



لزوم در نظر گرفتن فاصله ایمن از شریان های زیرسطحی در مجاورت عملیات بهسازی خاک های نرم رسی با سربرار

محمد مهدی پاردسوئی^{۱*}، مهدی مخبری^۲، محمد هادی پاردسوئی^۳، محمد رضا قاطع^۴

^{۱*} دانشجوی دکتری مهندسی عمران-ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران
(m.m.pardsouie@gmail.com)

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

^۳ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

^۴ کارشناسی، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲)

چکیده

در این تحقیق ابتدا یک مطالعه موردی کلاسیک در زمینه بهسازی خاک های نرم رسی به وسیله بار سربرار و زهکش های عمودی معرفی گردید و مورد صحت سنجی قرار گرفت. بر اساس مدل صحت سنجی شده، پیرامون خاکریز با استفاده از نرم افزار Geostudio 2018R2 مورد ارزیابی قرار گرفت و جابه جایی های جانبی و کرنش های افقی تعیین گردید. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که فاصله ایمن در مطالعه موردی نظر ۴۰ متر می باشد که تقریباً معادل طول خاکریز احداث شده است. در حالت مناطق شهری، در صورت وجود شریان های زیرسطحی از قبیل خطوط آب و فاضلاب، کابل های مخابرات و فیبر نوری یا خطوط انتقال نفت و گاز و حتی احداث ترانشه و گودبرداری در منطقه خطر تعیین شده، این شریان های مهم یا گودها، در معرض آسیب و خطر جدی ناشی از کرنش های ناشی از فرآیند بهسازی می باشند. در حالت شهرک ها یا مناطق صنعتی نیز به طور مشابه در صورت احداث این شریان ها در محدوده خطر تعیین شده یا گود برداری جهت ترانشه یا فنداسیون وضعیت مشابهی برقرار است. با توجه به اهمیت این شریان ها در بحث پدافند غیر عامل، مقتضی است چه در مرحله مطالعات اولیه و چه در حین ساخت و در صورت دائمی بودن خاکریز ها در دوران بهره برداری، فرآیند عملیات بهسازی در محدوده خطر مورد توجه ویژه سازندگان و مشاوران و کارفرمایان قرار گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده استفاده از این روش در محیط های شهری توصیه نمی گردد.

کلمات کلیدی

بهسازی خاک، بار سربرار، اجزای محدود، شریان های زیرسطحی، محدوده تاثیر.



The Necessity of Consideration of the Safe Distance for Infrastructures in the Vicinity of Weak Clay Soil Treatments Including Surcharge

Mohammad Mehdi Pardsouie ^{1*}, Mehdi Mokhberi ², Mohammad Hadi Pardsouie ³,

Mohammad Reza Ghate ⁴

^{*1} PhD candidate, Department of civil engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran (m.m.pardsouie@gmail.com)

² Associate professor, Department of civil engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

³ M.Sc., Department of civil engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

⁴ B.Sc., Department of civil engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

(Date of received: 24/01/2023, Date of accepted: 12/05/2023)

ABSTRACT

In this literature a case study that includes surcharge and prefabricated vertical drains (PVDs) was introduced and verified using finite element program Geostudio 2018R2. Based on the verified model, the lateral displacement and horizontal strains were calculated. It was shown that the safe zone for this special case study is 40 m that is approximately equal to the length of the constructed embankment. In urban areas as a result of the existence of water and wastewater pipes, optical fibers, oil and gas transition lines or trenches and excavations, these infrastructures are in serious danger due to the lateral displacements and horizontal strains. The same case is true for constructions in industrial areas. Since the mentioned infrastructures do have special importance in passive defense doctrine, exclusive attention should be considered by the owners, consultants and contractors in such projects all phases including preliminary investigation, during the construction and after the compilation of the treatment process in the case of permanent embankment. It was shown that due to the obstacles related to surcharge and PVDs treatment, this method is not suitable in urban areas.

Keywords:

Soil treatment, Surcharge, Finite element, Infrastructures, Influence zone.

