University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 54 (2024), Issue 2, 73-83

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Metakaolin on Dispersivity Potential and Geotechnical Parameters of Dispersive Soils

Ahmadreza Soltanian, Amir Ali Zad *, Maryam Yazdi, Amin Towhidi

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 11 December 2022**; Reviewed:** 24 February 2023**; Accepted:** 12 March 2023

Keywords:
Dispersive soil, Metakaolin, Soil stabilization, Double hydrometric test, Crumb test.

1. Introduction

Nowadays, the dispersion phenomenon is one of the main concerns for industrial and civil projects in southern regions of Iran. In this phenomenon, dispersive clay soil, under special situation, is dispersed and rapidly washed away. Due to the continuous developments in industrial and mineral additives, in this study metakaolin was used for soil improving dispersive soils. Researchers have always studied the use of additives for soil improvement. However, using cheap and environmentally friendly additives, such as natural pozzolans, are more desired. Natural pozzolans, are silica and alumina-silica materials with no apparent cement property but in presence of water, they make bonds with hydrate calcium and have cement properties. By reviewing previous studies, it can be seen that using pozzolanic materials are environmentally friendly, reduces energy consumption, reduces costs, reduces permeability and increases the chemical resistance of concrete. Metakaolin is a natural pozzolan with high permeability, with 50-55% SiO2 which reacts with Ca (OH)2 in room temperature and produces the calcium silicate hydrate (CSH) gel. Kolovos et al (2013) investigated mechanical properties of a soil improved by metakaolin. In this study, the optimum mix design of cement soil and its mechanical properties are investigated and the results show improved mechanical properties of soil. Wu et al (2016) studied the effect of metakaolin and cement on MHS strength and soil structure. The results show that adding metakaolin to soil reduces its sensitivity to water and significantly increased the uniaxial compressive strength and tensile strength of soil. Wianglor et al (2017) reviewed the effects of alkaline active metakaolin on compressive strength and particle structure of the improved mortar in 23 and 60 centigrade. The results show that increasing the amount of metakaolin and the temperature results in increased compressive strength and silicate and aluminate gel is apparently seen in mortar particle structure. In recent years, the compound effect of cement and metakaolin have rarely been studied, however there is no record for using metakaolin alone for soil improvement. This study aims to investigate the effects of different metakaolin percentages on reducing the clay dispersion potential, using crumb test, hydrometry, and also reviewing its geotechnical properties, such as Atterberg limits, maximum dry density, optimum humidity percentage, uniaxial compressive strength, and its validation using SEM.

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2023.55917.2240
Online ISSN: 2717-4077
* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-5712-8246
E-mail addresses: ahmadrezasoltanian1989@gmail.com (Ahmadreza Soltanian), a.zad@iauctb.ac.ir (Amir Ali Zad), mar.yazdi@iauctb.ac.ir (Maryam Yazdi), amin.tohidi@yahoo.com (Amin Towhidi).

2. Materials and methods

The physical and mechanical properties of dispersive clay are shown in table 1. The metakaolin used in this study was provided by Jahan Poodr Delijan Company, with special weight of 2.63gr/cm3 and special surface of 9169 cm2/gr. The metakaolin chemical analysis are shown in table 2.

Table 1. Physical and mechanical characteristics of dispersive clay

Soil property	Value	Standard
Classification (USCS)	CL	ASTM_D2487
Liquid limit (%)	33	ASTM_D4318
Plastic Limit (%)	22	ASTM_D4318
Plasticity Index (%)	11	ASTM_D4318
Unconfined Compression Strength (kg/cm²)	3.36	ASTM_D2166
Maximum dry density (g/cm²)	1.75	ASTM_D698
Optimum moisture content (%)	17.21	ASTM_D698

Table 2. metakaolin chemical analysis

chemical mixture	Weight percent
SiO_2	70.46
CaO	0.68
Al_2O_3	22.48
Fe_2O_3	0.45
K_2O	2.03
Na_2O	0.62
MgO	0.24

To investigate the effect of metakaolin on the changes in soil divergence potential and also its role in improving the geotechnical properties of dispersive clay, metakaolin with different percentages of 0, 2, 4, 6, and 8 percent by weight of soil was added to dispersive clay during the testing processes. And the samples were kept for 7 days to perform the reaction. Then, crumb tests, double hydrometer, Etterberg limits, standard compaction, and unconfined compression strength were performed on different combinations of soil and metakaolin based on ASTM standards.

3. Results and discussion

3.1. Examining the changes in dispersivity potential

The rate of variation dispersion percentage is presented in Fig. 1. As can be seen, the greatest decrease in the dispersion percentage occurred for the addition of 8% metakaolin. In this case, the dispersion percentage has decreased by about 62%, which is considered to be in the category of soils with insignificant dispersion according to Bell and Maud's criteria. The data taken from Crumb's test presented in Table 3 confirm the results of this section.

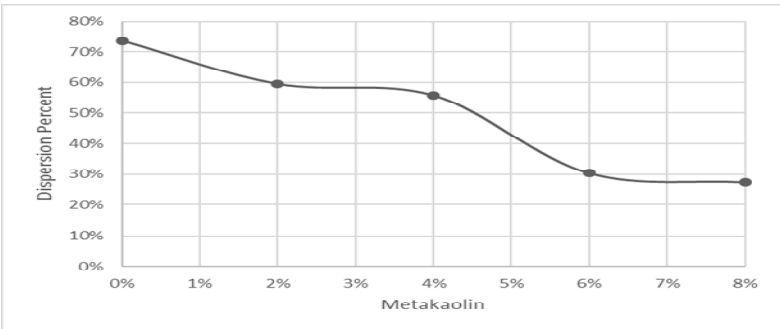


Fig. 1. Variation dispersion percentage based on double hydrometer test

Table 3. Variation dispersion percentage based on the Crumb test

Sample	Test result
Untreated Soil	Strong Reaction
Soil+2% Metakaolin	Moderate Reaction
Soil+4% Metakaolin	Moderate Reaction
Soil+6% Metakaolin	Slight Reaction
Soil+8% Metakaolin	Slight Reaction

3.2. The results of the Compaction test

By adding metakaolin to the soil, the necessary conditions for compaction and cohesion between the soil particles are provided and it causes the clay particles to become denser. Therefore, by reducing the space between the particles, which leads to a decrease in the optimum moisture content, when the soil particles are subjected to compaction, there is a relatively suitable connection between the soil particles, which helps in better compaction of the particles, and finally, the maximum dry density of the soil increases.

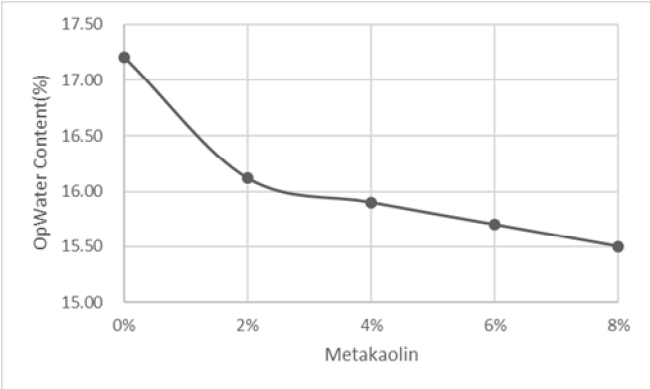


Fig. 2. Variations of optimum moisture percentage of stabilized samples with different percentages of metakaolin

