

بررسی تاثیر ترکیبات شیمیایی خاک بر پایداری دیواره گودبرداری

مجید آئینی

کارشناسی ارشد، گروه عمران- مهندسی خاک و پی
دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران.
aeini.majid@gmail.com

محمد حاجی عزیزی

دانشیار، گروه عمران- مهندسی خاک و پی، دانشگاه رازی
کرمانشاه، تاق بستان، دانشگاه رازی، دانشکده فنی و مهندسی، ایران.
mhazizi@yahoo.com

چکیده

با توجه به رشد جمعیت و کمبود فضا برای ساخت و ساز، روز به روز عمیق تر شدن گودبرداری‌ها در فضای شهری اتفاق می‌افتد. مطالعات نشان داده است که علاوه بر خصوصیات مکانیکی خاک، خصوصیات شیمیایی نیز سهم قابل توجهی در پایداری گود دارد. این تاثیر در خاک‌هایی که دارای ریزدانه هستند نمود بیشتری دارد که در آن سمنتاسیون شیمیایی بین ذره‌ای باعث ایجاد چسبندگی بیشتری در خاک شده است و در نهایت پایداری بیشتری را برای خاک خواهد داشت. در این مقاله تاثیر ترکیبات شیمیایی خاک در پایداری گودبرداری‌ها بررسی می‌شود که به عنوان کاری نو معرفی می‌گردد. به عنوان یک مطالعه موردی گودبرداری انجام شده در خیابان مدرس کرمانشاه بررسی شده است. همچنین به کمک نرم‌افزار Plaxis تحلیل پایداری گود با استفاده از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک انجام شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که بیشینه عمق گود برداری برای پایدار ماندن گود در حدود ۱۶ متر است در حالی که این گود با عمق ۲۲ متر پایدار مانده است. بنابراین ۶ متر اضافه عمق مربوط به تاثیر ترکیبات شیمیایی خاک است که در تحلیل‌های فیزیکی قابل اعمال نیست. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که اگر شناخت بیشتری از تاثیر ترکیبات شیمیایی در پایداری گود وجود داشته باشد، می‌توان عمق گودبرداری را بیش از عنوان یک روش جدید (نسبت به سایر روش‌های دیگر مانند نیلینگ، انکراژ، دیوار حایل و غیره) مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: گودبرداری، پایداری گود، خصوصیات مکانیکی، ترکیبات شیمیایی، سمنتاسیون شیمیایی.

The Investigation of Soil's Chemical Components Effect on Excavation Wall Stability

Majid Aeiini, Mohammad HajiAzizi*

ABSTRACT

Due to population growth and lack of space for construction, excavations are becoming more and more deep in the urban space. Studies have shown that in addition to soil mechanical properties, chemical properties also play a significant role in the stability of the excavation. This effect is more pronounced in fine-grained soils, where inter-particle chemical cementation results in greater cohesion to the soil and ultimately more stability to the soil. In this paper, the effect of soil chemical properties on stabilization of excavations is investigated, which is introduced as a new work. As a case study, excavation carried out on Modares Street in Kermanshah has been investigated. Also, with the help of Plexis software, the stability analysis of the excavation was performed using the physical and mechanical properties of the soil. The results of this analysis show that the maximum depth of excavation to stabilize the excavation, it is about 16 meters, while this excavation remained stable with a depth of 22 meters. Therefore, 6 m extra depth is related to the effect of soil chemical compounds, which is not applicable in physical analysis. The results of this paper show that if there is more knowledge about the effect of chemical compounds on the stability of the excavation, the depth of excavation can be considered more than the results of numerical analysis. Adding suitable chemical compounds to the soil of the project site, to stabilize the excavation wall, can be considered as a new method (compared to other methods such as nailing, anchorage, retaining wall, etc.).

KEYWORDS:

Excavation, Stability, Mechanical properties, Chemical properties, Cementation.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

تاریخ آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲

۱- مقدمه

کمک کند. همچنین با تغییر در میزان pH خاک می‌توان میزان تاثیرگذاری روش الکترواسموزیس را بر روند کسب مقاومت خاک افزایش داد.

اوزکان و همکاران [۶] تحقیقات خود را بر کانی کائولینیت و با تزریق فسفات و آلومینیوم به آن انجام دادند که منجر به افزایش ۵ تا ۶ برابری مقاومت برشی خاک نسبت به میزان اولیه شد. آلساوابکه و شیهان [۷] با تزریق فسفریک اسید در خاکی با کانی ایلیت به این نتیجه رسیدند که می‌توان مقاومت برشی خاک را به میزان ۱۶۰٪ میزان اولیه افزایش داد. آساوادرجا و گلاو [۳] نتیجه گرفتند که مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک، بدلیل سمناسیون بین‌ذره‌ای ذرات، که به واسطه تزریق الکتروشیمیایی فسفات در میدان الکتریکی آن ایجاد شده‌است، افزایش خواهد یافت. آتسوک و همکاران [۸] نیز آزمایشات خود را با تزریق یون منیزیم به خاکی با کانی کائولینیت ادامه دادند و نتیجه گرفتند که مقاومت برشی در این آزمایش تا میزان ۳۰۰ kPa در نزدیکی کاند افزایش یافته‌است.

گوتام و همکاران [۹] با انجام یک مطالعه موردی بر روی خاک‌های متورم شونده و تلاش برای پایدارسازی آن‌ها با تزریق مواد یونی در آزمایشگاه و مقایسه آن با نتایج کارگاهی بدست آمده، به این نتیجه رسیدند که استفاده از مواد پایدارساز یونی بر حدود اثربرگ و قابلیت تورم خاک تاثیرگذار است به طوری که با استفاده از این روش قابلیت تورم و فشار تورمی خاک کاهش پیدا می‌کند. ایکسیو و همکاران [۱۰] با مطالعه بر مکانیسم روش الکترواسموزیس در بهسازی خاک‌های رسی، دریافتند که افزایش مقاومت برشی که از آند به سمت کاتد (بعد از تزریق و بهسازی خاک) رخ می‌دهد با کاهش میزان آب در این نواحی همراه است که دلیل آن فرایند شیمیایی سمته شدن خاک در نزدیکی کاتد و مصرف آب موجود در خاک است. اوپو و همکاران [۱۱] پس از تحقیق در مورد تاثیر تزریق آب دیونیزه شده به خاک جهت بهبود شیمیایی خاک با استفاده از روش الکترواسموزیس به این نتیجه رسیدند که تزریق آب دیونیزه شده کلیدی برای سرعت بخشیدن به حرکت یون‌ها در نواحی بین آند و کاتد است به طوری که در نهایت منجر به افزایش مقاومت رس می‌شود. اوپو [۱۲] در تحقیقی که بر روی رس با کانی کائولینیت انجام داد، روشی جدید در روند انجام بهسازی الکترواسموزیس پیشنهاد کرد که با زمان‌بندی برای تزریق مواد ذکر شده در بالا، می‌توان علاوه بر نواحی نزدیک به آند و کاتد، تمامی نواحی مابین آن‌ها را نیز تحت تاثیر قرار داده و مقاومتشان را افزایش داد.

