



## بررسی میزان افزایش کارآمدی سیستم‌های بهسازی خاک‌های نرم رسی در صورت اعمال پیش‌بارگذاری خلاء

محمد مهدی پاردسوئی<sup>۱</sup>، علیرضا رضائی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، شرکت مهندسی مشاور هندسه پارس، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، شرکت مهندسی مشاور هندسه پارس، ایران

m.m.pardsouie@gmail.com

### خلاصه

استفاده از فشار خلاء به منظور افزایش بهره‌وری سیستم‌های مشتمل بر بار سربار و زهکش‌های عمودی بسیار موثر و کارآمد می‌باشد و زمان مورد نیاز برای رسیدن به درجه تحکیم مورد نظر را کاهش می‌دهد. در این مقاله ابتدا خلاصه‌ای از تاریخچه و اساس کارکرد سیستم‌های تحکیم خاک با خلاء ارائه شده و سپس میزان کارآمدی این سیستم با فرض به کار بردن آن برای یک پروژه عملی نشان داده می‌شود. تحکیم بستر واحد زلال سازی ماهشهر به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است که در آن پروژه، از بار سربار به همراه زهکش‌های عمودی (PVD) جهت بهسازی خاک مورد استفاده قرار گرفته بود. پس از تایید مدل، بار خلاء به میزان ۳۰، ۶۰ و ۷۵ کیلوپاسکال در مدل در سه حالت وجود سربار اولیه ۶ متری، سربار کاهش یافته ۳ متری و در حالت بدون سربار اعمال گردید و میزان افزایش کارآمدی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده اعمال پیش‌بارگذاری خلاء به میزان قابل توجهی باعث افزایش میزان کارآمدی هم از نظر اقتصادی و هم از نظر زمانی در سیستم بهسازی خاک در پروژه‌های مشابه می‌گردد. حالت بار سرباره کاهش یافته ۳ متری و فشار خلاء ۳۰ کیلو پاسکالی به عنوان حالت بهینه در این مطالعه مشخص گردید. نتایج این تحقیق می‌تواند در پروژه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** پیش‌بارگذاری خلاء، بار سربار، زهکش‌های عمودی، تحکیم، رس ضعیف

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، ساخت خاکریزهای ریل‌ها و بزرگراه‌ها و فونداسیون سازه‌های بزرگ بر روی خاک‌های نرم و تحکیم نیافته، منجر به پیشرفت‌های زیادی در زمینه تکنیک‌های بهسازی در خاک شده است. بیشتر ساخت و سازهای مهم در بیشتر کشورها، به خاطر شرایط اقتصادی، امکان دسترسی آزاد، وجود منابع نفتی و گازی و پیشرفت‌های بسیار سریع، در مناطقی با خاک‌های بسیار ضعیف با ظرفیت باربری پایین، و همچنین با قابلیت نشست‌های زیاد انجام می‌پذیرد. بنابراین، بهسازی این خاک‌های نرم قبل از شروع عملیات ساخت و ساز به منظور جلوگیری از نشست‌های زیاد و همچنین نشست‌های تفاضلی امری ضروری است. روش‌های متعددی در طول سال‌ها گذشته برای بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های ضعیف رسی مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان از محبوب‌ترین آن‌ها به روش اختلاط عمیق رس و سیمان [۱، ۲] و پیش‌بارگذاری اشاره کرد. استفاده از پیش‌بارگذاری، به عنوان یکی از روش‌های کلاسیک و محبوب در کارهای عملی شمرده می‌شود [۳]. پیش‌بارگذاری، استفاده از بار سربار بر روی محل اجرایی، قبل از قرارگیری سازه دائم می‌باشد که تحت آن تحکیم اولیه حادث خواهد شد. بهر حال، در حالت رسوبات ضخیم با نفوذپذیری پایین، زمان تحکیم به وسیله پیش‌بارگذاری به تنهایی به مقدار قابل توجهی طولانی می‌گردد. به همین دلیل یک سیستم از زهکش‌های عمودی (PVD)، معمولاً برای تسریع در عمل زهکشی شعاعی و فرآیند تحکیم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴، ۵]. عملکرد سیستم زهکش‌های عمودی بدین گونه است که مسیر زهکشی شعاعی را کاهش می‌دهند. استفاده از فشار خلاء همراه با بارگذاری سربار می‌تواند به مقدار بیشتری باعث تسریع در فرآیند تحکیم شده و مقدار سربار مورد نیاز را کاهش دهد. فشار خلاء اعمالی باعث به وجود آمدن فشار آب منفذی منفی می‌گردد که منجر به افزایش گرادیان هیدرولیکی و تنش موثر در خاک می‌گردد، که نهایتاً فرآیند تحکیم بدون افزایش مثبت فشار آب منفذی اضافی در ابتدای کار تسریع می‌یابد. در مناطقی با خاک‌های بسیار نرم، که امکان ساخت خاکریزهای بلند وجود ندارد، فشار خلاء می‌تواند به صورت مطلوبی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اهمیت زمان در پروژه‌های مشابه محققین و مهندسان شاغل در پروژه همواره به دنبال راهی برای کاهش زمان مورد نظر جهت بهسازی خاک پروژه بوده‌اند که می‌



