Civil Infrastructure Researches, Vol. 8, Issue. 2, Winter 2023, pp. 69-83

Stabilization of Lead and Zinc Contaminated Clay Soils with Metakaolin

M. Kazemzadeh

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

e-mail: michaelkazemzdeh1@gmail.com

A. Zad *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch.

e-mail: a.zad@iauctb.ac.ir

M. Yazdi

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch.

e-mail: yazdi_ma@yahoo.com

A.Chamani

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

e-mail: alichamani100@yahoo.com

Soil pollution due to various factors is one of the world's problems in different countries, especially industrialized countries, which has attracted much attention in the form of various researches. To solve this problem, in this study, metakaolin was used to stabilize low-plasticity (CL) clay contaminated with lead and zinc nitrate. The present study consists of two main stages. The first stage examines the soil to identify the most critical concentrations of contaminated soils and soils contaminated with lead nitrate and zinc nitrate in a ratio of 1: 1 and with concentrations of 1000, 5000 and 10000 ppm with a curing time of 7 days. The results obtained in the first stage showed that increasing the concentration of pollutants has a negative effect on soil geotechnical parameters, which can be reduced to the maximum uniaxial compressive strength and reduced soil CBR resistance. This step aimed to identify the most critical concentration of contaminated soil, which was 100 ppm. The second stage examines the resistance tests of contaminated soil with a concentration of 10000 ppm and its stabilization with metakaolin at a rate of 5% by weight and with a curing time of 7, 14 and 28 days. The purpose of curing time is to investigate the effect of time on soil geotechnical parameters during the presence of metakaolin in the soil. In general, according to the results of these experiments, the maximum uniaxial compressive strength and soil CBR strength increased with increasing curing time. As the curing time increases, the soil adhesion increases and consequently the compressive strength of the soil increases.

Keywords: lead (II) nitrate, Zinc nitrate, metakaolin, Pozzolan, Soil contamination.

* Corresponding author
Received 06 January 2022, Revised 14 June 2022, Accepted 15 June 2022.
DOI: 10.22091/cer.2022.7756.1349

بررسی پارامترهای خاک رس با پلاستیسیته کم آلوده به سرب و روی و تثبیت شده با متاکائولن

میکائیل کاظم‌زاده
گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.
پست الکترونیک:
michaelkazemzdeh1@gmail.com

امیرعلی زاد*
استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.
پست الکترونیک:
a.zad@iauctb.ac.ir

مریم یزدی
استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.
پست الکترونیک:
yazdi_ma@yahoo.com

علی چمنی
گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.
پست الکترونیک:
alichamani100@yahoo.com

آلودگی خاک در اثر عوامل مختلف یکی از معضلات دنیا در کشورهای مختلف به خصوص کشورهای صنعتی است که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این تحقیق از متاکائولن برای تثبیت خاک رس با خاصیت خمیری کم (CL) آلوده به نیترات سرب و نیترات روی استفاده شده است. پژوهش حاضر شامل دو مرحله اصلی است. مرحله اول به بررسی آزمایشهای شناسایی و مقاومتی خاک پایه با هدف شناسایی بحرانی ترین غلظت خاک آلوده و خاک آلوده به نیترات سرب و نیترات روی به نسبت ۱:۱ و با غلظتهای ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ با مدت زمان عمل آوری ۷ روز میپردازد. نتایج به دست آمده در مرحله اول نشان داد افزایش غلظت آلاینده بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک اثر منفی می گذارد که از این موارد می توان به کاهش حداکثر مقاومت فشاری تک محوری و کاهش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) خاک اشاره کرد. هدف این مرحله شناسایی بحرانی ترین غلظت خاک آلوده بود که میزان ppm ۱۰۰۰۰ بدست آمد. مرحله دوم به بررسی نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی خاک آلوده به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ و تثبیت آن با متاکائولن با میزان ۵٪ وزنی و با مدت زمان عمل آوری ۷ و ۱۴و ۲۸ روز میپردازد .منظور از مدت زمان عمل آوری، بررسی تاثیر زمان بر پارامترهای مختلف خاک نظیر LL، PL، PI، وزن مخصوص خشک. در مدت زمان حضور متاکائولن در خاک می باشد. به طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده از این آزمایشات، حداکثر مقاومت فشاری تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) خاک با افزایش زمان عمل آوری افزایش یافته است. با افزایش مدت زمان عمل آوری چسبندگی خاک افزایش می یابد و به تبع آن مقاومت فشاری خاک افزایش می یابد.

واژگان کلیدی: نیترات سرب، نیترات روی، متاکائولن، پوزولان، آلودگی خاک، تثبیت خاک.

۱- مقدمه

با توجه به وجود مناطق صنعتی در نقاط مختلف دنیا، ورود آلاینده ها به خاک و به تبع آن تغییر رفتار خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. خاکهای رسی با توجه به ساختار ویژه و همچنین ویژگی های خاصی که دارند در پروژه های تحقیقاتی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. از طرف دیگر با توجه به مطالعات انجام شده ورود آلاینده ها به ویژه فلزات سنگین به خاک علاوه بر مشکلات متعدد زیست محیطی باعث تغییر در پارامترهای مختلف خاکها میشوند. ورود این آلاینده ها به خاک به واسطه احداث کارخانه ها، نشت مواد پتروشیمی و موارد دیگر میتواند ایجاد گردد، با توجه به سوابق تحقیقات انجام شده این آلاینده ها میتواند بر روی خواص شیمیایی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک اثرات مثبت و منفی داشته باشد. در حوزه ی بررسی تأثیر آلاینده های فلز سنگین بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاکهای رسی و نحوه تثبیت

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۶، بازنگری ۱۴۰۱/۰۳/۲۴، پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۲۵.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2022.7756.1349

این خاک ها تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. از روش های تثبیت خاک ها و ملات های مختلف خاکی می توان به تثبیت با استفاده از پوزولان های طبیعی، تثبیت با استفاده از متاکائولن و تثبیت با استفاده از آهک اشاره کرد. باتیس[۲] و همکاران در مطالعه‌ای اثر افزودن متاکائولین بر مقاومت خوردگی ملات سیمان را مورد بررسی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که متاکائولن استحکام فشاری را بهبود می‌بخشد و استفاده از متاکائولن، چه به عنوان جایگزین شن و ماسه و چه به عنوان جایگزین سیمان رفتار خوردگی نمونه های ملات را بهبود می بخشد [۱]. سکر[۳] و همکاران در پژوهشی اثر آهک بر روی خاک رس نرم را بررسی کردند و متوجه شدند که همچنین با افزودن ۲٪ آهک پس از شصت روز، مقاومت فشاری محصور نشده خاک حدود هفت برابر افزایش یافته است و حد خمیری و روانی خاک افزایش یافته است اما این مقادیر باگذشت زمان عمل آوری کمتر میشود . همچنین آنها میزان اثرگذاری قابل توجه آهک در خاک را ۳٪ اعلام کردند اما به صورت کلی با افزودن ۲٪ آهک خاک مورد مطالعه تثبیت شده است [۲]. پژوهشگران در بررسی ای دیگر ضمن انجام آزمایشهای حدود اتربرگ، پروکتور استاندارد، تراکم، تک محوری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، خواص مهندسی رس های تثبیت شده با پوزولان ها و ضایعات صنعتی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد با افزودن همزمان این مواد، مقاومت و دوام نمونه های تثبیت شده افزایش می یابد [۳]. کولوز[۴] و همکاران در مطالعه ای دیگر محققان خواص مکانیکی خاک سیمان (اصلاح شده با متاکائولن) را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه بهینه سازی طرح اختلاط خاک سیمان و رفتار مکانیکی آن به طور تجربی بررسی شده و نتایج بیانگر بهبود خواص مکانیکی خاک سیمان بوده است. بررسی اثر متاکائولن بر هدایت هیدرولیکی و رفتار مکانیکی رس دریایی بهسازی شده با سیمان نشان میدهد که با افزایش درصد متاکائولن از ۳ به ۵ ٪ هدایت هیدرولیکی ۱۰ الی ۱۰۰ برابر کاهش یافته است [۴]. السوئیدانی[۵] و همکارا اثر پوزولان طبیعی روی خواص ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با آهک را در مطالعه ای مورد بررسی قرار دادند . در این مطالعه خاک با ۰ تا ۲ ٪ پوزولان و ۰ تا ۸ ٪ آهک تثبیت شد . نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان داد با افزودن پوزولان طبیعی، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) افزایش و شاخص خمیری خاک تثبیت شده با آهک کاهش می یابد [۵]. محققان اثر متاکائولن فعال قلیایی بر مقاومت فشاری و ساختار ذرات ملات عمل آوری شده در دماهای ۲۳ و ۶۰ درجه سانتیگراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن و دمای عمل آوری، مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می یابد و در ساختار ذرات ملات عمل آوری شده ژل سیلیکات و آلومینات به وضوح دیده میشود [۶]. قدیر و رنجبر درباره تثبیت خاکهای رسی با استفاده از سیمان پرتلند و ژئوپلیمر پژوهشی انجام دادند. در این پژوهش محققان به مقایسه عملکرد مکانیکی تثبیت خاک رسی با استفاده از خاکستر آتشفشانی ژئوپلیمر Va و سیمان پرتلند معمولی OPC پرداختند. مشاهده شده است که تثبیت با ژئوپلیمر در شرایط خشک (DC) کارآمدتر است در حالی که سیمان پرتلند در محیط مرطوب (OC) عالی است [۷]. هریچین[۶] و همکاران 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 باگذشت زمان عمل آوری میگذارد [۸].