خراد و همکاران [۱۳] در مطالعه ای بر روی نمونه ای از یک خاک با خاصیت متورم شونده‌گی بالا، از روش الکترواسموزیس در ولتاژهای متفاوت و در دوره های زمانی مختلف، استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که در اطراف الکترود آند، خاصیت تورم خاک تا ۸۳٪ و همچنین میزان pH خاک تا ۲/۸ کاهش می‌یابد. همچنین در این ناحیه میزان مقاومت فشاری محصورنشده در خاک در بهترین نمونه تا ۸ برابر افزایش داشته‌است. ژانگ و همکاران [۱۴] نیز با استفاده همزمان از روش الکترواسموزیس و پیش بارگذاری خلا (Vacuum

در سال‌های اخیر با افزایش تراکم و تعداد طبقات و نیاز به تأمین پارکینگ و سایر سطوح خدماتی در ساختمان‌ها به ویژه در مناطق مرکزی شهری، عمق گودبرداری‌ها نیز بیشتر شده‌است که اهمیتی بیش از پیش برای گودها پیدا کرده‌است. بنابراین نیازمند شناخت گسترده‌تری از خاک و رفتار آن در شرایط مختلف هستیم. وقتی که اندازه‌ی ذره‌ای به $1-2 \mu m$ و یا حتی کوچک‌تر کاهش می‌یابد، نیروهای صفحه‌ای تأثیر متفاوتی بر رفتار ذرات می‌گذارد و مطالعه‌ی رفتار ذرات از نظر پیوندهای کلوئیدی و صفحات شیمیایی ضروری است. بیشتر ذرات رسی رفتاری مانند کلوئیدها دارند که دلیل آن کوچک بودن اندازه‌ی ذراتشان و نیروهای الکتریکی صفحه‌ای و در نتیجه جایگزینی ایزومورفوس در ساختار آن‌هاست [۱].

در این راستا، پژوهشگران آزمایشات زیادی بر روی انواع مختلف خاک‌ها انجام داده‌اند و نتایج قابل توجهی حاصل شده‌است. میشل [۱]، هیل دیگارد و همکاران [۲] و آساوادرجا و گلاو [۳] در نتایج خود متوجه شدند که افزایش مقاومت برشی خاک، مربوط به شرایط اسیدی و قلیایی، به ترتیب نزدیک به آند و کاتد می‌باشد که با تزریق مواد شیمیایی در طول آزمایش الکترواسموزیس در خاک، تغییر یافته‌است و باعث شرایط سمته شدن یا نشدن ذرات خاک در نزدیکی آند یا کاتد می‌شوند. این شرایط (سمته شدن) در حالت قلیایی بیشتر از حالت اسیدی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نزدیکی کاتد مقاومت برشی خاک افزایش بیشتری خواهد یافت [۴]. شکل (۱) ستون‌های خاک را نشان می‌دهد که توسط سمناسیون شیمیایی بهسازی شده‌است.

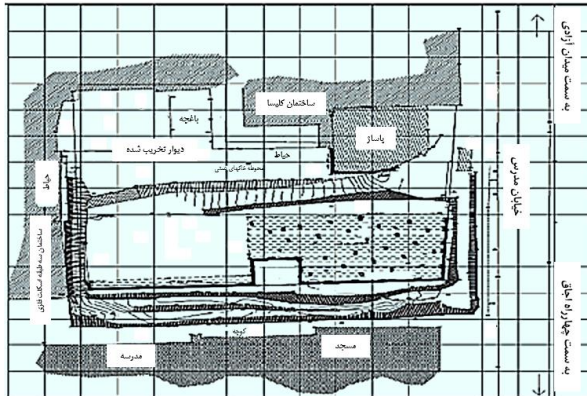


شکل (۱): ستون خاکی که با استفاده از سمناسیون بهسازی شده [۴]
لین و همکاران [۵] توانستند با تزریق $CaCl_2$ و Na_2SiO_3 به نمونه‌ای از رس کائولینیت، میزان کمتر افزایش مقاومت در نزدیکی آند نسبت به کاتد را، که بدلیل تاثیر pH در اسیدی و بازی بودن این نواحی است، بهبود بخشند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش میزان Na_2SiO_3 ، با توجه به تاثیر ژل سیلیسی بوجود آمده در نواحی اسیدی خاک و بویژه در نزدیکی آند، می‌تواند به افزایش مقاومت در این ناحیه

هستند که برای حمل نخاله‌های حاصل از گودبرداری و ساخت‌وساز، رفت‌وآمد داشته و دارند. سطح آب زیرزمینی در فصل تابستان ۱۰ m زیر فونداسیون طرح گزارش شده است ولی در طرفی که دیواره‌ی مورد مطالعه قرار دارد، مشکل نشت آب از سیستم آب‌فواصل همسایه گزارش شده است که مشکلی در پایداری دیواره به وجود نیآورده است و به همین دلیل خاک به صورت اشباع در نظر گرفته شده است.

۲-۲- موقعیت جغرافیایی

نقشه‌ی هوایی محل در شکل (۲) آورده شده است.



شکل (۲): نقشه هوایی محل گودبرداری [۱۸]

۲-۳- مشخصات لایه‌های خاک

لایه‌بندی خاک به صورت نمایش داده شده در شکل (۳) می‌باشد که جزئیات هر کدام از لایه‌ها در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول (۱): مشخصات ژئوتکنیکی هر لایه با توجه به آزمایشات برجا [۱۸]

عمق هر لایه (m)	نام لایه‌ها	Nu	Φ	C (kPa)	E (MPa)
۰ ~ ۴	L1	۰/۳۵	۳۰	۵۰	۲۵۰
۴ ~ ۶	L2	۰/۳۵	۱۰	۱۵۰	۳۰۰
۶ ~ ۱۲	L3	۰/۳۵	۳۲	۸۰	۴۲۰
۱۲ ~ ۱۶	L4	۰/۳۵	۱۰	۲۰۰	۲۵۰
۱۶ ~ ۲۲	L5	۰/۳۵	۳۳	۹۰	۴۰۰

در یک نمونه خاک تلاش کردند تا کارایی تحکیم در خاک را بهبود بخشیده و از تفاوت در نشستهای خاکی بکاهد. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده همزمان از این دو روش می‌تواند میزان آب بیشتری از لایه‌های خاک خارج کرده و تحکیم بیشتری را به دنبال داشته باشد و همچنین مقاومت برشی و ظرفیت باربری رس‌های دریایی را نیز بهبود بخشد. ژانگ و همکاران [۱۵] به بررسی تاثیر شرایط آند در استفاده همزمان تحکیم الکترواسموزیس با روش پیش بارگذاری خلا پرداختند. نتیجه این مطالعه نشان داد که تزریق محلول $CaCl_2$ از الکتروود آند تاثیر کمی بر روند خروج آب دارد اگرچه ظرفیت باربری را به صورت چشمگیری افزایش می‌دهد.