توان به طور مثال به کاهش فاصله زهکش ها یا افزایش عمق نصب زهکش ها اشاره نمود [۶, ۴]. در سال های اخیر، سیستم های مشتمل بر PVD نیز به منظور توزیع فشار خلاء مورد استفاده قرار گرفته اند که قادر به نفوذ به لایه های عمیق بوده، و در نتیجه سرعت و کارآمدی سیستم را به مقدار قابل توجهی افزایش داده اند [۷, ۸]. تحکیم با خلاء در سال ۱۹۵۲ توسط کجلمن پیشنهاد شد [۹]. بعد از آن در دو دهه بعدی مطالعات جداگانه ای در گوشه و کنار دنیا در این خصوص انجام پذیرفت. در سال های اخیر استفاده های میدانی زیاد و بسیار موفقی از این شیوه در مقالات گزارش شده است [۱۰-۱۳]. مطالعات نشان داده اند که تحکیم به کمک خلاء می تواند یک جایگزین کارآمدتر، ارزان تر و سریع تر در مقایسه با روش معمول در پیش بارگذاری رس های نرم به وسیله خاکریز است [۱۴]. شکل ۱ شمایی از یک پروژه تحکیم با خلاء به همراه سربار و زهکش عمودی را نشان می دهد.

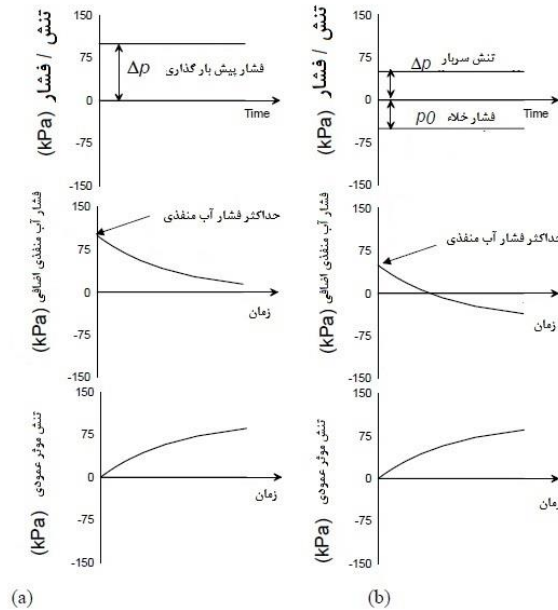


شکل ۱: پیش بار گذاری به وسیله بار سربار و بار خلاء [15]

## ۲. مقایسه پیش بار گذاری خلاء با روش های معمول

شکل ۲ فرآیند تحکیم روش معمول و پیش بارگذاری به وسیله خلاء را نشان می دهد. افزایش در تنش موثر برای این روش مربوط به اعمال فشار خلاء است. باید توجه نمود که فشار خلاء نمی تواند از فشار اتمسفر بیشتر باشد تا از پدیده کاویتاسیون<sup>۱</sup> جلوگیری شود [۸]. ویژگی های پیش بارگذاری با خلاء در مقایسه با روش معمول پیش بارگذاری از قرار زیر می باشند:

<sup>1</sup> Cavitation



شکل ۲: فرآیند تحکیم الف) بارگذاری معمول ب) پیش بارگذاری خلاء با فرض بدون هیچ هدر رفت خلاء [۱۶]

الف) تنش موثر مربوط به فشار مکشی با سرعت زیادی افزایش می‌یابد، و جابه‌جایی جانبی<sup>۱</sup> کاهش می‌یابد. در نتیجه، خطر گسیختگی برشی حتی با سرعت‌های زیاد ساخت خاکریز به حداقل می‌رسد. به‌رحال، جابه‌جایی درونی به سمت پاشنه خاکریز باید با دقت بررسی شود.

ب) هد پیش بارگذاری خلاء را می‌توان تا عمق‌های بیشتر خاک زیر سطحی با استفاده از سیستم زهکش‌های عمودی متخلخل نصب شده توزیع نمود.

ج) میزان بار سربار را می‌توان برای بدست آوردن مقدار برابر نشست کاهش داد، که این موضوع به کارآمدی سیستم خلاء بستگی دارد.

د) به این دلیل که ارتفاع سربار را می‌توان کاهش داد، حداکثر فشار آب منفذی اضافی به وجود آمده با هد پیش بارگذاری خلاء از روش سربار معمول کمتر است.

و) با اعمال فشار خلاء، شرایط اجتناب‌ناپذیر غیر اشباع در لایه‌های مرزی خاک-زهکش بهبود یافته که منجر به افزایش میزان سرعت تحکیم خواهد شد [۳].

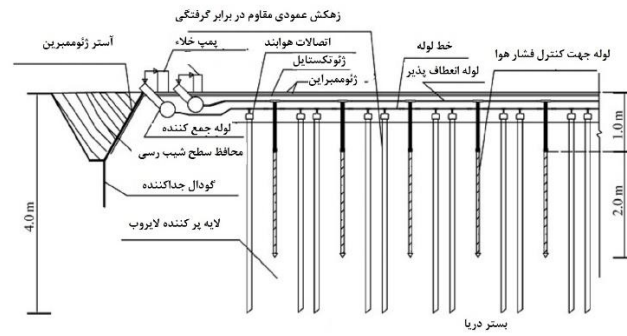
هزینه بهسازی خاک با هد پیش بارگذاری خلاء حدود ۳۰٪ کمتر از استفاده از روش سربار معمول است [۱۶]. کارآمدی سیستم به چندین فاکتور مهم بستگی دارد که عبارتند از: هوابند بودن سیستم، کارآمدی عایق‌ها میان گوشه‌های غشاء و سطح زمین و شرایط خاک و مکان قرارگیری سطح آب [۳].