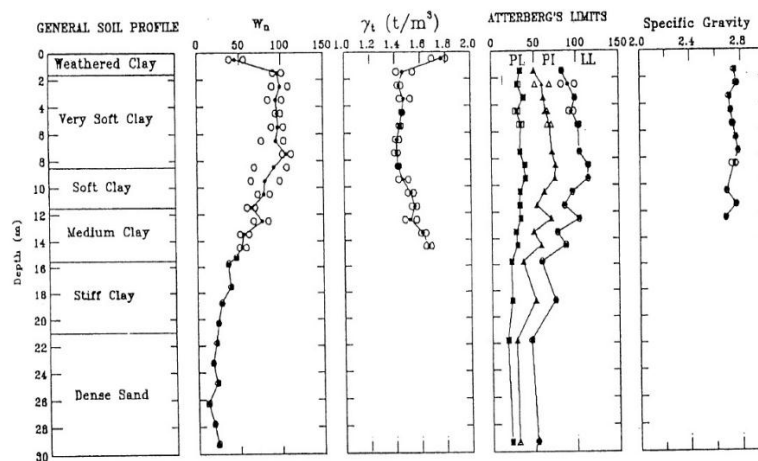


در حال حاضر یکی از عمده ترین اهداف پدافند غیرعامل، ایمن سازی و کاهش آسیب پذیری زیرساخت های موجود و مورد نیاز کشور است تا به تدریج شرایطی را برای امنیت ایجاد نماید. به این منظور با ارائه راهکارها و تدوین الزامات، ملاحظات، معیارها و دستورالعمل های فنی و مهندسی پدافند غیرعامل و الزامی نمودن آنها در مطالعات، طراحی و اجرای زیرساخت های توسعه و عمران می توان آنها را هدایت و کنترل نمود [۱]. توجه به توزیع میزان آسیب پذیری زیر ساخت های حیاتی و حساس و خطرات انسانی به عنوان یکی از راهکارهای مناسب باعث توانمندتر شدن شهرها و افزایش مقاومت آنها در برابر مخاطرات شده است که ارتباط مستقیمی با برنامه ریزی پدافند غیرعامل دارد [۲]. زیرساخت های شهری از قبیل خطوط آب، فاضلاب، مسیر های کنترل روان آب های سطحی، خطوط فیبر نوری و خطوط انتقال نفت و گاز از جمله مهمترین شریان های شهری هستند که در صورت وقوع هر گونه مشکل در آنها، قسمتی از فعالیت های شهری در آن منطقه دچار اختلال جدی گردیده و باعث نارضایتی گسترده و هر حالت لوله های انتقال گاز حتی باعث انفجار های عظیم در منطقه و خسارت های مالی و جانی گسترده می گردد. محققان مختلفی در منظر های مختلف به بررسی اهمیت لحاظ ملاحظات پدافند غیر عامل در خصوص شریان های زیر سطحی پرداخته اند از جمله طهرانی و پیشرو [۳] در خصوص فاضلاب شهری، آفتاب و همکاران به صورت مطالعه موردی در شهر ارومیه [۲]، زرقانی و همکاران [۴] در خصوص زیرساخت های آب، ستاری خواه و افتخاری [۵] در خصوص انتقال لوله های گاز و ملک زاده و همکاران در خصوص زیرساخت های مرتبط با فیبر نوری [۶] اشاره کرد. با گسترش مناطق شهری و صنعتی به خصوص در نوار ساحلی کشور، بهسازی خاک های نرم رسی تبدیل به یکی از ضرورت های اجتناب ناپذیر در روند ساخت و ساز در کشور ما گردیده است. در قسمت های شهری، به خاطر کمبود زمین و همچنین توسعه شهرک های صنعتی، مناطقی که قبلا به خاطر وجود لایه های بسیار ضعیف خاک امکان هیچ گونه سازی وجود نداشت، هم اکنون مورد توجه سازندگان قرار گرفته است. در نوار ساحلی کشور نیز عمدتا طرح های پالایشگاهی و کارخانجات تبدیلی و فرآوری محصولات معدنی و صنعتی در حال انجام است. یکی از راهکارهای بهسازی لایه های سست در چنین مناطقی استفاده از بار سربار به همراه زهکش