[2] Batis
[3] Sakr
[4] Kolovos
[5] Al-Swaidani
[6] Harichane

در زمینه آلودگی خاک و تثبیت خاک های آلوده پژوهش های متعددی صورت گرفته است. الپاسلان و یوکسلن[۷] درباره از بین بردن خاک آلوده به سرب با استفاده از روش تثبیت با سیمان تحقیقاتی را انجام دادند. برای رسیدن به این هدف، چندین آزمایش برای مخلوط مواد افزودنی مختلف (آهک، کربن فعال، خاک رس، شن و ماسه و سیمان) با خاک مصنوعی آلوده (پراکنده) خاک نمونه ها مطابق با روش شستشوی مشخصه TCLP[۸] توسعه یافته توسط ایالات متحده آمریکا EPA[۹] انجام گردید. نتایج پژوهش نشان داد که افزودنی های امتحان شده نظیر کربن فعال، زئولیت ، ماسه و رس برای تثبیت آلودگی با سرب تاثیر زیادی ندارند و آهک و سیمان به ترتیب با کارایی ۸۸٪ در نسبت ۱:۲۱ آهک:خاک و کارایی ۹۹٪ در نسبت ۱:۱۵ سیمان:خاک برعکس موارد فوق در تثبیت خاک آلوده شده با سرب به میزان چشگیری موثر بودند. [۹]. در مطالعه ای دیگر روی خواص مکانیکی لاینرهای رسی در معرض شیرابه مطالعه شد. محققان متذکر شدندکه سرب یکی از رایج ترین فلزات سنگین در شیرابه است که غلظت آن در مناطق مختلف بین ۱۰۰۰ تا ppm ۱۱۰۰ متغیر است. در این تحقیق هدف یافتن نتایج حاصل از آزمایشهای حدود سازگاری، شاخص تورم آزاد، خصوصیات مقاومتی، تحکیم و نفوذپذیری است. برای این منظور دو نوع خاک مختلف رسی با خاصیت خمیری متوسط CL با عنوان گروه A و رس با خاصیت خمیری بالا CH با عنوان گروه B در نظر گرفته شد. خاکها به طور مصنوعی با محلول نمک نیترات سرب با غلظت های ۲۰۰ppm، ۵۰۰ppm، ppm ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ppm مخلوط شدند. درنهایت پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت سرب در خاک، حد روانی و حد خمیری به طور چشمگیری کاهش مییابد.

براساس نتایج این پژوهش ضریب تحکیم با افزایش غلظت سرب افزایش می یابد، نفوذپذیری خاک رسی با افزایش غلظت سرب افزایش یافته و استحکام خاک رسی در اثر آلودگی با سرب کاهش می یابد [۱۰]. لی[۱۰] و همکاران با توجه به گستردگی فلزات سنگین از قبیل سرب و روی در اکثر مناطق چین، به بررسی رفتار خاکهای آلوده با سرب در این مناطق پرداختند. غلظت های نیترات سرب ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ppm۲۰۰۰۰ انتخاب شده بود . نمونه ها در رطوبت بهینه و تراکم حداکثر ساخته شده وبه مدت دو روز تحت عمل آوری قرارگرفته اند. نتایج نشان میدهد که حد روانی و نشانه خمیری با افزایش غلظت آلاینده کاهش یافته است. همچنین افزایش غلظت آلاینده سبب کاهش ضخامت آب لایه دوگانه و کاهش حد روانی میگردد[۱۱]. در تحقیقی دیگر تاثیر غلظت های مختلف آلاینده های هیدروکربنی برروی رفتارسیلت رسی و رس سیلتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تغییر پارامترهایی از قبیل غلظت آلاینده و نوع خاک بیشترین اثر را بر خصوصیات فیزیکی، شیمایی و مکانیکی خاک دارد. آلودگی خاک با آلاینده های هیدروکربنی سبب افزایش اندازه ذرات خاک و ضریب تحکیم میگردد. همچنین افزایش غلظت آلاینده موجب کاهش ضریب نفوذ پذیری، وزن مخصوص دانه ها، حدروانی، حد خمیری و رطوبت بهینه میگردد. این در حالی است که افزایش غلظت تاثیر چندانی بر روی دانسیته ماکزیمم نمی گذارد. از دیگر نتایج بدست آمده میتوان به کاهش میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با افزایش غلظت آلاینده های هیدروکربنی اشاره کرد [۱۲]. عبیدوی[۱۱] و همکاران در مطالعه ای دیگر به بررسی اثر نیترات سرب بر روی لایه های راهسازی پرداختند. بررسی دوره عمل آوری و غلظت آلاینده بر روی برخی پارامترهای فیزیکی ماسه رس دار از اهداف اصلی در این تحقیق بوده است.

[7] Alpaslan, B., & Yukselen
[8] -Toxicity Characterization Leaching Procedure
[9] -Environmental Protection Agency
[10] Li
[11] Abidoye