### ۳. اصول تحکیم با خلاء

در روش معمول بار سرباره، تنش موثر با افزایش تنش کل افزایش می‌یابد، اما در روش تحکیم با خلاء با ثابت نگه داشتن تنش کل، تنش موثر با کاهش فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. مفهوم تحکیم با خلاء در شکل ۳ و ۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Lateral displacement

۲۵ و ۲۶ مهرماه ۱۴۰۲

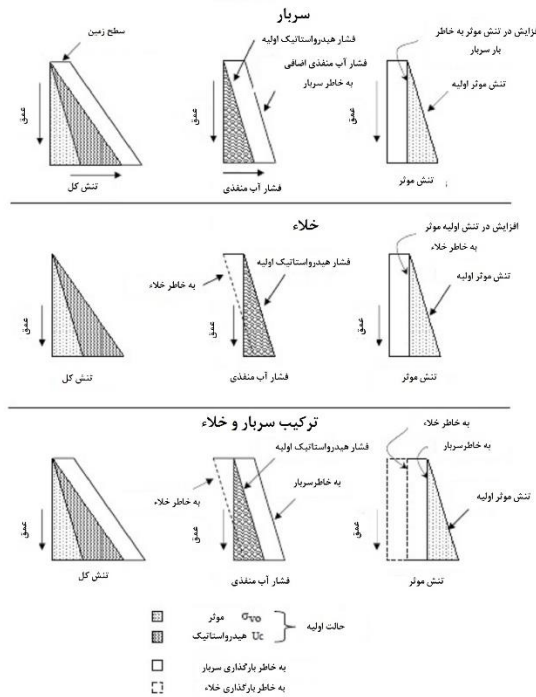


شکل ۳: نمایی شماتیک از تحکیم با خلاء [۱۷]

این فرایند به طور خلاصه عبارت است از افزایش تنش موثر ( $\sigma'$ ) به خاطر فشار آب منفذی منفی ( $-u$ ) که از کاهش فشار به خاطر خلاء ناشی می‌شود. با استفاده از روابط تنش موثر پیشنهادی ترزاقی برای خاک کاملاً اشباع می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در تنش موثر ( $\Delta\sigma'$ ) به طور معکوس به فشار آب منفذی مرتبط است ( $\Delta u$ ). در نتیجه یک افزایش در مقاومت خاک و کاهش در حجم خاک را شاهد خواهیم بود.

اساس پیش بارگذاری خلاء اینگونه می‌باشد که توده خاک به خاطر خلاء موجود در زیر لایه ناتراوا تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. اگر لایه خاکریز نیز بر روی لایه ناتراوا وجود داشته باشد توده خاک تحت اثر ترکیبی از بار خلاء و سربار خواهد بود. در آغاز، توده خاک تحت اثر فشار اتمسفر است ( $p_a$ ). طی تحکیم با خلاء، فشار خلاء در زیر لایه ناتراوا تا فشار کاهش می‌یابد تا فشار  $-p_0$  به وجود می‌آید. این فشار اعمالی باعث به وجود آمدن فشار در کوشن ماسه‌ای گردیده و عمل زهکشی حادث می‌گردد تا فشار به  $p_v$  کاهش یابد، یا به عبارت دیگر ( $p_v = p_a - p_0$ ) طوری که اختلاف فشار نهایی برابر با ( $p_a - p_v$ ) باشد. از طرف دیگر، در پیش بارگذاری سرباره، فشار تا  $p_p$  افزایش می‌یابد و در نتیجه اختلاف فشار برابر با ( $p_p - p_a$ ) خواهد بود. در نتیجه در حالت ترکیبی پیش بارگذاری فشار خلاء و فشار سرباره، تفاوت فشار برابر با ( $p_p - p_v$ ) خواهد بود، که در نتیجه زهکشی بالاتری را خاطر این تفاوت فشار بزرگتر خواهیم داشت که باعث بهبود بیشتری در مقاومت خاک شده و نشست خاک تسریع بیشتری خواهد یافت [۱۶]. یک نمای شماتیک تحکیم با خلاء به وسیله زهکش‌های عمودی متخلخل (PVD) پیشنهادی توسط [۱۸] در شکل ۳ نشان داده شده است.

یک مقایسه میان پروفیل تنش کل، فشار آب منفذی، تنش موثر تحت الف) بار سرباره معمول، ب) بار اعمالی خلاء در سطح زمین و ج) ترکیبی از بارگذاری خلاء و سرباره در شکل ۴ نشان داده شده است. فشار آب منفذی نظری و توزیع تنش عمودی طی تحکیم با بار سرباره و بار خلاء در شکل ۴ نشان داده شده است. در پیش بارگذاری با خلاء یک عرشه کاری معمولاً ساخته می‌شود. این عرشه از یک لایه ۰٫۸ تا ۱ متری ماسه زهکشی ساخته می‌شود که از میان آن‌ها زهکش‌های عمودی که تا عمق مناسب فرو رانده می‌شوند، نصب می‌گردند. یک آستر پلی اتیلنی انعطاف پذیر منطقه را می‌پوشاند و به یک سری آبراه متصل می‌گردد که این شبکه، یک عایق هوا بند را در منطقه به وجود می‌آورد. در زیر این لایه ناتراوا یک سیستم لوله‌های متخلخل جمع‌کننده آب قرار داده می‌شود که آب بالا کشیده شده توسط زهکش‌ها را جمع‌آوری می‌نمایند. پمپ‌های خلاء که اختصاصاً به همین منظور طراحی شده‌اند، و قادرند فشارهای خلاء بزرگی را به وجود آورند، همانطور که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است به سیستم جمع‌آوری آب‌ها متصل می‌شوند.