های عمودی است. زهکش های عمودی به صورت ستون های شنی یا ژئوسنتتیک های پیش ساخته متخلخل (PVD) می باشند که به خاطر ضریب بالای هدایت هیدرولیکی، فرآیند تحکیم و زایل ساختن فشار آب منفذی اضافی به وجود آمده توسط بار سربار را تسریع می بخشند [۷]. قبل از اجرای خاکریز ابتدا زهکش های عمودی اجرا می شوند و سپس عملیات خاکریزی بار سربار آغاز می گردد. بسته به نوع طراحی فرآیند بهسازی ارتفاع خاکریز می تواند بین ۲ تا ۸ متر به صورت معمول باشد. فرآیند ساخت خاکریز به صورت مرحله ای با یک شیب پایدار در یک بازه ۴ تا ۱۲ ماهه انجام می گردد. با افزایش بار سربار و آغاز فرآیند تحکیم در لایه های سست، نیروی برشی بسیار زیادی در زیر خاکریز و محیط پیرامون آن به وجود می آید. این نیرو در مرکز خاکریز کم و حداکثر آن در پاشنه خاکریز است [۸]. با دور شدن از مرکز خاکریز این نیرو نیز کاهش می یابد. محل عمده تاثیر این نیروی برشی معمولا در میانه لایه سست قرار گرفته است [۹]. آتاپاتو و همکاران [۱۰] تاثیر میزان خلاء را بر مناطق غیر بهسازی شده مجاور محدوده بهسازی را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس مدل سازی اجزای محدود انجام شده توسط نرم افزار Geostudio آنها یک نمودار را پیشنهاد نمودند که بر اساس آن نمودار، مهندسان طراح بتوانند تخمینی از شعاع منطقه تاثیر را به صورت حدودی تخمین بزنند. همچنین در خصوص پروژه هایی که شامل استفاده از عامل خلاء به عنوان یک فاکتور پیش بارگذاری بود پیشنهاد گردید که در صورت وجود شریان های زیر سطحی مهم در نزدیکی محل بهسازی، از طراحی با کاهش عمق زهکش ها در پای خاکریز جهت کاهش تغییرمکان جانبی استفاده گردد. با توجه به وجود این نیرو، در صورت وجود داشتن تاسیسات زیربنایی و شریان های انتقال انرژی یا آب و فاضلاب، در محدوده محل عملیات بهسازی احتمال بروز خسارت به خاطر جابه جایی خاک و شکستن و لهیدگی شریان ها و لوله ها وجود دارد. از این رو هنگام طراحی چنین پروژ هایی، مکان یابی و رعایت فاصله مناسب یکی از ضروریات مهم می باشد که متاسفانه این امر عمدتا مورد غفلت قرار می گیرد. در این نوشتار جهت تبیین موضوع ابتدا یک مطالعه موردی مطرح گردیده و مورد صحت سنجی قرار می گیرد. سپس جهت روشن شدن موضوع و مشخص شدن مقدار نیروی های وارده، مقادیر نیروی برشی وارده در پروفیل خاک ارائه می گردد.

