



## Stabilization of clayey soils contaminated with lead and zinc nitrate using metakaolin geopolymer

M. Kazemzadeh, A. A. Zad\*, P. Latifi

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** One of the most important environmental problems humans face is soil pollution, which occurs in various factors and affects different soil parameters. One way to tackle this phenomenon is the stabilization of soils. This study presents the result of using metakaolin geopolymer to stabilize contaminated clay. In this study, the primary and contaminated soil without stabilizing are subject to various tests; The results of the first phase of the experiments showed that increasing concentration of contamination had a negative effect on soil parameters. The results of these experiments also showed that the most critical concentration of soil contamination was among the concentrations of 10000 ppm. Then the soil contaminated with the most critical concentration was stabilized by metakaolin geopolymer at 5, 10, and 15% weight and was re-tested and identified with various resistive in 7 days of curing time. Finally, the results achieved at this stage showed that by increasing the percentage of metakaolin geopolymer, the soil strength parameters have significantly increased, and the addition of geopolymer to contaminated soil of 10000 ppm has resulted in the stabilization of soil and improved soil properties. The results of the experiments showed that the most optimal state was the addition of 15% metakaolin geopolymer to the 10000 ppm contaminated soil, in which the liquid limit increased by 39.47%, the plastic limit increased by 51.06%, the plasticity index increased by 20.68%, the optimal moisture content increased by 19.84%, Dry Unit Weight decreased by 3.23%, unconfined compression strength increased 2.28 times and CBR increased 2.31 times, compared to the unstabilized 10000 ppm contaminated soil.

### Review History:

Received: May, 22, 2022

Revised: Aug. 18, 2022

Accepted: Sep. 04, 2022

Available Online: Sep. 11, 2022

### Keywords:

Metakaolin

Pozzolan

Soil contamination

Geopolymer

Stabilization of soil

### 1- Introduction

Due to the low capacity of recycling methods in Iran, the only way to dispose of waste in this country might be its burial in the soil. Naturally, soil components can absorb contaminants. Clay and clay minerals are among the soil compounds playing a critical role in sanitary engineering landfills.

In the present study, the soil specimens are collected from an industrial area around Tehran and tested through basic tests. The soil is then contaminated and treated with different concentrations by the contaminant, and basic tests are performed on the sample similar to the soil sample. Afterward, the soil contaminated with the most critical concentration is stabilized by metakaolin geopolymer. Finally, the stabilized soil specimen is subjected to various laboratory experiments to investigate the new properties of the soil.

### 2- Methodology

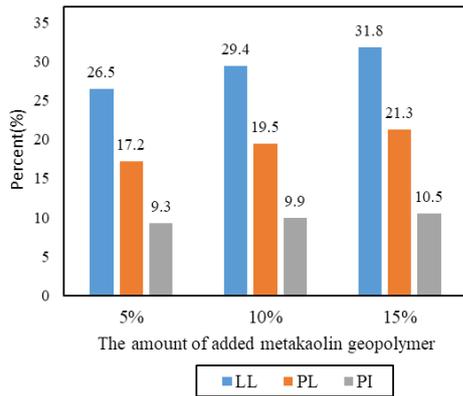
The experiments carried out in this study consist of two main stages. The first step includes the index and strength tests of the base soil. Then, the soil was contaminated with concentrations of 1000, 5000, and 10,000 ppm with a curing

time of 7 days. The investigated concentrations were selected from the research conducted by Li et al. (2015) and the reason for the above selection was that the contamination of clay with low plasticity with the above concentrations had not been studied before [1]. Contamination with heavy metals was done using lead nitrate and zinc nitrate in a ratio of 1:1. The soil was prepared with a moisture content of 35% to reach the liquid state. Afterward, lead nitrate and zinc nitrate were dissolved in water, followed by adding the solution to the soil. The above method is based on the method used in similar research conducted by (Abidoeye et al., 2018; Chu et al., 2017; Li et al., 2015) in the research field under study [1-3].

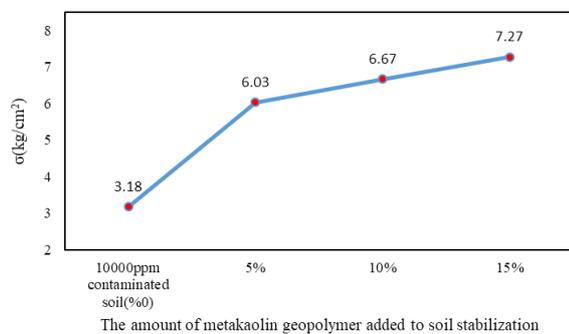
In the next stage, soil samples were contaminated with 10,000 ppm of lead and zinc in a ratio of 1:1 and a curing time of 7 days and then were dried. In this step, metakaolin as a geopolymer precursor with 5, 10, and 15 wt.% and alkaline solution (i.e., sodium hydroxide and sodium silicate) were used to stabilize the soil at  $\omega_{opt}$  and curing times of 7 days. The alkaline solution was prepared by adding sodium hydroxide at a concentration of 8 M to water. After the curing time, compaction, UCS, Atterberg, and CBR tests were carried out

\*Corresponding author's email: a.zad@iauctb.ac.ir





**Fig. 1.** Changes of Atterberg Limits of contaminated soil stabilized by metakaolin geopolymer in 7 days curing time



**Fig. 2.** The changes in maximum UCS of contaminated soil stabilized with metakaolin geopolymer cured in 7 days

on each sample.

### 3- Results and Discussion

#### 3- 1- Atterberg limits of stabilized soil

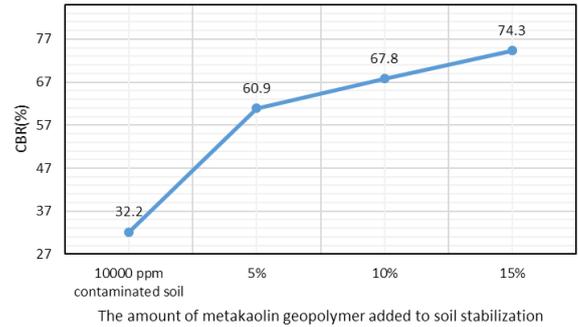
With the increase in the percentage of stabilizer, the thickness of the double layer around the clay particles increases, and the repulsion between the clay particles increases, which causes the free movement of the particles in more water, and as a result, the flow limit and the paste limit of the soil increase [1].

#### 3- 2- Unconfined Compressive Strength (UCS) of the Stabilized soil

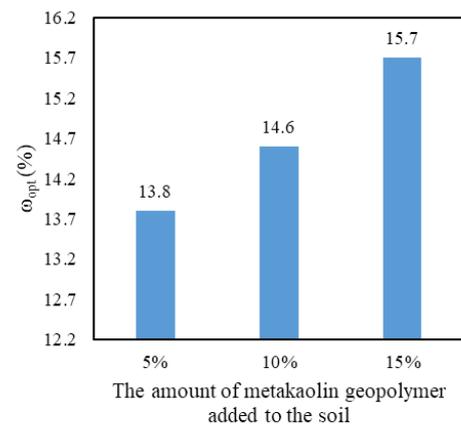
With the increasing percentage of geopolymer-metakaolin, soil cohesion increases, leading to an increase in the soil's UCS.

#### 3- 3- California Bearing Ratio (CBR) of the stabilized soil

By increasing the stabilizer's percentage, the CBR of the soil increased compared to the soil contaminated by 10,000 ppm. Increasing the metakaolin geopolymer percentage increases soil cohesion, thereby increasing its CBR.



**Fig. 3.** Diagram of the CBR variation graph of contaminated soil stabilized within 7 days in the different percentages of metakaolin geopolymer



**Fig. 4.** Diagram of changes in the optimum moisture content of contaminated soil stabilized by metakaolin geopolymer

#### 3- 4- Stabilized soil's compaction test results

According to the results from previous research by Li et al. (2015), increasing the percentage of stabilizers will increase the double layer thickness around clay particles. As a result, clay particles are placed under the same compressive energy at a further distance. Hence the dry weight of the maximum soil is reduced. As such, the particles are separated, the water retention capacity increases and the soil moisture percentage rises [1]

### 4- Conclusions

- According to the results of compaction tests on stabilized contaminated soil, with increasing the percentage of stabilizer, the soil's  $\omega_{opt}$  increased while its  $\gamma_{dmax}$  decreased.
- UCS experiments showed that the soil's UCS increases significantly with increasing the percentage of metakaolin geopolymer.
- CBR experiments showed that adding metakaolin geopolymer to contaminated soil at 10,000 ppm significantly increases its CBR.
- Based on the results of the Atterberg test on contaminated

soil stabilized with metakaolin geopolymer, LL, PL, and PI of the soil increased with increasing the stabilizer percentage.

#### References

- [1] J.-s. Li, Q. Xue, P. Wang, Z.-z. Li, Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay, *Applied Clay Science*, 105 (2015) 192-199.
- [2] Y. Chu, S. Liu, F. Wang, G. Cai, H. Bian, Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15) (2017) 13561-13575.
- [3] A.O. Abidoeye, O.D. Afolayan, I.I. Akinwumi, Effects of lead nitrate on the geotechnical properties of lateritic soils, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7) (2018) 522-530.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Kazemzadeh, A. A. Zad, P. Latifi, *Stabilization of clayey soils contaminated with lead and zinc nitrate using metakaolin geopolymer*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 961-964.