شکل ۴: تحکیم به کمک خلأ الف) بار سربار معمول ب) بار اعمالی خلأ در سطح زمین ج) ترکیبی از بار گذاری خلأ و سربار [۱۹]

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، بلافاصله بعد از اعمال بار سرباره، فشار آب منفذی و تنش کل افزایش می‌یابد. در انتهای تحکیم، زایل شدن فشار آب منفذی باعث افزایش تنش موثر خواهد شد. بهر حال، در تحکیم با خلأ تنش موثر با میزان کاهش فشار آب منفذی به خاطر فشار خلأ، افزایش خواهد داشت. در روش تحکیم با خلأ، تنش کل طی فرآیند مکش تغییری نخواهد کرد. به طور مشابه، ترکیبی از بار خلأ و بار سرباره باعث افزایش تنش موثر خواهد شد. بهر حال، تنش کل تنها به میزان بار سربار اعمالی افزایش خواهد یافت. به صورت نظری، تحکیم با خلأ محدود به حدود ۱ اتمسفر (۱۰۰ kpa) می‌باشد که تقریباً معادل ۶ متر سربار است. در واقعیت مشکلات فنی باعث کاهش کارآمدی سیستم خلأ در عمل می‌گردند. یک سیستم با کارآمدی ۷۵٪، تقریباً معادل یک بار سرباره ۴٫۵ متری می‌باشد [۴]. بنابراین، تحت شرایط بهتر یا با یک سیستم با عایق بندی موثرتر، عملکرد بهتر و در نتیجه بار سرباره بالاتری را می‌توان نتیجه گرفت.

#### ۴. پروژه تحکیم واحد های زلال ساز بندر ماهشهر به وسیله سربار و زهکش های عمودی و خلأ

محل پروژه در حدود ۲۰ کیلومتری شمال غربی منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی بندر ماهشهر قرار دارد. دو مخزن موجود بر روی ریز شمع قرار دارند. به خاطر مسایل اقتصادی تصمیم گرفته شد که بستر دو مخزن دیگر به روش پیش بارگذاری اصلاح گردد. مطالعات پیشین انجام شده توسط ایزدی و همکاران [۲۰] نشان داده اند که با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی خاک موجود در منطقه می‌توان یک نشست ۴۵۰ و ۹۰۰ میلیمتری را با استفاده از ترکیب سربار ۶ و ۹ متری و زهکش های عمودی در مدت ۵ ماه مشاهده نمود. پیش بارگذاری، استفاده از بار سربار بر روی محل اجرایی، قبل از قرار گیری سازه دائم می‌باشد که تحت آن تحکیم اولیه حادث خواهد شد. در طول عملیات پیش بارگذاری و با خروج اضافه فشار آب حفرهای از سیستم، نشست خاک صورت گرفته و تنش موثر در لایه های سست و تراکم پذیر زیرسطحی افزایش یافته و لذا امکان نشست سازه پس از احداث به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۲۱]. لایه بندی پژوه از قرار ذیل است:

لایه ۱: این لایه از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۱۶ متر ادامه می‌یابد. این لایه چسبنده و عمدتاً از جنس رس لاغر بوده و استحکام آن نرم تا نیمه سفت می‌باشد. از مشخصات قابل توجه این لایه وجود لزه های ماسه ای<sup>۱</sup> و سیلنی در اعماق مختلف بوده که بعضاً باعث افزایش عدد SPT در آن عمق شده اند.

<sup>1</sup> Sand lenses

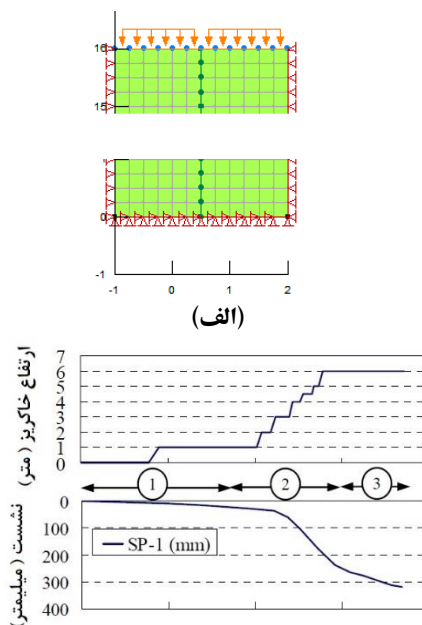
لایه II: این لایه از عمق متوسط ۱۶ متر شروع و تا عمق متوسط ۲۲ متر ادامه می‌یابد. لایه مورد نظر غیرچسبنده و عمدتاً از جنس ماسه سیلتی و یا سیلت ماسه‌ای می‌باشد که دارای میان لایه‌هایی از جنس رس لاغر با ضخامت کم می‌باشد. این لایه از نظر تراکم در رده با تراکم متوسط تا خیلی متراکم قرار گرفته است.