در سال‌های اخیر در ایران نیز محققان در زمینه تاثیر مواد افزودنی شیمیایی به خاک و بررسی تاثیر آن‌ها در رفتار خاک مطالعات زیادی انجام داده‌اند. احمدی [۱۶] با بررسی اثر مواد پوزولانی (نانو سیلیس و نانو اکسید آلومینیوم) در نشست یک بعدی خاک‌های ماسه‌ای یکنواخت سیمانی شده به این نتیجه رسید که افزودن این مواد سبب افزایش بخش سخت خمیر شده و به‌طور موثری سختی محصورشده خاک را افزایش دهد. وکیلی و همکاران [۱۷] نیز با ارزیابی تاثیر افزودنی‌های نانوسیلیس بر خصوصیات خاک‌های دارای خاصیت تورمی به این نتیجه دست یافتند که بهسازی خاک با این مواد ضمن کاهش تورم اولیه، موجب افزایش مقاومت خاک‌های بهسازی شده نسبت به خاک اولیه خواهد شد.

در این مقاله به بررسی پایداری گودبرداری انجام‌شده در خیابان مدرس کرمانشاه از دو جنبه‌ی شیمیایی و فیزیکی پرداخته شده است. هدف از انجام این تحقیق، شناخت رفتار شیمیایی خاک در پایداری گود ۲۲ متری و بدون نگه دارنده بوده است. با توجه به عمق زیاد گودبرداری و پایدار ماندن آن طی چندین سال که تحت بارهای ترافیکی و دینامیکی مختلفی قرار گرفته است، دانه‌بندی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌تواند معیار خوبی برای خاکریزهایی با شیب تند باشد.

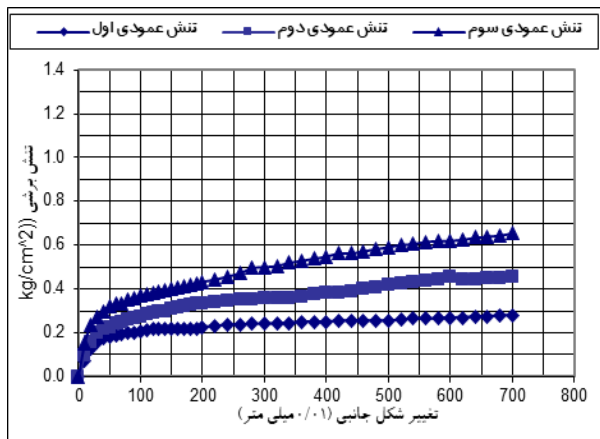
۲-۴- شناسایی محل و مشخصات ژئوتکنیکی

در این بخش، توضیحاتی در مورد شناسایی محل و اطلاعات ژئوتکنیکی خاک به همراه نتایج آزمایش‌هایی که برای شناخت بیشتر خصوصیات شیمیایی خاک انجام شده، ارائه شده است.

۲-۱- ابعاد گود

گودبرداری در پروژه‌ی مجتمع اداری-تجاری فیروزه‌ی غرب، واقع در خیابان مدرس شهرستان کرمانشاه انجام شده است که دارای ابعاد مشخصاتی به شرح زیر است:

طول و عرض گود به ترتیب ۱۱۰ m و ۶۵ m؛ عمق گودبرداری در حدود ۲۲ m؛ مدت زمان پایداری گود تقریباً ۱۰ سال است که به‌صورت شیب قائم گودبرداری شده است و در حدود یک سال در حالت قائم و بدون محافظ پایدار مانده است و سنگین‌ترین بار عبوری، با توجه به شرایط کارگاهی و وسعت پروژه، تراکم‌میکسرها‌ی ۳۰ تنی



شکل (۵): نمودار تنش- کرنش برشی حاصل از آزمایش برش بزرگ مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش به ترتیب زیر اندازه گیری شدند:

$$C' = 0.06 \text{ Kg/cm}^2 = 6 \text{ KN/m}^2$$

$$\Phi' = 33^\circ$$

با توجه به مقادیر چسبندگی و زاویه ی اصطکاک و مقادیر موجود در جدول ۱ که توسط مشاور ارائه شده است، به نظر می رسد که علت کم بودن مقدار چسبندگی حاصل از آزمایشگاه، از بین رفتن اثر سمناسیون شیمیایی در نمونه گیری و حمل آن به آزمایشگاه بوده است.

۲-۵- ترکیبات شیمیایی

مقدار pH به دلیل تاثیری که بر بار سطح ذره رس می گذارد، بر دفع بین ذره ای موثر است. لبه های (خارجی ترین لایه) با بار مثبت، می-توانند در محیط های با pH پایین ایجاد شوند. این موضوع تاثیر زیادی بر کاتولینیت و تاثیر کمتری بر ایلینیت دارد و در اسمکتیت^۱ نسبتاً بی تاثیر است. در کاتولینیت مقدار pH، که می تواند عددی تک رقمی - باشد، مهم ترین عامل کنترل کننده در بافت مواد ته نشین شده از سوسپانسیون^۲ است [۱]. pH اندازه گیری شده در نمونه ها ۹/۳ می باشد که بیانگر محیطی بازی است. قابل ذکر است که محیط اسیدی، هوازگی را تسریع می بخشد [۱۹]. بنابراین می توان نتیجه گرفت به دلیل بازی بودن شدید این خاک، هوازگی تاثیر کمی بر آن داشته است.

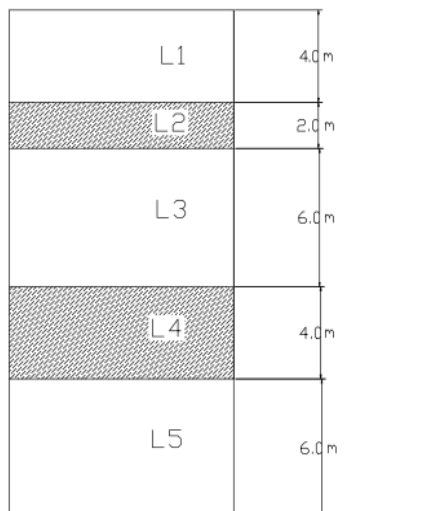
۲-۶- آزمایش XRD^۳

آزمایش طیف سنجی اشعه ایکس (XRD) به منظور بررسی رفتار ریزساختاری نمونه ها انجام می شود. طیف های اشعه ایکس می توانند تغییرات ترکیبات شیمیایی را بوضوح نشان دهند. از این آزمایش برای مطالعه و شناسایی کانی و کریستالوگرافی استفاده می شود که می تواند ترکیب هر عنصر در