نتایج نشان میدهد، افزایش غلظت نیترات سرب و دوره عمل آوری باعث کاهش دانسیته ماکزیمم و افزایش ظرفیت باربری کالیفرنیا در نمونه های آلوده میشود. همچنین افزایش دوره عمل آوری و غلظت نیترات سرب به ترتیب باعث افزایش وکاهش رطوبت بهینه گردیده است [۱۳]. چو[12] و همکاران در یک بررسی آزمایشگاهی به بررسی و تخمین پارامترهای مقاومت برشی در خاکهای آلوده با استفاده از ضریب هدایت الکتریکی پرداختند . برای این منظور خاک با سه فلزسنگین سرب، روی و کادمیم آلوده شده و نمونه های آلوده به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق قرارگرفته اند. نتایج نشان میدهد فلزات سنگین باعث افزایش مقاومت برشی و چسبندگی در خاک میشود .همچنین با افزایش غلظت آلاینده ها تغییرات بیشتری درپارامترهای مقاومتی حاصل میشود . نتایج آزمایشهای مقاومت الکتریکی نیز نشان میدهد که با افزایش غلظت آلاینده ها مقاومت الکتریکی کاهش می یابد [۱۴]. در پژوهشی دیگر از دوزهای مختلفی سرباره کاربید[13] و متاکائولین برای تثبیت خاک آلوده به مس مطابق با درجه آلودگی آن استفاده گردید. نتایج پژوهش این محققان نشان میداد که PH خاک با با افزایش میزان سرباره کاربید (CA) و کاهش محتوای متاکائولن افزایش می یابد [۱۵]. وانگ[14] و همکاران در مطالعه ای به بررسی نقش آهک و سنگ آهک در هیدراتاسیون کانی های رسی و بررسی اثربخشی کانی های رسی برای تثبیت/ جامد سازی همزمان As (آرسنیک) و Pb (سرب) در خاک آلوده پرداختند. به طور کلی پژوهش فوق یک روش بدون استفاده از سیمان برای تثبیت/جامدسازی خاک آلوده به As و Pb را با استفاده از مواد معدنی خاک رس به عنوان مواد اتصال کم کربن ارائه داد و نتایج این پژوهش ثابت کرد که مواد معدنی خاک رس به طور موثر عناصر سمی را تثبیت کرده اما لازم به ذکر است که مقدار کافی آهک برای اطمینان از جامدسازی مطلوب و تثبیت آلاینده‌ها در محصولات پایه رس-تثبیت کننده/جامدکننده مورد نیاز است[۱۶] . وانگ و همکاران در پژوهشی دیگر، کارایی و نقش مکانیکی متاکائولن، گل قرمز[15] و تفاله کوره بلند[16] بر تثبیت/جامدسازی رسوبات آلوده به آرسنیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که نمونه های آلوده تثبیت شده با متاکائولن کمترین کارایی و نمونه های تثبیت شده با گل قرمز دارای بیشترین کارایی موجود در تثبیت سازی/جامدسازی رسوبات آلوده به آرسنیک را داشتند [۱۷]. در مطالعه ای دیگر، پتانسیل تثبیت/جامدسازی ژئوپلیمرهای برپایه متاکائولن-گل قرمز برای تثبیت آرسنیک در کانی لولینژیت[17] مورد بررسی قرار دادند و نتایج پژوهش فوق نشان داد که غلظت آرسنیک از حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد در طول مرحله هیدراتاسیون بین ۷ تا ۲۸ روز عمل آوری افزایش یافت[۱۸].

در پژوهش حاضر خاک مورد استفاده به منظور بررسی آزمایشگاهی از نزدیکی یک منطقه صنعتی در اطراف شهر تهران جمع آوری است که ابتدا آزمایشات پایه بر روی این خاک ها انجام شده و سپس در ادامه پژوهش این خاک ها به وسیله آلاینده با غلظت و زمان تاثیر حداکثری آلوده شده و پس از گذشت زمان متناسب، تثبیت کننده با زمان عمل آوری مختلف به خاک اضافه و خواص ژئوتکنیکی و مقاومتی خاک را مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری این پژوهش، آلوده کردن خاک ریزدانه از نوع CL و سپس تثبیت خاک آلوده شده با بهینه ترین درصد متاکائولن براساس پژوهش های گذشته می باشد.

۲- مواد و مصالح

[12] Chu
[13] carbide slag
[14] Wang
[15] Red mud
[16] blast-furnace slag
[17] lollingite

خاک استفاده شده در این تحقیق برگرفته از منطقه ای در نزدیکی شهرک صنعتی سهند واقع در چهاردانگه تهران است. چهاردانگه شهری است که در جنوب غربی شهر تهران واقع شده است و دارای دو شهرک صنعتی است. شرکتهای صنعتی ایران خودرو دیزل، سدید، کیان تایر، لوله سازی، سینجرگاز، یاران و شرکت های متعدد دیگر در این شهر قرار گرفته اند و خطر ورود آلاینده ها و پسماندهای صنعتی شرکت های ذکر شده به خاک منطقه فوق وجود دارد. بخشی از منطقه فوق که تازه تاسیس بوده و خطر آلودگی در آن وجود نداشت به منظور نمونه برداری تعیین شد.

آلوده کننده مورد استفاده در این پژوهش، نیترات سرب و نیترات روی می باشد که با نسبت ۱:۱ به صورت محلول در آب به خاک اضافه می شوند. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نیترات سرب و نیترات وری مورد استفاده در آزمایشات در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور تثبیت خاک آلوده از تثبیت کننده متاکائولن در این پژوهش استفاده شده است. متاکائولن به میزان ۵٪ وزنی با زمان های عمل آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روز به خاک آلوده شده به عنوان تثبیت کننده اضافه می شود. در جدول ۲ ترکیبات شیمیایی و در جدول ۳ مشخصات فیزیکی متاکائولن مورد استفاده در پژوهش فوق نشان داده شده است.

جدول ۱-مشخصات آلوده کننده های مورد استفاده

نام / مشخصات	نیترات 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^3)	۴/۵۳	۲/۰۶۵

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی متاکائولن مورد استفاده

فرمول شیمیایی	درصد وزنی(٪)
SiO_2	۴۸
Al_2O_3	۴۱
Fe_2O_3	۱/۳
CaO	۳/۱
MgO	۱/۸
$K_2O + Na_2O$	۰/۲ + ۰/۱۶
SO_3	۰/۲

جدول ۳- مشخصات فیزیکی متاکائولن مورد استفاده

وزن مخصوص (gr/cm^3)	۲/۳۸
بلین (cm^2/gr)	۹۱۶۹
افت ناشی از احتراق (LOI) (درصد)	۱/۰

مشخصات فیزیکی و شیمیایی متاکائولن براساس استاندارد ASTM C618-2012 و با استفاده از آزمایش XRF[۱۸] ارائه شده است.

۳- روش و آزمایشات انجام شده

بر روی خاک پایه ابتدا آزمایش توده ویژه (G_s) براساس استاندارد ASTM (D-854) با استفاده از پمپ خلا و در دمای ۲۴ درجه سانتی گراد انجام شد و توده ویژه خاک پایه در نهایت ۲/۷۶ بدست آمد.

پس از آزمایش توده ویژه، بر روی خاک پایه آزمایش دانه بندی به روش الک براساس استاندارد ASTM (D-421) انجام شد. براساس نتایج بدست آمده درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ برابر با ۹۴/۶٪ می باشد بنابر این بیش از ۵۰ ٪ خاک از الک ۲۰۰ عبور کرده و با توجه به طبقه بندی خاک به روش USCS خاک مورد نظر ریزدانه است. پس از آزمایشات ذکر شده بر روی خاک پایه آزمایش هیدرومتری براساس استاندارد ASTM (D-422) انجام گشت؛ در نهایت، با توجه به نتایج آزمایش های دانه بندی و هیدرومتری ، نمونه خاک دارای ۵/۴ ٪ ماسه و ۵۱٪ رس و ۴۴/۲ ٪ سیلت می باشد.

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.