لایه III: از عمق متوسط ۲۲ متر تا انتهای عمق شناسایی در اکثر گمانه‌ها مجدداً لایه چسبنده از جنس رس لاغر مشاهده شده است. این لایه از نظر استحکام در رده سفت تا سخت قرار گرفته است [۲۲].

پروژه پیش‌بارگذاری واحد‌های زلال‌سازی بندر ماهشهر برای بررسی میزان کارآمدی سیستم خلاء در این مقاله مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

## ۵. مدل اجزای محدود

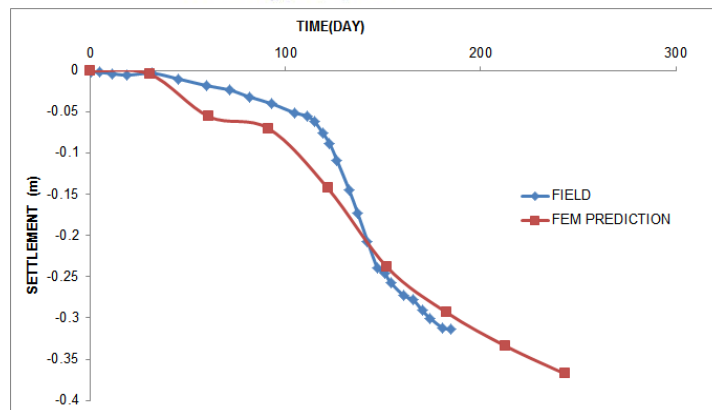
مدل عددی ساخته شده از نوع کرنش صفحه‌ای و به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار Geostudio 2018 تحلیل شده است. در این مدل سازی از مدل رفتاری Modified Cam Clay که از قانون هم‌بسته جریان تبعیت می‌کند و کارآمدی آن در مدل سازی مسائل مشابه به اثبات رسیده است استفاده گردید [۲۳، ۲۴]. المان مورد استفاده از نوع Quads and Triangles بوده و پتوی ماسه‌ای و زهکش‌ها به صورت شرایط مرزی در مدل اعمال شدند. شکل ۵ شبکه بندی مدل در برنامه اجزای محدود را نشان می‌دهد. از منطقه تاثیر در اطراف زهکش صرف نظر شده است. از آن جایی که بخش اعظم نشست در ۱۶ متر بالایی روی می‌دهد در مدل سازی اجزای محدود تنها لایه بالایی در نظر گرفته شده است. جزییات مدل سازی و توضیحات تکمیلی در خصوص پروژه مورد مطالعه را می‌توان در [۲۱، ۲۴-۲۷] بررسی کرد. شکل ۶ نتایج مدل اجزای محدود را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده در محل نشان می‌دهد.



(ب)

شکل ۵-الف) مدل تک سلولی تقارن محوری<sup>۱</sup> مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای محدود (ب) نمودار خاکریزی و نشست در محدوده شماره ۱ واحد زلال‌سازی ماهشهر [۲۲]

<sup>1</sup> Axisymmetric



شکل ۶- نشست پیش بینی شده در برابر داده اندازه گیری شده در محل در پروژه واحد زلال سازی ماهشهر ( داده های اندازه گیری شده از [۲۱])

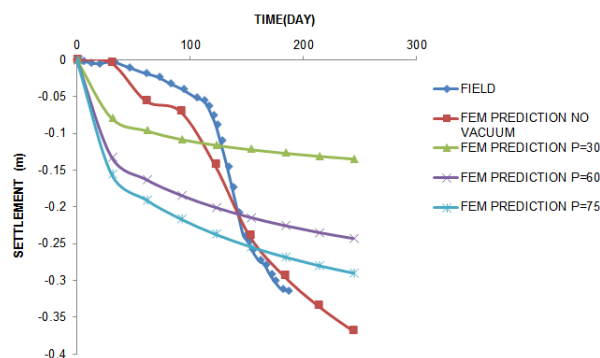
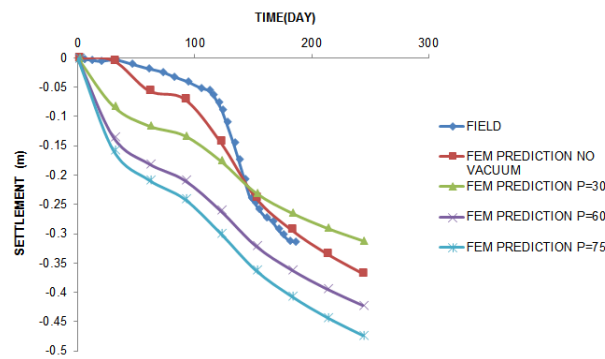
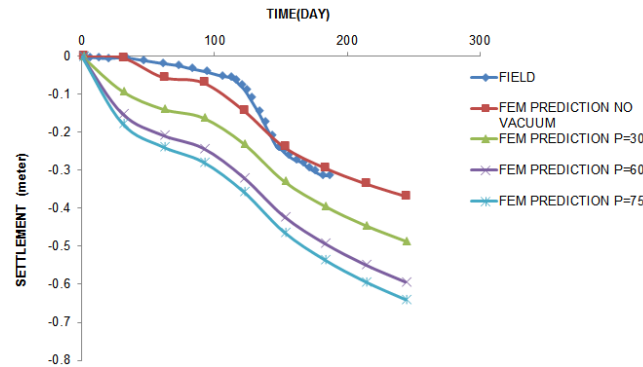
## ۶. بحث و بررسی نتایج