DOI: [10.22060/ceej.2022.21411.7712](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21411.7712)







## تثبیت خاک‌های رسی آلوده به نیترات سرب و روی با استفاده از ژئوپلیمر متاکائولن

می‌کائیل کاظم زاده، امیرعلی زاد\*، پوریا لطیفی

نام دانشکده و دانشگاه به صورت زیر اصلاح شود: گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

### کلمات کلیدی:

متاکائولن

پوزولان

آلودگی خاک

ژئوپلیمر

تثبیت خاک

**خلاصه:** یکی از معضلات زیست‌محیطی مهم که بشر با آن‌ها روبرو است مبحث آلودگی خاک است که در اثر عوامل مختلفی اتفاق می‌افتد و در صورت وقوع بر روی پارامترهای مختلف خاک تأثیر می‌گذارد. یکی از راه‌های مقابله با این پدیده تثبیت خاک‌ها است. این پژوهش نتیجه استفاده از ژئوپلیمر متاکائولن برای تثبیت خاک رس آلوده را ارائه می‌کند. در این پژوهش ابتدا خاک پایه و آلوده بدون تثبیت کننده مورد بررسی تحت آزمایش‌های مختلف قرار می‌گیرند؛ نتایج به دست آمده در مرحله اول آزمایش‌ها نشان داد افزایش غلظت آلاینده بر روی پارامترهای خاک اثر منفی می‌گذارد. هم‌چنین نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که بحرانی‌ترین غلظت آلودگی خاک از میان غلظت‌های مورد بررسی میزان ۱۰۰۰۰ ppm است. سپس خاک آلوده با بحرانی‌ترین غلظت به وسیله ژئوپلیمر متاکائولن به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵٪ وزنی و با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز تثبیت شده مجدداً مورد آزمایش‌های مختلف قرار گرفت. در نهایت نتایج به دست آمده در این مرحله نشان داد که با افزایش درصد ژئوپلیمر متاکائولن، پارامترهای مقاومتی خاک به طور چشمگیری افزایش یافته است و افزودن ژئوپلیمر به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm موجب تثبیت خاک و بهبود خواص خاک شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که بهینه‌ترین حالت افزودن ۱۵٪ ژئوپلیمر متاکائولن به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm بود که در آن نسبت به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm تثبیت نشده حد روانی ۳۹/۴۷٪ افزایش، حد خمیری ۵۱/۰۶٪ افزایش، نشانه خمیری ۲۰/۶۸٪ افزایش، رطوبت بهینه ۱۹/۸۴٪ افزایش، وزن مخصوص خشک ۳/۲۳٪ کاهش، مقاومت فشاری تک‌محوری ۲/۲۸ برابر افزایش و CBR ۲/۳۱ برابر افزایش یافته بود.

### ۱- مقدمه

آلاینده‌ها باشند. رس‌ها و کانی‌های رسی از جمله ترکیبات خاک بوده و نقش مهمی به عنوان اجزای سازنده لندفیل‌های مهندسی-بهداشتی ایفا می‌کنند. سیستم‌های چند لایه‌ای پی لندفیل، برای زباله‌های خانگی و صنعتی به عنوان یک سد ژئوشیمیایی-هیدرولیکی جهت عبور آلاینده‌های خطرناک، از جمله فلزات سنگین، به خوبی عمل می‌کنند. پژوهش‌های متعددی در زمینه آلودگی انواع خاک‌ها با فلزات سنگین انجام شده است. اوحدی و همکارانش (۲۰۱۷) در تحقیقات خود نشان دادند اگرچه تئوری لایه دوگانه قادر به توصیف کامل تغییر رفتار خاک‌های رسی نیست، با این وجود رابطه‌ای مؤثر در تفسیر رفتار خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و نمک‌ها و آلاینده‌های آلی می‌باشد [۱]. چو و همکارانش (۲۰۱۶) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بین دانه‌ها در خاک‌های آلوده را وابسته به چیدمان و شکل اولیه دانه‌های خاک می‌دانند و همچنین بیان می‌کنند که تغییر در زاویه اصطکاک داخلی تا حد معینی در خاک‌های آلوده به وجود می‌آید و این امر ناشی از تغییر در اندازه ذرات می‌باشد [۲]. نتایج پژوهش چو و همکارانش (۲۰۱۷) نشان می‌دهد

در جهان امروز پرداختن به مسائل زیست‌محیطی، به علت افزایش جمعیت و کاهش منابع طبیعی، روز به روز اهمیت بیشتری پیدا کرده است. آب‌های زیرزمینی بی‌شک جزء مهم‌ترین منابع طبیعی هستند و آب به عنوان مایه حیات در زندگی انسان بسیار حائز اهمیت است. آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌تواند زندگی انسان و دیگر موجودات را با خطر جدی مواجه سازد. یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی گردد، انتقال آلودگی از طریق محل‌های دفن سنتی زباله در شهرها است. دفن زباله متداول‌ترین و معمول‌ترین گزینه برای دفع مواد زائد جامد شهری حتی در کشورهای پیشرفته است. در ایران به علت ظرفیت پایین استفاده از روش‌های بازیافت، شاید بتوان گفت تنها روش دفع مواد زائد، دفن این مواد در داخل خاک است. در حالت طبیعی اجزای خاک می‌توانند جاذب

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.zad@iauctb.ac.ir



سیپولیت + ورمی کمپوست میزان حضور کادمیم در خاک را به ترتیب ۱۵/۲ تا ۴۷/۸٪ و ۱۳/۲ تا ۴۴/۹٪ کاهش می‌داد [۱۰].

در سال‌های اخیر استفاده از مواد مختلفی نظیر آهک، متاکائولن و سیمان پرتلند به منظور تثبیت خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته و پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است. ویانگلر و همکارانش (۲۰۱۷) اثر متاکائولن فعال قلیایی بر مقاومت فشاری و ساختار ذرات ملات عمل‌آوری شده در دماهای ۲۳ و ۶۰ درجه سلسیوس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن و دمای عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد و در ساختار ذرات ملات عمل‌آوری شده ژل سیلیکات و آلومینات به وضوح دیده می‌شود [۱۱]. السوئیدانی و همکارانش (۲۰۱۹) اثر پوزولان طبیعی روی خواص ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با آهک را مورد بررسی قرار دادند و نتایج این پژوهش نشان داد با افزودن پوزولان طبیعی، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) افزایش و شاخص خمیری خاک تثبیت شده با آهک کاهش می‌یابد [۱۲]. پوبا قدیر و نوید رنجبر (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از سیمان پرتلند و ژئوپلیمر پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش مولاریته فعال کننده قلیا / خاک رس مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر را بهبود می‌بخشد [۱۳]. هریچین و همکارانش (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای دیگر نیز اثر آهک و مواد پوزولانی را بر روی خاک رسی مورد مطالعه قرار دارند و یافتند افزودن آهک موجب کاهش شاخص خمیری می‌شود و باعث افزایش رطوبت بهینه خاک نیز می‌شود. همچنین افزودن آهک اثر قابل توجهی را در افزایش اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک با گذشت زمان عمل‌آوری می‌گذارد [۱۴].

در پژوهشی دیگر، خدکا و همکارانش (۲۰۲۰) دو نوع ژئوپلیمر سنتز شده از منابع آلومینوسیلیکات، خاکستر بادی و متاکائولن، را برای تعیین اثربخشی آن‌ها در تثبیت رفتار تورم/ انقباض خاک متورم شونده با سولفات بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌داد که اختلاط مواد افزودنی در طول سنتز ژئوپلیمر متاکائولن به طور قابل توجهی ماتریس ژئوپلیمر را تغییر نداد زیرا نسبت‌های مولی  $Na/Al$  و  $Si/Al$  به دست آمده در ژئوپلیمر متاکائولن اصلاح شده و غیراصلاح شده مشابه بودند [۱۵]. رونگ-رونگ و دونگ-دونگ (۲۰۲۰) خواص مکانیکی و ویژگی‌های ریزساختار خاک رس سیلتی ژئوپلیمری مبتنی بر متاکائولن را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) و  $E_{50}$  با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابند و نرخ افزایش از ۱ روز به ۷ روز

فلزات سنگین باعث افزایش مقاومت برشی و چسبندگی در خاک می‌شود و همچنین با افزایش غلظت آلاینده‌ها تغییرات بیشتری در پارامترهای مقاومتی حاصل می‌شود [۳]. جی پارک (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر ژئولیت طبیعی بر روی خاک آلوده با فلز سنگین روی پرداخت و در انتها به این نتیجه رسید که با افزایش درصد ژئولیت زاویه اصطکاک داخلی کاهش و ظرفیت جذب افزایش می‌یابد [۴]. کرکوش و الطاهر (۲۰۱۷) در پژوهشی نشان دادند که تغییر پارامترهایی از قبیل غلظت آلاینده و نوع خاک بیشترین اثر را بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک دارد و آلودگی خاک با آلاینده‌های هیدروکربنی سبب افزایش اندازه ذرات خاک و ضریب تحکیم می‌گردد [۵].

عبیدی و همکارانش (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای دیگر محققان به بررسی اثر نیترات سرب بر روی لایه‌های راهسازی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد، افزایش غلظت نیترات سرب و دوره عمل‌آوری باعث کاهش دانسیته ماکزیمم و افزایش ظرفیت باربری کالیفرنیا در نمونه‌های آلوده بود [۶]. کنتسی و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با استفاده از سه چسباننده مختلف متاکائولن (MK)، سیمان پرتلند معمولی و سیمان کلسیم آلومینات (calcium aluminat cement) برای جامدسازی/ تثبیت خاک آلوده به سرب (Pb) را مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد که سرب با کلسیم سیلیکات هیدرات در حالت استفاده از OPC مرتبط است در حالی که کانی ettringite نقش کلیدی در حفظ این آلاینده با استفاده از چسباننده سیمان کلسیم آلومیناته دارد [۷]. کنتسی و همکارانش (۲۰۲۱) در پژوهشی دیگر به بررسی سرنوشت خاک آلوده به سرب اصلاح شده با چسباننده‌های مختلف، قبل و بعد از روند تثبیت پرداختند. نتایج این پژوهش نشان دهنده این بود که پس از تثبیت با سیمان پرتلند معمولی و سیمان کلسیم آلومینات، مقداری از سرب موجود جذب اکسیدهای آهن شده است [۸]. وانگ و همکارانش (۲۰۲۱) در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر، پژوهشگران عملکرد یک چسباننده نو مبتنی بر لجن قرمز (red mud) را برای تثبیت/جامدسازی نوعی خاک رس آلوده به چندین فلز سنگین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که قدرت خاک تحت درمان با تمام اتصال دهنده‌ها، نیاز به مقاومت فشاری تک‌محوری (۳۵۰ کیلوپاسکال) ضایعات تثبیت کننده/ جامد کننده در محل‌های دفن زباله را برآورده می‌کند [۹]. پی و همکارانش (۲۰۲۱) تحقیقی به منظور بررسی اثربخشی دو ماده سیپولیت و سیپولیت و ورمی کمپوست بر روی اصلاح ساختار خاک آلوده به کادمیم (Cd) آزمایش‌های میدانی انجام دادند و نتایج این پژوهش نشان داد که تثبیت خاک با استفاده از سیپولیت و با مخلوط

جدول ۱. مشخصات آلوده کننده‌های مورد استفاده

Table 1. Properties of soil contaminators

نام مشخصات		نیتрат سرب	نیترات روی
فرمول شیمیایی	$Pb(NO_3)_2$	$Zn(NO_3)_2$	
وزن مولکولی (gr/mol)	۳۳۱/۲	۱۸۹/۳۶	
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۴/۵۳	۲/۰۶۵	

۲- مواد و مصالح

خاک استفاده شده در این تحقیق برگرفته از منطقه چهاردانگه در جنوب غربی شهر تهران بود که منطقه فوق دارای دو شهرک صنعتی است. در این شهرک صنعتی، شرکت‌ها و صنایع مختلفی قرار گرفته‌اند و خطر ورود آلاینده‌ها و پسماندهای صنعتی و مواد سمی شرکت‌های ذکر شده به خاک منطقه فوق وجود دارد.