آزمایش های پژوهش حاضر شامل دو مرحله اصلی است. مرحله اول به بررسی آزمایشهای شناسایی و مقاومتی خاک پایه و خاک آلوده میپردازد. در این مرحله ابتدا آزمایشهای شناسایی و مقاومتی (تراکم مطابق استاندارد ASTM (D-1557)، تک محوری براساس استاندارد ASTM (D-2166) و CBR) بر روی خاک پایه انجام شد و سپس خاک با غلظت های ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ppm با مدت زمان عمل آوری ۷ روز، آلوده می شود. آلودگی با فلزات سنگین نیترات سرب و نیترات روی با نسبت ۱:۱ بوده است. خاک با درصد رطوبت ٪۳۵ آماده سازی شد، به صورتی که خاک کاملا در حالت مایع و روان باشد. سپس نیترات سرب و نیترات روی در آب حل شده و بعد محلول به خاک اضافه می شوند؛ روش ذکرشده براساس روش های مورد استفاده در پژوهش های قبلی است[۱۱، ۱۳ و ۱۴]. نمونه ها را در داخل کیسه های پلاستیکی درب دار (زیپ کیف) قرار داده، به صورتی که داخل هر کیسه ۱ کیلوگرم از نمونه خاک قرار میگیرد. بعد از گذشت مدت زمان عمل آوری خاک را خشک کرده و بر روی نمونه های خاک آلوده شده آزمایش تعیین حدود اتر برگ، تراکم، آزمایشهای تک محوری و CBR خاک پایه انجام شد. نتایج کلیه آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های مختلف به طور کلی در جدول ۴ ارائه شده است. بعد از انجام آزمایش ها و براساس نتایج ارائه شده در جدول۱ غلظتی که ضعیف‌ترین نتایج را نشان داده بود به عنوان نمونه منتخب برای مرحله بعدی انتخاب شد که در این بخش غلظت منتخب نمونه ای با ppm ۱۰۰۰۰ آلودگی است. در مرحله بعدی پژوهش نمونه خاک با ppm ۱۰۰۰۰ سرب و روی با نسبت ۱:۱ و با مدت زمان عمل آوری ۷ روز آلوده شد تا اثر حضور همزمان سرب و روی در خاک به میزان برابر و اثر مدت زمان عمل آوری۷ روز نیز مورد بررسی قرار گیرند. پس از مدت زمان عمل آوری نمونه های خاک خشک شدند. در ادامه این مرحله متاکائولن به میزان ۵٪ وزنی با زمان های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و با درصد رطوبت بهینه خاک پایه (۱۵/۳٪) به خاک آلوده شده به عنوان تثبیت کننده اضافه شد که این روش و درصد رطوبت بهینه مورد استفاده برگرفته از تحقیقات گذشته می باشد [۱۳و۱۵]. نمونه ها در داخل کیسه های پلاستیکی درب دار نگهداری شدند و بعد از گذشت مدت

[18] X-ray fluorescence

زمان عمل آوری نمونه ها، از هر نمونه آزمایش های CBR، تراکم ، تک محوری و اتر برگ گرفته شد.

جدول ۴- نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده

پارامترهای خاک / نوع خاک	σ (Kg/cm^2) مقاومت فشاری تک محوی خاک	CBR(%)	ω_{opt}(%)	$\gamma_{d,max}$ (gr/cm^3)	PI (%)	PL (%)	LL (%)
خاک پایه	۴/۱۵	۴۰/۸	۱۵/۳	۱/۷۷۳	۱۵/۸	۱۶/۷	۳۲/۵
خاک آلوده ppm ۱۰۰۰ عمل آوری شده در مدت زمان ۷روز	۳/۸۳	۳۸/۱	۱۴/۸	۱/۷۸۵	۱۳/۶	۱۵/۸	۲۹/۴
خاک آلوده ppm ۵۰۰۰ در مدت زمان ۷روز	۳/۶۸	۳۶/۷	۱۴/۱	۱/۸۱۵	۱۰/۴	۱۵/۲	۲۵/۶
خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ در مدت زمان ۷روز	۳/۱۸	۳۲/۲	۱۳/۱	۱/۸۵۶	۸/۷	۱۴/۱	۲۲/۸
خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ تثبیت شده با ۵٪ وزنی متاکائولن و عمل آوری شده در مدت زمان ۷روز	۴/۷۷	۴۵/۱	۱۳/۵	۱/۸۴۷	۸/۶	۱۴/۶	۲۳/۲
خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ تثبیت شده با ۵٪ وزنی متاکائولن و عمل آوری شده در مدت زمان ۱۴ روز	۵	۵۰/۱	۱۴/۴	۱/۸۳۰	۸/۷	۱۵/۱	۲۳/۸
خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ تثبیت شده با ۵٪ وزنی متاکائولن و عمل آوری شده در مدت زمان ۲۸روز	۵/۱۵	۵۵/۴	۱۴/۷	۱/۸۲۳	۹/۲	۱۵	۲۴/۲

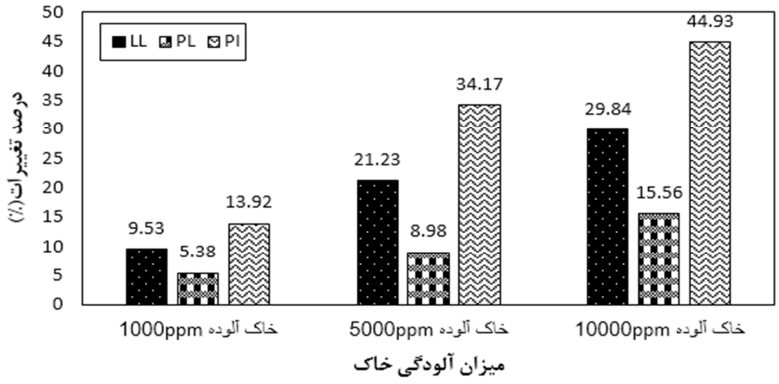
۴-نتایج آزمایشات

۴-۱- حدود اتربرگ

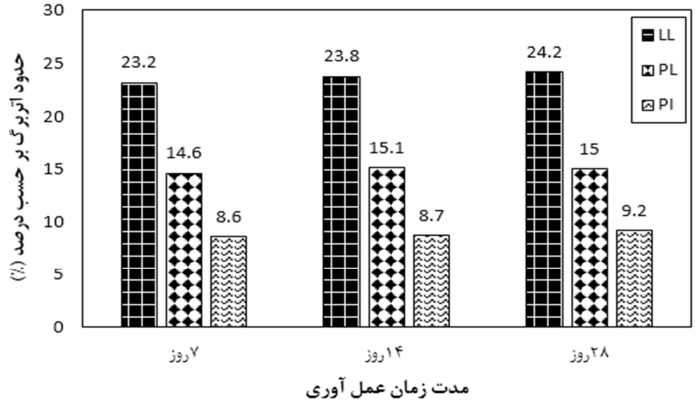
آزمایش حد روانی بر روی ۲۵۰ گرم خاک خشک عبوری از الک ۴۰ انجام گرفته که با توجه به نتایج به دست آمده حد روانی خاک پایه برابر با LL=۳۵/۵ است. پس از آزمایش حد روانی، آزمایش حد خمیری بر روی خاک پایه انجام شده است. با توجه به نتایج بدست آمده حد خمیری خاک پایه PL=۱۶/۷ می باشد. براساس رابطه PI=LL-PL نشانه خمیری خاک پایه برابر PI=۱۵/۸ است. با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش اتربرگ خاک پایه از نوع CL (رس با خاصیت خمیری کم) است. سپس، آزمایش اتربرگ بر روی خاک آلوده به نیترات سرب و نیترات روی با سه غلظت ۱۰۰۰ ، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ و با مدت زمان عمل آوری ۷ روز انجام شد و پس از آن مقایسه نتایج میان آزمایش حدود اتربرگ انجام گرفته بر روی خاک پایه و خاک آلوده به نیترات سرب و روی نشان می دهد که حد روانی در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ به ترتیب ۹/۵۳ ٪، ۲۱/۲۳ ٪ و ۲۹ /۸۴ ٪ نسبت به خاک پایه کاهش یافته است و حد خمیری خاک آلوده در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ به ترتیب ۵/۳۸٪، ۸/۹۸٪ و ۱۵/۵۶٪ نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. در نهایت، که نشانه خمیری خاک آلوده در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ به ترتیب ۱۳/۹۲٪، ۳۴/۱۷ ٪ و ۴۴/۹۳ ٪ نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. از مقایسه نتایج بدست آمده آزمایش اتربرگ بر روی خاک پایه و خاک آلوده استنباط می شود که بحرانی ترین حالت بین این سه غلظت خاک آلوده مورد بررسی غلظت ppm ۱۰۰۰۰ است. نتایج فوق در شکل ۱ ارائه شده است. یکی از ویژگی های معمول خاک های رسی، ارتباط مستقیم بین تغییرات حد روانی با ضخامت لایه دو گانه پراکنش اطراف ذره های رسی است. افزایش غلظت آلاینده ، دافعه بین ذرات رس را کاهش می دهد که باعث حرکت آزادانه

ذرات در مقدار آب کمتری می شود [۱۱] و در نتیجه حد روانی و حد خمیری کاهش می یابد.

