه با مدل سازی چهار روش بهسازی خاک بستر (خاکریز – خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته – خلاء به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته – خاکریز و خلاء به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته) برای چهار نوع زمین، بهینه‌ترین روش بهسازی از نظر اقتصادی، زمان انجام پروژه انتخاب شد.

۵-۲- نتایج :

۱) در این پژوهش به تاثیر جنس خاک بستر در انتخاب نوع روش بهسازی پرداخته شد، با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی نرم افزار پلکسیس برای هر جنس خاک یک روش بهسازی ایده‌ال است چه از لحاظ مقدار زمان اجرا آن و چه از نظر اقتصادی .

- مناسب‌ترین روش برای بهسازی خاک زمین نوع یک با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۳.۶۹ (متر بر روز) و در جهت قائم ۳.۴۶ (متر بر روز) استفاده از خاکریز تک است.
- در خاک زمین نوع دو با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۰.۰۰۸ (متر بر روز) و در جهت قائم ۰.۰۰۴ (متر بر روز)، مناسب‌ترین روش بهسازی، اجرا خاکریز به همراه زهکش‌های قائم پیش ساخته است، زیرا در مقایسه با اجرای خاکریز تک ۸۹.۴ درصد زمان اجرای پروژه کاهش می‌یابد.
- در خاک زمین نوع سه با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۰.۰۰۵۶۰۶ (متر بر روز) و در جهت قائم ۰.۰۰۳۴۷۶ (متر بر روز)، مناسب‌ترین روش بهسازی، اجرا فشار خلاء توسط زهکش‌های قائم پیش ساخته است، زیرا در مقایسه با اجرای خاکریز تک ۹۹.۷۱ درصد زمان اجرای پروژه کاهش می‌یابد.
- در خاک زمین نوع چهار با نفوذپذیری میانگین در جهت افقی ۰.۰۰۰۳۳۶۹ (متر بر روز) و در جهت قائم ۰.۰۰۰۱۶۲۳ (متر بر روز)، مناسب‌ترین روش بهسازی، اجرا خاکریز به همراه فشار خلاء توسط زهکش‌های قائم پیش ساخته است، زیرا در مقایسه با اجرای خاکریز تک ۹۹.۲ درصد زمان اجرای پروژه کاهش می‌یابد.
- در نتیجه با کاهش مقدار نفوذپذیری خاک بستر استفاده از فشار خلاء ضرورت پیدا می‌کند.

۲) با توجه به جنس خاک، استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته می‌تواند تاثیر قابل توجهی در کاهش زمان نشست تحکیمی داشته باشد.

۳) با توجه به جدول (۵-۱) می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر میزان نفوذپذیری خاک کمتر شود، استفاده از فشار خلاء به کمک زهکش‌های قائم می‌تواند تا ۹۰ درصد زمان اجرای پروژه را کاهش دهد.

جدول (۵-۱) درصد کاهش زمان اجرا پروژه برای هر چهار روش بهسازی

نفوذپذیری میانگین قائم (متر بر روز)	نفوذپذیری میانگین افقی (متر بر روز)	نوع زمین	نوع بهسازی	درصد کاهش زمان اجرا پروژه
۳/۴۶	۳/۶۹	۱	خاکریز	-
۰/۰۰۴	۰/۰۰۸	۲	خاکریز + زهکش‌های قائم	۸۹/۴
۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۵۶	۳	فشار خلاء + زهکش‌های قائم	۹۹/۷۱
۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۳۳	۴	خاکریز + فشار خلاء + زهکش‌های قائم	۹۹/۲

۵-۳- پیشنهادات:

- در این تحقیق اثر ناحیه اغتشاش در اطراف زهکش‌های قائم در مدلسازی دیده نشده است، با توجه به اینکه تاثیر این ناحیه می‌تواند در تعیین مقدار زمان انجام پروژه تاثیر گذار باشد، پیشنهاد می‌شود مدلسازی با در نظر گرفتن ناحیه اغتشاش انجام شود.
- فاصله و الگوی چینش زهکش‌های قائم پیش ساخته در طراحی پارامترهای بسیار مهمی هستند بلکه با طراحی بهینه می‌توان تعداد زهکش‌های قائم را کاهش داد به همین سبب پیشنهاد می‌شود این تحقیق در فضای سه بعدی مدل شود تا اثر فاصله دیده شود.
- با توجه به میزان تاثیرگذاری نرخ بارگذاری خاکریز بر ارتفاع بحرانی پیشنهاد می‌شود خاکریز با نرخ‌های بارگذاری مختلف مدلسازی شود. زیرا هرچقدر نرخ بارگذاری کاهش یابد و در گام‌های بیشتری خاکریز بارگذاری شود، فشار آب حفره‌ای اضافی فرصت بیشتری برای زائل شدن دارد به همین خاطر ارتفاع بحرانی خاکریز بیشتر می‌شود.

مراجع

فهرست مراجع

[1] S. Paul, E. Varghese, and L. Stephen, "Prefabricated Vertical Drain (Pvd)," 2014.

[2] D. Basu, P. Basu, and M. Prezzi, "Analytical solutions for consolidation aided by vertical drains," *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal,* vol. 1, pp. 63-71, 2006.

[3] J. Saowapakpiboon, D. Bergado, P. Voottipruex, L. Lam, and K. Nakakuma, "PVD improvement combined with surcharge and vacuum preloading including simulations," *Geotextiles and Geomembranes,* vol. 29, pp. 74-82, 2011.

[4] Z. Zhang, G.-B. Ye, and Y. Xu, "Comparative analysis on performance of vertical drain improved clay deposit under vacuum or surcharge loading," *Geotextiles and Geomembranes,* vol. 46, pp. 146-154, 2018.

[5] B. Indraratna, M. E. Kan, D. Potts, C. Rujikiatkamjorn, and S. W. Sloan, "Analytical solution and numerical simulation of vacuum consolidation by vertical drains beneath circular embankments," *Computers and Geotechnics,* vol. 80, pp. 83-96, 2016.

[6] J. Han, *Principles and practice of ground improvement*: John Wiley & Sons, 2015.

[7] J. Chu and C. Rujikiatkamjorn, *Ground Improvement: Case Histories*: Elsevier, 2005.

[8] A. Verruijt, *An introduction to soil dynamics* vol. 24: Springer Science & Business Media, 2009.

[9] B. M. Das, "Principles of Geotechnical Engineering 7rd," ed: USA: PWS Publishers, 2006.

[10] A. Verruijt, "Consolidation of soils," *Encyclopedia of hydrological sciences,* 2006.

[11] S. Tewatia, "Equation of 3D consolidation in cartesian coordinates," *International Journal of Geotechnical Engineering,* vol. 7, pp. 105-108, 2013.

[12] M. A. Biot, "General theory of three-dimensional consolidation," *Journal of applied physics,* vol. 12, pp. 155-164, 1941.

[13] D. Soares Jr, "An uncoupled numerical approach for soil consolidation analysis," *Computers and Geotechnics,* vol. 111, pp. 255-260, 2019.

[14] B. M. Das, *Principles of foundation engineering*: Cengage learning, 2015.

[15] S. Hansbo, "Experience of consolidation process from test areas with and without vertical drains," in *Elsevier Geo-Engineering Book Series*. vol. 3, ed: Elsevier, 2005, pp. 3-49.

[16] S. A. Ahmad Tajudin, M. F. Yusof, I. Bakar, A. Marto, M. N. Zakaria, and M. E. Abdullah, "Numerical Modelling of Prefabricated Vertical Drain for Soft Clay using ABAQUS," in *Applied Mechanics and Materials*, 2015, pp. 1502-1507.

[17] C. Rujikiatkamjorn and B. Indraratna, "Three-dimensional numerical modeling of soft soil consolidation improved by prefabricated vertical drains," in *Ground Modification and Seismic Mitigation*, ed, 2006, pp. 161-168.

[18] B. Indraratna, I. Sathananthan, C. Bamunawita, and A. Balasubramaniam, "Theoretical and numerical perspectives and field observations for the design and performance evaluation of embankments constructed on soft marine clay," in *Elsevier geo-engineering book series*. vol. 3, ed: Elsevier, 2005, pp. 51-89.

[19] B. Indraratna and I. Redana, "Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay," *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 37, pp. 132-145, 2000.