به منظور آلوده کردن خاک با فلزات سنگین از نیترات سرب و روی با نسبت ۱:۱ در مطالعه حاضر استفاده شده است. نیترات سرب و نیترات روی در آب حل می‌شوند و بعد به صورت محلول به خاک اضافه خواهند شد. مشخصات آلوده کننده‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است. نیترات سرب یک ترکیب شیمیایی از نمک غیرآلی اسید نیتریک و سرب به فرمول شیمیایی  $Pb(NO_3)_2$  و نیترات روی یک ترکیب شیمیایی از نمک غیرآلی اسید نیتریک و روی به فرمول شیمیایی  $Zn(NO_3)_2$  می‌باشد و هر دو به شکل پودر سفید رنگ است و به راحتی در آب حل می‌شوند.

در این تحقیق از متاکائولن به عنوان پیش ماده ژئوپلیمر با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵٪ و محلول قلیایی (سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات) به اندازه درصد رطوبت بهینه خاک پایه، با زمان‌های عمل‌آوری ۷ روز به خاک آلوده شده به عنوان تثبیت کننده اضافه شد. در جدول ۲، مشخصات شیمیایی متاکائولن مورد استفاده ارائه شده است. سدیم هیدروکسید یک ترکیب معدنی است که از کاتیون سدیم و آنیون هیدروکسید تشکیل شده و به شکل جامد و پولکی شکل سفید رنگ می‌باشد. فرمول شیمیایی آن NaOH بوده و دارای جرم مولی ۳۹/۹۹۷ گرم بر مول می‌باشد و در آب انحلال پذیر است. سدیم سیلیکات به شکل مایع غلیظ بوده و به فرمول شیمیایی  $Na_2SiO_3$  می‌باشد

در مقایسه با ۷ روز به ۲۸ روز سریع‌تر است و با متاکائولن، هر دو UCS و  $E_{50}$  ابتدا افزایشی منظم و سپس کاهش را نشان می‌دهند [۱۶]. عثمان و عباس (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای دیگر درصدهای مختلفی از ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن که شامل ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴٪ بود را به منظور تثبیت خاک استفاده کردند؛ نتایج این بررسی نشان داد که مقاومت فشاری محصور نشده خاک نرم با افزودن متاکائولن به ویژه با ۱۰ و ۱۲٪ متاکائولن افزایش یافت [۱۷]. وانگ و همکارانش (۲۰۲۱) در پژوهشی خاک رسی تثبیت شده توسط بایندر ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن را با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌داد که مقاومت فشاری محدود نشده خاک تثبیت شده ژئوپلیمری با درصدهای مختلف متاکائولن و فعال کننده قلیایی نشان می‌دهد که نسبت اختلاط بهینه و اقتصادی بایندر ژئوپلیمر در خاک رسی حدود ۱۲٪ است و نسبت ایده آل متاکائولین و فعال کننده قلیایی در ژئوپلیمر ۲:۱ است [۱۸]. لو و همکارانش (۲۰۲۲) دیگر تأثیر مدول محتوای متاکائولن و غلظت فعال کننده قلیایی بر خواص مکانیکی خاک رس سیلتی تثبیت شده با ژئوپلیمر و متاکائولن را مورد بحث و بررسی‌های آزمایشگاهی مختلف قرار دادند و نتایج نشان این تحقیق نشان داد که وقتی مدول فعال کننده قلیایی ۱/۳، غلظت فعال کننده قلیایی ۴۰٪ و محتوای متاکائولین ۱/۲ برابر فعال کننده قلیایی است، مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) به نسبت مخلوط بهینه و اپتیمال می‌رسد [۱۹]. در پژوهش حاضر ابتدا از یک منطقه صنعتی در اطراف شهر تهران خاک مورد نظر برای آزمایش‌ها جمع‌آوری گشت سپس بر روی خاک جمع‌آوری شده آزمایش‌های پایه انجام شد؛ پس از آن خاک به وسیله آلوده کننده با غلظت‌های مختلف آلوده و عمل‌آوری شد و بر روی نمونه نیز مشابه نمونه خاک پایه آزمایش‌های پایه انجام گرفت. در نهایت خاک آلوده با بحرانی‌ترین غلظت به وسیله ژئوپلیمر متاکائولن مورد تثبیت قرار گرفته و بر روی نمونه خاک تثبیت شده نیز آزمایش‌های مختلف به منظور بررسی خواص جدید خاک انجام گرفته است. نوآوری این پژوهش، بررسی تاثیر افزودن ژئوپلیمر متاکائولن با درصدهای مختلف به خاک ریزدانه از نوع CL که با نیترات سرب و نیترات روی آلوده شده و در مدت زمان ۷ روز عمل‌آوری شده است، می‌باشد. در پژوهش‌های گذشته، از ژئوپلیمر (فعال کننده قلیایی) و متاکائولن به منظور تثبیت خاک‌های مختلفی استفاده شده است اما در زمینه تثبیت خاک‌های رسی با پلاستیسیته کم و آلوده به آلوده کننده‌های مختلف با استفاده از ژئوپلیمر متاکائولن پژوهشی انجام نشده است. به همین منظور در تحقیق حاضر، از ژئوپلیمر متاکائولن به منظور تثبیت خاک رسی آلوده استفاده شد.

### جدول ۲. مشخصات شیمیایی متاکائولن

Table 2. Chemical properties of metakaolin

فرمول شیمیایی	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	سایر	افت ناشی از احتراق (LOI)
درصد (%)	۴۸	۴۱	۱/۳	۳/۱	۱/۸	۰/۲ + ۰/۱۶	۰/۲	۴/۲۴	۱/۰

### ۳- روش و آزمایش‌های انجام شده

ابتدا با استفاده از پمپ ویژه و بیژن خاکی بر روی خاک نمونه اولیه در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد آزمایش توده ویژه بر اساس استاندارد ASTM(D-824) انجام شد و توده ویژه (چگالی) خاک پایه ۲/۷۶ به دست آمد.

پس از آزمایش توده ویژه و بیژن خاکی بر روی خاک آزمایش دانه‌بندی به روش الک بر اساس استاندارد ASTM(D-421) انجام شد و بر اساس نتایج به دست آمده درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ برابر با ۹۴/۶٪ می‌باشد بنابراین بیش از ۵۰٪ خاک از الک ۲۰۰ عبور کرده و با توجه به طبقه‌بندی خاک به روش USCS خاک مورد نظر ریزدانه می‌باشد. سپس آزمایش هیدرومتری بر اساس استاندارد ASTM(D-422) بر روی خاک پایه انجام گرفت و در نهایت، با توجه به نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری نمونه خاک دارای ۵/۴٪ ماسه و ۵۱٪ رس و ۴۴/۷٪ سیلت بود. نتایج آزمایش اتربرگ انجام گرفته بر اساس استاندارد ASTM(D-4318) نشان داد که خاک پایه از نوع CL (رس با خاصیت خمیری کم) است. جزئیات بیشتر آزمایش فوق در قسمت ۴-۱-۱ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر آزمایش‌ها شامل دو مرحله اصلی است. مرحله اول به بررسی آزمایش‌های شناسایی و مقاومتی خاک پایه و خاک آلوده شامل آزمایش‌های شناسایی و مقاومتی دانه‌بندی، هیدرومتری، اتربرگ، تراکم، تک‌محوری و CBR بر روی خاک پایه بر اساس شماره استانداردهای ارائه شده در جدول ۳ انجام گرفت؛ سپس خاک با غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز، آلوده شد. غلظت‌های مورد بررسی انتخاب شده از پژوهش انجام گرفته توسط جیانگ شان-لی و همکارانش (۲۰۱۵) بوده و دلیل انتخاب فوق این بود که آلوده کردن خاک رس با پلاستیسیته کم با غلظت‌های فوق قبلاً مورد مطالعه قرار نگرفته بود [۲۰]. در پژوهش حاضر، آلودگی با فلزات سنگین نیتрат سرب و نیترات روی با نسبت ۱:۱ بوده است. خاک با درصد رطوبت ۳۵٪ آماده‌سازی شد،

به صورتی که خاک کاملاً در حالت مایع و روان باشد. سپس نیترات سرب و نیترات روی در آب حل شده و بعد محلول به خاک اضافه شد. روش فوق، بر اساس روش مورد استفاده در پژوهش‌های مشابه انجام گرفته در زمینه پژوهشی مورد مطالعه است [۲۰، ۶ و ۳]. نمونه‌ها را در داخل کیسه‌های پلاستیکی درب دار (زیب کیف) قرار داده شد، به صورتی که داخل هر کیسه ۱ کیلوگرم از نمونه خاک قرار گیرد. بعد از گذشت مدت زمان عمل‌آوری خاک را خشک کرده و از نمونه‌های خاک آلوده شده آزمایش‌های اتربرگ و تراکم گرفته شد. آزمایش‌های تک‌محوری و CBR با درصد رطوبت بهینه خاک پایه انجام گرفت. بعد از انجام آزمایش‌ها غلظتی که ضعیف‌ترین نتایج را بر اساس آزمایش‌های تک‌محوری و CBR به دست آورده بود به عنوان نمونه منتخب برای مرحله بعدی انتخاب شد. در این بخش غلظت منتخب نمونه‌های با ۱۰۰۰۰ ppm آلودگی می‌باشد.