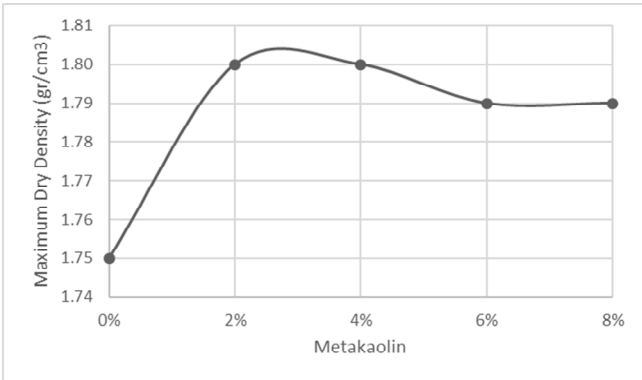


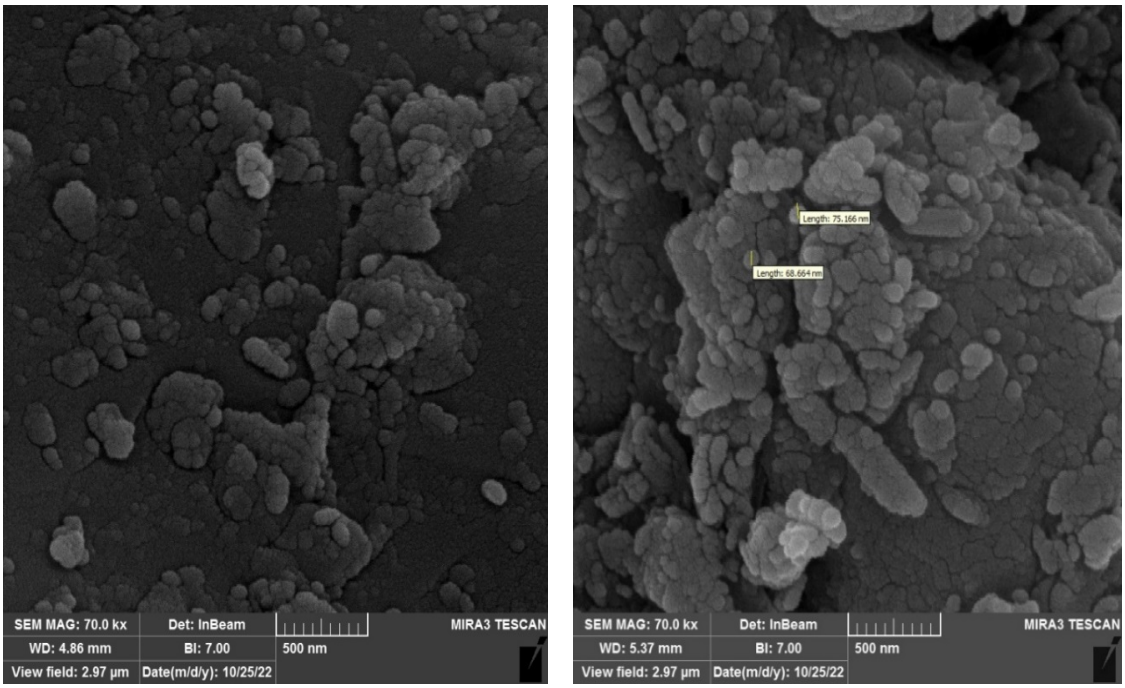
Fig. 3. Variations of maximum dry density of stabilized samples with different percentages of metakaolin

3.3. The results of the Etterberg limit test

The results of the Etterberg limit test have indicated that adding metakaolin decreases the liquid limit, plastic limit and plasticity index of the soil. A decrease in the plasticity index causes a decrease in flexibility and an increase in the density of dispersive clay, which also affects the properties of compaction, swelling and resistance of the soil. Therefore, the reduction of plasticity index can be considered as a useful change in improving the performance of modified soil samples.

3.4. The results of the unconfined compressive strength test

The results have shown that the 7-day compressive strength has increased for all samples. Adding metakaolin provides suitable conditions for pozzolanic reactions between SiO2 and Ca2+. As a result of these reactions, new compounds including CSH are formed. CSH fills the holes in the soil and reduces porosity and increases the density of the soil structure, which ultimately leads to an increase in soil resistance. This is shown in Fig. 4.



(a) (b)

Fig. 4. SEM images: **a)** natural soil, **b)** soil with 8% metakaolin

4. Conclusions

In this research, the effect of adding metakaolin on reducing the dispersivity potential of clay soils and improving their geotechnical properties has been investigated. The obtained results can be summarized as follows:

1) The dispersivity potential decreased by 62% and based on the results of the Crumb test, the soil was classified as Slight dispersive soils. The main reason for the decrease in dispersion is the immediate cation exchange reactions, including the replacement of Ca2+ with Na+ in the soil.

2) Based on the compaction test results, by adding metakaolin to the soil, the optimum moisture content is reduced and the necessary conditions for compaction and cohesion between the soil particles are provided and it increases the maximum dry density of the soil.

3) By adding metakaolin to the soil, the Etterberg limits decreased for all modified samples compared to the unmodified samples.

4) The unconfined compressive strength of the samples increased during the 7-day processing period by adding metakaolin. The main reason for the increase in resistance is the change in the structure of dispersive clay due to pozzolanic reactions and the formation of new compounds such as CSH.

اثر متاکائولن بر پتانسیل واگرایی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های واگرا

احمدرضا سلطانیان[1]، امیرعلی زاد[*2]، مریم یزدی[3]، امین توحیدی[4]

[1] دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
[2] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
[3] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
[4] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

دریافت: 1401/9/20، بازنگری: 1401/12/5، پذیرش: 1401/12/21، نشر آنلاین: 1401/12/21

چکیده

امروزه یکی از دغدغه‌هایی که در پروژه‌های صنعتی و عمرانی در برخی مناطق جنوبی کشور مطرح است پدیده واگرایی می‌باشد. در این پدیده خاک‌های رسی واگرا تحت شرایطی خاص پراکنده شده و به سرعت شسته می‌شوند. با توجه به پیشرفت روزافزون در زمینه افزودنی‌های صنعتی و معدنی، در این پژوهش از متاکائولن (Metakaolin) جهت بهسازی خاک‌های واگرا استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌هایی متشکل از درصد وزنی صفر، 2، 4، 6 و 8 درصد وزن خاک، به خاک رس شدیداً واگرا افزوده شد و پس از پایان دوره عمل‌آوری 7 روزه، نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی قرار گرفتند و میزان تغییرات پتانسیل واگرایی و همچنین بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که با افزودن 6 تا 8 درصد متاکائولن به خاک، پتانسیل واگرایی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این حالت مطابق نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه شدت پتانسیل واگرایی حدود 55 درصد کاهش یافت و در محدوده واگرایی کم قرار گرفت این موضوع در آزمایش کرامب (Crumb) هم صادق بود. در ادامه نتایج آزمایش حدود اتربرگ (Atterberg limits) نشانگر کاهش شاخص خمیری و در نتیجه کاهش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها است. بررسی نتایج آزمایش تراکم نشان‌دهنده آن بوده است که با کاهش رطوبت بهینه، حداکثر دانسیته خشک خاک افزایش یافته که همین امر سبب افزایش تراکم خاک در نتیجه واکنش‌پذیری بالا متاکائولن با هیدروکسیدکلسیم و تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم بوده است که درنهایت سبب افزایش مقاومت محصورنشده خاک و بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک واگرا گردیده است.

کلیدواژه‌ها: خاک واگرا، متاکائولن، بهسازی خاک، آزمایش هیدرومتری دوگانه، آزمایش کرامب، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده.

1- مقدمه

خاک‌های واگرا، به خاک‌های رسی اطلاق می‌شوند که در معرض آب‌های با غلظت نمک پایین به‌راحتی شسته خواهند شد، این رس‌ها در کاتیون جذبی خود دارای مقادیر بسیار بالایی یون سدیم هستند. پدیده واگرایی، پدیده‌ای پیش‌رونده است که نقطه شروع آن از نقطه‌ای است که جریان آب در آن نقطه متمرکز بوده، مانند ترک‌های حاصله از انقباض، نشست نامساوی و ترک‌های هیدرولیکی که به‌تدریج گسترش می‌یابد. خاک‌های واگرا در انواع مختلف اقلیم‌ها در مناطق مختلف جهان نظیر استرالیا، برزیل، ایران و ایالات متحده آمریکا به‌وفور وجود دارد.

جهت شناسایی خاک‌هایی واگرا توصیه به انجام هم‌زمان 4 دسته آزمایش می‌شود که عبارتند از آزمایش پین هول[1]، کرامب، هیدرومتری دوگانه و آزمایش‌های شیمیایی (ICOLD، 1990).

به‌طورکلی خاک‌های واگرا به‌عنوان خاک‌های رسی با درصد سدیم زیاد که بسیار مستعد فرسایش هستند تعریف می‌شوند. تمایل خاک‌های رسی واگرا به پراکندگی یا پخش‌شدگی به کانی شناسی، شیمی خاک و همچنین نمک‌های محلول در آب منفذی و فرسایش آبی بستگی دارد (Singh و همکاران، 2018).

1. Pinhole

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2023.55917.2240

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 09123344749
* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-5712-8246
آدرس ایمیل: ahmadrezasoltanian1989@gmail.com (ا. سلطانیان)، a.zad@iauctb.ac.ir (ا. زاد)، mar.yazdi@iauctb.ac.ir (م. یزدی)، amin.tohidi@yahoo.com (ا. توحیدی).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود کانی‌های رس فعال با غلظت الکترولیتی پایین مانند مونت موریلونیت[2] و یون‌های سدیم قابل تعویض به رفتار واگرایی خاک کمک می‌کند. ذرات رس شامل کانی‌هایی می‌باشند که با کانی‌های تشکیل‌دهنده ذرات ماسه و لای کاملاً متفاوت هستند (Sherard و همکاران، 1972).

رس‌ها معمولاً ذرات کریستالی صفحه‌ای شکلی هستند که از دو واحد اصلی سیلیکات‌های چهاروجهی Si_2O_5 و آلومینیوم هیدروکسید هشت‌وجهی $Al(OH)_3$ ساخته شده‌اند که این دو واحد در لایه‌های متناوب روی هم قرار گرفته‌اند. به‌علت نقص در ساختار شبکه کریستالی، یون‌های Al^{3+} جایگزین یون‌های Si^{4+} می‌شوند و برخی از یون‌های Al^{3+} با یون‌های Mg^{2+} جایگزین می‌شوند. در نتیجه، کانی‌های رس از لحاظ بار الکتریکی مثبت، ضعف دارند، یعنی دارای یک بار منفی دائمی هستند و برای جبران این ضعف، کاتیون‌های آب موجود در اطراف خود را جذب می‌کنند (Van de Graaff و همکاران، 2001).