به منظور بررسی میزان کارآمدی سیستم تحکیم با مقادیر مختلف پیش بار گذاری خلاء سه حالت در نظر گرفته شد:

- ۱- اعمال فشار خلاء ۳۰ کیلو پاسکال ۲- اعمال فشار خلاء ۶۰ کیلو پاسکال ۳- اعمال فشار خلاء ۷۵ کیلو پاسکال که بیشترین مقداری است که از لحاظ عملی در خاک زیرین قابل اعمال می باشد. فرض می شود که سیستم اعمال خلاء هیچ گونه نشستی نداشته و در طی مدت زمان بهره برداری هیچ گونه وقفه ای در کار آن حادث نگردیده است. این سه مورد با سه حالت مختلف بارگذاری سربار مورد آزمون قرار گرفت تا تصویر روشنی از میزان تاثیر خلاء حاصل شود. منظور از P در نمودارها فشار خلاء است. در حالت اول (شکل ۷a) فرض می گردد که شرایط پروژه همان شرایط قبلی است و فقط به خاطر تسریع در روند اجرایی پروژه در کنار سربار ۶ متری و زهکش های عمودی از بار خلاء نیز می خواهیم استفاده نماییم. از شکل ۷a پیداست که در این شرایط با خلاء اعمالی ۳۰، ۶۰ و ۷۵ کیلو پاسکال به ترتیب ۴۰، ۶۰ و ۷۸ روز از مدت زمان پروژه برای رسیدن به نشست تحکیمی هدف مورد نظر (۳۳ سانتیمتر) کاسته می شود. همان طور که مشاهده می شود در حالت استفاده از ترکیب سربار و فشار خلاء زمان به میزان قابل توجهی کاهش یافته است که در صورتی که زمان در پروژه عامل کلیدی محسوب گردد این روش ترکیبی می تواند بسیار کارآمد باشد. در حالت دوم فرض می گردد که ارتفاع سربار به نصف کاهش پیدا کرده است. پرواضح است که در این حالت با یک فشار خلاء ۳۰ کیلو پاسکالی نشست مورد نظر در همان زمان قبلی حاصل می شد در حالی که ۳ متر از ارتفاع خاکریز کاسته شده است و به دنبال آن مشکلات مربوط به پایداری خاکریز و مسائل اجرایی نیز کاهش یافته است (شکل ۷b). با توجه به هزینه گزاف عملیات خاک برداری و خاک ریزی، استفاده از ترکیب پیش بارگذاری سربار و خلاء با ارتفاع کاهش یافته یک گزینه مناسب اقتصادی جهت ارائه طرح بهسازی باشد. هم اکنون استفاده از ترکیب بار و سربار کاهش یافته در اکثر پروژه های حال حاضر در جهان به عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی، مد نظر طراحان ژئوتکنیک می باشد. در این حالت با توجه به وجود یک سرباره، نیازی به استفاده از فشار های بالای خلاء نبوده و در نتیجه مشکلات فنی مرتبط با نگه داشتن فشار های بالا و نشستی در سیستم و در کل هزینه نگهداری سیستم به مقدار قابل توجهی کاهش می باشد. همچنین استفاده از این روش در مناطقی که دسترسی به مصالح خاکریز جهت احداث سرباره محدود می باشد نیز می تواند به عنوان یک گزینه مطلوب تلقی گردد. در حالت بدون وجود خاکریز (شکل ۷c) عملکرد مطلوبی را در حالت فشار خلاء ۳۰ و ۶۰ کیلو پاسکالی مشاهده نمی شود. دلیل این امر وجود لته های ماسه ای در لایه اول خاک می باشد که به شدت کارآمدی سیستم تحکیم با خلاء را کاهش داده است. در این حالت علیرغم وجود لته های ماسه ای و نبود سربار مشاهده می کنیم که سیستم در روز ۱۷۰ ام مشابه حالت اجرا شده با سربار ۶ متری، نشست هدف حاصل گردیده است. در حالت استفاده از فشار خلاء ۶۰ کیلو پاسکال، در زمان ۱۷۰ روز، ۹۰ درصد نشست تحکیمی هدف حاصل گردیده که در صورت استمرار عملیات نهایتاً ظرف ۳۰ روز نشست نهایی مورد انتظار حاصل می گردد. با توجه به موارد مذکور مشاهده می گردد که استفاده از بارگذاری خلاء به تنهایی در فشار های ۶۰ و ۷۵ کیلو پاسکالی عملکردی مشابه سربار احداث شده داشته است با این تفاوت که در این حالت دیگر نیازی به عملیات خاکریزی و خاک برداری در این حجم بسیار زیاد نبوده و بلافاصله بعد از اتمام عملیات، عملیات پارت بعدی که احداث فنداسیون می باشد می توانست آغاز گردد که از نظر زمانی در پروژه و از نظر مالی صرفه جویی قابل توجهی قابل دسترسی بود. در حال حاضر در پروژه جاده ابریشم چین، در صورت وجود شرایط مناسب محلی و ژئوتکنیکی معمولاً از روش بارگذاری خلاء بدون سربار استفاده می گردد به خصوص در مناطق باتلاقی که دسترسی به مصالح جهت احداث بار سرباره محدود یا ناممکن است [۲۸]. بهر حال طراحی سیستم های بهسازی خاک های نرم رسی با توجه به پیچیدگی