### جدول ۳. آزمایش‌های انجام شده و شماره استاندارد آزمایش‌ها

Table 3. Conducted tests and the standard test number

شماره استاندارد	نام آزمایش
ASTM (D-421)	دانه‌بندی روش الک
ASTM (D-422)	دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتری
ASTM (D-854)	توده ویژه یا G <sub>s</sub>
ASTM (D-1557)	تراکم پروکتور اصلاح شده
ASTM (D-2166)	تک‌محوری
ASTM (D-4318)	حد روانی
ASTM (D-4318)	حد خمیری

جدول ۴. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده

Table 4. obtained results from conducted tests

LL (%)	PL (%)	PI (%)	$\gamma_{d,max}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\omega_{opt}$ (%)	CBR (%)	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	پارامترهای خاک نوع خاک
۳۲/۵	۱۶/۷	۱۵/۸	۱/۷۷۳	۱۵/۳	۴۰/۸	۴/۱۵	خاک پایه
۲۹/۴	۱۵/۸	۱۳/۶	۱/۷۸۵	۱۴/۸	۳۸/۱	۳/۸۳	خاک آلوده ۱۰۰۰ ppm عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز
۲۵/۶	۱۵/۲	۱۰/۴	۱/۸۱۵	۱۴/۱	۳۶/۷	۳/۶۸	خاک آلوده ۵۰۰۰ ppm در مدت زمان ۷ روز
۲۲/۸	۱۴/۱	۸/۷	۱/۸۵۶	۱۳/۱	۳۲/۲	۳/۱۸	خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm در مدت زمان ۷ روز
۲۶/۵	۱۷/۲	۹/۳	۱/۸۲۷	۱۳/۸	۶۰/۹	۶/۰۳	خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm تثبیت شده با ۵٪ وزنی متاکائولن و عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز
۲۹/۴	۱۹/۵	۹/۹	۱/۸۱۳	۱۴/۶	۶۷/۸	۶/۶۷	خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm تثبیت شده با ۱۰٪ وزنی متاکائولن و عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز
۳۱/۸	۲۱/۳	۱۰/۵	۱/۷۹۶	۱۵/۷	۷۴/۳۸	۷/۲۷	خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm تثبیت شده با ۱۵٪ وزنی متاکائولن و عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز

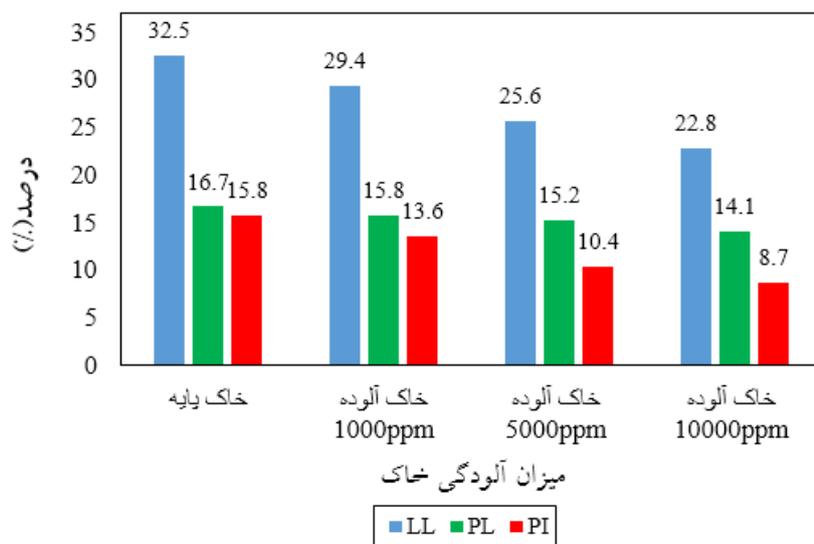
۴- نتایج آزمایش‌ها

۴-۱-۱- حدود اتربرگ خاک پایه و خاک آلوده

آزمایش حد روانی بر روی ۲۵۰ گرم خاک خشک عبوری از الک ۴۰ انجام شد با توجه به نتایج این آزمایش حد روانی خاک پایه برابر با  $LL=32/5$  بود. سپس آزمایش حد خمیری روی خاک پایه انجام شد و نتایج این آزمایش نشان داد که حد خمیری خاک پایه برابر  $PL=16/7$  است. بر اساس رابطه  $PI=LL-PL$  نشانه خمیری خاک پایه برابر  $PI=15/8$  است. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش اتربرگ خاک پایه از نوع CL (رس با خاصیت خمیری کم) است.

سپس آزمایش اتربرگ بر روی خاک خشک عبوری از الک ۴۰ و آلوده به نیترات سرب و نیترات روی با سه غلظت ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm و با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز انجام شد. نتایج این آزمایش در شکل ۱ شرح داده شده است. پس از آن مقایسه نتایج میان آزمایش حدود اتربرگ انجام گرفته بر روی خاک پایه و خاک آلوده به نیترات سرب و روی که در شکل ۱ نمایش داده شده نشان می‌دهد که حد روانی در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. همچنین، حد خمیری خاک آلوده در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm به خاک پایه کاهش یافته است. در نهایت، نشانه خمیری خاک آلوده در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰

در مرحله بعدی تحقیق نمونه خاک با ۱۰۰۰۰ ppm سرب و روی با نسبت ۱:۱ و با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز آلوده شد و پس از مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌های خاک خشک شدند. در ادامه این مرحله متاکائولن به عنوان پیش ماده ژئوپلیمر با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵٪ و محلول قلیایی (سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات) به اندازه درصد رطوبت بهینه خاک پایه (۱۵/۳٪) بر اساس روش‌های مورد استفاده در مطالعات گذشته با زمان عمل‌آوری ۷ روز به خاک آلوده شده به عنوان تثبیت کننده اضافه شد [۲۱] و [۶]. بر اساس مطالعات گذشته تثبیت خاک با متاکائولن در مدت زمان ۷ روزه موجب بهبود بیشتر پارامترهای مورد بررسی خاک نسبت به مدت زمان ۱ و ۳ روز بود بنابراین مدت زمان ۷ روز برای عمل‌آوری نمونه‌ها انتخاب شد [۱۶]. نحوه تولید محلول قلیایی به این صورت است که سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار به آب اضافه می‌شود؛ از آنجایی که این واکنش گرمازا است، ۱۶ الی ۲۴ ساعت به آن زمان داده شد تا محلول شفاف شده و به دمای محیط برسد. سپس به نسبت ۱:۱ با سدیم سیلیکات ترکیب شد. نمونه‌ها در داخل کیسه‌های پلاستیکی درب دار نگهداری شد. بعد از گذشت مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، از هر نمونه تست‌های تراکم، تک‌محوری، اتربرگ و CBR گرفته شد. نتایج به دست آمده از کلیه آزمایش‌ها انجام گرفته بر روی نمونه خاک پایه، آلوده و تثبیت شده در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱. تغییرات حدود اتربرگ خاک پایه و خاک آلوده

Fig. 1. Changes of Atterberg Limits of base soil & contaminated soil

در درصدهای ۵ و ۱۰ و ۱۵٪ نسبت به خاک آلوده پایه افزایش یافته است. به طور کلی با افزایش درصد تثبیت کننده، ضخامت لایه دوگانه در اطراف ذرات رسی افزایش می‌یابد و همین طور دافعه بین ذرات رسی افزایش می‌یابد که باعث حرکت آزادانه ذرات در مقدار آب بیشتری می‌شود و در نتیجه حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد [۲۰].

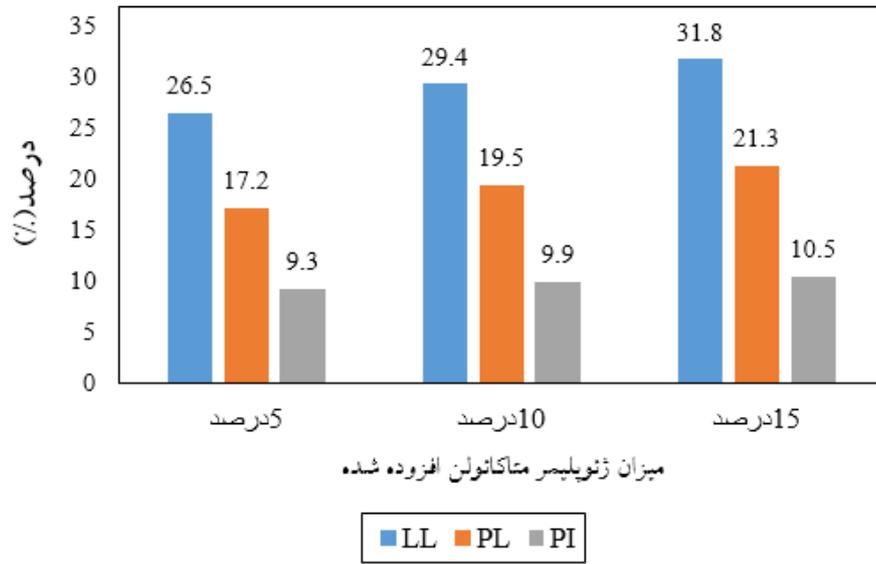
#### ۴-۲-۱- تراکم خاک پایه و خاک آلوده

آزمایش تراکم بر روی ۵ کیلوگرم از خاک خشک عبوری از الک شماره ۴، با ۵ درصد رطوبت مختلف (۱۰/۲، ۱۳/۱، ۱۵/۳، ۲۰/۴ و ۲۲/۷٪) انجام گرفت. پس از انجام آزمایش تراکم درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک پایه محاسبه شد. آزمایش تراکم به روش اصلاح شده انجام شده است. با استناد به نتایج به دست آمده درصد رطوبت بهینه خاک پایه برابر ۱۵/۳٪ و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک برابر ۱/۷۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. پس از مدت زمان عمل‌آوری خاک به مدت ۷ روز، بر روی خاک آلوده به غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm آزمایش تراکم انجام گرفت. منحنی تراکم به دست آمده از آزمایش انجام شده بر روی خاک پایه و خاک آلوده با غلظت‌های مختلف که در مدت زمان ۷ روز عمل‌آوری شده در شکل ۳ نشان داده شده است. مقایسه میان نتایج به دست آمده از خاک پایه و خاک آلوده عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز که در