پس از آلوده شدن خاک به نیترات سرب و نیترات روی به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ و با مدت زمان ۷ روز، خاک آلوده با متاکائولن به میزان ۵ ٪ با مدت زمان عمل آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روز تثبیت شده سپس آزمایش اتربرگ بر روی نمونه های خاک انجام شد. نتایج بدست آمده از آزمایشات اتربرگ انجام گرفته بر روی خاک آلوده تثبیت شده متاکائولن در شکل ۲ ارائه شده است. تفسیر نتایج بدست آمده نشان دهنده این است که حد روانی خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در زمان‌های عمل آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۱/۷۵، ۴/۳۸ و ۶/۱۴٪ نسبت به خاک آلوده افزایش یافته است. حد خمیری خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در زمان های عمل آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۳/۵۴، ۷/۰۹ و ۶/۳۸٪ نسبت به خاک آلوده افزایش یافته است. حد خمیری خاک در ۱۴ روز نسبت به ۷ روز افزایش یافته سپس در ۲۸ روز تقریبا ثابت مانده است. نشانه خمیری خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در زمان های عمل آوری ۷ روز ۱/۱۴٪ نسبت به خاک آلوده افزایش داشته و در زمان ۱۴ روز برابر خاک آلوده می باشد و در ۲۸ روز ۵/۷۴٪ افزایش یافته است. با افزایش مدت زمان عمل آوری ضخامت لایه دوگانه اطراف ذرات رسی افزایش می یابد و دافعه بین ذرات افزایش یافته که باعث حرکت آزادانه ذرات در مقدار آب بیشتری می شود و در نتیجه حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می یابد.



شکل ۱- مقایسه تغییرات حدود اتربرگ در برابر میزان آلودگی های مختلف خاک

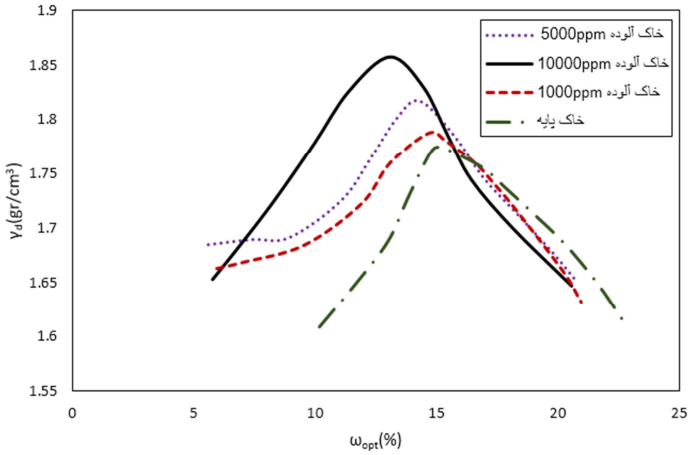


شکل ۲- مقایسه تغییرات حدود اتربرگ خاک آلوده ppm۱۰۰۰۰ تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در برابر مدت زمان عمل آوری

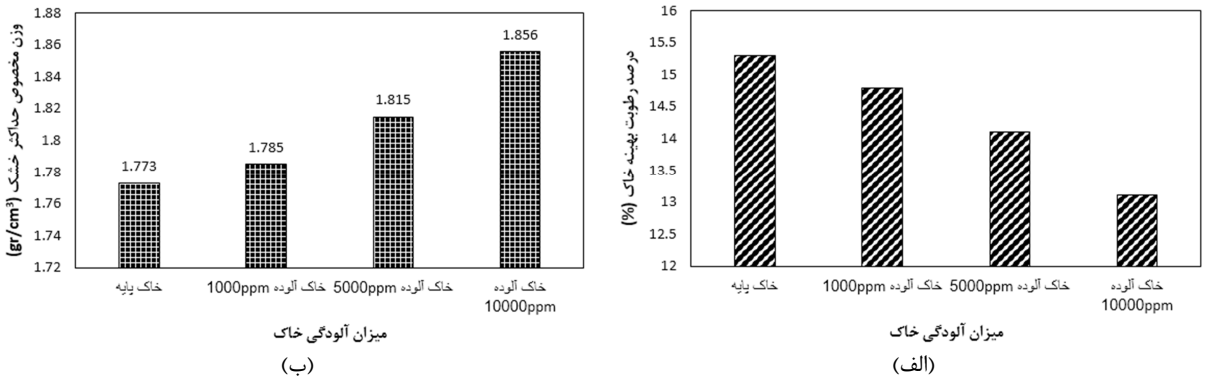
۴-۲-آزمایش تراکم

با استناد به نتایج بدست آمده درصد رطوبت بهینه خاک پایه برابر ۱۵/۳٪ و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک برابر ۱/۷۷۳ gr/cm^3 می باشد. پس از مدت زمان

عمل آوری خاک به مدت ۷ روز ، بر روی خاک آلوده به غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ آزمایش تراکم انجام گرفت. منحنی تراکم بدست آمده از آزمایش انجام شده بر روی خاک پایه و خاک آلوده با غلظت های مختلف که در مدت زمان ۷ روز عمل آوری شده در شکل ۳ ارائه شده است. مقایسه میان نتایج بدست آمده از خاک پایه و خاک آلوده عمل آوری شده در مدت زمان ۷روز که در شکل ۴- الف ارائه شده است نشان می دهد که با افزایش غلظت آلاینده درصد رطوبت بهینه خاک در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ به ترتیب ۳/۲۶، ۷/۸۴ و ۱۴/۳۷٪ نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. همچنین نتایج شکل ۴- ب نشان می دهد که با افزایش غلظت آلاینده وزن مخصوص خشک حداکثر خاک در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ به ترتیب ۰/۶۷، ۲/۳۶ و ۴/۶۸ ٪ نسبت به خاک پایه افزایش یافته است.



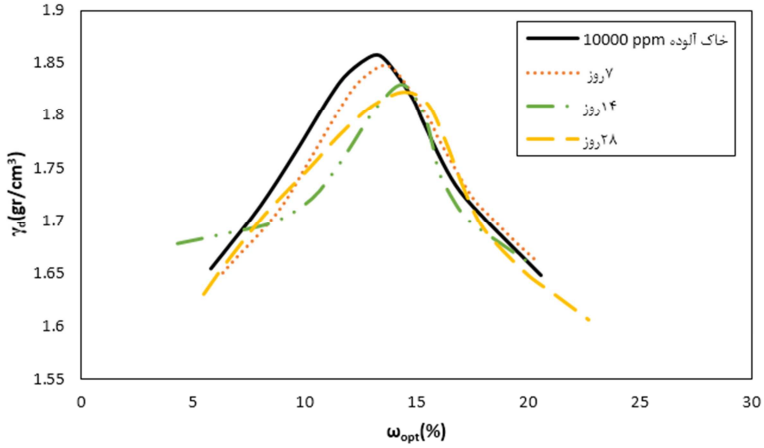
شکل ۳- مقایسه منحنی تغییرات دانسیته خشک حداکثر در مقابل درصد رطوبت برای خاک پایه و خاک آلوده با غلظت های مختلف