در ترکیب تبادلی یون‌ها، راحت‌تر آن است که Na^+ با Ca^{2+} یا Al^{3+} جایگزین شود. یون‌های سدیم (که در سطح ذرات خاک واگرا حضور دارند) تک‌ظرفیتی هستند و نسبت به یون‌های دوظرفیتی یا سه‌ظرفیتی کلسیم و آلومینیوم تأثیر کمتری روی خنثی کردن بار روی ذرات کلوئیدی و جلوگیری از تورم و واگرایی ذرات خاک دارند. بنابراین ذرات کلوئیدی منفرد یکدیگر را دفع کرده و در محلول، معلق باقی می‌مانند (Fan و همکاران، 2013). به‌عبارت دیگر در فرایند واگرایی کاتیون‌های یک‌ظرفیتی سدیم روی سطح ذرات رس باعث افزایش ضخامت لایه دوگانه و همچنین افزایش نیروی دافعه بین ذرات می‌شوند. زمانی که نیروی دافعه بین ذرات از نیروی جاذبه بیشتر باشد، وجود آب به‌راحتی و سهولت ذرات خاک را از یکدیگر جدا کرده و جابه‌جا می‌کند. فرسایش این نوع خاک‌ها نیازمند جریان آب با سرعت زیاد نیست و ذرات رس ممکن است به‌علت نیروهای دافعه حتی در آب ساکن هم به‌صورت کلوئیدی شناور شوند، در حالی که برای فرسایش سایر رس‌ها سرعت جریان آب باید از یک حد مشخص بیشتر باشد و در کمتر از آن هیچگونه فرسایشی در خاک رخ نمی‌دهد (Flores-Berrones، 2011).

به‌منظور حل مشکلات تثبیت کننده‌های سنتی، باید به‌دنبال مواد و مصالحی بود که خصوصیات فنی خاک را بهبود ببخشد و باعث تخریب محیط زیست نشوند. پژوهشگران بسیاری افزودنی-های شیمیایی را مورد ارزیابی قرار دادند و به‌رغم اثر مثبت آن روی خصوصیات مهندسی خاک به‌دلیل قیمت بالا توجیه اقتصادی نداشته و استفاده از آن‌ها را به‌عنوان جایگزین تثبیت کننده‌های سنتی، محدود کرده‌اند (Batis و همکاران، 2005).

استفاده از مواد افزودنی برای تثبیت خاک، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این بین استفاده از افزودنی‌های ارزان و سازگار با محیط زیست مانند پوزولان‌های طبیعی حائز اهمیت می‌باشد. پوزولان‌های طبیعی، مواد سیلیسی و آلومینوسیلیکاتی هستند که ظاهراً دارای خاصیت سیمانی نیستند ولی در حضور آب، با هیدرات کلسیم ترکیب‌هایی با خاصیت سیمانی به‌وجود می‌آورند. با مروری بر تحقیقات گذشته، مشاهده می‌شود که استفاده از مواد پوزولانی در ساخت بتن علاوه بر سازگاری با محیط زیست، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی،کاهش هزینه،کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی بتن می‌شود (Roohbakhshan و همکاران، 2016). متاکائولن یک پوزولان طبیعی با واکنش‌پذیری بالا می‌باشد که دارای 50 الی 55 درصد SiO_2 می‌باشد که در واکنش با $Ca(OH)_2$ در دمای معمولی ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) تولید می‌شود. همچنین این ماده حدوداً دارای40 الی 45 درصدAl_2O_3 می‌باشد که با کلسیم هیدرات (CH) واکنش داده و فازهای آلومیناتی تولید می‌کند. متاکائولن از کلسیته نمودن خاک کائولن در دمای بین550 تا 900 درجه سانتی‌گراد به‌دست می‌آید (Batis و همکاران، 2005).

اولین استفاده از این ماده در سال 1962 در سد جوپیای[3] برزیل می‌باشد. استفاده از متاکائولن در صنعت بتن عمر کوتاه و حدود 20 سال دارد، ولی به‌سرعت به‌عنوان یک ماده پوزولانی مؤثر پذیرفته شده است، به طوری‌که از سال 1994 میلادی متاکائولن به‌صورت تجاری وارد بازار شده است (Taherkhani، 2016). مطالعات بسیاری توسط محققین در خصوص اثرات جایگزینی سیمان با متاکائولن به‌عنوان یک پوزولان و تأثیر آن بر بهبود خصوصیات مکانیکی و پایایی بتن انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که افزودن متاکائولن به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی آن می‌شود. همچنین این ماده مقاومت بتن در برابر خوردگی را افزایش می‌دهد و علی‌رغم وجود مطالعات بسیار در خصوص اثرات افزودن پوزولان متاکائولن به بتن، استفاده از متاکائولن جهت تثبیت خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Ghrici و همکاران، 2007).

Kolovos و همکاران (2013) خواص مکانیکی (خاک سیمان) اصلاح شده با متاکائولن را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه بهینه‌سازی طرح اختلاط خاک سیمان و رفتار مکانیکی آن به‌طور تجربی بررسی شده و نتایج بیانگر بهبود خواص مکانیکی خاک سیمان بوده است. بررسی اثر متاکائولن بر

2. Montmorillonite

3. Jupiya

مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی 3 درصد سیمان و 5 درصد متاکائولن، حدود 2 تا 3 برابر خاک بدون متاکائولن است. همچنین نرخ افزایش مقاومت خاک حاوی متاکائولن در روزهای اول عمل‌آوری بیشتر از خاک فاقد متاکائولن است. در واقع متاکائولن به واکنش‌های پوزولانی شتاب می‌دهد.

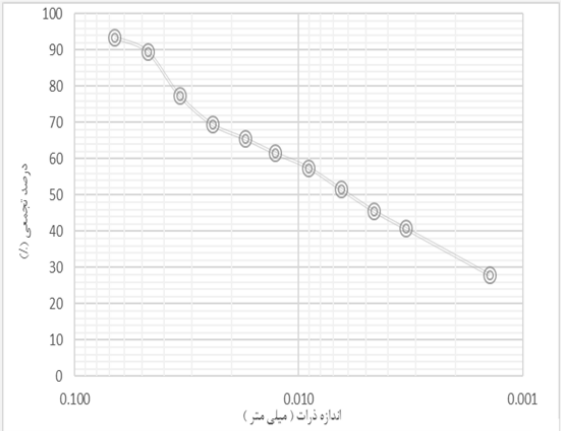
Wu و همکاران (2016) اثر متاکائولن و سیمان را بر مقاومت و ساختار خاک MHS (این خاک حاوی 33 درصد ماسه، 45/5 درصد لای و 20/5 درصد رس و حد روانی، حد خمیری، نشانه خمیری به‌ترتیب 38/1، 55/5، 17 درصد است) مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که اضافه کردن متاکائولن به خاک تثبیت شده با سیمان حساسیت خاک نسبت به آب را کاهش و مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. نسبت بهینه سیمان به متاکائولن در این مطالعه بین 2 الی 3 ارزیابی شده است. بررسی‌های ریزساختاری نیز بیانگر افزایش واکنش‌های پوزولانی و تولید مواد معدنی جدید هیدرات کلسیم آلومینات (CSH) و هیدرات سیلیکات کلسیم (CAH) است.

Wianglor و همکاران (2017) اثر متاکائولن فعال قلیایی بر مقاومت فشاری و ساختار ذرات ملات عمل‌آوری شده در دماهای 23 و 60 درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن و دمای عمل-آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد و در ساختار ذرات ملات عمل‌آوری شده ژل سیلیکات و آلومینات به‌وضوح دیده می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از متاکائولن برای سنتز ژئوپلمیرها مورد توجه قرار گرفته است. نتایج سنتز ژئوپلمیرها با متاکائولن و ترکیب متاکائولن با مواد دیگر مانند زئولیت، نانوسیلیس، کائولن، مواد سیمانی و غیره نشان می‌دهد که متاکائولن موجب بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، کاهش آلودگی زیست‌محیطی و به‌طورکلی موجب بهبود عملکرد ژئوپلمیرها می‌شود. نتیجه این‌که استفاده از ژئوپلمیرهای با پایه موادی نظیر متاکائولن در ساخت بتن، ملات و بهسازی خاک گسترش یافته و افزایش مقاومت و کارایی آن‌ها را به دنبال خواهد داشت (Sudagar و همکاران، 2018).

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از سیمان و آهک به‌عنوان یک افزودنی مناسب برای تثبیت خاک مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر هر چند اثر ترکیب متاکائولن و سیمان برای تثبیت خاک به‌صورت محدودی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما تاکنون از متاکائولن به تنهایی برای تثبیت و بهسازی خاک رس استفاده نشده است. در این مطالعه در نظر است که با توجه به ویژگی‌های منحصربفرد متاکائولن، تأثیر درصدهای مختلف متاکائولن بر کاهش پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی با استفاده از آزمایش کرامب، هیدرومتری مضاعف و همچنین ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها شامل حدود اتربرگ، حداکثر چگالی خشک، درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری تک‌محوری خاک و اعتبار بخشی آن به‌وسیله تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) است.

