

Evaluation of durability of stabilized soft soils under changing weather conditions

Hamid Reza Akbari¹ , Azam Entezari Harsini²

1. Department of Civil Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail:

Hamidreza.akbari@iauh.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of geology, Payam Noor University, Tehran, Iran. E-mail: a.entezariharsini@pnu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2024-08-26

Received in revised form

2024-11-11

Accepted

2024-12-06

Available online

2024-12-25

Keywords:

Soft soil,
Stabilization,
Wet-dry cycles,
Freeze-thaw cycles

ABSTRACT

Soil amendment methods have made significant progress in terms of economics and compatibility with the environment, so that currently the focus is on long-term evaluations of these methods. The many benefits of stabilization have made this method to be considered as the target plan in many soft soil improvement researches. Stabilized soils are always under weather conditions, so evaluating the long-term durability of stabilized soils can be important in choosing a method. For this purpose, kaolinite soil stabilized with lime and reinforced with polypropylene fibers was subjected to wet-dry and freeze-thaw cycles, and the mechanical behavior of the samples was analyzed by conducting compressive strength and indirect tensile strength tests. The results show that the wet-dry cycle is clearly more destructive than the freeze-thaw cycle and the use of the stabilization plan including 12% lime along with 1.25% polypropylene fibers has a good performance against the cycles of weather conditions and maintains 76% of its strength and provides the minimum strength required for the sub-base.

Cite this article: Akbari, Hamid Reza., & Entezari Harsini, Azam. (2024). Evaluation of durability of stabilized soft soils under changing weather conditions. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(2), 62-76.

DOI: 10.22126/amcen.2024.11319.1025



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2024.11319.1025

Publisher: Razi University

Introduction

In many areas, due to the many limitations of implementation and development, we are inevitably forced to carry out construction operations on weak and problematic soils, which has forced engineers to think of ways to improve and modify these types of soils. One of the most important criteria that should be considered for choosing the improvement method includes: economic efficiency, simple implementation, compatibility with the environment and availability of materials. Among the problematic soils that are widespread on the surface of the earth and are encountered especially in linear projects are soft soils, and their prominent features include weak resistance, settling and Low stability noted. Generally, these features cause slope instability, deformation of the road surface and tilting of structures.

The field of improving the mechanical properties of soft and weak soils (for example, clay) is one of the main branches of geotechnical engineering. It is a common practice to adopt improvement and modification techniques to ensure that structures are built on a sufficiently strong soil base. Stabilization and reinforcement techniques for clay soils may include inert materials (cohesive-free soils), chemicals (cement, lime, or industrial additives), or the use of randomly distributed fibers. While all of these additives are added to soft soils by mixing, the question remains whether an optimal combination of consolidation and reinforcement techniques can be achieved to maximize strength and improve soil mechanical properties. In addition, each of these additives helps to increase soil resistance in a different way, while each technique has its limitations.

Lime stabilization is an old and common method to improve the properties of weak materials. The conducted research shows that lime can improve the properties of weak materials by reducing soil plasticity caused by short-term reactions (cation exchange and flocculation) and increasing efficiency and resistance due to long-term reactions (pozzolanic). When lime and water are added to the clay, the pH value increases strongly (more than 12), which causes the dissolution and decomposition of the soil particles, then the released silica and aluminum react with the calcium in the lime and lead to Calcium silicate hydrate and calcium aluminate hydrate cement gels are formed, which ultimately improve soil properties.

Method

In this research, kaolinite soil was used as soft soil and lime was used for stabilization. Polypropylene fibers with a length of 6 and 12 mm are stabilized soil reinforcement. After 28 days of processing, the stabilized and reinforced samples were subjected to cycles of environmental conditions. The cycles include 7 wet-dry cycles and 28 freeze-thaw cycles. Then the samples were subjected to chemical tests, unconfined compressive strength, indirect tension and X-ray analysis.