۱ - Smectite

۲ - Suspension

3 - X-Ray Diffraction



شکل (۳): لایه بندی خاک دیواره [۱۸]

۲-۴- چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک

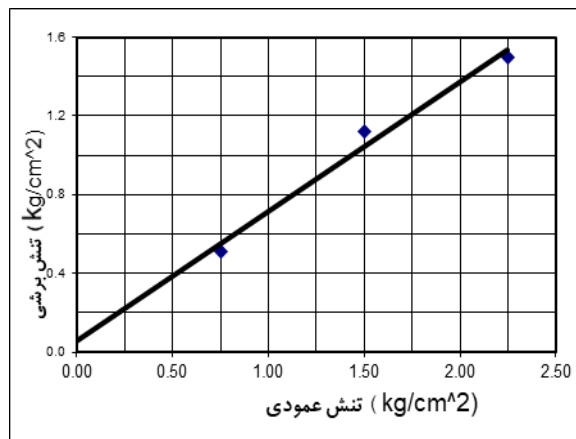
چند نمونه از عمق ۲۲ متری تهیه شده و آزمایش برش مستقیم بر روی آن ها انجام گردید که مراحل انجام آزمایش و نتایج حاصله به شرح زیر است:

با توجه به دانه بندی خاک مورد نظر و وجود درشت دانه در آن، از آزمایش برش بزرگ، برای اندازه گیری چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه استفاده شده است.

پس از اعمال سه تنش عمودی که مقادیر آن ها در جدول (۲) آمده است، نتایج تنش های برشی متناسب با هریک و سپس میزان تغییر شکل جانبی متناسب با هر تنش برشی نیز اندازه گیری شد، که نتایج نهایی در نمودارهای شکل های (۴) و (۵) آورده شده است.

جدول (۲): تنش های اعمالی در هر مرحله از آزمایش

تنش عمودی اول (kg/cm ²)	تنش عمودی دوم (kg/cm ²)	تنش عمودی سوم (kg/cm ²)
۰/۷۵	۱/۵۰	۲/۲۵



شکل (۴): نمودار تنش عمودی-تنش برشی

فاصله‌ی صفحه‌ی با شاخص میلر (۰۰۱) برای هر گروه کانی رسی مشخص است. صفحات اساسی معمولاً شدیدترین انعکاس را در میان صفحات کریستال‌ها به دلیل چینش نزدیک اتم‌ها در این لایه‌ها دارند. کانی‌های غیررسی معمول که در خاک‌ها وجود دارند نیز با انعکاس اشعه‌ی X قابل شناسایی می‌باشند.

با انجام آزمایش XRD وجود ترکیباتی چون اکسید آهن دو ظرفیتی و اکسید آلومینیوم دو ظرفیتی در نمونه‌ی خاک تایید شد. پس از اطمینان از حضور این ترکیبات شیمیایی در نمونه خاک، مقدار دقیق این ترکیبات و نیز ترکیبات دیگر موجود در خاک با انجام آزمایش‌های شیمیایی بر روی نمونه خاک، اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است. قابل ذکر است که اکسیدهای آهن و آلومینیوم دو ظرفیتی و همچنین اکسید سیلیسیوم، با درصدهای بالا، مهمترین ترکیبات شیمیایی موجود در نمونه‌ی خاک هستند.

جدول (۳): ترکیبات شیمیایی موجود در گود خیابان مدرس

نام ترکیب شیمیایی	درصد (جرمی) موجود در نمونه
گچ برحسب SO_4 ($CaSO_4$)	۰/۳۸
گچ برحسب SO_3 ($CaSO_3$)	۰/۲۲
کربن دی اکسید CO_2 << درصد حجمی >>	۶/۳
سیلیسیوم اکسید (SiO_2)	۳۷/۶۷
اکسیدهای آلومینیوم و آهن آهن اکسید (Fe_2O_3)	۲۶/۵۵ ۱۶/۹۰
آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)	۹/۶۵
کلسیم اکسید (CaO)	۷/۰
منیزیم اکسید (MgO)	۰/۴

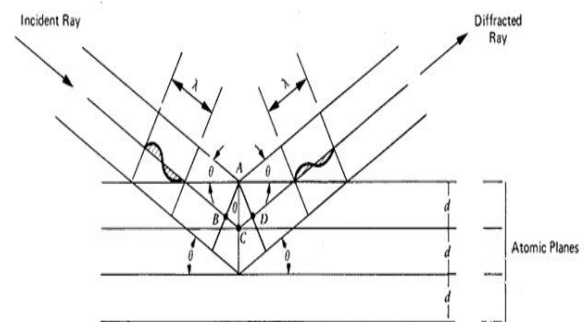
با توجه به ترکیبات خاک و درصدهای هر کدام از آنها، کانی خاک از دسته مونت موریلونیت و از زیردسته نان ترونیت است که به استناد به تحقیقات انجام شده بر روی انواع خاک‌ها که در مرجع [۱] آمده است، این نوع خاک در طبقه‌ی "به ندرت یا Rare" قرار می‌گیرد.

۳- تحلیل عددی

برای انجام تحلیل‌های عددی در این پژوهش، از نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis-version 8.5 در حالت دوبعدی استفاده شد. در تحلیل با این نرم‌افزار از المان‌های کرنش مسطح ۱۵ گرهی استفاده شده است. در شکل (۷) مدل ساخته شده برای گود، ابعاد گود، لایه‌های ۲ متری خاکبرداری در نظر گرفته شده و همچنین محل بار وارده از طرف ساختمان مجاور گود قابل مشاهده است.

یک ماده را تعیین کند. آزمایش XRF آنالیز عنصری انجام می‌دهد و تنها می‌تواند تشخیص دهد چه درصدی از عناصر در ماده موجود است (بدون آن که بتواند ترکیب ماده را تشخیص دهد).