و ۱۰۰۰۰ ppm نسبت به خاک پایه کاهش یافته بود. از مقایسه نتایج به دست آمده آزمایش اتربرگ بر روی خاک پایه و خاک آلوده این مسئله استنباط شد که بحرانی‌ترین حالت بین این سه غلظت خاک آلوده مورد بررسی غلظت ۱۰۰۰۰ ppm است. یکی از ویژگی‌های معمول خاک‌های رسی، ارتباط مستقیم بین تغییرات حد روانی با ضخامت لایه دوگانه پراکنش اطراف ذره‌های رسی است. افزایش غلظت آلاینده، دافعه بین ذرات رس را کاهش می‌دهد که باعث حرکت آزادانه ذرات در مقدار آب کمتری می‌شود و در نتیجه حد روانی و حد خمیری کاهش می‌یابد [۲۰].

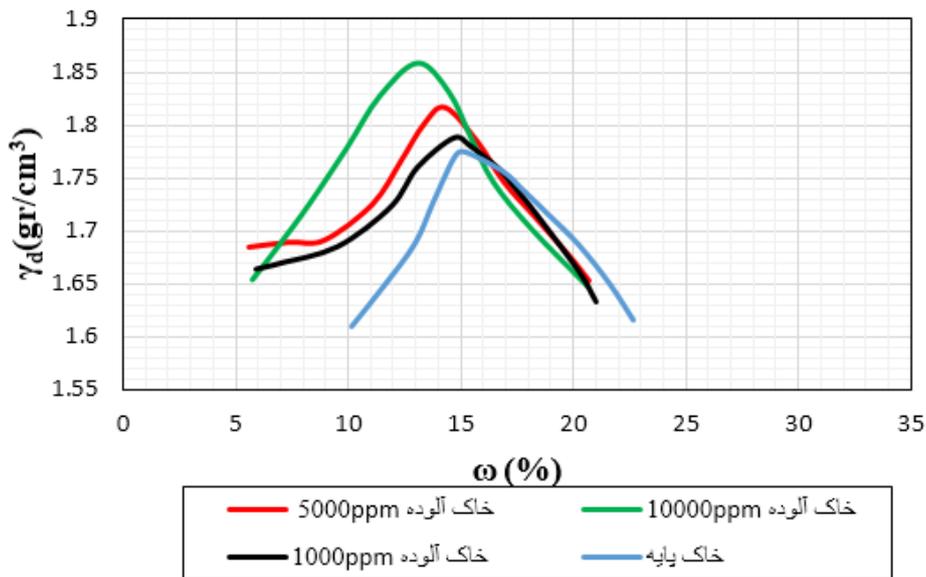
#### ۴-۱-۲- حدود اتربرگ خاک آلوده تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن

پس از آلوده شدن خاک به نیترات سرب و نیترات روی به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ خاک آلوده با ژئوپلیمر متاکائولن به درصد ۵، ۱۰ و ۱۵٪ وزنی با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز تثبیت شده سپس آزمایش اتربرگ بر روی نمونه‌های خاک انجام شد. نتایج این آزمایش در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که برای خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن و عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز حد روانی خاک در درصدهای ۵ و ۱۰ و ۱۵٪ نسبت به خاک آلوده پایه افزایش یافته است. مجدداً، حد خمیری خاک در درصدهای ۵ و ۱۰ و ۱۵٪ ژئوپلیمر متاکائولن نسبت به خاک آلوده پایه افزایش یافته است. در نهایت، نشانه خمیری خاک



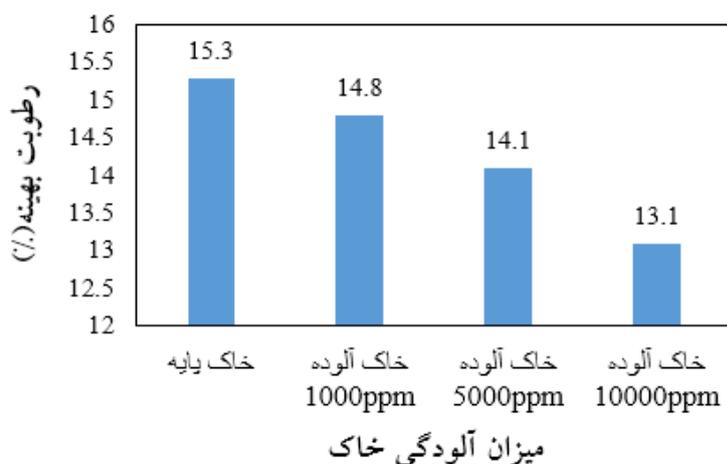
شکل ۲. تغییرات حدود اتبرگ خاک آلوده تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه

Fig. 2. Changes of Atterberg Limits of contaminated soil stabilized by metakaolin geopolymer in 7 days curing time



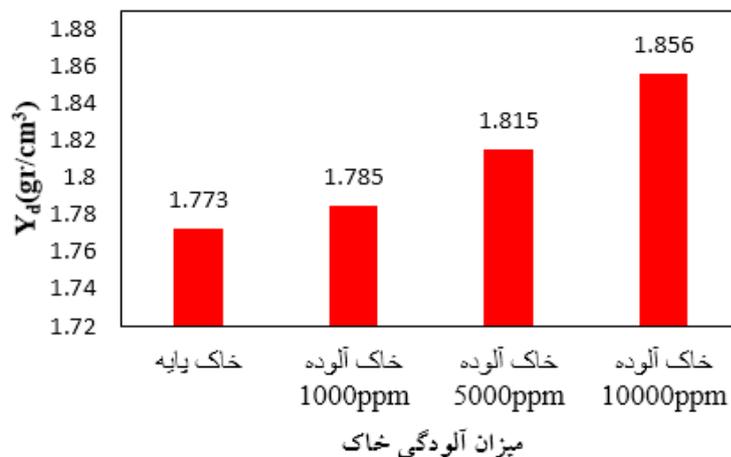
شکل ۳. منحنی تراکم خاک پایه

Fig.3. The base soil's compaction curve



شکل ۴. نمودار تغییرات درصد رطوبت بهینه خاک آلوده و مقایسه آن با خاک پایه

Fig. 4. Diagram of changes in the optimum moisture content of the contaminated soil and comparison of it to the base soil

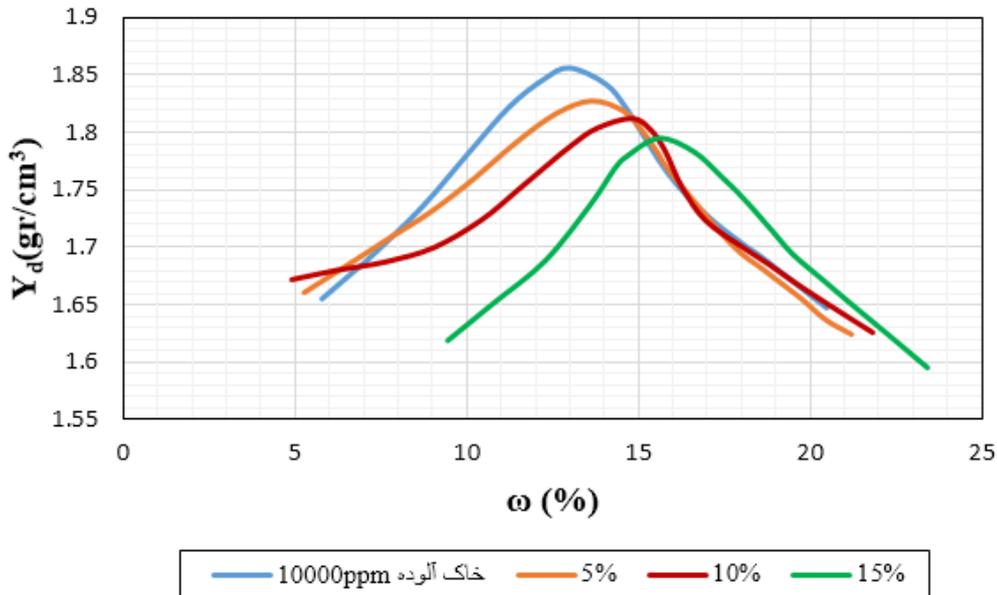


شکل ۵. نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک خاک آلوده و مقایسه آن با خاک پایه

Fig. 5. Diagram of changes in the dry unit weight of the contaminated soil and comparison of it to the base soil

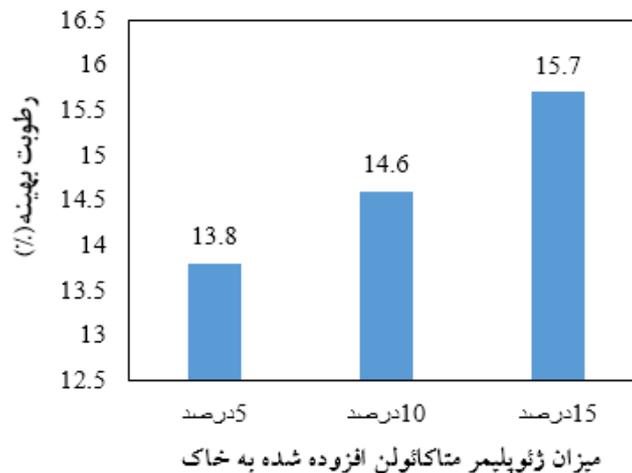
بین این سه غلظت، خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm بود. این امر ممکن است به دلیل کاهش ضخامت لایه دوگانه پراکنش اطراف ذره‌های رسی باشد. این کاهش ضخامت لایه دوگانه باعث نزدیک‌تر شدن ذرات تحت انرژی تراکم یکسان شده و از این رو وزن مخصوص حداکثر خشک خاک افزایش می‌یابد. به تبع آن ذرات به هم نزدیک‌تر شده و ظرفیت نگهداری آب کمتر شده و درصد رطوبت بهینه خاک کاهش می‌یابد [۲۰].