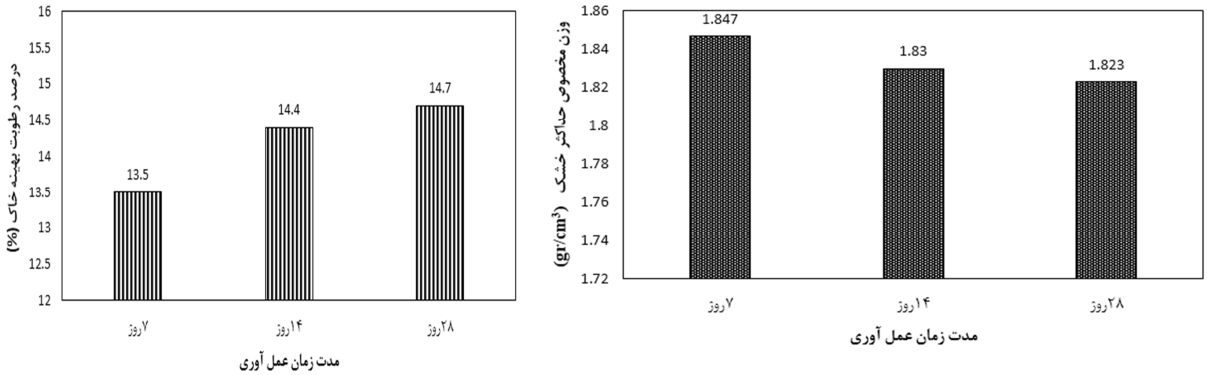
شکل ۴- تغییرات (الف) درصد رطوبت بهینه و (ب) وزن مخصوص خشک حداکثر خاک در مقابل میزان آلودگی خاک

پس از آلوده شدن خاک به نیترات سرب و نیترات روی به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ با مدت زمان ۷ روز، خاک آلوده با متاکائولن به میزان ۵٪ با مدت زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تثبیت شده سپس آزمایش تراکم بر روی نمونه های خاک انجام شد و منحنی های آزمایش فوق در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج شکل ۶- الف با افزایش زمان عمل آوری درصد رطوبت بهینه خاک آلوده تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در زمان های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۳/۰۵، ۹/۹۲ و ۱۲/۲۱٪ نسبت به خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ افزایش یافته است و از سوی دیگر مطابق با نتایج شکل ۶- ب با افزایش زمان عمل آوری وزن مخصوص خشک حداکثر خاک آلوده تثبیت شده با متاکائولن در زمان های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۰/۴۸،

۱/۴۰ و ۱/۷۷٪ نسبت به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm کاهش یافته است.



شکل ۵- مقایسه منحنی تراکم ۱۰۰۰۰ ppm با خاک تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در برابر مدت زمان عمل آوری



(الف) (ب)

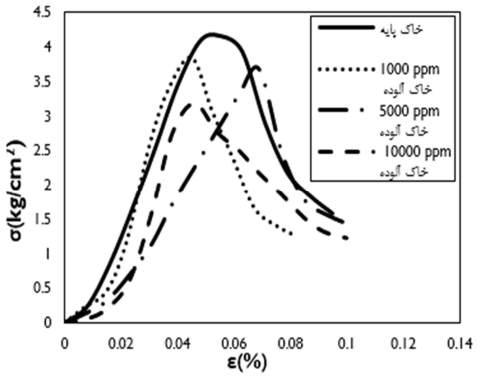
شکل ۶- نمودار تغییرات (الف) وزن مخصوص خشک حداکثر و (ب) درصد رطوبت بهینه خاک آلوده تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در برابر مدت زمان عمل آوری

۴-۳-مقاومت تک محوری

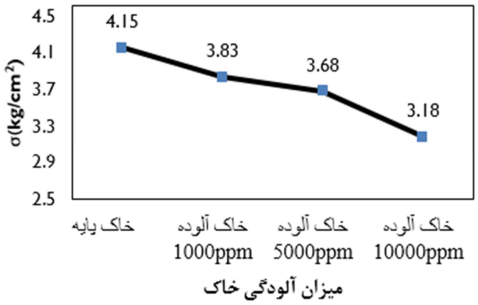
آزمایش تک محوری بر روی kg ۱ خاک خشک عبوری از الک ۴ با درصد رطوبت بهینه خاک انجام گرفت. براساس نتایج بدست آمده از حداکثر مقاومت فشاری خاک پایه برابر با kg/cm^2 ۴/۱۵ می باشد. سپس، آزمایش تک محوری بر روی خاک آلوده به سرب و روی به غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ با مدت زمان عمل آوری ۷ روز و با درصد رطوبت بهینه خاک پایه انجام شد و منحنی تنش کرنش بدست آمده از آزمایشات فوق در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، نمودار تغییرات حداکثر مقاومت فشاری تک محوری خاک پایه و خاک آلوده با غلظت های مختلف در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل ۸، با افزایش غلظت آلاینده مقاومت فشاری حداکثر خاک در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ به ترتیب ۷/۷۱، ۱۱/۳۲ و ۲۳/۳۷٪ نسبت به خاک پایه کاهش می یابد. خاک آلوده به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ بحرانی ترین حالت نسبت به غلظت های دیگر می‌باشد. با حضور نیترات سرب و نیترات روی در خاک رس، واکنش های 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.

بعد از آلوده شدن خاک به نیترات سرب و نیترات روی به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ با مدت زمان ۷ روز، خاک آلوده با متاکائولن به میزان ۵٪ وزنی با مدت زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و با درصد رطوبت بهینه خاک

پایه تثبیت شده سپس آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های خاک انجام شد.



شکل ۷- مقایسه منحنی تنش کرنش خاک پایه با خاک آلوده در غلظت های مختلف



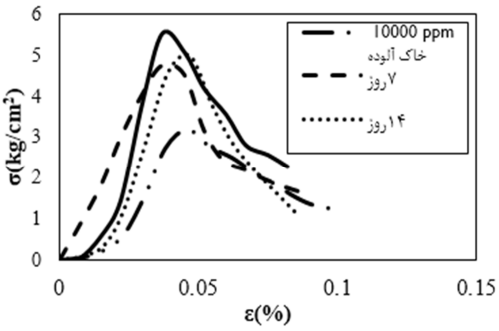
شکل ۸- تغییرات مقاومت تک محوری خاک در برابر میزان آلودگی

منحنی تنش- کرنش آزمایشات ذکرشده در شکل ۹ نمایش داده شده است. تحلیل نتایج بدست آمده و ارائه شده در شکل ۱۰ نشان می دهد حداکثر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در زمان های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۱/۵، ۱/۶۵ و ۱/۷۴ برابر نسبت به خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ رشد داشته است.

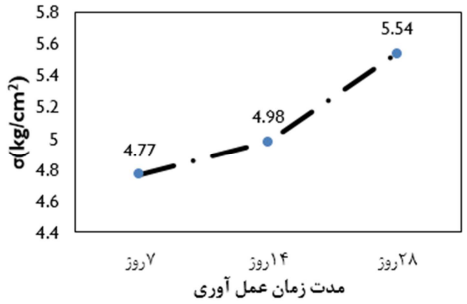
به طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده از این آزمایش، حداکثر مقاومت فشاری تک محوری با افزایش زمان عمل آوری افزایش یافته است. با افزایش مدت زمان عمل آوری چسبندگی خاک افزایش می یابد و به تبع آن مقاومت فشاری خاک افزایش یافته است.

۴-۴- نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

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٪ بدست آمده است.