در این تحقیق، آزمایش XRD بر روی نمونه خاکی انجام شده است تا نوع کانی رس مشخص گردد. از آنجا که طول موج‌های در حدود ۱ A برابر همان فاصله صفحات اتمی در مواد کریستالی است، از اشعه‌ی X می‌توان برای آنالیز ساختارهای کریستالی استفاده کرد. هنگامی که اشعه‌ی X به یک کریستال اصابت می‌کند، موجب نفوذ اشعه تا چندین میلیون لایه می‌شود. در هر لایه‌ی اتمی، بخشی از پرتو توسط اتم‌ها جذب می‌شود، سپس اتم‌ها به صورت دو قطبی نوسان خواهند کرد و امواج را در تمام جهات ساطع می‌کنند. امواج تابشی در جهات معینی هم‌فاز خواهند بود و می‌توانند به شیوه‌ی ساده به صورت موج حاصل از انعکاس پرتو تابش تفسیر شوند. تابش‌های هم‌فاز به صورت یک پرتو منسجم ظاهر می‌شوند که می‌توانند بر روی یک فیلم یا یک دستگاه شمارش تابش شناسایی شوند. جهت لایه‌های اتمی موازی، به جهت پرتو تابشی بستگی دارد، که در آن تابش‌ها بسته به طول موج اشعه‌ی X و فاصله‌ی بین لایه‌های اتمی، هم‌فاز هستند. شکل ۶ برخورد پرتو موازی اشعه‌ی X با طول موج λ به یک کریستال در زاویه‌ی θ با لایه‌های اتمی موازی که به اندازه‌ی d از هم فاصله دارند را نشان می‌دهد. اگر موج انعکاس یافته از C، موج انعکاس یافته از A را تقویت کند، اختلاف طول مسیر بین دو موج باید مضرب صحیحی از طول موج‌های $n\lambda$ باشد.



شکل (۶): برخورد پرتو موازی اشعه X به کریستال با لایه اتمی موازی

موازی

رابطه‌ی زیر برای طول موج های $n\lambda$ برقرار است.

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

رابطه ۱

رابطه‌ی (۱) همان قانون براگ^۱ است. این قانون مبنایی برای شناسایی کریستال‌ها با استفاده از قانون اشعه‌ی X است. از آنجا که هیچ دو کانی فاصله‌ی یکسان لایه‌های بین اتمی در سه بعد ندارند، زوایایی که در آن انعکاس اتفاق می‌افتد و فاصله‌ی اتمی که محاسبه شده است، می‌تواند برای شناسایی کانی به کار رود. انعکاس اشعه‌ی X به ویژه برای شناسایی کانی‌های رسی بسیار مناسب می‌باشد، به این دلیل که

1 - Bragg's Law

که در این رابطه q_c مقدار مقاومت مخروط، σ^2 تنش موثر خاک بر حسب kPa و S پارامتر بدون بعدی است که از جدول (۴) به دست می‌آید.

جدول (۴): مقادیر پارامتر S برای خاک‌های مختلف [۲۰]

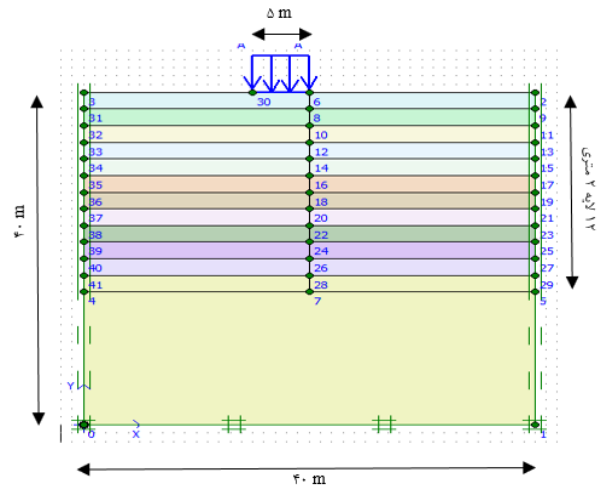
FAQ/USDA Texture class	Θ_{sat} (Kg. kg-1)	α (h.pa- 1)	N	S
Cl	۰/۳۹۵	۰/۰۲۱۷	۱/۱۰۳	۰/۰۲۹۶
sa cl	۰/۳۳۵	۰/۰۶۱۶	۱/۱۳۹	۰/۰۳۱۷
si cl	۰/۳۶۲	۰/۰۲۲۰	۱/۱۰۴	۰/۰۲۷۳
cl l	۰/۳۲۴	۰/۰۴۰۰	۱/۱۲۷	۰/۰۲۸۵
si cl l	۰/۳۲۵	۰/۰۲۲۶	۱/۱۲۹	۰/۰۲۹۰
sa cl l	۰/۳۹۹	۰/۰۷۲۷	۱/۱۶۹	۰/۰۳۲۶
L	۰/۲۷۸	۰/۰۳۱۴	۱/۲۰۸	۰/۰۳۵۴
si l	۰/۲۶۹	۰/۰۱۳۴	۱/۲۴۵	۰/۰۳۸۵
si	۰/۲۴۳	۰/۰۰۴۵	۱/۳۹۲	۰/۰۴۸۵
sa l	۰/۲۵۸	۰/۰۴۰۰	۱/۲۷۸	۰/۰۴۰۵
l sa	۰/۲۳۹	۰/۰۵۳۴	۱/۴۰۶	۰/۰۴۸۸
sa	۰/۲۲۶	۰/۰۶۷۱	۱/۵۸۱	۰/۰۵۹۴

در جدول بالا، n پارامتر بدون بعدی است که برای تعیین شکل منحنی استفاده می‌شود. α مکش خاک است و Θ_{sat} نشان دهنده‌ی میزان آب در حالت اشباع است. همانطور که از این جدول قابل مشاهده است، مقدار S برای نمونه‌ی خاک مورد نظر، تقریباً ۰/۰۳ است. برای به دست آوردن رابطه‌ی بین مدول الاستیسیته و عمق، رابطه‌های زیر برای خاک ماسه-رسی در نظر گرفته شده‌اند:

$$E = \alpha q_c \quad \alpha = 3.8 \text{ to } 5.7 \quad \text{رابطه ۳}$$

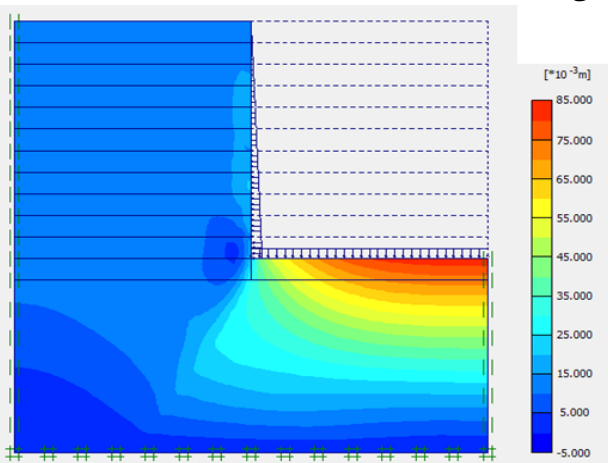
$$E = 5/3 (q_c + 1600) \quad PI < 15\% \quad \text{رابطه ۴}$$

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات، مقدار PI مربوط به نمونه‌ی خاک، بیشتر از حد مجاز در رابطه‌ی دوم بوده و این شرط را ارضا نمی‌کند. بنابراین از رابطه‌ی (۳) برای تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به ارتفاع استفاده شد که بدین منظور، مقدار α نیز میانگین دو عدد ذکر شده در بالا، یعنی ۴/۷۵ در نظر گرفته شده است [۲۱]. مطابق با موارد فوق، مقدار افزایش E در هر لایه در جدول (۵) آورده شده است:



شکل (۷): ایجاد لایه های ۲ متری و بارگذاری در مدل Plaxis

در این مدل‌سازی، گود در حالت اشباع در نظر گرفته شده و حفاری آن، به صورت مرحله‌ای و در لایه‌های دو متری انجام شده است. مشخصات مربوط به هر لایه‌ی خاک به صورت جداگانه و در لایه‌های دومتری به خاک اختصاص داده شد که در ادامه چگونگی تغییرات پارامترها در عمق و نحوه‌ی تعریف آن‌ها به نرم‌افزار شرح داده شده است. بار وارده از طرف ساختمانی یک طبقه که در مجاورت گود قرار داشت، 700 kg/m^2 در نظر گرفته شده است (لازم به ذکر است که قسمت حیاط این ساختمان بالای گودبرداری واقع شده است). شکل (۸) تغییر شکل حاصل از تحلیل عددی برای حفاری ۲۲ m در گود مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل (۸): ۲۲ متر حفاری در ۱۱ گام ۲ متری در نرم افزار Plaxis

مشاهده می‌شود که میزان تغییر شکل‌ها در خاک بسیار ناچیز است. به منظور اعمال تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به عمق گودبرداری، از رابطه زیر [۲۰] استفاده می‌شود:

$$q_c = 328 + 37.39 (1/S) + 1.615\sigma^2 \quad \text{رابطه ۲}$$

جدول (۶): تعیین پارامترهای A، B، C و D برای خاک‌های

	مختلف [۲۲]				Standard Deviation (deg)
	Parameter Values in Degrees				
	A	B	C	D	
Gravel and cobbles with Cu>4	۴۴	۱۰	۷	۲	۳/۱
Sand with Cu>6	۳۹	۱۰	۳	۲	۳/۲
Sand with Cu<6	۳۴	۱۰	۳	۲	۳/۲

مقادیر هر کدام از این پارامترها برای نمونه‌ی مورد مطالعه به صورت جدول (۷) است.

جدول (۷): انتخاب پارامترهای A، B، C و D برای نمونه‌ی خاک

در گودبرداری خیابان مدرس				
D	C	B	A	پارامتر
۲	۳	۱۰	۳۹	مقدار

همچنین برای محاسبه‌ی دانسیته‌ی نسبی (Dr) از رابطه‌ی زیر استفاده شده است [۱۸]:

$$D_r = \left(\frac{\gamma_{d_{max}}}{\gamma} \right) \frac{\gamma_d - \gamma_{d_{min}}}{\gamma_{d_{max}} - \gamma_{d_{min}}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن:

$\gamma_{d_{max}}$ بیشینه وزن مخصوص ذرات خشک خاک

γ_d وزن مخصوص ذرات خشک خاک

$\gamma_{d_{min}}$ کمینه وزن مخصوص ذرات خشک خاک و

γ وزن مخصوص ذرات خاک در حالت طبیعی است.

پس از انجام محاسبات، مقدار دانسیته‌ی نسبی ۲۹/۳۵٪ بدست آمد. با استفاده از رابطه‌ی ۶، مقدار تغییرات زاویه‌ی اصطکاک در عمق خاک نیز محاسبه شد که نتایج نهایی آن در جدول (۸) آمده است:

جدول (۵): تغییرات مدول الاستیسیته در عمق

Depth	σ'_h $\gamma' =$	qc	ΔE	E (kPa)
۰-۲	۱۱	۱۶۳۵/۰۷	۷۷۶۶/۶	۳۵۷۷۶۶
۲-۴	۳۳	۱۶۷۰/۰۶	۷۹۳۵/۴	۳۵۷۹۳۵
۴-۶	۵۵	۱۷۰۶/۱۳	۸۱۰۴/۱	۳۰۸۱۰۴
۶-۸	۷۷	۱۷۴۱/۶۶	۸۲۷۲/۹	۴۲۸۲۷۲
۸-۱۰	۹۹	۱۷۷۷/۱۹	۸۴۴۱/۷	۴۲۸۴۴۱
۱۰-۱۲	۱۲۱	۱۸۱۲/۷۲	۸۶۱۰/۴	۴۲۸۶۱۰
۱۲-۱۴	۱۴۳	۱۸۴۸/۲۵	۸۷۷۹/۲	۳۵۸۷۷۹
۱۴-۱۶	۱۶۵	۱۸۸۳/۷۸	۸۹۴۷/۹	۳۵۸۹۴۷
۱۶-۱۸	۱۸۷	۱۹۱۹/۳۱	۹۱۱۶/۷	۴۰۹۱۱۶
۱۸-۲۰	۲۰۹	۱۹۵۴/۸۴	۹۲۸۵/۵	۴۰۹۲۸۵
۲۰-۲۲	۲۳۱	۱۹۹۰/۳۷	۹۴۵۴/۲	۴۰۹۴۵۴
۲۲-۲۴	۲۵۳	۲۰۲۵/۹	۹۶۲۳/۱	۴۰۹۶۲۳

پس از انجام این محاسبات، مشخصات خاک متناسب با هر لایه در برنامه Plaxis وارد شد و برای چسبندگی‌های مختلف در هر مرحله تحلیل‌های مربوطه انجام گرفت.

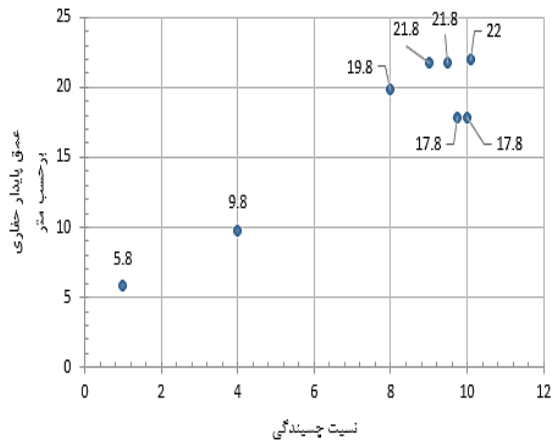
همچنین برای در نظر گرفتن کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک نسبت به عمق، از رابطه‌ی دانکن و رایت [۲۲] استفاده شده است که این رابطه به صورت زیر است:

$$\Phi' = A + B(Dr) - [C + D(Dr)^0] \log_{10}(\sigma'/P) \quad \text{رابطه ۵}$$

که σ' تنش موثر در خاک و Dr دانسیته نسبی ذرات خاک است. معمولاً خاک‌های خوب دانه‌بندی شده زاویه‌ی اصطکاک بیشتری نسبت به خاک‌های با دانه‌بندی یکنواخت دارند. این تغییرات در پارامتر A دیده شده است که از ۴۴ درجه برای شن و ذرات درشت‌تر تا ۳۹ درجه برای ماسه‌ی خوب دانه بندی شده و همچنین ۳۴ درجه برای ماسه با دانه‌بندی یکنواخت متغیر است. همان‌طور که می‌دانیم، زاویه‌ی اصطکاک با افزایش دانسیته افزایش می‌یابد. این ویژگی در پارامتر B منعکس شده است که بیانگر تغییر ۱۰ درجه‌ای در مقدار Φ' به ازای تغییرات دانسیته‌ی نسبی از ۰ تا ۱۰۰ است.