ذاتی به صورت بهینه با در نظر گرفتن شرایط پروژه، مسائل اقتصادی و اهداف پروژه یک امر بسیار چالش برانگیز است که می‌بایست الزماً توسط مهندسین ژئوتکنیک ذیصلاح در این زمینه انجام گردد. در صورت ضعف در مطالعات اولیه، در نظر نگرفتن شرایط جوی و محیطی و همچنین موارد خاص اجرایی پروژه، امکان ارائه یک طرح نامناسب و ناکارآمد دور از ذهن نیست. در این خصوص باید این نکته مهم را در نظر داشت که همانند تمام پروژه‌های بهسازی خاک، احداث یک منطقه آزمایشی جهت تست کردن طراحی اولیه به صورت محدود، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است که در تمام پروژه‌های بزرگ بین‌المللی این امر با صرف زمان و هزینه‌های بسیار انجام پذیرفته است [۱۶، ۲۹]. امید است که بزودی با همت متخصصان داخلی شاهد انجام پروژه‌های مشابه در کشور عزیز ایران نیز باشیم.



شکل ۷- نشست بستر تحت فشار خلاء ۳۰، ۶۰ و ۷۵ کیلو پاسکال (الف) سربار ۶ متری (ب) سربار ۳ متری (ج) بدون سربار



در این پژوهش پس معرفی سیستم تحکیم با خلاء و توصیف مکانیسم عامل بر آن، کارآمدی سیستم پیش بار گذاری به وسیله خلاء در یک پروژه موردی ( تحکیم بستر واحد زلال سازی ماهشهر) بررسی گردید. در مناطقی که به علت شرایط جوی، ژئوتکنیکی و یا تلفیقی از این موارد، امکان احداث خاکریز های بلند جهت بهسازی زمین بستر وجود ندارد، این تکنولوژی کارآمدی خود را به خوبی نشان می دهد. در مواردی که به علت کمبود زمان، می بایستی از سیستمی استفاده گردد که دارای قابلیت اطمینان زیادی باشد، سیستم تحکیم با خلاء می تواند بسیار سودمند باشد. با توجه به ارزان تر بودن حدود ۳۰ درصدی یا بیشتر این سیستم نسبت به بار سرباره، بسته به شرایط پروژه می توان برای کاهش هزینه ها از این سیستم به تنهایی و یا به صورت تلفیقی از خلاء و سربار استفاده نمود. در این مطالعه موردی، هر چند به علت وجود لیز های ماسه ای، این سیستم کارآمدی مورد انتظار در پروژه های مشابه اجرا شده قبلی را نداشت، اما همچنان در حالت وجود سربار ۶ متری باعث کاهش قابل توجهی در زمان حصول به نشست هدف به خصوص در حالت فشار خلاء ۶۰ و ۷۵ کیلو پاسکالی گردید. در حالت سربار کاهش یافته ۳ متری فشار خلاء ۳۰ کیلو پاسکالی، سیستم عملکردی تقریباً مشابه وجود سربار ۶ متری داشت و در حالت بدون سربار، با فشار خلاء ۷۵ کیلو پاسکالی در مدت تقریباً مشابه به نشست هدف دست یافت. استفاده از حالت ترکیب سربار کاهش یافته ۳ متری با فشار خلاء حداقلی ۳۰ کیلو پاسکالی، اقتصادی ترین و در عین حال کارآمدترین سیستم بهسازی خاک با توجه به نتایج این تحقیق بود. با توجه به کاهش کارآمدی به خاطر وجود لیزهای ماسه ای اهمیت بررسی های ژئوتکنیکی قبل از شروع پروژه های از این دست نمایان می گردد. با توجه به گسترش ساخت و ساز های ساحلی و فراساحلی در کشور امید می رود که این سیستم نیز در پروژه های مشابه به کار گرفته شود.