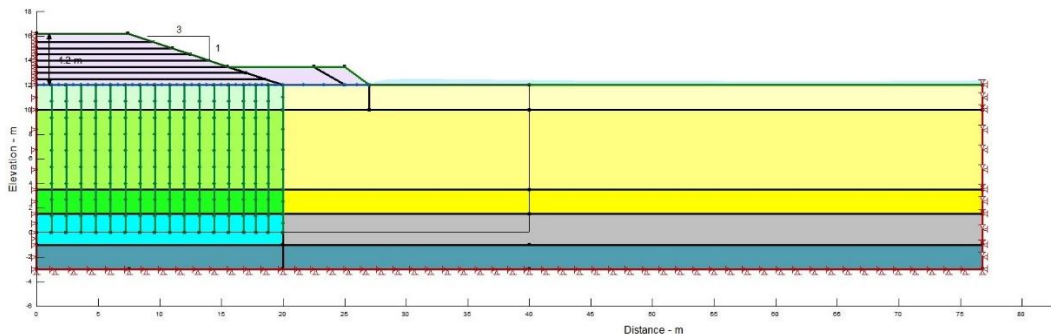


۲- روش تحقیق

جهت انجام مدل سازی، از نرم افزار اجزای محدود Geostudio 2018R2 استفاده گردید. مطالعه موردی مورد استفاده در این مقاله خاکریز آزمایشی ساخته شده در فرودگاه بانکوک می باشد که یک نمونه کلاسیک در عمده مقالات مرتبط با بهسازی خاک های نرم رسی با استفاده از سربار و زهکش های عمودی متخلل ژئوسینتیکی است. شکل ۱ پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد بهسازی و نمایی شماتیک از مدل اجزای محدود کرنش صفحه ای مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد. با توجه به فرآیند طولانی و پیچیده مدل سازی و این مهم که این امر در قبل توسط نگارندگان این نوشتار انجام گردیده است و در [۷، ۹، ۱۱] به صورت مفصل بیان گردیده است، صرفاً در شکل ۲، تصویر شماتیک مدل اجزای محدود ساخته شده و نمودار صحت سنجی جهت خاکریز آزمایشی TS2 که دارای یک سربار ۴،۲ متری بوده و فاصله زهکش های آن ۱،۲ متر و به صورت آرایش مثلثی می باشد ارائه گردیده است.



(الف)



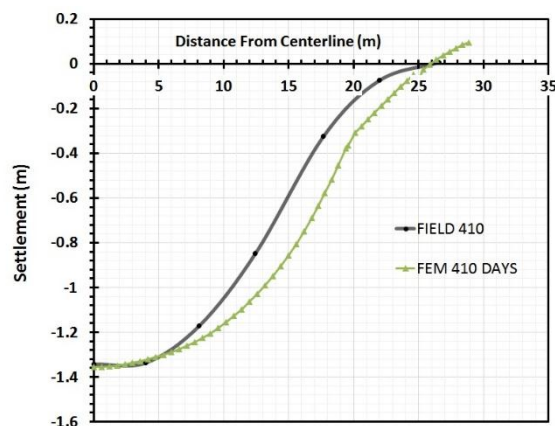
(ب)

شکل ۱: الف- پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه در فرودگاه بانکوک [۱۲]، ب- مدل اجزای محدود در مطالعه.

محل اجرای پروژه در یک منطقه ساحلی می باشد که جهت توسعه فاز دوم و بین المللی فرودگاه انتخاب گردید. اما به دلیل وجود لایه های بسیار سست خاک رسی، روش های بهسازی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پس از انجام آزمایشات در محل و احداث پایلوت های روش های پیشنهادی، روش بهسازی با بار سربار و PVD جهت عمده منطقه مورد استفاده قرار گرفت. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می گردد به استثنای نشست نهایی، در طول مسیر مدل اجزای محدود مقدار نشست را کمی بیش برآورد کرده است. یکی از دلایل این امر تاخیر در انتقال تنش از سربار به خاک می باشد که توسط [۱۳] نیز به آن اشاره گردیده است.



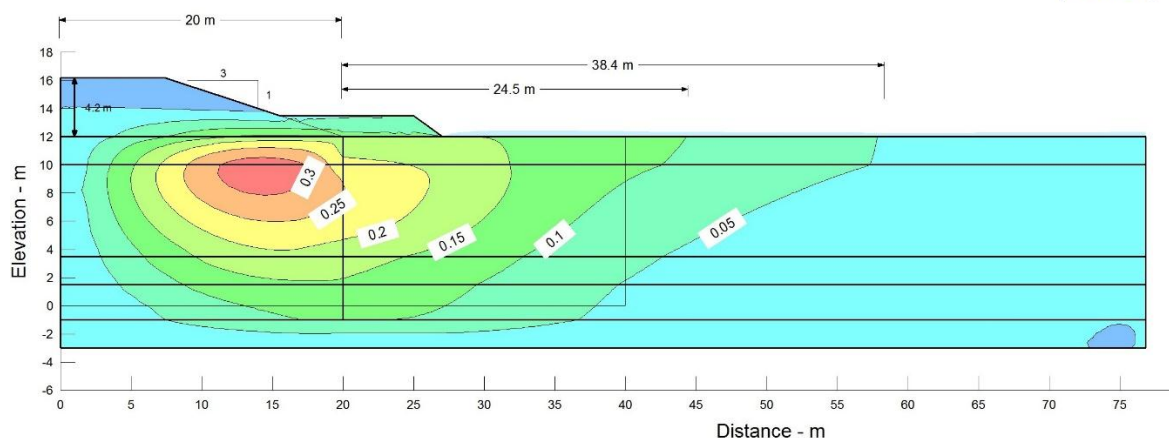
شکل ۳ یک نمونه از ترک های به وجود آمده و خسارت های وارده از یک خاکریز را نشان می دهد. همانطور که از شکل پیدا است می توان دید علی رغم فاصله زیاد از خاکریز احداث شده چه تغییرات بزرگی در سطح زمین اتفاق افتاده است.