2- مواد و روش‌ها

خاک رس مورد استفاده در این پژوهش در حالت طبیعی دارای خصوصیات واگرایی شدید بوده که از محدوده توابع شهر اردکان در استان یزد نمونه‌گیری انجام شده است و مشخصات مکانیکی خاک محدوده بر اساس نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ و انجام طبقه‌بندی خاک به‌روش یونیفاید نوع خاک به‌عنوان رس با پلاستیسیته کم (CL) (مطابق استاندارد ASTM-D2487) که دارای حد روانی 33 و دامنه خمیری 11 (مطابق استاندارد ASTM-D4318)، درصد رطوبت خاک 3/5 و دانسیته خشک در محل 1/54 کیلوگرم بر مترمکعب (مطابق استاندارد ASTM-D698) می‌باشد. نمونه‌ها پس از حفر گمانه‌ای به عمق 2 متر، از کف گمانه برداشت شده و سپس داخل کیسه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه منتقل شده است. محدوده مورد نظر به لحاظ صنعتی مطرح بوده و از روش‌هایی از جمله حذف خاک بستر و بسترسازی با مصالح مرغوب‌تر و ژئوگریدها جهت مهیا کردن بستری مناسب به‌منظور احداث سوله، راه‌های دسترسی استفاده می‌شود. شکل (1) بیانگر منحنی دانه‌بندی خاک رس محدوده مورد مطالعه بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری می‌باشد. همچنین خصوصیات شیمیایی خاک واگرا مورد مطالعه مطابق جدول (1) بر اساس آنالیزهای شیمیایی به‌دست آمده است. متاکائولن مورد استفاده در این پژوهش از شرکت جهان پودر دلیجان تهیه شده است و دارای وزن مخصوص 2/63 گرم بر سانتی‌مترمکعب و سطح مخصوص ویژه آن 9169 سانتی‌مترمربع بر گرم می‌باشد و آنالیز شیمیایی متاکائولن به‌شرح جدول (2) می‌باشد.



شکل 1- منحنی دانه‌بندی خاک رس محدوده مطالعاتی

جدول 1- مشخصات شیمیایی خاک رس واگرا

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
SiO_2	53/42
CaO	10/55
Al_2O_3	14/36
Fe_2O_3	3/1
K_2O	2/73
Na_2O	1/78
MgO	3/24

جدول 2- مشخصات شیمیایی متاکائولن

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
SiO_2	70/46
CaO	0/68
Al_2O_3	22/48
Fe_2O_3	0/45
K_2O	2/03
Na_2O	0/62

ماده پوزولانی متاکائولن محصول فعال‌سازی رس کائولن به‌وسیله حرارت است. کلسینه[4] کردن فرآیندی است که در آن موادی مثل خاک‌های معدنی را در دمای نسبتاً بالا حرارت می‌دهند تا ترکیبات شیمیایی موجود در مواد تجزیه شوند و ترکیبات فرار (مثل آب) از مواد خارج می‌شود (Caballero و همکاران، 2019). هرچه درصد کلسینه شدن بالاتر باشد ماده خروجی دارای واکنش‌پذیری بالاتری است. عملیات حرارتی کائولینیت اشکال کریستالی را به اشکال واکنشی آمورف[5] تبدیل می‌کند به‌طوری‌که ماده به‌دست آمده بسیار واکنش‌پذیر بوده و قدرت ژئوپلیمر را مشخص می‌کند. بر اساس استاندارد ASTM-C618، مقدار آلومیناسیلیکات باید حداقل 70 درصد میزان کل ترکیب را تشکیل دهد و با نظر به این‌که این مقدار برای متاکائولن بالای 70 درصد است، مقدار قابل قبولی برای ایجاد ژل ژئوپلیمر است (Xu و همکاران، 2002). درجه حرارتی که در آن کائولن به ساختار کریستالی متاکائولن تبدیل می‌شود در حدود 600 تا 800 درجه می‌باشد. اگر ماده در جریان پخت کمتر حرارت داده شود، تبدیل فاز معدنی آمورفوس[6] رخ نخواهد داد و ماده به‌طور مناسب پوزولانی نخواهد شد. بنابراین، درجه حرارت در تبدیل خاک کائولن به پوزولان فراواکنشی متاکائولن بسیار حساس است. (Caldarone و همکاران، 1994).

ابتدا با استفاده از آزمایش‌های کرامب و هیدرومتری دوگانه به بررسی وضعیت شدت واگرایی خاک تحت طرح‌های اختلاط مختلف متاکائولن پرداخته شده است. در استاندارد ASTM D6572-12 این جمله منعکس شده است که آزمایش کرامب اگرچه نشانگر خوب و سریعی برای واگرایی خاک است اما باید به‌همراه آزمایش‌های پین هول[7] و هیدرومتری دوگانه انجام گیرد. این جمله حاکی از این است که آزمایش کرامب دقت خیلی بالایی ندارد. مطابق استاندارد ASTM D6572، ابتدا برای ساخت نمونه بازسازی شده، مصالح خاکی در دستگاه خردکن به ذرات ریزتر تبدیل شده و سپس از الک نمره 10 رد شده‌اند و در مرحله بعد با افزودن آب، این خاک به رطوبت بهینه رسیده و بعد از به تعادل رسیدن رطوبت در نمونه، با کمک فشار ملایم دست مکعب‌هایی به ابعاد تقریبی پانزده میلی‌متر ساخته و به آرامی درون یک ظرف حاوی 250 میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شد. سپس در زمان‌های 2 دقیقه، 60 دقیقه و 6 ساعت، میزان واکنش این مکعب‌ها نسبت به آب، مورد بررسی قرار گرفت. سپس با توجه به‌میزان واکنش خاک در پایان زمان تعیین شده، با استفاده از جدول (3) نسبت به تعیین شدت واگرایی هر نمونه خاک با هر طرح اختلاط در نظر گرفته شده نتیجه‌گیری انجام داده می‌شود. این آزمایش سه مرتبه بر روی تمامی نمونه‌ها با طرح اختلاط‌های مختلف متاکائولن انجام شد.

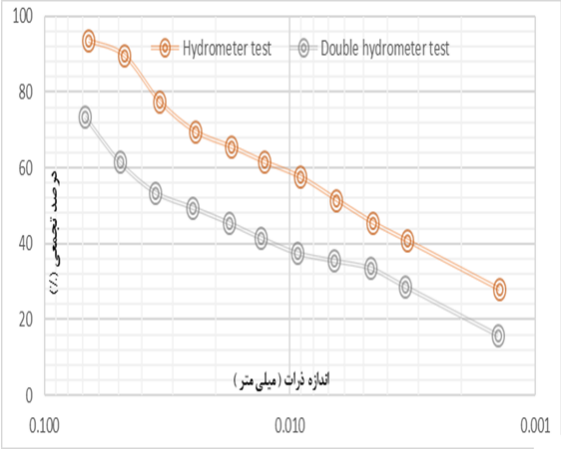
جدول 3- تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش کرامب بر اساس معیار واکر[8] (1997)

درجه	واکنش	توضیحات
1	بدون واکنش	ذرات خاک از یکدیگر جدا شده در ظرف ته‌نشین می‌شود اما محلول کلوئیدی تشکیل نمی‌شود.
2	واکنش کم	رنگ آب در مجاورت سطح خاک کمی تغییر می‌کند.
3	واکنش متوسط	تغییر رنگ آب در تمام ظرف قابل تشخیص است و معمولاً در مجاورت سطح خاک محسوس‌تر است
4	واکنش شدید	رنگ آب به‌دلیل تشکیل محلول کلوئیدی کاملاً تغییر می‌کند و تمام آب ظرف کدر می‌شود.

جهت اطمینان از نتایج حاصله نمونه‌های خاک با طرح اختلاط‌های مختلف را توسط آزمایش هیدرومتری دوگانه مطابق با استاندارد ASTM D4221، میزان تغییرات واگرایی با توجه به طرح اختلاط‌های معین مورد سنجش قرار داده می‌شود. بدین منظور روی هر یک از نمونه‌ها دو بار آزمایش انجام می‌گردد، یک بار مطابق با استاندارد ASTM D4221-63 که در این روش از ماده پراکنده‌ساز هگزا[9] متافسفات سدیم با غلظت 4 درصد و همزن مکانیکی برای جداسازی ذرات استفاده می‌شود. بار دیگر مطابق با استاندارد ASTM D 4221-99 و بدون ماده پراکنده‌ساز و با استفاده از همزن دستی انجام می‌شود. سپس درصد واگرایی

4. Calcination
5. Amorph
6. Amorphous
7. Pinhole
8. Walker
9. Sodium Hexa Metaphosphate

نمونه‌ها بر اساس رابطه به‌دست آمده و در ادامه این درصدها بر اساس معیارهای جدول (4) و رابطه (1) طبقه‌بندی شده و پتانسیل واگرایی نمونه تحت طرح اختلاط‌های مختلف سنجیده و مناسب‌ترین طرح اختلاط انتخاب می‌گردد، که بنا به محاسبات انجام شده و با استناد به شکل (2) خاک محدوده مطالعاتی با 73/68% واگرایی در محدوده خاک واگرایی بسیار شدید قرار دارد.