Results

By comparing the results, it can be concluded that the wet-dry cycle is much more destructive than the freeze-thaw, so that each wet-dry cycle has an effect of more than 5 freeze-thaw cycles. This good performance is achieved for the following reasons:

- 1) With the addition of lime, the production of cement gels in the stabilized mixture will reduce water penetration, and this reduction in water penetration will create fewer cracks around the pores in dry conditions.
- 2) The dissolution of soil structures and the combination with lime create cement gels that surround the fibers and create an integrated system by sticking them together.
- 3) Fibers with low density after being in the system cause an increase in density and create a denser stabilized soil system. First, this increase in density causes more interference and conflict between the particles of the stabilized mixture and the fibers, which does not allow the soil or stabilizer to be washed away by creating a unified structure, and also causes the reduction of pores in the structure of the stabilized soil.
- 4) The insertion of fibers by connecting the two sides of the crack prevents the cracks from increasing and expanding.
- 5) The performance of other fibers in conditions where clay particles tend to swell and decrease in volume after drying by bearing the tensile force prevents their volume from changing and prevents the spread of cracks.

Conclusions

The research conducted investigated the efficiency and potential of stabilized and reinforced samples under wet-dry and freeze-thaw cycles. The process of stabilization with lime and reinforcement with polypropylene fibers was done. During the study, the following results were obtained:

- 1) The optimal amount of lime to stabilize soft kaolinite soil is 8 to 12%, which has an acceptable compressive strength, but in higher amounts, the compressive strength will decrease.
- 2) The use of fibers in different lengths has performed well so that the addition of fibers greatly increases the tensile strength, but the changes in the change of compressive strength are limited.
- 3) The optimal amount of fibers with a length of 12 mm is 1%, but by reducing the length of the fibers to 6 mm, the optimal amount will be 1.2%.
- 4) The soils stabilized with lime are highly vulnerable to the wet-dry cycle and most of the resistance has been lost, then the addition of polypropylene fibers to this system will create a unified structure resistant to environmental conditions.
- 5) The wet-dry cycle is much more destructive compared to the freeze-thaw cycle, so it can be considered more than 5 times more destructive.
- 6) The soft soil sample stabilized with 12% lime and 1% fibers has an acceptable performance against the environmental conditions (wet-dry and freeze-thaw) and provides the minimum acceptable limits for the sub-base.

7) The results obtained from the microstructural and macrostructural tests show that the presence of lime in the system causes a major increase in CSH and CAH cement gels and the addition of fibers by densifying the system, surrounding microcracks and creating a system Integrated, they provide an acceptable performance so that the process of modifying soft soil using lime-fiber combination has increased durability and stability in addition to improving the resistance parameters.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



ارزیابی دوام خاک‌های نرم تثبیت شده تحت شرایط آب و هوایی متغیر

حمیدرضا اکبری^۱، اعظم انتظاری هرسینی^۲ ✉

۱. گروه عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: Hamidreza.akbari@iauh.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه زمین شناسی، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: a.entezariharsini@pnu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵	
کلیدواژه‌ها: خاک نرم، تثبیت، سیکل تر-خشک، سیکل انجماد-ذوب	روش‌های اصلاح خاک، پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌های اقتصادی و سازگاری با محیط زیست داشته به نحوی که درحال حاضر تمرکز بر روی ارزیابی‌های دراز مدت این روش‌هاست. مزایای فراوان تثبیت موجب شده تا این روش به عنوان طرح هدف در بسیاری از پژوهش‌های اصلاح خاک نرم مدنظر قرار گیرد. همواره خاک‌های تثبیت شده تحت شرایط آب و هوایی قرار دارند بنابراین ارزیابی دوام دراز مدت خاک‌های تثبیت شده می‌تواند در انتخاب روش مهم باشد. به این منظور خاک کائولینیت تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن تحت سیکل‌های تر-خشک و انجماد-ذوب قرار گرفته و با انجام تست‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیر مستقیم رفتار مکانیکی نمونه‌ها تحلیل شد. نتایج بیانگر این موضوع است که سیکل تر-خشک به وضوح مخرب‌تر از سیکل انجماد-ذوب است و استفاده از طرح تثبیت شامل ۱۲ درصد آهک همراه ۱/۲۵ درصد الیاف پلی پروپیلن در برابر سیکل‌های شرایط آب و هوایی عملکرد موفی دارد و ۷۶ درصد از مقاومت خود را حفظ کرده و حداقل مقاومت لازم برای زیراساس را تامین می‌کند.