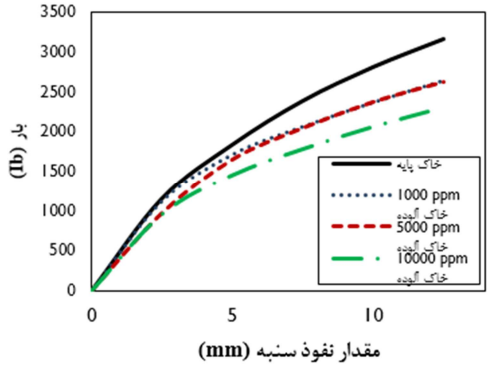
شکل ۹- مقایسه منحنی-تنش کرنش خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ با خاک آلوده تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در زمان‌های مختلف



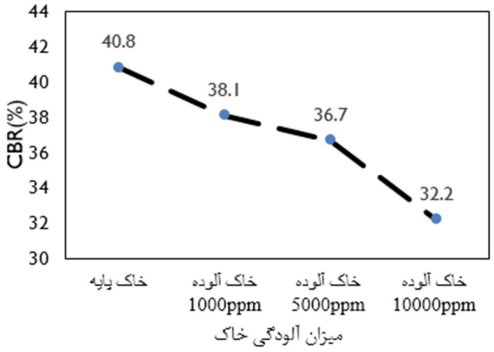
شکل ۱۰- تغییرات مقاومت تک محوری خاک در برابر مدت زمان عمل آوری

سپس، آزمایش CBR بر روی خاک آلوده در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ با مدت زمان عمل آوری ۷ روز به اندازه درصد رطوبت بهینه خاک پایه انجام شد و منحنی میزان نفوذ در برابر بار برای خاک پایه و خاک آلوده با غلظت های مختلف در شکل ۱۱ ارائه شده است. بر همین اساس مقادیر حاصله از آزمایش CBR خاک آلوده به نیترات سرب و روی در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ با مدت زمان ۷ روز در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ با افزایش غلظت آلاینده مقدار ظرفیت باربری خاک در غلظت های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ به ترتیب ۶/۶۱، ۱۰/۰۴ و ۲۱/۰۷ ٪ نسبت به خاک پایه کاهش پیدا کرده به طوری که بحرانی ترین حالت بین ۳ غلظت مورد

بررسی، خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm می باشد. وجود نیترات سرب و روی در خاک باعث به وجود آمدن فعالیت های شیمیایی و واکنش های تبادل یونی بین کانی های رسی و سرب و روی می شود. صفحات کانی های رسی که دارای بار منفی هستند کاتیون های موجود در محیط را به طرف خود جذب می کنند، با افزایش غلظت آلاینده چسبندگی خاک کاهش یافته و ظرفیت باربری خاک کاهش می یابد.

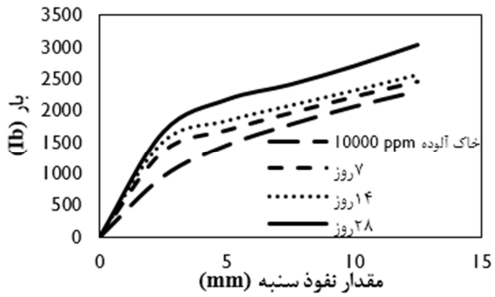


شکل ۱۱– مقایسه منحنی CBR خاک پایه و خاک آلوده در غلظت های مختلف

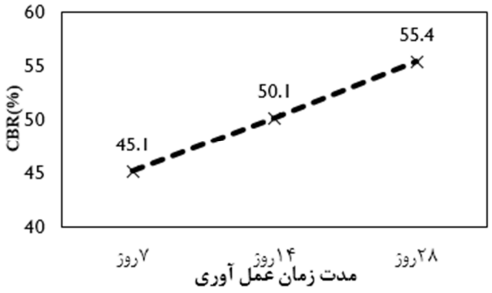


شکل ۱۲- تغییرات CBR خاک در برابر میزان آلودگی

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 متاکائولن به درصد میزان ۵٪ وزنی با مدت زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و با درصد رطوبت بهینه خاک پایه تثبیت شده سپس آزمایش CBR بر روی نمونه های خاک انجام شد. منحنی میزان نفوذ در برابر بار برای خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm و نمونه های خاک آلوده تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در مدت زمان عمل آوری مختلف در شکل ۱۳ ارائه شده است؛ تحلیل نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ نشان دهنده این است که مقاومت CBR آلوده تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن با افزایش زمان عمل آوری در زمان های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۴۰/۰۶، ۵۵/۵۹ و ۷۲/۰۴٪ نسبت به خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm افزایش یافته است. افزایش CBR را می‌توان ناشی از شکل گیری تدریجی ترکیبات سیمان در خاک به عنوان یک نتیجه از واکنش پوزولانیک بین متاکائولن و خاک رس دانست.



شکل ۱۳- مقایسه منحنی CBR خاک آلوده ۱۰۰۰۰ ppm با خاک تثبیت شده با ۵٪ متاکائولن در مدت زمان عمل‌آوری متفاوت



شکل ۱۴- نمودار تغییرات CBR خاک در مقابل مدت زمان عمل آوری

۵-مقایسه و بحث

مقایسه نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر با پژوهش انجام گرفته توسط لی و همکاران نشان دهنده این بود که روند تغییرات مشاهده شده در مقادیر حدود اتربرگ خاک آلوده مشابه بود؛ نتایج هر دو پژوهش بیانگر کاهش حد روانی و حد خمیری خاک رسی با افزایش غلظت آلوده کننده (نیترات سرب) بود. همچنین، نتایج پژوهش حاضر و پژوهش انجام گرفته توسط توسط لی و همکاران نشان دهنده افزایش وزن مخصوص خشک و

کاهش درصد رطوبت بهینه خاک رسی با افزایش غلظت آلوده کننده بود.

مقایسه نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر و پژوهش انجام شده توسط هریچین و همکاران بیانگر این موضوع بود که به طور مشابه، افزودن متاکائولن و پوزولان طبیعی به خاک رسی ریزدانه از نوع CL باعث افزایش حد روانی و حد خمیری خاک می شود؛ اما از سوی دیگر، نتیجه پژوهش محققان نشان دهنده کاهش شاخص خمیری خاک رسی با افزایش میزان پوزولان طبیعی بود. البته نکته قابل توجه این است که در پژوهش انجام شده توسط هریچین و همکاران میزان افزایش حد روانی و حد خمیری نسبت به پژوهش حاضر چشمگیرتر بوده که این را می توان به عدم حضور آلوده کننده در خاک رسی مورد استفاده در پژوهش انجام شده توسط هریچین و همکاران مرتبط دانست.

بررسی و مقایسه میان نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر و تحقیق انجام گرفته توسط سان و همکاران نشان‌دهنده این بود که افزودن متاکائولن به خاک آلوده باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری خاک شده است؛ البته شایان ذکر است که آلوده کننده مورد استفاده در پژوهش سان و همکاران از نوع نیترات مس بوده است.

۶- نتایج

مطالعه حاضر مبتنی بر تحلیل های آزمایشگاهی بوده و به منظور بررسی اثر متاکائولن در بهبود خواص مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک رس آلوده به سرب و روی می باشد. آزمایش ها به منظور یافتن مدت زمان عمل آوری بهینه متاکائولن برای بهبود خواص مقاومتی خاک آلوده انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده می توان موارد ذیل را بیان کرد:

- طبق نتایج آزمایش اتربرگ بر روی خاک های آلوده به غلظت ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ افزایش غلظت آلاینده بر روی حدود اتربرگ خاک اثر منفی می گذارد و حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری خاک کاهش می یابد به طوری که بحرانی ترین حالت بین این سه غلظت خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ می باشد. با افزایش مدت زمان عمل آوری در ۵٪ تثبیت کننده LL، PL و PI خاک روند رشد اندکی داشته اند. افزودن تثبیت کننده به خاک آلوده بر روی حدود اتربرگ خاک به طور کلی اثر مثبت می گذارد و مقادیر حدود اتربرگ خاک تثبیت شده را به خاک پایه نزدیک می کند. بدین معنا که با افزودن متاکائولن به خاک پایه و افزایش مدت زمان عمل آوری نمونه، با افزایش مقادیر حدود اتربرگ، میزان رطوبت بیشتری لازم است تا خاک از حالت نیمه جامد به خمیری و از حالت خمیری به حالت مایع درآید. به طور کلی می توان گفت که هر چقدر حد روانی و حد خمیری خاک بالاتر باشد، میزان ریزدانه موجود در خاک بیشتر بوده و در نتیجه میزان جذب آب بالاتر است.
- مطابق با نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم بر روی خاک های آلوده به سه غلظت مختلف، با افزایش غلظت آلاینده درصد رطوبت بهینه خاک کاهش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک افزایش پیدا کرده است؛ به طوری که بحرانی ترین حالت خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ می باشد که نسبت به خاک پایه درصد رطوبت بهینه خاک در این غلظت ۱۴/۳۲٪ کاهش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک ۴/۶۸ ٪ افزایش پیدا کرده است. به طور کلی حضور آلاینده در خاک بر روی رطوبت بهینه خاک اثر منفی می گذارد در حالی که باعث بهبود حداکثر وزن مخصوص خشک خاک می شود. هم چنین نتایج آزمایش های تراکم انجام گرفته بر روی خاک آلوده تثبیت شده، نشان دهنده این است که با

افزایش مدت زمان عمل آوری در یک درصد تثبیت کننده مشخص، درصد رطوبت بهینه خاک افزایش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش می یابد.