شکل 2- نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه خاک واگرا

جدول 4- تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه بر اساس معیار Bell و Maud (1994)

درصد واگرایی	پتانسیل واگرایی خاک
≤ 15	غیرواگرا
30 - 15	کمی واگرا
50 - 30	نیمه‌واگرا
≥ 50	شدیداً واگرا

$$\text{درصد واگرایی} = (F(0.005)2/F(0.005)1)\times 100 \quad (1)$$

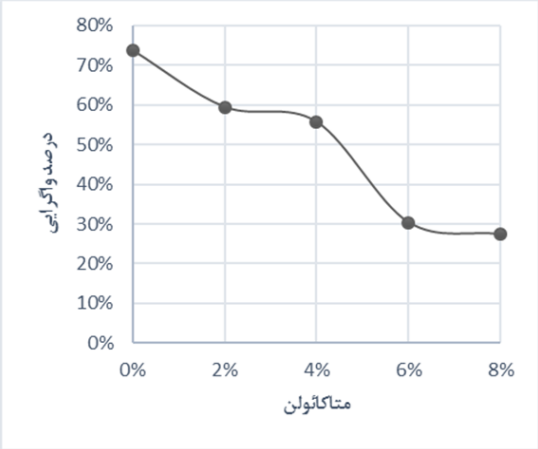
سپس با انجام آزمایش حدود اتربرگ مطابق استاندارد ASTM D4318، میزان تأثیر هر یک از طرح های اختلاط بر روی حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری خاک با عبور از الک نمره 40 سنجیده می‌شود. در ادامه مطالعات، نمونه خاک در هاون چینی کوبیده و از الک نمره 2 میلی‌متر عبور داده شد و سپس با نسبت 1:2 آب و خاک مخلوط می‌شود و به‌مدت 24 ساعت به آن استراحت داده خواهد شد و در نهایت PH متر داخل آن قرار می‌شود، با انجام آزمایش PH این نتیجه دریافت شد که خاک از نوع قلیایی ضعیف می‌باشد. سپس به‌منظور سنجش میزان غلظت یون‌های محلول در خاک و روند تغییرات متناسب با طرح‌های اختلاط از آزمایش EC هدایت الکتریکی خاک استفاده شد. بدین منظور از طریق عصاره‌گیری از گل اشباع با نسبت 1:2، 1:5 و 1:10 خاک و آب و پروب EC استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر متاکائولن بر میزان تغییرات پتانسیل واگرایی خاک و همچنین نقش آن در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک واگرا، نمونه‌های تهیه شده از منطقه، در خردکن برقی خرد شده و از الک نمره 40 عبور داده شد. سپس متاکائولن با درصدهای مختلف صفر، 2، 4، 6، 8 درصد وزنی خاک، طی مراحل آزمایش به‌صورت خشک به خاک واگرا اضافه‌شد و به‌خوبی مخلوط شده است. از جمله اثرات مثبت متاکائولن اثر پرکننده، تسریع هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی با هیدروکسیدکلسیم (CH) می‌باشد. در میان این اثرات، اثر پرکننده فوراً رخ می‌دهد، هیدراتاسیون سریع در 24 ساعت اول کار می‌کند و واکنش پوزولانی بین 7 تا 14 روز به حداکثر می‌رسد (Tongwei و همکاران، 2014) و بر این اساس بعد از عمل اختلاط، نمونه‌ها در ظرف‌های پلاستیکی جهت انجام واکنش به‌مدت 7 روز نگهداری شده‌اند. بر این اساس آزمایش‌های کرامب، هیدرومتری مضاعف، تعیین حدود اتربرگ، سنجش PH، سنجش EC، تراکم استاندارد و مقاومت فشاری محدود نشده بر روی ترکیب‌های مختلف خاک و متاکائولن بر اساس استانداردهای ASTM انجام شد. قابل‌ذکر است، انتخاب درصدهای متاکائولن بر اساس پژوهش‌های پیشین انجام شده توسط محققین صورت پذیرفته است (Wu و همکاران، 2016؛ Tongwei و همکاران، 2014). همچنین جهت دستیابی به ساختاری دقیق‌تر از قبل و بعد از اختلاط نمونه، عکس‌برداری SEM انجام شد. این عکس‌برداری از نمونه‌ها با درصدهای مختلف متاکائولن انجام شده است و بهترین ساختار با نمونه اولیه مقایسه شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی تغییرات پتانسیل واگرایی

به‌منظور بررسی تأثیر متاکائولن بر میزان پتانسیل واگرایی خاک بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه، نرخ تغییرات درصد واگرایی به‌ازای افزودن درصدهای مختلف متاکائولن در شکل (3) ارائه شده است. آنچه که در این شکل مشهود است با افزایش مقدار متاکائولن، تغییرات در شدت پتانسیل واگرایی خاک مورد مطالعه روندی نزولی به خود گرفته است تا جایی که مطابق معیار Bell و Maud خاک از حالت شدیداً واگرا به حالت متوسط و حتی شدت پتانسیل واگرایی پایین (کم) تغییر یافته است که نتایج آن در جدول (5) آمده است.

این تغییرات حاکی از آن است که متاکائولن در درصدهای پایین تأثیر کمی بر روند تغییرات پتانسیل واگرایی نمونه داشته ولی با افزایش درصد متاکائولن در بازه 6 تا 8 درصد افزودنی، نتیجه مطلوبی بر شدت پتانسیل واگرایی خاک داشته است.



شکل 3- تاثیر متاکائولن بر واگرایی خاک مورد مطالعه بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه

بیشترین کاهش درصد واگرایی به‌ازای افزودن 8% متاکائولن رخ داد. در این حالت درصد واگرایی از 74/7 درصد با کاهش نسبی 62 درصدی به 28/4 درصد رسیده است که بر اساس معیار بل و ماود خاک در رده خاک‌های با واگرایی ناچیز محسوب می‌شود. از این موضوع می‌توان دریافت که ترکیباتی که دارای سولفات آلومینیوم کمتری هستند تأثیر کمتری بر نتایج واگرایی خاک دارند، با توجه به نتایج آزمایش شیمیایی متاکائولن میزان درصد این عنصر در متاکائولن مناسب بوده که به تبع آن با افزایش درصد متاکائولن، از میزان واگرایی خاک کاسته شده است.

جدول 5- تغییرات پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه بر اساس معیار Bell و Maud (1994)

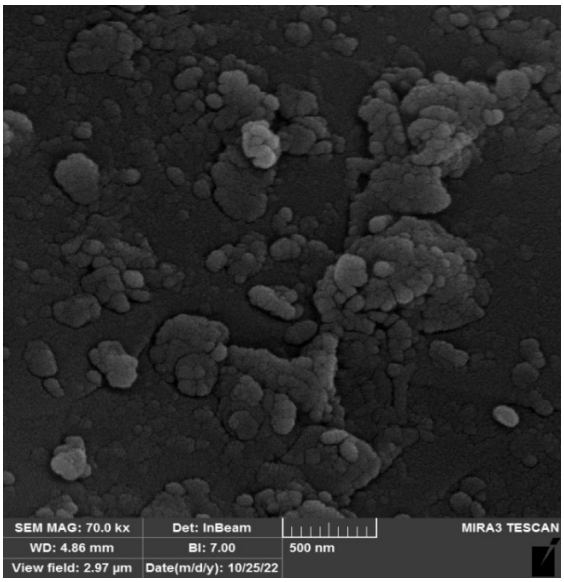
	درصد وزنی	پتانسیل واگرایی
متاکائولن	0	واگرایی شدید
	2	واگرایی شدید
	4	واگرایی شدید
	6	نیمه واگرا
	8	واگرایی با شدت کم

جهت صحت‌سنجی داده‌های فوق، آزمایش کرامب بر اساس معیار والکر مطابق جدول (6) ارائه شد که طبق این جدول می‌توان نتیجه گرفت طرح اختلاط‌هایی که بر اساس معیار Bell و Maud واگرایی با شدت کم در نظر گرفته شدند در آزمایش کرامب مطابق معیار والکر، غیرواگرا شناخته شدند در نتیجه ترکیب خاک و 8% متاکائولن را می‌توان دارای رفتار غیرواگرا معرفی نمود.