شکل ۴ ارائه شده است نشان داد که با افزایش غلظت آلاینده درصد رطوبت بهینه خاک در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm به ترتیب ۳/۲۶٪، ۷/۸۴٪ و ۱۴/۳۷٪ نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. هم‌چنین، نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت آلاینده وزن مخصوص خشک حداکثر خاک در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm به ترتیب ۰/۶۷٪، ۲/۳۶٪ و ۴/۶۸٪ نسبت به خاک پایه افزایش می‌یابد. بحرانی‌ترین حالت



شکل ۶. نمودار تغییرات درصد رطوبت در برابر وزن مخصوص خشک خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن با درصد‌های مختلف

Fig. 6. Diagram of changes in moisture content against the dry soil unit weight of 10,000 ppm contaminated soil and stabilized soil with different percentages of metakaolin geopolymer

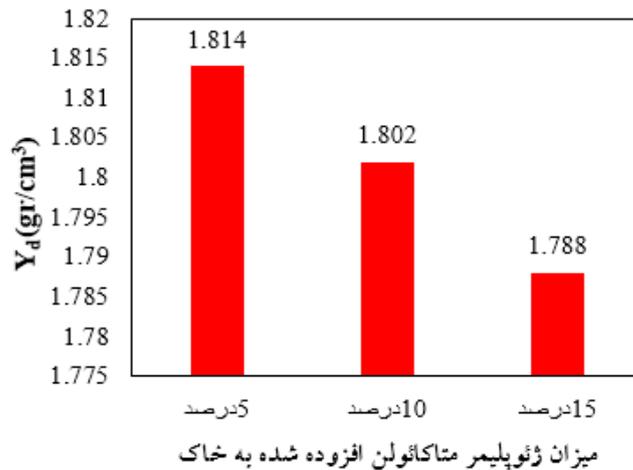


شکل ۷. نمودار تغییرات درصد رطوبت بهینه خاک آلوده تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن

Fig.7. Diagram of changes in the optimum moisture content of contaminated soil stabilized by metakaolin geopolymer

فوق در شکل ۶ ارائه شده است. تفسیر نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم انجام شده بر روی خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن و عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز که در شکل ۷ ارائه شده است نشان می‌دهد که با افزایش درصد متاکائولن درصد رطوبت بهینه خاک در درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵٪ به ترتیب ۵/۳۴٪، ۱۱/۴۵٪ و ۱۹/۸۴٪ نسبت به خاک آلوده ppm

۲-۲-۴ اثر میزان ژئوپلیمر متاکائولن بر تراکم خاک آلوده پس از آلوده شدن خاک به نیترات سرب و نیترات روی به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ با مدت زمان ۷ روز، خاک آلوده با ژئوپلیمر متاکائولن به میزان ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز تثبیت شده سپس آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های خاک انجام شد. منحنی تراکم به دست آمده از آزمایش



شکل ۸. نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر خاک آلوده تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن

Fig. 8. Diagram of the maximum dry unit weight of the contaminated soil stabilized by metakaolin geopolymer

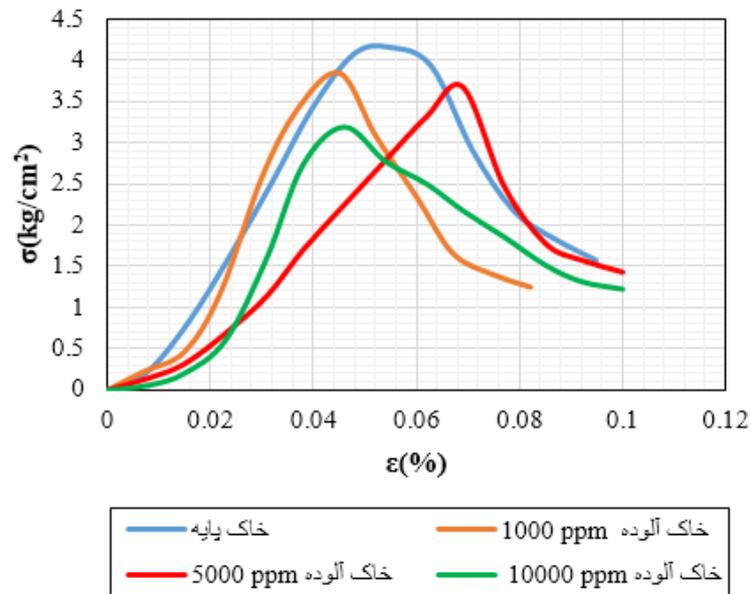
تک‌محوری انجام شده بر روی خاک پایه و خاک آلوده در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۰ با افزایش غلظت آلاینده مقاومت فشاری حداکثر خاک در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm به ترتیب ۷/۷۱٪، ۱۱/۳۲٪ و ۲۳/۳۷٪ نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. خاک آلوده به غلظت ۱۰۰۰۰ بحرانی‌ترین حالت نسبت به غلظت‌های دیگر بود. با حضور نیترات سرب و نیترات روی در خاک رس، واکنش‌های تبادل یونی بین کانی‌های رسی و سرب و روی اتفاق می‌افتد، در اثر این واکنش‌ها، با افزایش غلظت آلاینده چسبندگی خاک کاهش یافته و حداکثر مقاومت فشاری خاک کاهش می‌یابد.

۴-۳-۲- اثر افزودن ژئوپلیمر متاکائولن بر مقاومت تک‌محوری خاک آلوده بعد از آلوده شدن خاک به نیترات سرب و نیترات روی به غلظت ۱۰۰۰۰ ppm با مدت زمان ۷ روز، خاک آلوده با ژئوپلیمر متاکائولن به میزان ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز و با درصد رطوبت بهینه خاک پایه تثبیت شده سپس آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه‌های خاک انجام شد. منحنی تنش-کرنش خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm و خاک آلوده تثبیت شده با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر متاکائولن در شکل ۱۱ ارائه شده است. از شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه حداکثر مقاومت فشاری خاک در درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵٪ ژئوپلیمر متاکائولن به ترتیب ۱/۸۹، ۲/۱ و ۲/۲۸ برابر نسبت به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm

۱۰۰۰۰ افزایش یافته است. هم‌چنین، بر اساس نتایج شکل ۸ با افزایش درصد تثبیت کننده وزن مخصوص خشک حداکثر خاک در درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵٪ به ترتیب ۱/۵۶٪، ۲/۳۱٪ و ۳/۲۳٪ نسبت به خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ کاهش یافته است. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم، با افزایش درصد تثبیت کننده درصد رطوبت بهینه خاک افزایش یافته در حالی که وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش یافته است. بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش‌های قبلی، افزایش درصد تثبیت کننده باعث افزایش ضخامت لایه دوگانه در اطراف ذرات رسی می‌شود. در نتیجه ذرات رسی تحت انرژی تراکم یکسان در فاصله دورتری از هم قرار می‌گیرند، از این رو وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش می‌یابد. همین‌طور ذرات از هم فاصله گرفته و ظرفیت نگهداری آب بیشتر شده و درصد رطوبت بهینه خاک افزایش می‌یابد [۲۰].

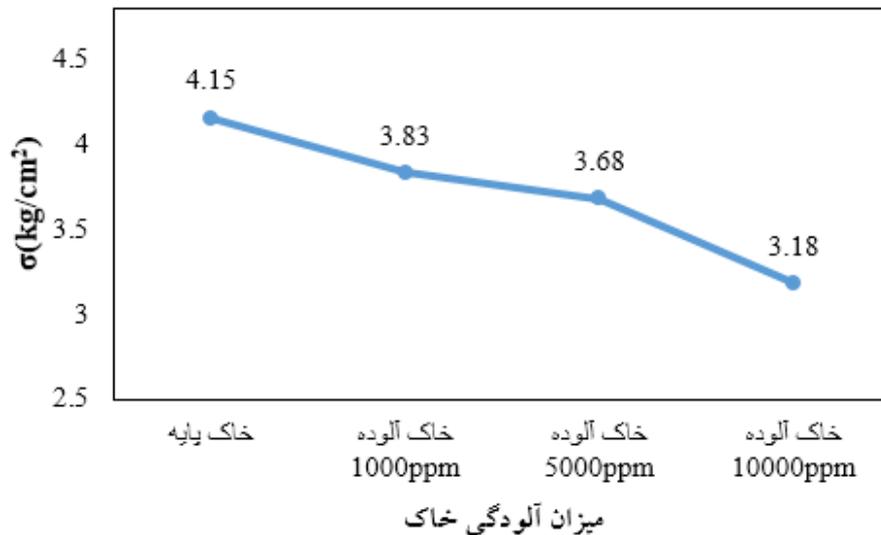
#### ۴-۳-۱- مقاومت تک‌محوری خاک پایه و خاک آلوده

آزمایش تک‌محوری بر روی ۱ kg خاک خشک عبوری از الک ۴ با درصد رطوبت بهینه خاک انجام گرفت و بر اساس نتایج به دست آمده، حداکثر مقاومت فشاری خاک پایه برابر با ۴/۱۵ kg/cm<sup>۲</sup> بود. سپس، آزمایش تک‌محوری بر روی خاک آلوده به سرب و روی به غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز و با درصد رطوبت بهینه خاک پایه انجام شد. منحنی تنش-کرنش خروجی از آزمایش