تأثیر کاهش زاویه اصطکاک در پارامترهای C و D منعکس می‌شود. P بیانگر فشار جو است که در این پژوهش معادل ۱ atm در نظر گرفته شده است [۲۲]. برای استفاده از این رابطه، مقادیر پارامترهای A، B، C و D از جدول (۶) استخراج می‌شود:

چسبندگی خاک، در نسبت‌های مقادیر برجا به آزمایشگاهی است و اعداد نشان داده شده در این شکل عمق‌هایی هستند که می‌توان گودبرداری پایدار انجام داد. این تغییرات در جدول ۱۰ آمده است. نتایج تحلیل عددی در شکل ۸ قابل مشاهده است که مقادیر عددی آن در جدول ۱۱ آمده است.



شکل (۹): تغییرات عمق پایداری در مقابل نسبت چسبندگی

جدول (۱۰): تغییرات عمق پایداری و چسبندگی خاک

عمق پایداری گود	نسبت مقدار چسبندگی به مقدار اولیه
تا ۶ متری	۱
تا ۱۰ متری	۴
تا ۲۰ متری	۸
تا ۲۲ متری	۹
تا ۲۲ متری	۹/۵
تا ۱۸ متری	۹/۷۵
تا ۱۸ متری	۱۰
پایدار تا انتهای ۲۲ متر حفاری	۱۰/۱

با توجه به جدول (۱۰) و شکل (۹)، علت کاهش در نسبت‌های ۹/۷۵ و ۱۰ افزایش مقدار پلاستیسیته می‌باشد که با افزایش این نسبت و رسیدن به مقدار ۱۰/۱، این محدوده وسیع‌تر شده و موجبات پایداری دیوار گود را فراهم می‌آورد. مقدار جایابی نهایی دیواره گود در جدول (۱۱) قابل مشاهده است.

جدول (۸): تغییرات زاویه اصطکاک در عمق هر لایه خاکی

لایه‌ها	تنش نرمال موثر بر حسب KN/m ²	کاهش زاویه اصطکاک موثر*	زاویه اصطکاک موثر
۰-۲	۱۱	۰	۳۰
۲-۴	۳۳	-۲	۲۸
۴-۶	۵۵	-۳	۷
۶-۸	۷۷	-۴	۲۸
۸-۱۰	۹۹	-۴	۲۸
۱۰-۱۲	۱۲۱	-۴	۲۸
۱۲-۱۴	۱۴۳	-۵	۵
۱۴-۱۶	۱۶۵	-۵	۵
۱۶-۱۸	۱۸۷	-۵	۲۸
۱۸-۲۰	۲۰۹	-۵	۲۸
۲۰-۲۲	۲۳۱	-۵	۲۸

*اعداد این ستون گرد شده‌اند

برای مدلسازی گودی ۲۲ متری در نرم افزار Plaxis، ابتدا مدلی با ابعاد 40m*40m تعریف شد. شرایط مرزی بدین صورت در نظر گرفته شد که مرزهای کناری در جهت X و مرز پایین گود در هر دو جهت X و Y گیردار شدند. دیواره ۲۲ متری گود به ۱۱ قسمت با عمق‌های ۲ متری تقسیم شد و عملیات حفاری به صورت مرحله ای انجام گردید (شکل ۷).

با توجه به تغییر پارامترهای مقاومتی خاک نسبت به عمق، تغییرات زاویه ی اصطکاک و مدول الاستیسیته در جدول ۹ آمده است.

جدول (۹): پارامترهای فیزیکی خاک در هر عمق از خاک

عمق (m)	E (kPa)	زاویه اصطکاک موثر (درجه)
۰-۲	۳۵۷۷۶۶	۳۰
۲-۴	۳۵۷۹۳۵	۲۸
۴-۶	۳۰۸۱۰۴	۷
۶-۸	۴۲۸۲۷۲	۲۸
۸-۱۰	۴۲۸۴۴۱	۲۸
۱۰-۱۲	۴۲۸۶۱۰	۲۸
۱۲-۱۴	۳۵۸۷۷۹	۵
۱۴-۱۶	۳۵۸۹۴۷	۵
۱۶-۱۸	۴۰۹۱۱۶	۲۸
۱۸-۲۰	۴۰۹۲۸۵	۲۸
۲۰-۲۲	۴۰۹۴۵۴	۲۸
۲۲-۲۴	۴۰۹۶۲۳	۲۸

شکل (۹) نشان‌دهنده تحلیل‌های انجام شده در مقادیر مختلف

جدول (۱۱): تغییر مکان دیواره گود (از پایین به بالای گود)

X [m]	Y [m]	U [mm]
20	18	22.001
20	19	17.926
20	20	12.463
20	21	20.720
20	22	16.351
20	23	18.330
20	24	16.760
20	25	21.731
20	26	16.175
20	27	19.104
20	28	14.283
20	29	17.684
20	30	15.380
20	31	17.031
20	32	16.461
20	33	15.906
20	34	15.441
20	35	15.043
20	36	14.654
20	37	14.324
20	38	14.053
20	39	13.820
20	40	13.605

۴- نتایج

تحلیلهای عددی نشان دادند که گودی با مشخصات داده شده در این مقاله تنها می تواند به ارتفاع ۱۶ m پایدار بماند در حالی که این گود در عمل به عمق ۲۲ m پایدار مانده است. هدف آن است تا علت این تفاوت بررسی و تعیین شود. با بررسی های انجام شده مشخص گردید که ترکیبات شیمیایی درون خاک موجب شده است تا ارتفاع گود بیش از مقادیر حاصل از تحلیل های عددی باشد، چرا که با نمونه گیری از محل و انتقال آن به آزمایشگاه و انجام آزمایشهای فیزیکی بر آنها، تاثیر رفتار شیمیایی خاک حذف می گردد. اما در آزمایشهای برجای محلی، تاثیر رفتار شیمیایی آشکار می شود. از تاثیر ترکیبات شیمیایی می توان به عنوان نکه دارندهای مطمئن، کم هزینه و البته قابل اجرا در محیط- های بسته فضای شهری یاد کرد. نتایج به دست آمده از این پژوهش به ترتیب زیر قابل بیان است:

- ترکیبات شیمیایی موجود در خاک، به خصوص ترکیباتی چون اکسید آلومینیوم دوظرفیتی، اکسید آهن دوظرفیتی، اکسید

سیلیسیوم و همچنین کلسیم، می توانند به صورت چشمگیری مقاومت برشی و پایداری دیواره های گودبرداری را افزایش دهند. میزان تاثیر ترکیبات شیمیایی بر مقاومت برشی خاک، به نوع کانی غالب خاک و سایر خصوصیات شیمیایی آن بستگی داشته تا آنجا که این تاثیر برای کاتولینیت باعث افزایش مقاومت برشی خاک تا ۶ برابر می باشد.