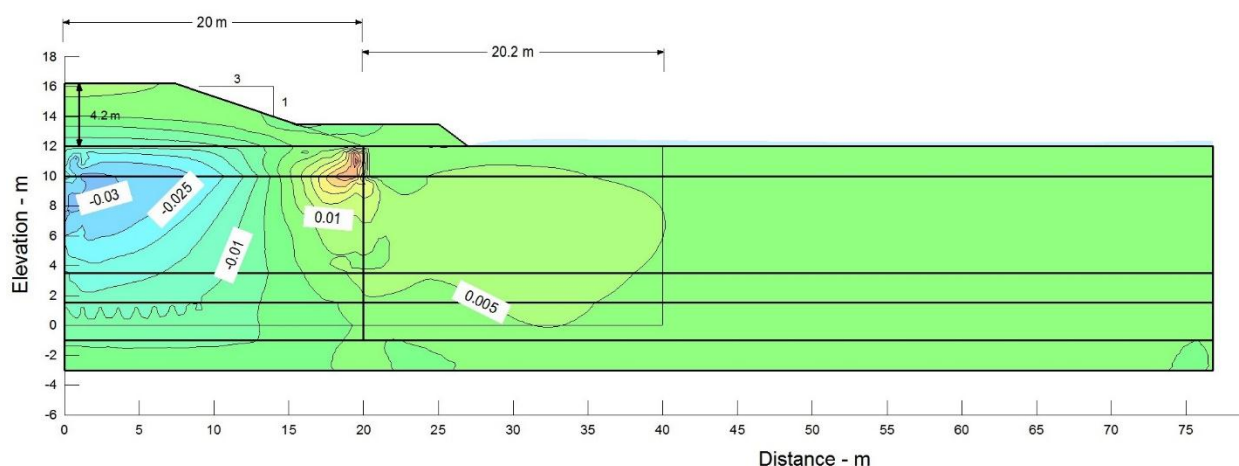
شکل ۲: صحت سنجی مدل ساخته شده در برابر داده های در محل ، داده در محل از [۱۲] بعد از ۴۱۰ روز.



شکل ۳: تغییرات سطح زمین در اثر احداث خاکریز [۱۴].



(الف)



(ب)

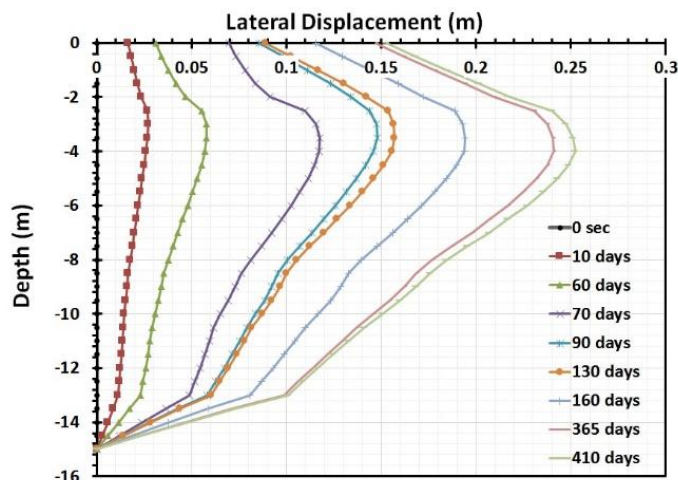
شکل ۴: الف) کنتورهای جابه جایی (بر حسب متر) ب) کرنش در جهت X (بر حسب کیلوپاسکال)، بعد از گذشت ۴۱۰ روز در مدل اجزای محدود.