شکل ۹. منحنی تنش-کرنش خاک پایه و خاک آلوده در غلظت‌های مختلف

Fig. 9. The strain-stress curve of the base soil and contaminated soil at different concentrations

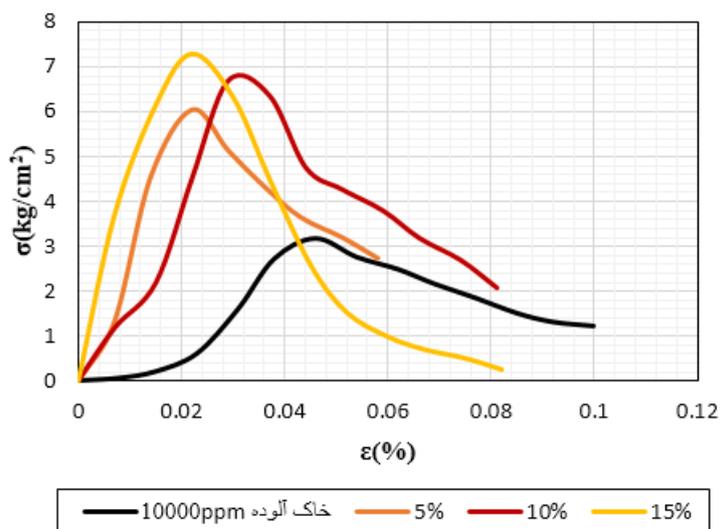


شکل ۱۰. نمودار تغییرات مقاومت فشاری حداکثر خاک آلوده و مقایسه آن با خاک پایه

Fig. 10. Diagram of changes in the maximum compressive strength of the contaminated soil and comparison of it to the contaminated soils

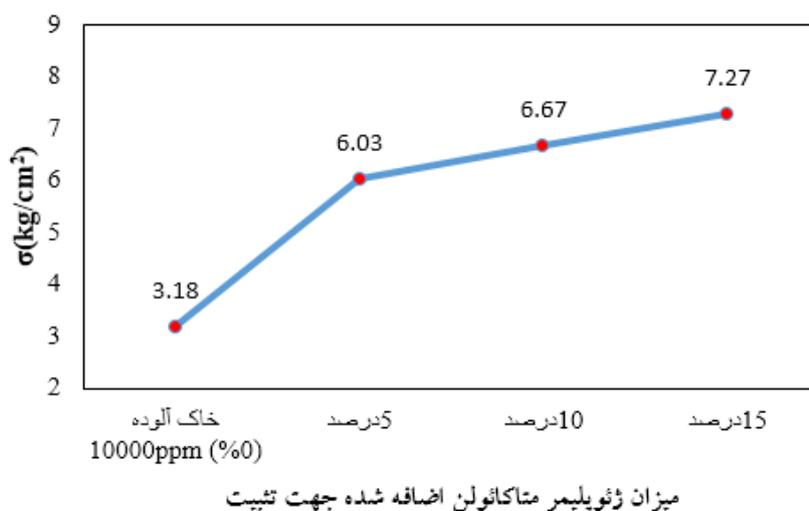
تک‌محوری، نمونه‌های خاک پایه و خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm پس از رسیدن به مقاومت نهایی قادر به تحمل بار هستند ولی در نمونه‌های خاک تثبیت شده پس از رسیدن به مقاومت نهایی نرخ کاهش مقاومت در آن‌ها نسبت به خاک پایه و خاک آلوده با شدت بیشتری بود.

رشد داشته است. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش، حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش درصد تثبیت کننده به طور چشمگیری افزایش یافته است ولی در میزان کرنش‌های کمتر نسبت به خاک پایه و خاک آلوده اتفاق افتاده است. همچنین با توجه به منحنی‌های



شکل ۱۱. منحنی تنش-کرنش خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن در درصدهای مختلف

Fig. 11. The stress-strain curve of 10000 ppm contaminated soil & stabilized soil by metakaolin geopolymer in different percentages



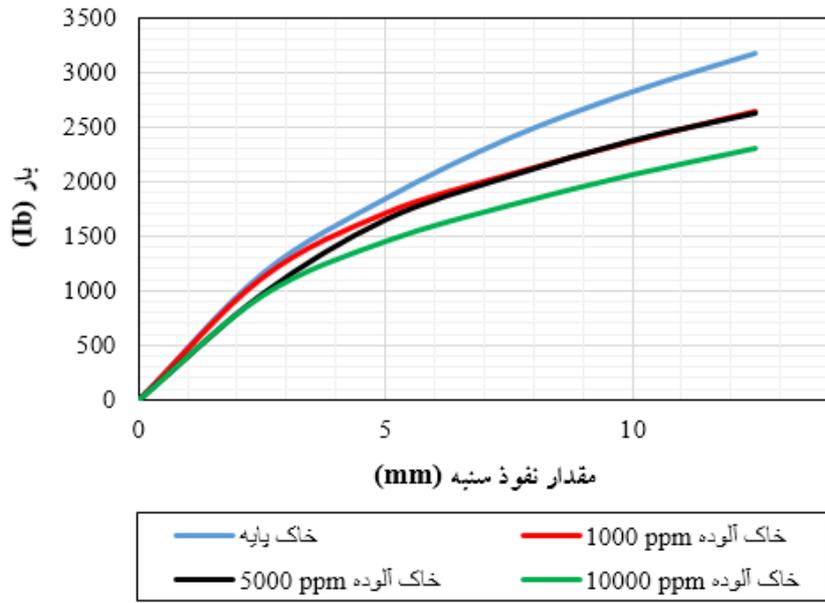
شکل ۱۲. نمودار تغییرات حداکثر مقاومت فشاری خاک آلوده تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن

Fig. 12. Diagram of the maximum compressive strength of the stabilized contaminated soil stabilized with metakaolin geopolymer

روز به اندازه درصد رطوبت بهینه خاک پایه انجام شد. بر همین اساس مقادیر حاصله از آزمایش CBR خاک آلوده به نیترات سرب و روی در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm با مدت زمان ۷ روز منحنی میزان نفوذ سنبه در برابر بار در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ با افزایش غلظت آلاینده مقدار ظرفیت باربری خاک در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm به ترتیب ۶۱/۶٪، ۱۰/۰۴٪ و ۲۱/۰۷٪ نسبت

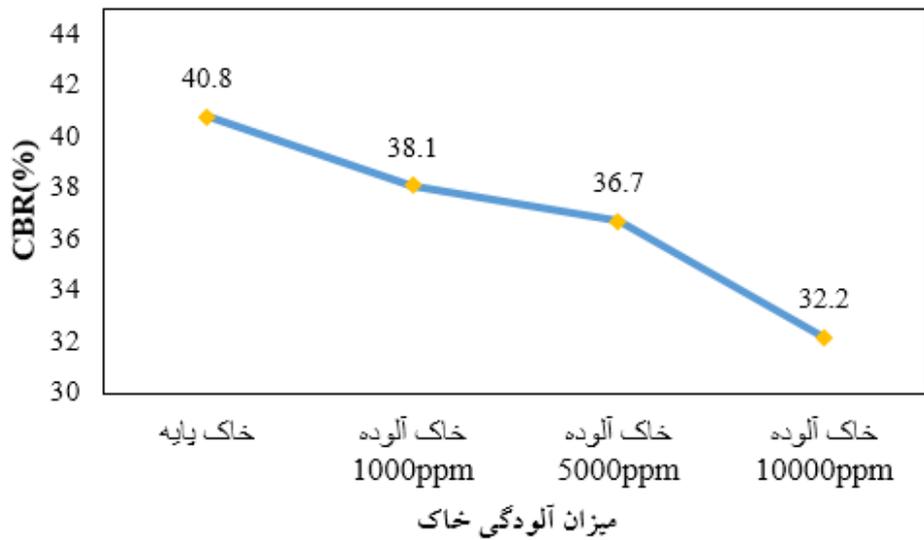
۴-۱-۴ CBR خاک پایه و خاک آلوده

آزمایش CBR بر روی ۵ کیلوگرم خاک خشک عبوری از الک ۴ با درصد رطوبت بهینه خاک انجام گرفت و با توجه به نتیجه به دست آمده از آزمایش فوق و همچنین مقادیر بار استاندارد در آزمایش CBR، مقدار CBR خاک پایه برابر ۴۰/۸٪ به دست آمده است. سپس آزمایش CBR بر روی خاک آلوده در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm با مدت زمان عمل‌آوری ۷



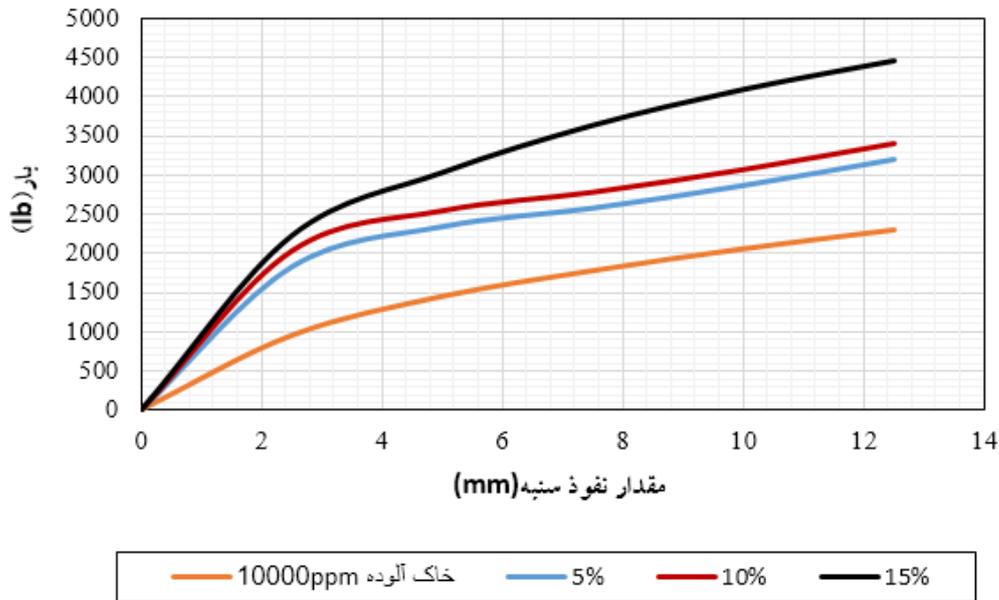
شکل ۱۳. منحنی CBR خاک پایه و خاک آلوده با غلظت‌های مختلف

Fig. 13. CBR curve of the base soil and contaminated soil with different concentrations



شکل ۱۴. نمودار تغییرات CBR خاک آلوده در غلظت‌های مختلف و مقایسه آن به خاک پایه

Fig. 14. Diagram of the CBR variation graph in different concentrations and comparison of it to base soil



شکل ۱۵. منحنی CBR خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm و خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر متاکائولن ۱.