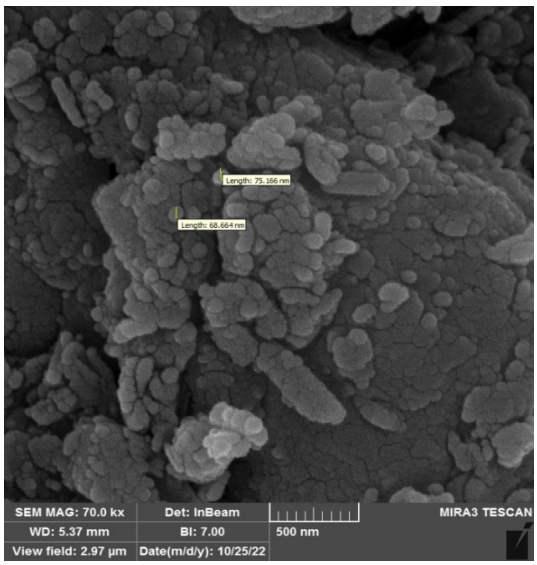
جدول 6- تغییرات پتانسیل واگرایی خاک با درصدهای مختلف در آزمایش کرامب بر اساس معیار Walker (1997)

	درصد وزنی	پتانسیل واگرایی
متاکائولن	0	واگرایی شدید
	2	نیمه‌واگرا
	4	نیمه‌واگرا
	6	واگرایی با شدت کم
	8	واگرایی با شدت کم

در شکل (4) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ساختار خاک واگرا ارائه شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود ساختار خاک پراکنده بوده و با افزودن متاکائولن به خاک، باعث می‌شود ساختار پراکنده خاک به ساختاری متراکم و لخته‌ای تبدیل شود در نتیجه باعث کاهش منافذ آن شده است. این موضوع در شکل (5) نشان داده شده است. با افزودن متاکائولن به خاک، در اثر واکنش‌های شیمیایی ترکیبات جدیدی شامل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم تشکیل شده که این امر سبب پر شدن حفرات خاک و در نتیجه کاهش تخلخل و افزایش تراکم می‌شود که این موضوع مزید بر علت افزایش مقاومت محدود نشده خاک می‌شود.



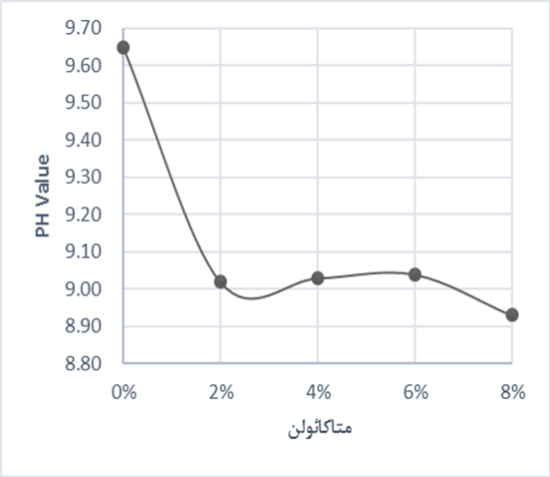
شکل 4- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از خاک واگرا



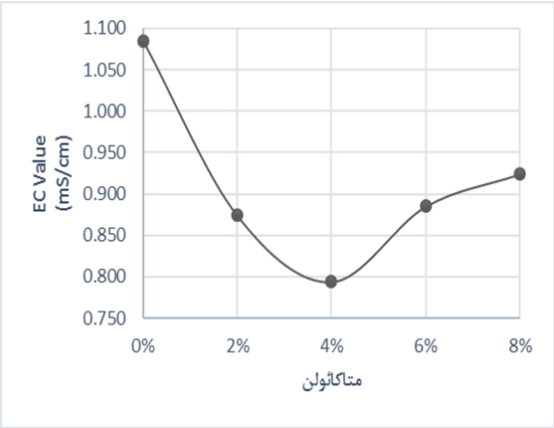
شکل 5- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه اصلاح شده با 8 درصد متاکائولن

3-2- نتایج آزمایش‌های PH و EC

در جهت تکمیل نتایج و تحلیل نوع برهم‌کنش اتفاق افتاده بر روی نمونه‌های تثبیت شده آزمایش‌های EC و PH انجام گرفت. واکنش تبادل یونی در خاک‌های ریزدانه با خاصیت تبادل کاتیونی و حضور آب اتفاق می‌افتد، بعد از افزایش یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و سه ظرفیتی آلومینیوم در اطراف کانی‌های رسی، این یون‌ها جایگزین یون سدیم می‌شوند که به‌دلیل این که تک ظرفیتی هستند دارای خاصیت الکترونگاتیوی کمتری می‌باشند. لذا ضخامت لایه دوگانه کاهش یافته و در نتیجه نیروی جاذبه بین کانی‌ها شدت گرفته و منجربه تماس کانی‌های رسی از وجوه به یکدیگر می‌شود. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که متاکائولن کلسیم و آلومینیوم کافی جهت اختلاط با سیلیکات و آلومینات داشته باشد و لازمه این کار هم بالا بودن PH مخلوط می‌باشد تا بتواند حلالیت سیلیکات و آلومینات کانی‌های رسی را فراهم آورد. همان‌گونه که در شکل (6) مشاهده می‌نمایید افزودن متاکائولن سبب کاهش PH خاک گردیده است و تقریباً با افزایش آن روند تغییرات PH خاک ناچیز بوده ولی زمانی که مقدار متاکائولین از 8% عبور میکند مقدار PH خاک روندی نزولی‌تر به خود گرفته است در مجموع با افزایش مقدار متاکائولن خاک از حالت قلیایی به حالت خنثی تغییر رویه می‌دهد. روند تغییرات خاصیت هدایت الکتریکی خاک (*EC*) در شکل (7) نشان داده شده است که با توجه به روند تغییرات مشاهده شده افزایش متاکائولن تا حدود 4% سبب کاهش این جریان بوده که در ادامه زمانی که مقدار متاکائولن از 4% تجاوز می‌کند، هدایت الکتریکی خاک روند صعودی را تجربه می‌کند.



شکل 6- روند تغییرات PH خاک به‌واسطه درصدهای مختلف متاکائولن

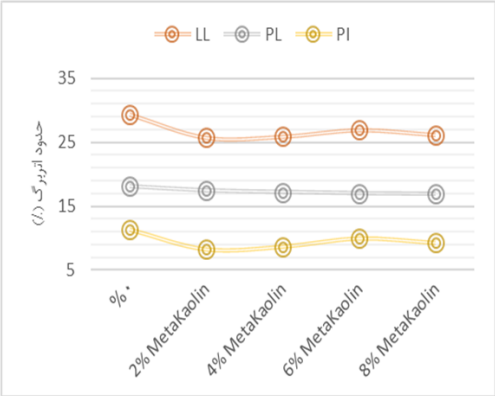


شکل 7- روند تغییرات EC خاک به‌واسطه درصدهای مختلف متاکائولن

در مجموع هرچقدر که *EC* بالاتر باشد، ذرات با بار منفی در خاک بیشتر است (ذرات ارگانیک و رسی)، بنابراین کاتیون‌ها نیز در خاک بیشتر می‌شوند (که دارای بار مثبت هستند). سدیم (Na^{+})، آمونیوم (NH^{4+})، پتاسیم (K^{+})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، هیدروژن (H^{+})، آهن (Fe^{2+})، آلومینیوم (Al^{3+})، مس (Cu^{2+})، روی (Zn^{2+}) و منگنز (Mn^{2+}) که همین علت حضور کاتیون‌های مثبت مزید بر کاهش واگرایی، افزایش تراکم و به تبع آن تأثیر بر مقاومت محصور نشده خاک می‌باشد. در نتیجه تجاوز میزان متاکائولن مصرفی از 4% می‌تواند نتایج مطلوب‌تری بر روی نمونه خاک مورد مطالعه داشته باشد.

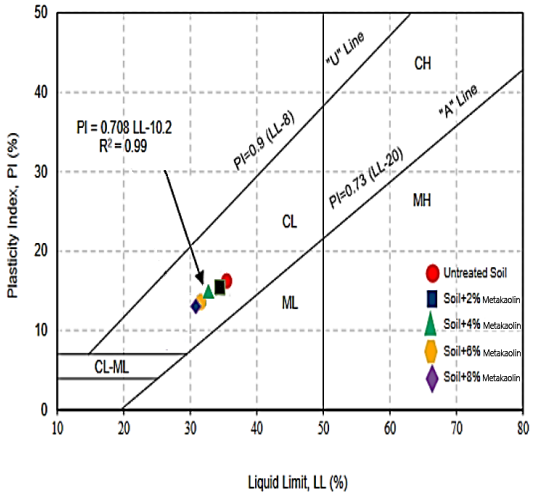
3-3- بررسی نتایج حدود اتربرگ

نتایج آزمایش حدود اتربرگ حاکی از آن بوده است که با افزودن متاکائولن مقدار حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد. به‌طور کل می‌توان متاکائولن را جهت گرفتن نتیجه مطلوب‌تر از حدود اتربرگ و جهت افزایش میزان تراکم نمونه معرفی نمود. نکته دیگر میزان درصد کلسیم متاکائولن است که تأثیر بسزایی در کاهش حدود اتربرگ دارد چرا که کلسیم با سدیم جایگزین شده و این موضوع سبب کاهش درصد سدیم خاک می‌گردد. همان‌گونه که در شکل (8) مشاهده می‌کنید میزان حدود اتربرگ در ترکیب خاک با متاکائولن کاهش یافته و در تحلیل شیمیایی این ماده مشخص است که میزان کلسیم موجود در متاکائولن در حد قابل قبولی است که همین امر سبب کاهش سدیم خاک و درنتیجه کاهش حدود اتربرگ گردیده است. از طرفی متاکائولن رفتاری آب گریز از خود نشان می‌دهد، این در حالی است که خاک رس خاصیت جذب آب بیشتری نسبت به متاکائولن دارد که دلیل اصلی کاهش کلیه پارامترهای حدود اتربرگ همین امر بوده است. لذا به‌طورکلی کاهش شاخص خمیری باعث کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش چگالی خاک رس واگرا می‌شود که بر ویژگی‌های تراکم، فشردگی، تورم و مقاومت خاک نیز تأثیر می‌گذارد. بنابراین می‌توان کاهش شاخص خمیری را به‌عنوان یک تغییر مفید در بهبود کارایی نمونه‌های خاک اصلاح شده در نظر گرفت.