۳- نتایج و بحث

محققان متعددی روابط تجربی متعددی را برای بدست آوردن فاصله تاثیر از خاکریز ساخته شده جهت عملیات بهسازی ارائه نموده اند که عمده آن ها با در نظر گرفتن پیش بارگذاری خلاء می باشد و بر اساس یک مطالعه موردی خاص این روابط پیشنهاد گردیده اند [۱۵-۱۷]. با توجه به خصوصیات متعدد و متنوع هر پروژه بهسازی که اختصاصا متعلق به همان پروژه خاص است مطمئن ترین روش استفاده از مدل سازی اجزای محدود است. در این نوشتار نیز از روش اجزای محدود جهت بررسی محدوده ایمن و تاثیر از خاکریز احداث شده استفاده شده است. همانطور که در شکل (الف) مشاهده می گردد تا فاصله ۳۸٫۴ متری از پاشنه خاکریز در سطح زمین مقدار جابه جایی برابر با ۵ سانتیمتر وجود دارد. با توجه به طول ۴۰ متری خاکریز می توان نتیجه گرفت که در این پروژه خاص می توان به صورت تقریبی، محدوده ایمن را به اندازه طول خاکریز در نظر گرفت. البته باید به این نکته توجه داشت که مهمترین پارامتر در تعیین این طول، ضخامت تراکم پذیر ترین لایه خاک می باشد که در این مطالعه موردی ضخامت این لایه که درست در زیر لایه هوازده سطحی قرار دارد برابر با ۶ متر می باشد. بدیهی است که در صورتی که ضخامت این لایه ۸ یا ۱۴ متر بود به طور قطع شعاع محدوده تاثیر نیز به تبع آن افزایش می یافت. با توجه به شکل (ب) می توان دید که کرنش راستای محور X برابر با ۰٫۰۰۵ کیلو پاسکال، در فاصله ۲۰٫۲ متری از پاشنه خاکریز تا عمق ۱۲ متری از سطح زمین گسترش یافته است. محدوده



خط کنتور نشان داده شده، ناحیه بحرانی جهت شریان های زیر سطحی یا سازه های زیرزمینی می باشد که فشار وارده بر آن ها در این ناحیه می تواند باعث بروز خسارت های جدی به چنین سازه یا شریان های شهری و صنعتی گردد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می گردد حداکثر میزان جابه جایی جانبی و کرنش افقی در پای پاشنه خاکریز روی داده است. فشار در این نقطه آنچنان زیاد است که در بعضی از پروژه ها، حتی با وجود اجرای شمع های مسلح، شمع شکسته و یا دچار زوال گردیده اند [۱۸].



شکل ۵: نمودار جابه جایی جانبی در پای پاشنه خاکریز در برابر عمق برای زمان های مختلف.

شکل ۵ حداکثر جابه جایی جانبی در پای پاشنه خاکریز را نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود حداکثر جابه جایی در عمق ۴ متری زمین روی می دهد و نه در سطح زمین. با افزایش ارتفاع خاکریز نرخ افزایش جابه جایی جانبی نیز زیاد می گردد و حتی بعد از ساخت خاکریز نیز همچنان به خاطر پدیده تحکیم این افزایش ادامه می یابد. با توجه به نیروی برشی زیاد در این ناحیه، در صورت وجود خاکریز در پروژه های تعریض راه، ترک های عمیقی در بدنه خاکریز قدیمی واقع می گردد که توسط محققان گزارش گردیده است [۱۹-۲۱]. با توجه به نیروی برشی در این محدوده، در صورت نیاز به خاکبرداری در محدوده خطر محل احداث خاکریز (که در این مثال ۴۰ متر محاسبه گردید)، در صورت در نظر نگرفتن این موضوع در محاسبات ضریب اطمینان و روش گودبرداری و پایدار سازی گود، احتمال ریزش گود به شدت افزایش می یابد. مقتضی است که در صورت احداث خاکریز های دائم (به طور مثال جهت احداث راه ها و آزاد راه ها)، به خصوص در مناطق شهری، خاک برداری ها جهت احداث فنداسیون ساختمان های جدید یا جهت ترانشه به منظور لوله گذاری از نظر مهندسیین دارای صلاحیت در این خصوص استفاده گردد. با توجه به موارد عنوان گردیده و همچنین تجمع بسیار زیاد شریان های انرژی و آب و فاضلاب و همچنین کابل های فیبر نوری و مخابرات، استفاده از این روش بهسازی در مناطق شهری توصیه نمی گردد. در صورت استفاده از این روش بهسازی در مناطق صنعتی می بایست محل شریان های زیرسطحی در محدوده خطر، از قبل جانمایی گردیده و اقدامات لازم جهت پایدار سازی یا جابه جایی این شریان ها در صورت امکان صورت پذیرد. عدم توجه به این موضوع می تواند منجر به خسارت های مالی و جانی جبران ناپذیری گردد.