Fig. 15. The CBR curve of 10000 ppm contaminated soil & stabilized soil with different percentages of metakaolin geopolymer

با افزایش درصد ژئوپلیمر متاکائولن در درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵٪ به ترتیب ۱/۸۹، ۲/۱ و ۲/۳۱ برابر نسبت به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm افزایش یافته است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر مبتنی بر تحلیل‌های آزمایشگاهی بوده و به منظور بررسی اثر ژئوپلیمر متاکائولن به عنوان تثبیت کننده در بهبود خواص مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک رس آلوده به سرب و روی است. آزمایش‌ها به منظور یافتن مقدار و مدت زمان عمل‌آوری بهینه ژئوپلیمر متاکائولن برای بهبود خواص مقاومتی خاک آلوده انجام شد. بهبود خواص مقاومتی خاک به معنای افزایش چسبندگی خاک و به تبع آن افزایش ظرفیت باربری خاک و مقاومت فشاری خاک می‌باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان موارد ذیل را بیان کرد:

با توجه به نتایج آزمایش اتربرگ بر روی خاک آلوده تثبیت شده با ژئوپلیمر متاکائولن، با افزایش درصد تثبیت کننده از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری خاک به طور کلی افزایش یافته است.

به خاک پایه کاهش پیدا کرده به طوری که بحرانی‌ترین حالت بین ۳ غلظت مورد بررسی، خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm بود. وجود نیترات سرب و روی در خاک باعث به وجود آمدن فعالیت‌های شیمیایی و واکنش‌های تبادل یونی بین کانی‌های رسی و سرب و روی می‌شود. صفحات کانی‌های رسی که دارای بار منفی هستند کاتیون‌های موجود در محیط را به طرف خود جذب می‌کنند، با افزایش غلظت آلاینده چسبندگی خاک کاهش یافته و ظرفیت باربری خاک کاهش می‌یابد.

#### ۴-۲-۴ اثر افزودن ژئوپلیمر متاکائولن بر CBR خاک آلوده

پس از آلوده شدن خاک به نیترات سرب و نیترات روی به غلظت ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm با مدت زمان ۷ روز، خاک آلوده با ژئوپلیمر متاکائولن به درصد میزان ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز و با درصد رطوبت بهینه خاک پایه تثبیت شده سپس آزمایش CBR بر روی نمونه‌های خاک انجام شد. بر همین اساس، نمودار میزان نفوذ در برابر بار برای خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm و خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف متاکائولن در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. نتایج شکل ۱۶ نشان دهنده این است که مقاومت CBR خاک آلوده عمل‌آوری شده در مدت زمان ۷ روز



شکل ۱۶. نمودار تغییرات CBR خاک آلوده تثبیت شده در مدت زمان ۷ روز در درصد‌های مختلف ژئوپلیمر متاکائولن

Fig. 16. Diagram of the CBR variation graph of contaminated soil stabilized within 7 days in the different percentages of metakaolin geopolymer

توجهی افزایش می‌دهد. افزودن ژئوپلیمر متاکائولن به خاک چسبندگی خاک را افزایش داده بنابراین بر روی ظرفیت باربری خاک اثر مثبت می‌گذارد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت CBR خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm تثبیت شده با ۱۵٪ ژئوپلیمر متاکائولن، ۲/۳۱ برابر نسبت به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm تثبیت نشده افزایش یافته بود.

### منابع

- [1] V.R. Ouhadi, M.S. Fakhimjoo, S.T. Omid Naeini, The Comparison of Plastic and Permeability Behavior of Bentonite in the Presence of Organic and Heavy Metal Contaminants, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(85) (2017) 25-36.
- [2] Y. Chu, S.-y. Liu, G.-j. Cai, H.-l. Bian, A study in the micro-characteristic and electricity properties of silt clay contaminated by heavy metal zinc, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(14) (2016) 556-559.
- [3] Y. Chu, S. Liu, F. Wang, G. Cai, H. Bian, Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical

طبق نتایج آزمایش‌های تراکم بر روی خاک آلوده تثبیت شده، با افزایش درصد تثبیت کننده، درصد رطوبت بهینه خاک افزایش پیدا کرده است در حالی که وزن مخصوص خشک حداکثر خاک روند کاهشی داشته است. با توجه به نتایج آزمایش تراکم افزودن ژئوپلیمر متاکائولن به خاک باعث بهبود درصد رطوبت بهینه خاک می‌شود در حالی که بر روی حداکثر وزن مخصوص خشک خاک اثر منفی می‌گذارد. نتایج آزمایش‌های تراکم انجام شده نشان داد افزودن ۱۵٪ ژئوپلیمر متاکائولن به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm باعث کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک و افزایش درصد رطوبت بهینه خاک به ترتیب به میزان ۳/۲۳٪ و ۱۹/۸۴٪ شد.

آزمایش‌های فشاری تک‌محوری نشان دادند که با افزایش درصد ژئوپلیمر متاکائولن مقاومت فشاری خاک افزایش قابل توجهی می‌یابد ولی حداکثر مقاومت فشاری در میزان کرنش‌های کمتر نسبت به خاک آلوده اتفاق می‌افتد. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن ۱۵٪ ژئوپلیمر متاکائولن به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm باعث افزایش ۲/۲۸ برابری مقاومت فشاری تک‌محوری شده است.

با انجام آزمایش CBR مشخص شد به طور کلی افزودن ژئوپلیمر متاکائولن به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm مقاومت CBR را به میزان قابل

- and Geotechnical Engineering, 8(5) (2016) 714-725.
- [13] P. Ghadir, N. Ranjbar, Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, 188 (2018) 361-371.
- [14] K. Harichane, M. Ghrici, S. Kenai, Stabilization of Algerian clayey soils with natural pozzolana and lime, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1) (2018) 1-10.
- [15] S.D. Khadka, P.W. Jayawickrama, S. Senadheera, B. Segvic, Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum, *Transportation Geotechnics*, 23 (2020) 100327.
- [16] Z. Rong-rong, M. Dong-dong, Effects of curing time on the mechanical property and microstructure characteristics of Metakaolin-based geopolymer cement-stabilized silty clay, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020 (2020).
- [17] S. Othman, J.M. Abbas, Stabilization Soft Clay Soil using Metakaolin Based Geopolymer, *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 14(3) (2021) 131-140.
- [18] S. Wang, Q. Xue, Y. Zhu, G. Li, Z. Wu, K. Zhao, Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil, *Construction and Building Materials*, 267 (2021) 120469.
- [19] Y. Luo, J. Meng, D. Wang, L. Jiao, G. Xue, Experimental study on mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer stabilized silty clay, *Construction and Building Materials*, 316 (2022) 125662.
- [20] J.-s. Li, Q. Xue, P. Wang, Z.-z. Li, Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay, *Applied Clay Science*, 105 (2015) 192-199.
- [21] Y.-J. Sun, J. Ma, Y.-G. Chen, B.-H. Tan, W.-J. Cheng, Mechanical behavior of copper-contaminated soil solidified/stabilized with carbide slag and metakaolin, *Environmental Earth Sciences*, 79(18) (2020) 1-13.
- characteristics using electrical resistivity, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15) (2017) 13561-13575.
- [4] J. Park, Assessment of shear strength characteristics and zinc adsorption capacities of zeolite-amended soils for adsorptive fill materials, □□□□□ □□□, 2017.
- [5] M. Karkush, T. Al-Taher, Geotechnical evaluation of clayey soil contaminated with industrial wastewater, *Archives of civil engineering*, 63(1) (2017).
- [6] A.O. Abidoye, O.D. Afolayan, I.I. Akinwumi, Effects of lead nitrate on the geotechnical properties of lateritic soils, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7) (2018) 522-530.
- [7] S. Contessi, L. Calgaro, M.C. Dalconi, A. Bonetto, M.P. Bellotto, G. Ferrari, A. Marcomini, G. Artioli, Stabilization of lead contaminated soil with traditional and alternative binders, *Journal of hazardous materials*, 382 (2020) 120990.
- [8] S. Contessi, M.C. Dalconi, S. Pollastri, L. Calgaro, C. Meneghini, G. Ferrari, A. Marcomini, G. Artioli, Cement-stabilized contaminated soil: Understanding Pb retention with XANES and Raman spectroscopy, *Science of The Total Environment*, 752 (2021) 141826.
- [9] F. Wang, J. Xu, H. Yin, Y. Zhang, H. Pan, L. Wang, Sustainable stabilization/solidification of the Pb, Zn, and Cd contaminated soil by red mud-derived binders, *Environmental Pollution*, 284 (2021) 117178.
- [10] P. Pei, Y. Sun, L. Wang, X. Liang, Y. Xu, In-situ stabilization of Cd by sepiolite co-applied with organic amendments in contaminated soils, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208 (2021) 111600.
- [11] K. Wianglor, S. Sinthupinyo, M. Piyaworapaiboon, A. Chaipanich, Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortars, *Applied Clay Science*, 141 (2017) 272-279.
- [12] A. Al-Swaidani, I. Hammoud, A. Meziab, Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil, *Journal of Rock Mechanics*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Kazemzadeh, A. A. Zad, P. Latifi, Stabilization of clayey soils contaminated with lead and zinc nitrate using metakaolin geopolymer, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4751-4768.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2022.21630.7781](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21630.7781)