- غالب تاثیر ترکیبات شیمیایی موجود در خاک به صورت چسبندگی نمود پیدا می کند که این عامل ناشی از اثر سمناسیون بین ذره های ایجاد شده در خاک خواهد بود. لذا این تاثیر، از نظر شیمیایی، یک طرفه و بدون بازگشت است. بدین معنی که اگر پیوند ایجاد شده ناشی از سمناسیون بین ذرات خاک شکسته شود، این پیوند دوباره شکل نگرفته و چسبندگی خاک بدون تاثیر ترکیبات شیمیایی، خودنمایی خواهد کرد.

- با توجه به ایجاد پیوند سمناسیون بین ذره های و تاثیر آن بر ریزدانه های خاکی، اسیدی یا بازی بودن محیط خاک به شدت در روند این ترکیب تاثیرگذار است که بهترین pH برای این پیوند، حدود ۱۰ می باشد؛ بدین معنی که محیط اسیدی تاثیر منفی بر این پیوند می گذارد.

- با توجه به تاثیر محیط اسیدی در افزایش سرعت هوازگی دیواره های خاکی، قلیابیت خاک را می توان به عنوان فاکتوری برای پایین بودن میزان هوازگی خاک، در مقایسه با محیط اسیدی، در نظر گرفت.

- با ادامه تحلیل به صورت مرحله ای در نرم افزار Plaxis، مشخص شد که تاثیر ترکیبات شیمیایی موجود در خاک، می تواند دیوار گود را تا عمق ۳۶ m بدون نیاز به سازه نگهبان پایدار نگه دارد.

- ترکیبات شیمیایی می توانند پارامترهای مقاومتی خاکی با مشخصات داده شده در این مقاله را تا ۱۵ برابر افزایش دهند.

- نتایج حاصل از این مقاله تنها برای خاکی با مشخصات داده شده در این مقاله معتبر است و نمی توان از آن برای تمام خاکها و گودها استفاده کرد.

۵- مراجع

[۱] J.K. Mitchell, K. Soga, Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons New York, 2005.

[۲] B.H. Hyldegaard L. M. Ottosen A. N. Alshawabkeh Transformation of tetrachloroethylene in a flow-through electrochemical reactor, Science of The Total Environment, 707(10), (2020), 135566.

[۳] P. Asavadorndej, U. Glawe, Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method, Bulletin of engineering geology and the environment, 64(3) (2005) 237.

- L. Zhang, Z. Pan, B. Wang, C. Fang, G. Chen, A. Zhou, P. Jiang, L. Wang, Experimental investigation on electro-osmotic treatment combined with vacuum preloading for marine clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 49 (6), (2021), 1495-1505. [۱۴]
- L. Zhang, L. Hu, Effect of anode condition on electro-osmotic consolidation combined with vacuum preloading, *Drying Technology*, (2021), 10.1080/07373937.2021.1885041. [۱۵]
- M. Ahmadi, Effect of pozzolanic nanomaterials on one-dimensional settlement of cemented uniform sand, *Asas*, 21(56), (2020), 19-30. [۱۶]
- H. Vakili, M. Mokhberi, Experimental investigation on the effects of nanosilica and polypropylene fiber on the geotechnical characteristics of the expansive soils under freeze-thaw cycles, (2020), *Asas*, In Press. [۱۷]
- D.K.C. Group, Geotechnical Report of Excavation in Firoozeye Gharb's Project in Kermanshah, Kermanshah, 2011. [۱۸]
- L.D. Bryant, Geotechnical problems with pyritic rock and soil, Virginia Tech, 2003. [۱۹]
- A. Dexter, E. Czyż, O. Gałę, A method for prediction of soil penetration resistance, *Soil and Tillage Research*, 93(2) (2007) 412-419. [۲۰]
- B. Das, *Advanced Soil Mechanics* Taylor and Francis Washington, (1997). [۲۱]
- J.M. Duncan, S.G. Wright, T.L. Brandon, *Soil strength and slope stability*, John Wiley & Sons, 2014. [۲۲]
- S.-C. Chien, C.-Y. Ou, Y.-C. Lee, A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement, *Applied clay science*, 50(4) (2010) 481-492. [۴]
- Y.-S. Lin, C.-Y. Ou, S.-C. Chien, Cohesive Strength Improvement Mechanism Of Kaolinite Near the Anode During Electroosmotic Chemical Treatment, *Clays and Clay Minerals*, 66(5) (2018) 438-448. [۵]
- S. Ozkan, R. Gale, R. Seals, Electrokinetic stabilization of kaolinite by injection of Al and PO₄³⁻ ions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 3(4) (1999) 135-144. [۶]
- A. Alshawabkeh, T.C. Sheahan, Soft soil stabilisation by ionic injection under electric fields, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 7(4) (2003) 177-185. [۷]
- N. Otsuki, W. Yodsudjai, T. Nishida, Feasibility study on soil improvement using electrochemical technique, *Construction and Building Materials*, 21(5) (2007) 1046-1051. [۸]
- S. Gautam, S. He, X. Yu, Stabilization of expansive soil using injection of liquid ionic soil stabilizer: A case study between field and laboratory treatment, in: *Geo-Congress 2019: Soil Improvement*, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2019, pp. 335-343. [۹]
- Z. Xue, X. Tang, Q. Yang, Z. Tian, Y. Zhang, W. Xu, Mechanism of electro-osmotic chemical for clay improvement: process analysis and clay property evolution, *Applied Clay Science*, 166 (2018) 18-26. [۱۰]
- C.-Y. Ou, C.-Y. Lin, S.-C. Chien, On the behavior of the cured electroosmotic chemical treated clay, *Acta Geotechnica*, (2020) 1-14. [۱۱]
- C.-Y. Ou, S.-C. Chien, Y.-T. Syue, C.-T. Chen, A novel electroosmotic chemical treatment for improving the clay strength throughout the entire region, *Applied Clay Science*, 153 (2018) 161-171. [۱۲]
- M. K. Kherad, A. H. Vakili, M. R. bin Selamat, M. Salimi, M. S. Farhadi & M. Dezh, An experimental evaluation of electroosmosis treatment effect on the mechanical and chemical behavior of expansive soils, *Arabian Journal of Geosciences*, 13, (2020), Article number: 260, 1-12. [۱۳]