۴- جمع بندی و نتیجه گیری

استفاده از روش اجزای محدود قبل از اجرای پروژه بهسازی خاک های نرم شامل سربار و زهکش های عمودی، یک روش موثر در تشخیص منطقه خطر و مشخص نمودن محدوده کرنش های زیرسطحی می باشد. در این مقاله خاکریز آزمایشی TS2 که جهت مطالعه عملکرد سیستم سربار و زهکش های عمودی ژئوسینتتیک در طرح توسعه فرودگاه بین المللی بانکوک ساخته شده بود، به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید و مدل اجزای محدود در نرم افزار Geostudio 2018R2 بر اساس داده های برداشت در محل مورد صحت سنجی قرار گرفت. بر اساس مدل صحت سنجی شده تغییرات کرنش افقی و جابه جایی های جانبی در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفته و محدوده خطر در این پروژه برابر با ۴۰ متر تعیین شد. یکی از مهمترین مواردی که می بایست در محدوده خطر در نظر گرفته شود وجود شریان های زیرسطحی از قبیل لوله آب و فاضلاب، کابل های برق و فیبر نوری و لوله های انتقال نفت و گاز است. با توجه به وجود آمدن جابه جایی و کرنش های افقی، در صورت در نظر گرفتن این مهم قبل از شروع پروژه می تواند منجر به خسارت های مالی و جانی جبران ناپذیری گردد. در این خصوص می بایست در فاز مطالعات اولیه، این شریان ها به دقت شناسایی شده و در صورت قرار گرفتن در محدوده خطر نسبت به پایدار سازی و جابه جایی در صورت امکان اقدام گردد. همچنین در صورت حفر ترانشه و یا گودبرداری در زمان عملیات بهسازی، این کرنش ها می بایست در محاسبات ضریب اطمینان و نحوه اجرای پایدار سازی گود ها لحاظ گردد. با توجه به مطالعه موردی ارائه شده در این تحقیق، استفاده از روش بهسازی خاک های نرم و ضعیف با استفاده از سربار و زهکش های عمودی، به خاطر جابه جایی ها و منطقه بزرگ تاثیر، جهت محیط شهری که عمدتاً تراکم شریانی زیرسطحی بالایی دارند مناسب نیست. در پروژه شهری بهتر است از روش های دیگری مثل استفاده از شمع ها استفاده گردد. در خصوص مناطق صنعتی، در هنگام عملیات بهسازی مقتضی است در محدوده خطر، عملیات توسعه و یا ادامه فاز های بعدی پروژه، تحت نظر مهندسین ذیصلاح در این خصوص انجام گیرد تا از خسارت های مفروضه تا حد امکان جلوگیری گردد.

۵- مراجع

- ۱- م. ت. ر. م. و.، ۱۳۹۶، الزامات و ملاحظات پدافند غیرعامل در طرح های توسعه و عمران شهری (دستورالعمل مکانیابی مراکز حیاتی و حساس)، شهرسازی.
- ۲- ا. آفتاب، ع. سلیمانی و م. فری، ۲۰۱۹، ارزیابی آسیب پذیری زیرساخت های شهری ارومیه با رویکرد پدافند غیرعامل، فصلنامه پدافند غیر عامل، ۹، ۴، ۱۷-۳۱.
- ۳- م. میرزاابراهیم طهرانی و ن. پیشرو، ۲۰۲۱، شناسایی ریسک زیرساخت های حیاتی سیستم فاضلاب شهری با رویکرد پدافند غیرعامل، مجله آب و فاضلاب، ۳۱، ۷، ۱۲۰-۱۳۱.
- ۴- س. زرقانی، ا. ع. خوارزمی و ف. ک. م. پ. غ. ع. و ت. پ. بخشی شادمهری، ۲۰۱۶، جایگاه پدافند غیر عامل در امنیت زیرساخت های شهری با تاکید بر زیرساخت آب.
- ۵- خ. علی ستاری و ک. علی اکبر افتخاری قوشه، ۱۳۹۲، نقش پدافند غیرعامل در ارتقای امنیت خطوط لوله انتقال گاز کشور، پدافند غیر عامل و امنیت، ۷، ۲-۳۲.
- ۶- ع. ا. ملک زاده، ر. پاشایی و م. منصور سمایی، ۲۰۱۹، حسگر توزیعی فیبر نوری حساس به فاز در اقدامات پدافند غیرعامل، فصلنامه پدافند غیرعامل، ۹، ۴، ۹۳-۱۰۳.
- ۷- م. پاردسویی و س. زمردیان، ۱۳۹۱، مدل سازی عددی پروژه تحکیم خاک بستر واحد های زلال ساز بندر ماهشهر به وسیله سربار و زهکش های عمودی، دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله، ژئوتکنیک.