استناد: اکبری، حمیدرضا؛ انتظاری هرسینی، اعظم. (۱۴۰۳). ارزیابی دوام خاک‌های نرم تثبیت شده تحت شرایط آب و هوایی متغیر. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱(۲)، ۶۲-۷۶. DOI: 10.22126/amcen.2024.111319.1025



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

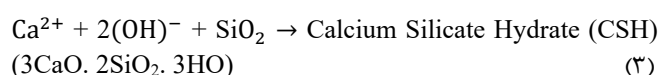
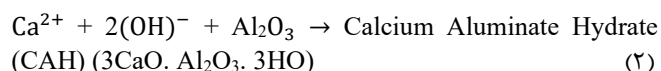
۱. مقدمه

در مناطق متعددی، به دلیل محدودیت‌های متعدد اجرایی و توسعه یافتگی به ناچار مجبور به انجام عملیات ساخت بر روی زمین‌های ضعیف و مسئله دار هستیم که این امر مهندسان را ناگزیر کرده که به راهکارهای بهسازی و اصلاح این نوع خاک‌ها بیاورند. از مهمترین معیارهایی که برای انتخاب روش بهسازی باید مدنظر قرار گیرد شامل: صرفه اقتصادی، اجرای ساده، سازگاری با محیط زیست و دردسترس بودن مصالح است. از جمله خاک‌های مسئله‌دار که گستردگی فراوانی در سطح زمین داشته و بخصوص در پروژه‌های خطی به آن برخورد می‌شود خاک‌های نرم بوده که ویژگی‌های بارز آنها مقاومت ضعیف، نشست پذیری زیاد و پایداری کم است. عموماً این ویژگی‌ها موجب ناپایداری شیب، تغییر شکل روسازی جاده و کج شدن سازه‌ها می‌شود [۱]. حوزه بهبود خواص مکانیکی خاک های نرم و ضعیف (به عنوان مثال رس) یکی از شاخه‌های اصلی مهندسی ژئوتکنیک است. اتخاذ تکنیک‌های بهسازی و اصلاح برای حصول اطمینان از اینکه سازه‌ها بر روی یک بستر خاکی به اندازه کافی مستحکم ساخته شوند، یک روش معمول است. تکنیک‌های تثبیت و تسلیح برای خاک‌های رسی ممکن است شامل مواد بی اثر (خاک‌های بدون چسبندگی)، مواد شیمیایی (سیمان، آهک، یا افزودنی‌های صنعتی)، یا استفاده از الیاف با توزیع تصادفی باشد. در حالیکه همه این مواد افزودنی با اختلاط به خاک‌های نرم اضافه می شوند، این سوال باقی می‌ماند که آیا یک ترکیبی بهینه از تکنیک‌های تثبیت و تسلیح را می توان برای به حداکثر رساندن مقاومت و بهبود خصوصیات مکانیکی خاک به دست آورد. علاوه بر این، هر یک از این مواد افزودنی به روشی متفاوت به افزایش مقاومت خاک کمک می‌کند در حالیکه، با توجه به هر تکنیک محدودیت‌های خود را دارد [۲]. با توجه به پیشرفت‌های روز افزون در روش‌های اصلاح خاک ناگزیر باید آنالیزهای دقیق و سخت گیرانه‌تری بر روی نمونه‌ها انجام داد که باتوجه به شرایط آب و هوایی متغیر در اقلیم‌های مختلف، رفتار مکانیکی این محصولات تثبیت شده بعد از سال‌ها قرارگیری در شرایط محیطی نکته بسیار با اهمیت بوده که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به خصوصیات نامطلوب مصالح ضعیف که می‌توانند منجر به آسیب‌های جبران ناپذیری در سازه‌ها گردد، بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی این