[20] J. Chu and S. Yan, "Application of the vacuum preloading method in soil improvement projects," in *Elsevier geo-engineering book series*. vol. 3, ed: Elsevier, 2005, pp. 91-117.

[21] Z.-C. Moh and P. Lin, "Case study of ground improvement work at the Suvarnabhumi Airport of Thailand," in *Elsevier Geo-Engineering Book Series*. vol. 3, ed: Elsevier, 2005, pp. 159-198.

[22] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, A. Balasubramaniam, and V. Wijeyakulasuriya, "Predictions and observations of soft clay foundations stabilized with geosynthetic drains and vacuum surcharge," in *Elsevier Geo-Engineering Book Series*. vol. 3, ed: Elsevier, 2005, pp. 199-229.

[23] B. Indraratna, R. Zhong, and C. Rujikiatkamjorn, "An analytical model of PVD-assisted soft ground consolidation," *Procedia engineering,* vol. 143, pp. 1376-1383, 2016.

[24] M. Ghomi, "Comparison between results of stability analysis of Noghreh Kamar with FLAC & PLAXIS softwars," MSC, Civil Engineering, Arak University, 2011.

[25] B. Rahimi, "Stability analysis and support design of railway tunnels in rasht - ghazvin," MSC, Faculty Of Mining And Metallurgy Engineering, Amirkabir University Of Technology, 2009.

[26] س. خلیلی, "تحلیل پایداری و تعیین الگوی انفجار در تونل خط راه آهن میانه," کارشناسی ارشد, دانشکده فنی مهندسی, دانشگاه تربیت مدرس, ۱٤۰۰.

[27] A. Palmstrom and H. Stille, "Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations," *Tunnelling and Underground Space Technology,* vol. 22, pp. 363-376, 2007.

[28] J.-F. Xue, J.-F. Chen, J.-X. Liu, and Z.-M. Shi, "Instability of a geogrid reinforced soil wall on thick soft Shanghai clay with prefabricated vertical drains: a case study," *Geotextiles and Geomembranes,* vol. 42, pp. 302-311, 2014.

[29] B. Indraratna, J. Chu, and C. Rujikiatkamjorn, *Ground improvement case histories: compaction, grouting and geosynthetics*: Butterworth-Heinemann, 2015.

Abstract

Generally safety of every structure built on soil, depending on strength and hydraulic state of in view subsoil. Namely with increase of underwater level in soil, excess pore water pressure due to structure loading increased and soil strength decreased that result in instability. Settlement due to loading is considered as factor for stability monitoring that formed from two stage, part of settlement happened during loading (transient settlement) and part that happened after loading in long term (consolidation settlement) and the time of that may be last several day till several year based on available condition, for example if subsoil include of saturated clayey soil, soil settlement not completed in this stage and may be continued long after structure operation. Conventional methods employed for underwater drainage and after that increase of consolidation settlement rate, include of stone columns (gravel columns) and embankment construction. In recent years, using prefabricated vertical drains with embankment construction as preloading, drainage speed and consolidation settlement rate increased. Over time by applying vacuum in prefabricated vertical drains more speeds has been given to consolidation process. In this study, in order to investigate the effect of bed soil type on improvement methods selection (embankment, embankment with prefabricated vertical drain, prefabricated vertical drain with vacuum, embankment with prefabricated vertical drain and vacuum), numerical modeling with Plaxis software used. In order to investigate the effect of soil type, four ground types is considered that in each type one optimum improvement methods has been introduced. Results showed that soil type has considerable effect on soil improvement method determination, so that in ground type one, embankment preloading method, in ground type two, embankment preloading with prefabricated vertical drain method, in ground type three, vacuum pressure preloading with prefabricated vertical drain method, and in ground type four, coupled embankment and vacuum pressure preloading with prefabricated vertical drain, been the most effective improvement method, that the amount of time reduction in improvement process of ground types 2,3,4 than state that embankment used, been 89.4, 99.71,99.2 percent respectively.

Keywords : Prefabricated vertical drainage, Preloading, Vacuum pressure, Consolidation settlement, Numerical modeling

Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Numerical modeling of PVD (prefabricated vertical drain) with preloading and Vacuum draining systems for improving the fine soils

By: Ali Banar

Supervisor:
Dr. Mohsen Keramati

July 2021