- آزمایش تک محوری بر روی خاک آلوده با سه غلظت مختلف نشان می‌دهد که با افزایش غلظت آلاینده حداکثر مقاومت فشاری خاک کاهش یافته است به طوری که خاک آلوده به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ بحرانی ترین حالت نسبت به غلظت های دیگر است. در این غلظت مقاومت فشاری حداکثر خاک نسبت به خاک پایه ۲۳/۳۲٪ کاهش یافته است. حضور آلاینده در خاک باعث کاهش چسبدگی خاک شده و به تبع آن بر روی حداکثر مقاومت فشاری خاک اثر منفی می گذارد. مطابق با نتایج آزمایش فشاری تک محوری با افزایش مدت زمان عمل آوری در یک درصد مشخص مقاومت فشاری خاک افزایش می یابد. به طور کلی با اضافه شدن متاکائولن به خاک مقاومت فشاری حداکثر خاک بیشتر شده و چسبندگی خاک افزایش می یابد.
- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش CBR بر روی خاک آلوده، با افزایش غلظت آلاینده مقدار CBR خاک کاهش می یابد به طوری که خاک آلوده ppm ۱۰۰۰۰ بحرانی ترین غلظت می باشد. در این غلظت مقدار CBR خاک نسبت به خاک پایه حدود ۲۱ ٪ کاهش یافته است. وجود آلاینده در خاک چسبندگی خاک را کاهش می دهد و باعث می شود ظرفیت باربری خاک کاهش یابد. هم چنین آزمایش CBR نشان داد که با افزایش مدت زمان عمل آوری مقاومت CBR خاک افزایش می یابد. وجود متاکائولن در خاک چسبندگی خاک را افزایش داده و بر روی ظرفیت باربری خاک تاثیر مثبت می گذارد. بدین معنا که با افزایش CBR خاک، مقدار بار بیشتری لازم خواهد بود تا نفوذ ۲/۵ میلیمتر در خاک مدنظر انجام شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که خاک با CBR بالاتر متراکم تر بوده و باربری بیشتری دارد.
- با توجه به گستردگی شهرک صنعتی سهند و احتمال وجود خاک با مشخصات مختلف در منطقه ذکر شده، از عیوب پژوهش فوق می توان به خاک برداری انجام شده از یک ناحیه اشاره کرد. پیشنهاد می گردد که در پژوهش های آتی شناسایی های زیرزمینی و مطالعات ژئوتکنیکی به منظور شناسایی پروفیل های خاک موجود در منطقه صورت گرفته سپس با نمونه برداری از خاک های موجود به بررسی وجود آلودگی یا آلوده سازی و سپس تثبیت نمونه ها پرداخته شود.
- با توجه به وجود صنایع مختلف در نزدیکی محل خاک برداری، برای پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می شود که نوع آلوده کننده مورد استفاده برای آلوده کردن خاک نیز تغییر کرده تا اثر آلاینده‌های مختلف بر خاک موجود بر منطقه نیز بررسی شود. همچنین، با توجه به نتایج پژوهش فوق و تاثیر مثبت افزودن متاکائولن به خاک آلوده، لازم تاثیر استفاده از تثبیت کننده های دیگر بر روی خاک فوق نیز مورد مطالعه قرار گیرد تا بهترین تثبیت کننده موجود با توجه به شرایط استفاده گردد.

مراجع

[1] Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S., & Badogiannis, E. (2005). The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. Cement and concrete composites, 27(1), 125-130.

[2] Sakr, M. A., Shahin, M. A., & Metwally, Y. M. (2009). Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. Geotechnical and Geological Engineering, 27(1), 105-113.
[3] Hossain, K. M. A., & Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. Construction and building Materials, 25(8), 3495-3501.
[4] Kolovos, K. G., Asteris, P. G., Cotsovos, D. M., Badogiannis, E., & Tsivilis, S. (2013). Mechanical properties of soilcrete mixtures modified with metakaolin. Construction and Building Materials, 47, 1026-1036.
[5] Al-Swaidani, A., Hammoud, I., & Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(5), 714-725.
[6] Wianglor, K., Sinthupinyo, S., Piyaworapaiboon, M., & Chaipanich, A. (2017). Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortars. Applied Clay Science, 141, 272-279.
[7] Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. Construction and Building Materials, 188, 361-371.
[8] Harichane, K., Ghrici, M., & Kenai, S. (2018). Stabilization of Algerian clayey soils with natural pozzolana and lime. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 62(1), 1-10.
[9] Alpaslan, B., & Yukselen, M. A. (2002). Remediation of lead contaminated soils by stabilization/solidification. Water, Air, and Soil Pollution, 133(1), 253-263.
[10] Resmi, G., Thampi, S. G., & Chandrakaran, S. (2011). Impact of lead contamination on the engineering properties of clayey soil. Journal of the Geological Society of India, 77(1), 42-46.
[11] Li, J. S., Xue, Q., Wang, P., & Li, Z. Z. (2015). Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay. Applied Clay Science, 105, 192-199.
[12] Karkush, M. O., & Al-Taher, T. A. A. (2017). Geotechnical evaluation of clayey soil contaminated with industrial wastewater. Archives of civil engineering, 63(1).
[13] Abidoye, A. O., Afolayan, O. D., & Akinwumi, I. I. (2018). Effects of lead nitrate on the geotechnical properties of lateritic soils. International Journal of Civil Engineering and Technology, 9(7), 522-530.
[14] Chu, Y., Liu, S., Wang, F., Cai, G., & Bian, H. (2017). Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity. Environmental Science and Pollution Research, 24(15), 13561-13575.
[15] Sun, Y. J., Ma, J., Chen, Y. G., Tan, B. H., & Cheng, W. J. (2020). Mechanical behavior of copper-contaminated soil solidified/stabilized with carbide slag and metakaolin. Environmental Earth Sciences, 79(18), 1-13.
[16] Wang, L., Cho, D. W., Tsang, D. C., Cao, X., Hou, D., Shen, Z., ... & Poon, C. S. (2019). Green remediation of As and Pb contaminated soil using cement-free clay-based stabilization/solidification. Environment international, 126, 336-345.
[17] Wang, L., Chen, L., Tsang, D. C., Zhou, Y., Rinklebe, J., Song, H., ... & Ok, Y. S. (2019). Mechanistic insights into red mud, blast furnace slag, or metakaolin-assisted stabilization/solidification of arsenic-contaminated sediment. Environment international, 133, 105247.
[18] Zhou, X., Zhang, Z. F., Yang, H., Bao, C. J., Wang, J. S., Sun, Y. H., ... & Su, C. (2021). Red mud-metakaolin based cementitious material for remediation of arsenic pollution: Stabilization mechanism and leaching behavior of arsenic in lollingite. Journal of Environmental Management, 300, 113715.