مواد برای رسیدن به یک مصالح پایدار و ایمن ضروری است. روش‌های مختلفی از جمله اصلاح فیزیکی، تثبیت شیمیایی، مسلح کردن برای بهبود خصوصیات مصالح ضعیف می‌تواند استفاده شود که در این بین روش تثبیت شیمیایی با مواد سنتی نظیر سیمان و یا آهک یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود مصالح در بلند مدت است [۳]. تثبیت آهکی یک روش قدیمی و رایج برای بهبود خصوصیات مصالح ضعیف است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد آهک می‌تواند از طریق کاهش پلاستیسته خاک ناشی از واکنش‌های کوتاه مدت (تبادل کاتیونی و فولوکوله شدن) و افزایش کارایی و مقاومت در اثر واکنش‌های بلند مدت (پوزولانی) خصوصیات مصالح ضعیف را اصلاح کند [۴]. هنگامی که آهک و آب به خاک رس اضافه می‌شوند مقدار pH به شدت افزایش می‌یابد (بیشتر از ۱۲) که سبب انحلال و تجزیه ذرات خاک می‌شود سپس سیلیکا و آلومینا آزاد شده با کلسیم موجود در آهک واکنش داده و منجر به شکل‌گیری ژل‌های سیمانی کلسیم سیلیکات هیدرات و کلسیم آلومینات هیدرات شده بر اساس روابط ۱ تا ۳ که در نهایت سبب بهبود خصوصیات خاک می‌شوند.



(۱) (Ionization of calcium hydroxide; pH > 12)



در روش تثبیت شیمیایی عوامل متعددی از جمله نوع کانی رسی، درصد افزودنی، زمان و دمای عمل‌آوری در بهبود مقاومت خاک تاثیرگذار هستند. آهک و پوزولان طبیعی برای تثبیت دو نوع رس CL و CH استفاده شد. نتایج نشان دادند که عملکرد و درصد بهینه آهک در رس‌ها متفاوت است، بطوریکه افزودن ۸ درصد آهک بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری به مقاومت فشاری تک محوری رس CL و CH را حدود ۳۰ درصد نسبت به خاک اصلاح نشده افزایش داد. همچنین بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری در رس CH با افزایش درصد

شود بنحویکه با افزودن ۱۸ درصد پودر سنگ آهک به عنوان درصد بهینه تثبیت کننده چگالی خشک حداکثر افزایش یافته و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری بهبود قابل توجهی داشته و رفتار خاک از حالت نرم به ترد تغییر خواهد یافت که از محدودیت‌های تثبیت آهکی است که حضور الیاف و اجرای عملیات تسلیح این محدودیت را برطرف خواهد ساخت [۱۰]. عملکرد مناسب آهک در تثبیت خاک‌های رسی (با چسبندگی زیاد و چسبندگی کم) قابل توجه بوده و در پژوهشی که رس‌ها با چسبندگی مختلف توسط آهک تثبیت و عمل آوری شدند دوام آن‌ها تحت سیکل انجماد-ذوب تا ۱۰ دوره ارزیابی شد. رس‌های با چسبندگی زیاد حساسیت و ضعف بیشتری در برابر سیکل انجماد-ذوب از خود نشان می‌دهد. چسبندگی با اعمال سیکل‌ها به شدت کاهش خواهد یافت ولی در نهایت تثبیت رس‌ها با آهک دوام نمونه‌ها را بهبود بخشیده است [۱۱].

۲. مواد و مصالح

۲-۱. خاک نرم

خاک نرم استفاده شده در این پژوهش کائولینیت زنوز تبریز (شمال غربی ایران) است. کائولینیت بعنوان یک خاک نرم در مطالعات استفاده شده است [۱۲]. براین اساس مشخصات مهندسی آن طبق روش‌های ASTM [۱۳] و پارامترهای زیست محیطی مطابق با EPA manual تعیین شد [۱۴] نتایج آزمایش‌های ریزساختاری و شیمیایی نشان می‌دهد که مقدار عمده خاک (حدود ۷۰ درصد) کانی کائولینیت است. مشخصات ژئوتکنیکی خاک نرم مورد استفاده بطور خلاصه در جدول ۱ و نمودار دانه بندی آن در شکل ۱ ارائه شده است.