شکل 8- روند تغییرات حدود اتربرگ در نمونه های اصلاح شده با درصدهای مختلف متاکائولن

تأثیر افزودن متاکائولن به خاک واگرا را می‌توان با ترسیم‌بر روی نمودار پلاستیسیته بهتر توضیح داد. بر اساس نتایج آزمایش حدود اتربرگ و طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید، با افزودن متاکائولن به خاک، همه نمونه‌ها در رده رس با پلاستیسیته کم (CL) طبقه‌بندی شدند. این موضوع در شکل (9) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همه نمونه‌ها بین خطوط A و U قرار دارند.

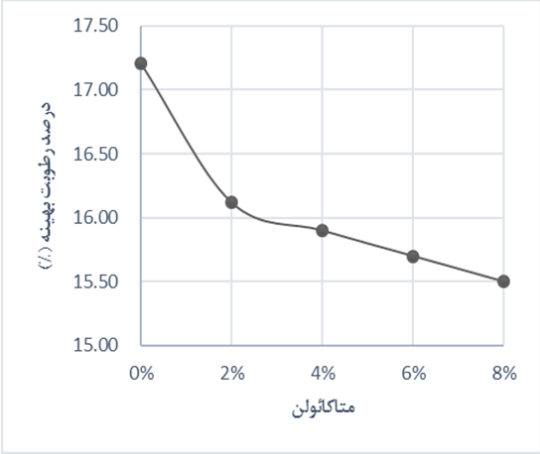


شکل 9- موقعیت نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن بر روی نمودار پلاستیسیته

4-3- بررسی نتایج آزمایش تراکم

نتایج آزمایش تراکم برای نمونه‌های ترکیب شده با درصدهای مختلف متاکائولن در شکل‌های (10) و (11) ارائه شده است. در تعیین رطوبت بهینه خاک اولیه مشخص گردید که نمونه اولیه دارای رطوبت بهینه 17/21 بوده و با افزایش درصد متاکائولن رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. لذا از این موضوع می‌توان دریافت که متاکائولن خاصیت آب گریز دارد و این امر باعث می‌شود جذب آب پایینی داشته باشد. در نتیجه رطوبت بهینه پایین‌تری نسبت به نمونه اولیه به‌وجود می‌آورد. همچنین با کاهش رطوبت بهینه میزان حداکثر دانسیته خشک خاک افزایش یافته است. این رفتار می‌تواند به‌واسطه میل برای جذب آب توسط متاکائولن برای واکنش‌های پوزولانی با بخش‌های رسی یا سیلتی خاک باشد. این نتایج با پژوهش Attah و همکاران در سال 2019 نیز تأیید می‌گردد.

شکل 10- روند تغییرات درصد رطوبت بهینه نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف متاکائولن



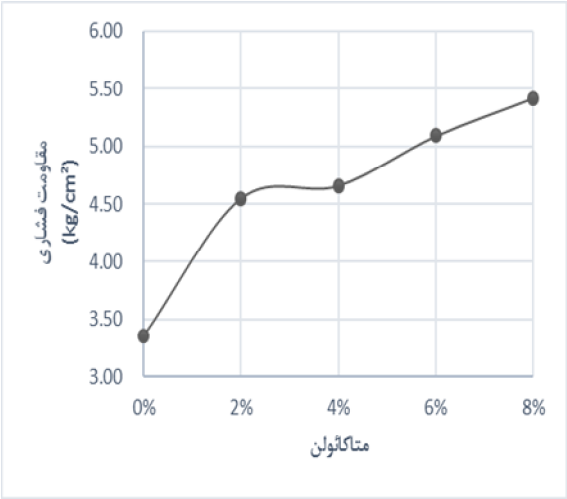
شکل 11- روند تغییرات حداکثر دانسیته خشک نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف متاکائولن

همچنین ممکن است روند کاهشی در درصد رطوبت بهینه به‌دلیل واکنش‌های تبادل کاتیونی باشد که باعث لخته‌شدن بخش‌های رسی خاک شده است (Salahudeen و همکاران، 2015). کاهش میزان رطوبت بهینه به این دلیل رخ می‌دهد که سطح خاک با افزودن متاکائولن کاهش یافته است، بنابراین برای فشرده‌سازی مخلوط‌ها و کاهش درصد رطوبت بهینه به آب کمتری نیاز است (Al-Khalili و همکاران، 2021).

در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که هرچه میزان رطوبت خاک از مقدار رطوبت بهینه کمتر باشد، ذرات آب مانند روغن عمل می‌کنند و اجازه می‌دهند که ذرات خاک روی هم بلغزند. در این حالت ذرات ریزتر مابین ذرات درشت‌تر را پر می‌کنند و میزان تراکم افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش درصد رطوبت از میزان رطوبت بهینه، آب در فضای خالی بین خاک قرار می‌گیرد و به‌عبارتی جایگزین ذرات خاک خواهد شد و در نتیجه آن میزان تراکم کاهش می‌یابد، لذا ترکیباتی که دارای رطوبت بهینه کمتر هستند نیاز به آب کمتری جهت ایجاد فرآیند ذکرشده داشته‌اند، متاکائولن مورد استفاده دارای وزن مخصوص 2/63 گرم بر سانتی‌مترمکعب و خاک مورد مطالعه دارای وزن مخصوص 2/4 گرم بر سانتی‌مترمکعب است که متاکائولن با وزن مخصوص بالاتر جایگزین خاک با وزن مخصوص پایین‌تر می‌شود و به همین دلیل حداکثر چگالی خشک خاک افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند مربوط به لختگی و انباشتگی ذرات رس به‌واسطه فرآیند تبادل کاتیونی با خاک باشد (Osinubi و همکاران، 2015). پس جهت دستیابی به نتیجه مطلوب ترجیحاً میزان متاکائولن مصرفی می‌بایست درصد بیشتری از ترکیب را تشکیل دهد. در واقع با افزودن متاکائولن به خاک، شرایط لازم برای فشردگی و پیوستگی بین ذرات خاک فراهم شده و موجب متراکم‌تر شدن ذرات خاک رس می‌شود. بنابراین با کاهش فضای خالی بین ذرات که منجر به کاهش رطوبت بهینه می‌شود، زمانی که دانه‌های خاک تحت عمل تراکم قرار می‌گیرند، پیوستگی نسبتاً مناسبی بین ذرات خاک به‌وجود می‌آید که به تراکم بهتر ذرات کمک می‌کند و در نهایت حداکثر چگالی خشک خاک افزایش می‌یابد.

5-3- بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

نتایج ارائه شده در شکل (12) نشان می‌دهد با افزودن متاکائولن به خاک، مقاومت فشاری 7 روزه، برای همه نمونه‌ها افزایش یافته است. لذا متاکائولن تأثیر بسزایی در مقاومت فشاری 7 روزه دارد. بیشترین مقدار افزایش مقاومت در نمونه‌های اصلاح شده با 8 درصد متاکائولن اتفاق افتاده است که حدود 1/6 برابر مقاومت نمونه اصلاح نشده می‌باشد.



شکل 12- روند تغییرات مقاومت فشاری 7 روزه نمونه‌ها با درصدهای مختلف متاکائولن

همان‌گونه که در جدول تحلیل شیمیایی ماده متاکائولن مشاهده شد (جدول (2)) میزان سدیم محلول در متاکائولن کم است که همان‌طور که نتیجه شد این امر سبب افزایش نسبی حدود اتربرگ شده است. همچنین مشاهده شد که متاکائولن رطوبت بهینه را کاهش اما سبب افزایش دانسیته خشک خاک گردید و همین امر موجب افزایش تراکم خاک گردید که همین امر مزید بر علت برای افزایش مقاومت محدود نشده خاک گردیده است. علاوه بر این، نتایج تصویربرداری SEM نشان داد که با افزودن متاکائولن، ساختار پراکنده خاک به یک ساختار لخته‌دار تبدیل می‌شود و در نتیجه استحکام خاک را افزایش می‌دهد. از طرفی این ماده واکنش‌پذیری خیلی بالایی با هیدروکسید کلسیم دارد و بعد از واکنش دادن ترکیبی سیمانی شکل و چسبنده ایجاد می‌کند. ظهور ترکیب سیمانی به نام ژل

هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) سبب ایجاد ساختاری منسجم در خاک شده است.

4- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تاثیر متاکائولن به‌مقدار وزنی صفر، 2، 4، 6، 8 درصد وزن خاک بر روی کاهش پتانسیل واگرایی و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک های شدیداً واگرا انجام گرفت. که با انجام آزمایشات مختلف نتایج زیر حاصل گردید:

1) در بحث اصلاح پدیده واگرایی خاک، با استفاده از نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه و کرامب مشخص گردید که خاکی که در حالت عادی شدیدا واگرا بود با افزودن 6 تا 8 درصد متاکائولن از شدت واگرایی آن بسیار کاسته شده تا جایی که نمونه رفتاری کاملاً نزدیک غیرواگرا از خود نشان داد. لذا در حالت کلی با توجه به نتایج افزودنی می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب 6 تا 8 درصد متاکائولن را می‌توان به‌عنوان درصد مناسبی جهت اصلاح کامل واگرایی برای خاک‌هایی با شدت واگرایی نسبتاً زیاد معرفی نمود.

2) افزودن متاکائولن سبب کاهش PH خاک گردیده است و زمانی که مقدار متاکائولین از 8% عبور می‌کند مقدار PH خاک روندی نزولی‌تر به خود گرفته است و در مجموع با افزایش مقدار متاکائولن خاک از حالت قلیایی به حالت خنثی تغییر رویه می‌دهد.

3) افزایش متاکائولن تا حدود 4% سبب کاهش EC خاک بوده و در ادامه زمانی که مقدار متاکائولن از 4% تجاوز می‌کند، هدایت الکتریکی خاک روند صعودی را تجربه می‌کند. هرچقدر که EC بالاتر باشد، ذرات با بار منفی در خاک بیشتر است (ذرات ارگانیک و رسی)، بنابراین کاتیون‌ها نیز در خاک بیشتر می‌شوند و کاتیون‌های مثبت باعث کاهش واگرایی و بهبود عملکرد خواهند شد.

4) متاکائولن بر اساس نتایج رطوبت بهینه ماده‌ای آب گریز می‌باشد این امر باعث می‌شود رطوبت بهینه نمونه‌هایی که حاوی متاکائولن با درصد بالا هستند، کاهش یابد که در نتیجه با کاهش رطوبت بهینه نمونه، حداکثر دانسیته خشک خاک افزایش می‌یابد که سبب افزایش تراکم خاک و در نتیجه مقاومت فشاری خاک می‌شود. پس در نتیجه میزان متاکائولن مصرفی می‌بایست بیشتر باشد تا بتوان نتایج مطلوب‌تری کسب نمود.

5) با توجه به تصاویر SEM می‌توان بیان نمود که افزودنی متاکائولن سبب منسجم‌تر شدن ساختار خاک شده و خلل و فرج را تا حد امکان پر نموده و ساختاری یک پارچه و لخته شکل به خاک داده است.

6) با افزودن متاکائولن به خاک حدود اتربرگ برای تمام نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه اصلاح نشده کاهش یافت، در بین نمونه‌ها، نمونه‌ای که در ترکیب خود 6 درصد متاکائولن دارد، دارای شاخص خمیری بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر بوده ولی نسبت به خاک واگرای اصلاح نشده حدود 14 درصد کاهش دارد. تأثیر انجام واکنش‌های شیمیایی و تبادل کاتیونی میان ترکیب خاک و متاکائولن، سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه شده است که با کاهش ضخامت لایه دوگانه، شاخص خمیری کاهش می‌یابد.

7) در بررسی مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها مشاهده گردید که متاکائولن سبب افزایش مقاومت فشاری در دوره عمل‌آوری 7 روزه می‌شود. در نمونه‌های اصلاح شده با 8 درصد متاکائولن بیشترین افزایش مقاومت اتفاق افتاده است که حدود 1/6 برابر مقاومت نمونه اصلاح نشده است. این ماده واکنش‌پذیری خیلی بالایی با هیدروکسیدکلسیم دارد و بعد از واکنش دادن ترکیبی سیمانی شکل و چسبنده ایجاد می‌کند.

5- مراجع

Al-Khalili AM, Ali AS, Al-Taie AJ, “Effect of metakaolin and silica fume on the engineering properties of expansive soil”, Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1895 (1), 12-17, IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012017

ASTM_D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), in: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM_D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM_D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM_D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM_D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, in: ASTM Internationa, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM_D6572-00, Standard Test Method for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by Crumb Test, in: ASTM Designation: D6572-00.

ASTM_D4221-99, Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer, in: ASTM Designation: D4221-99.

Attah IC, Agunwamba JC, Etim RK, Ogarekpe NM, “Modelling and predicting of CBR values of lateritic soil treated with metakaolin for road material”, ARPN Journal of Engineering and Applied Science, 2019, 14 (20), 3609-3618.

Batis G, Pantazopoulou P, Tsivilis S, Badogiannis E, “The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars”, Cement and Concrete Composites, 2005, 27 (1), 125-130.

Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, 1972, 1 (1), 584-626.

Singh B, Gahlot PK, Purohit DGM, "Dispersive Soils Characterization, Problems and Remedies", International Research Journal of Engineering and Technology, 2018, 5 (6), 2478-2484.

Sudagar A, Andrejkovicova S, Patinha C, Velosa A, McAdam A, da E, Rocha F, "A novel study on the influence of cork waste residue on metakaolin-zeolite based geopolymers", Applied Clay Science, 2018, 152, 196-210. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.013

Taherkhani H, "Investigation and comparison of compressive strength of clay soils stablized by cement, lime and CBR plus", Modares Civil Engineering Journal, 2016, 16 (4), 161-174.

Van de Graaff R, Patterson RA, "Explaining the mysteries of salinity sodicity, SAR and ESP in on-site practice", Conference: Advancing Onsite Wastewater Systems, University of Armidale, New England, 2001, September, 25-27.

Wang S, Zhang X, Zhang P, Chen Z, "Strength Performance and stabilization mechanism of fine sandy soils stabilized with cement and metakaolin", Sustainability, 2023, 15 (4), 3431. https://doi.org/10.3390/su15043431

Wianglor K, Sinthupinyo S, Piyaworapaiboon M, Chaipanich A, "Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortars", Applied Clay Science, 2017, 141, 272-279. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.025

Wu Z, Deng Y, Liu S, Liu Q, Chen Y, Zha F, "Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin", Applied Clay Science, 2016, 127, 44-51. https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.040

Xu H, Van Deventer J, "Geopolymerisation of multiple minerals", Minerals Engineering, 2002, 15 (12), 1131-1139. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00255-8

Zhang T, Yue X, Deng Y, Zhang D, Liu S, "Mechanical behaviour and micro-structure of cement-stabilised marine clay with a metakaolin agent", Construction and Building Materials, 2014, 73, 51-57. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.041

https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.041

Bellotto M, Gualtieri A, Artioli G, Clark S, Kinetic, "Study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part I: kaolinite dihydroxylation", Physics and chemistry of minerals, 1995, 22 (4), 207-217. https://doi.org/10.1007/BF00202253

Bell FG, Maud RR. "Dispersive soils: a review from a South African perspective", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1994, 27(3), 195-210. https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1994.027.P3.02

Caballero LR, Paiva MD, Fairbairn ED, Toledo Filho RD, "Thermal, mechanical and microstructural analysis of metakaolin based geopolymers", Materials Research, 2019, 22-25. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0716

Fan H, Kong L, "Empirical equation for evaluating the dispersivity of cohesive soil", Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50 (9), 989-994. https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0332

Flores-Berrones R, Lopez-Acosta NP, "Internal erosion due to water flow through earth dams and earth structures", INTECH Open Access Publisher, 2011, 283-306. https://doi.org/10.5772/24615

Ghrici MS, Kenai M, "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements", Cem, Concr Compos, 2007, 542-549. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009

ICOLD, "Dispersive Soils in Embankment Dams", ICOLD Bulletin, 1990, (77) 195-210. https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1994.027.P3.02

Kolovos KG, Asteris PG, Cotsovos DM, Badogiannis E, Tsivilis S, "Mechanical properties of soil Crete mixtures modified with metakaolin", Construction and Building Materials, 2013, 47, 1026-1036. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.008

Luo Y, Meng J, Wang D, Jiao L, Xue G, "Experimental study on mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer stabilized silty clay", Construction and Building Materials, 2022, 17, 316. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125662

Osinubi KJ, Yohanna P, Eberemu AO, "Cement modification of tropical black clay using iron ore tailing as admixture", Journal of Transportation Geotechnics, 2015, 5, 35-49. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.001

Roohbakhshan A, Kalantari B, "Stabilization of clayey soil with lime and waste stone powder", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2016, 48 (4), 429-438. https://doi.org /10.22060/CEEJ.2016.679

Salahudeen AB, Ochepo J, "Effect of bagasse ash on some engineering properties of lateritic soil", Jordan Journal of Civil Engineering, 2015, 9 (4), 468-476.

Sherard JL, Decker RS, Pyker NL, "Piping in earth dams of dispersive clays", Specially Conference on