- 8- Pardsouie, M. M., and M. H. Pardsouie, 2022, **The effect of PVDs length on the lateral displacement of embankments**, J. G. G., 18, 1, 655-658.
- 9- Pardsouie, M. M., Momeni, M., Nasehi, S. A., and Pardsouie, M. J., 2022, **2D Numerical Investigation of the Effectiveness of Surcharge and Vacuum Preloading Along with PVDs**, 13th National Congress on Civil Engineering Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- 10- Atapattu, S., and Chao, K. C., 2022, **Influence of vacuum preloading to nearby non-treated area for Bangkok soft clay**.
- 11- Pardsouie, M. M., Pardsouie, M. H., Zomorodian, S. M. A., and Mokhberi, M., 2022, **Numerical Study of efficiency of the Vacuum Preloading in Weak Clay Treatment Application (a case study)**, Journal of Nea Approaches in Civil Engineering, 6, 2, 1-10.
- 12- Bergado, D., Long, P., and Balasubramaniam, A., 1996, **Compressibility and flow parameters from PVD improved soft Bangkok clay**, J. G. E., 27, 1-20.
- 13- Elkady, T. Y., Al-Mahbashi, A. M. and Al-Refeai, T. O., 2015, **Stress-dependent soil-water characteristic curves of lime-treated expansive clay**, J. J. o. M. i. C. E., 27, 3, 04014127.
- 14- Tashiro, M., Nguyen, S. H., Inagaki, M., Yamada, S., and Noda, t., 2015, **Simulation of large-scale deformation of ultra-soft peaty ground under test embankment loading and investigation of effective countermeasures against residual settlement and failure**, J. Soils and Foundations, 55, 2, 343-358.
- 15- Nguyen, D. C., Vu, N. M., and Van Pham, E. S., 2020, **Determination of the affected area of vacuum consolidation method for roadbed ground improvement to adjacent works**, J. J. o. M., 61, 6, 33-39.
- 16- Liu, j., Fu, H., Wang, J., Cai, Y., and Hu, X., 2018, **Estimation of influence scope of lateral displacement of soft ground under vacuum pressure with PVD**, J. A. I. C. E.
- 17- Chai, j., and Rondonuwu, S. G., 2015, **Surcharge loading rate for minimizing lateral displacement of PVD improved deposit with vacuum pressure**, J. G. and Geomembranes, 43, 6, 558-566.
- 18- Chai, j., Lu, Y., Uchikoshi, T. J., 2018,, **Behavior of an embankment on column–slab improved clay deposit**, I. J. o. G. G. Engineering, 4, 4, 1-12.
- 19- Wu, J., et al., 2021, **Combined vacuum and surcharge preloading method to improve lianyungang soft marine clay for embankment widening project: A case**, J. J. I. J. o. P. E. , 49, 2, 452-465.
- 20- Jiang, X., Jiang, Y., Wu, C. Y., Wang, W. Q., and Geng, Y. G., 2020, **Numerical analysis for widening embankments over soft soils treated by PVD and DJM columns**, J. I. J. o. P. E., 21, 3, 267-279.
- 21- Stark, T. D., Ricciardi, P. J., and Sisk, R. D., 2018, **Highway Embankment on Soft Soils Case Study and Lessons Learned**, in IFCEE 2018 International Association of Foundation Drilling Deep Foundations Institute American Society of Civil Engineers Pile Driving Contractors Association, 2018.