آهک از ۴ به ۸ مقدار مقاومت خاک کاهش یافت، درحالیکه در رس CL برای حالت مشابه مقاومت خاک افزایش پیدا کرد [۵،۶]. کاواک و بایکال رفتار بلند مدت رس کائولینیت تثبیت شده با آهک را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزودن ۴ درصد آهک به خاک کائولینیت بعد از ۱۲۳ ماه (بیشتر از ۱۰ سال) عمل‌آوری مقاومت خاک را از ۱۲۳ کیلوپاسکال به ۲۶۴۰ کیلوپاسکال افزایش داد [۷]. مائوبک و همکاران نشان دادند رفتار کانی‌های رسی در حضور مقدار ثابت آهک کاملاً متفاوت است. به عبارتی دیگر در نمونه‌های کائولینیت تثبیت شده با ۱۰ درصد آهک در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد مقدار مقاومت فشاری خاک با افزایش زمان عمل‌آوری تغییر چشمگیری نداشت اما با افزایش دمای عمل‌آوری به ۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت خاک با رشد قابل ملاحظه‌ای همراه بود. در شرایط مشابه برای نمونه‌های کلسیم بنتونیت رفتار کاملاً متفاوت بود بطوریکه در دمای ۲۰ درجه با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت خاک بصورت خطی افزایش یافت، درحالیکه با افزایش دمای عمل‌آوری بیشترین افزایش مقاومت در روزهای اول بدست آمد و بعد ۳۰ روز عمل‌آوری افزایشی در مقاومت خاک مشاهده نشد [۸]. در پژوهشی تاکاره و چاوهران بیان کردند که خاک‌های نرم رسی، مانند خاک‌های سیاه پنبه‌ای، اگر در بستر پروژه‌های عمرانی قرار گیرند نیاز به عملیات بهسازی دارند. آن‌ها خاک سیاه را با استفاده از آهک، خاکستر بادی و میکروسیلیس تثبیت و به بررسی جزئیات آن پرداختند. آزمایش‌ها نشان دادند که افزودن ۵٪ میکروسیلیس همراه با ۳٪ آهک و ۳٪ خاکستر بادی، به‌طور قابل‌توجهی CBR را در شرایط اشباع و غیر اشباع افزایش داده است بر این اساس ضخامت روسازی جاده کاهش خواهد یافت و هزینه‌های ساخت اقتصادی خواهد شد. کاهش ۱۵ تا ۲۱ درصدی در ضخامت روسازی هزینه‌های اقتصادی را بطور عمده کاهش داده و طرح تثبیت موفقیت آمیز بوده است [۹]. پودر سنگ آهک نیز می‌تواند در تثبیت خاک‌های رسی با پلاستیسیته زیاد (CH) موثر واقع

جدول ۱. مشخصات خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر

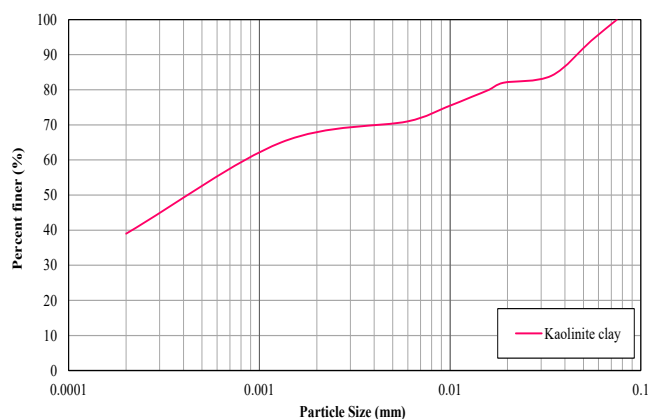
مشخصات	واحد	مقدار اندازه گیری شده
حد روانی	%	۳۹
شاخص خمیری	%	۱۸
نامگذاری خاک	-	رس با چسبندگی کم
pH	-	(CL)
EC هدایت الکتریکی	$\mu\text{S}/\text{cm}$	۸/۵
ظرفیت تبادل ماتیونی CEC	cmol/kg	۱۵۰
سطح مخصوص ویژه SSA	m^2/g	۱۱
		۲۴