## ۸. منابع

- [۱] M.S. Pakbaz, R.J.A.C.S. Alipour, Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay, (2012) 1-4.
- [۲] R. Alipour, J. Khazaei, M.S. Pakbaz, A. Ghalandarzadeh, Settlement control by deep and mass soil mixing in clayey soil, 1.۳۷-۲۷ (۲۰۱۷) (۱)۷۰
- [۳] J. Chu, S. Yan, B. Indraratna, Vacuum preloading techniques-recent developments and applications, (2008).
- [۴] C. Rujikiatkamjorn, B. Indraratna, Current state of the art in vacuum preloading for stabilising soft soil, (2013).
- [۵] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, A. Balasubramaniam, G.J.G. McIntosh, Geomembranes, Soft ground improvement via vertical drains and vacuum assisted preloading, 30 (2012) 16-23.
- [۶] M.R. Motahari, H. Kiani vafa, Studying Performance of PVDs on Consolidation Behavior of soft Clayey Soils Using EFM, Mahshahr Oil Storages %J Journal of Civil Engineering and Materials Application, 4(2) (2020) 75-88.
- [۷] B. Indraratna, R. Zhong, P.J. Fox, C.J.J.o.G. Rujikiatkamjorn, G. Engineering, Large-strain vacuum-assisted consolidation with non-Darcian radial flow incorporating varying permeability and compressibility, 143(1) (2017) 04016088.
- [۸] B. Indraratna, I. Sathananthan, C. Rujikiatkamjorn, A. Balasubramaniam, Analytical and Numerical Modeling of Soft Soil Stabilized by Prefabricated Vertical Drains Incorporating Vacuum reloading, (2005).
- [۹] W. Kjellman, Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, in: Proc. of Conf. on Soil Stabilization, 1952, 1952.
- [۱۰] W. Zhu, J. Yan, G.J.O.E. Yu, Vacuum preloading method for land reclamation using hydraulic filled slurry from the sea: a case study in coastal China, 152 (2018) 286-299.
- [۱۱] G. Kang, T.-H. Kim, S.-K.J.J.o.O.U.o.C. Yun, Measured Performance and Analysis of the Residual Settlement of a PVD-Improved Marine Soft Ground, 20(5) (2021) 1055-1066.
- [۱۲] Y. Wu, R. Zhou, Y. Lu, X. Zhang, H. Zhang, Q.C.J.G. Tran, Geomembranes, Experimental study of PVD-improved dredged soil with vacuum preloading and air pressure, (2022).
- [۱۳] Z.J.S.E. Ji, Foundation, Application of Vacuum Preloading Method in Narrow Road on Soft Ground Treatment Project, 36(2) (2022) 131.
- [۱۴] A. de Lillis, G. Fasano, A. Flora, S.J.P.o.t.I.o.C.E.-G.I. Miliziano, A novel application of vacuum preloading: conception, analysis and performance evaluation, (2022) 1-16.
- [۱۵] rncc.co, construction site vacuum preloading, in, 2022.
- [۱۶] B. Indraratna, Recent advances in the application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilisation, (2010).
- [۱۷] J. Wang, Y. Cai, J. Ma, J. Chu, H. Fu, P. Wang, Y.J.J.o.G. Jin, G. Engineering, Improved vacuum preloading method for consolidation of dredged clay-slurry fill, 142(11) (2016) 06016012.
- [۱۸] J. Cognon, I. Juran, S. Thevanayagam, Vacuum consolidation technology-principles and field experience, in: Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. Part 2 (of 2), Publ by ASCE, 1994, pp. 1237-1248.
- [۱۹] A. Jacob, S. Thevanayagam, E. Kavazanjian, Vacuum-assisted consolidation of a hydraulic landfill, in: Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. Part 2 (of 2), Publ by ASCE, 1994, pp. 1249-1261.



- [۲۰] P. Izedi Preloading and wick drain installation at Emam khomeini port in: the first conference on soil improvement in iran, undefined, 2001.
- [۲۱] T. Fakharian , Mehdi zade , Mohammad loo the numerical modelling of radial consolidation and callibration of instrumentation data in Sarbandar Decanter center in Mahshahr, in: forth international conference of soil mechanic and geotechnic in iran, undefined, 2010.
- [۲۲] A. Tasalloti, K. Fakharian, A. Mehdizadeh, Preliminary investigation of instrumentation in decanter units preloading project in Mahshahr port (South-west of Iran), 2۰۱۰
- [۲۳] M.C. Yapriadi, I. Sumarli, A.J.J.J.M.T.S. Iskandar, Evaluasi Settlement Menggunakan Surcharge Preloading Dengan Pvd Pada Proyek Di Bandung Selatan, 3(3) (2020) 911-922.
- [۲۴] S.M.A.Z. Mohammad Mehdi Pardsouie the investigation of the percentage of improvement in the case of applying vacuum pressure along with PVD and surcharge (part 2), in: the second Iranian national conference on structure , earthquake and geotechnical engineering, Mazandaran, 2011.
- [۲۵] S.M.A.Z. Mohammad Mehdi Pardsouie The numerical investigation of soil improvement of Mahshahr decanter unit with surcharge and embankment preloading ( part 1), in: the second Iranian national conference on structure , earthquake and geotechnical engineering, Mazandaran, 2011.
- [۲۶] M.M. Pardsouie, M. Mokhberi, M.H.J.A.R.i.C.E. Pardsouie, The Importance of Incorporating Hydraulic Modifier Function versus Step Loading in Ground Improvements Including Vacuum Preloading, 4(2) (2022) 54-60.
- [۲۷] M.M. Pardsouie, M.H. Pardsouie, S.M.A. Zomorodian, M.J.J.o.C.E. Mokhberi, M. Application, Numerical Study of efficiency of the Vacuum Preloading in Weak Clay Treatment (a case study), 6(2) (2022).
- [۲۸] J. Shang, M. Tang, Z.J.C.G.J. Miao, Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study, 35( (۱۹۹۸) (۲۰۰۷) ۷۴۹-۷۴۰.
- [۲۹] D.T. Bergado, P. Jamsawang, P. Jongpradist, S. Likitlersuang, C. Pantaeng, N. Kovittayanun, F.J.G. Baez, Geomembranes, Case study and numerical simulation of PVD improved soft Bangkok clay with surcharge and vacuum preloading using a modified air-water separation system, 50(1) (2022) 137-153.