جدول ۲. مشخصات الیاف مورد استفاده در پژوهش حاضر

مشخصات	واحد	مقدار اندازه گیری شده
جنس	-	پلی پروپیلن
طول	mm	۱۲ و ۶
مقاومت کششی	MPa	۳۵۰
مدول الاستیسیته	MPa	۲۷۰۰
دانسیته	g/cm^3	۰/۹۱
قطر	μm	۱۹

۴-۲. آماده سازی نمونه ها

خاک نرم با مقادیر مختلف آهک (۰، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۴ درصد) تثبیت و همگن بودن آن از طریق چشمی کنترل و مقدار بهینه (۱۲٪) تعیین شد. برای مسلح سازی خاک تثبیت شده مقادیر مختلف الیاف (شامل: ۰، ۸/۰، ۱، ۱/۲ و ۱/۴ درصد) افزوده و پس از انجام آزمایش مقدار ۱/۲ درصد الیاف با طول ۶ میلیمتر به عنوان بهینه انتخاب شد. مشخصات نمونه های اصلی، مطابق با جدول ۳ است. ابتدا برای ساخت هر نمونه مقادیر معین افزودنی و الیاف با توزیع تصادفی به خاک نرم اضافه و کاملاً مخلوط شده تا همگن شود. آب مقطر اضافه شده به نمونه برابر رطوبت بهینه هر ترکیب است. در نهایت نمونه ها در کیسه پلاستیکی قرار داده شده و به منظور عمل آوری به مدت ۲۸ روز در محفظه با دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت ۸۵ درصد نگهداری می شود.



شکل ۱. نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر

۲-۲. آهک

آهک هیدراته $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ با خلوص ۹۶ درصد، از محصولات کمپانی مرک آلمان تهیه و به عنوان تثبیت کننده در پژوهش استفاده شده است.

۳-۲. الیاف مصنوعی پلی پروپیلن

از پرکاربردترین الیاف مصنوعی مورد استفاده در مسلح سازی خاک، الیاف پلی پروپیلن است با توجه به این موضوع الیاف با طول متوسط ۶ و ۱۲ میلیمتر برای مسلح سازی خاک تثبیت شده استفاده می شود. تصویر و جدول ۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۳. مشخصات نمونه های ساخته شده در پژوهش حاضر

نام اختصاری نمونه	درصد آهک	درصد الیاف با طول ۶ میلیمتر
4L	۴	۰
8L	۸	۰
12L	۱۲	۰
4LF	۴	۱/۲
8LF	۸	۱/۲
12LF	۱۲	۱/۲

۵-۲. چرخه تر-خشک و انجماد و ذوب

شرایط محیطی مانند وقوع سیلاب، بارش‌های شدید و ذوب شدن برف سبب می‌شود که برخی از راه‌ها و پروژه‌ها به دفعات تحت شرایط اشباع قرار گرفته و سپس به دلیل گرم شدن هوا خشک شوند [۱۵] بر این اساس ارزیابی محصولات تثبیت شده تحت شرایط محیطی (تر و خشک شدن از مخرب‌ترین شرایط محیطی) لازم به نظر می‌رسد. به همین منظور نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D559 تحت سیکل تر و خشک شدن قرار گرفته و پس از ۱ تا ۷ سیکل، مقادیر افت وزنی، مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. بمنظور انجام سیکل تر و خشک، ابتدا نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۵ ساعت در آب مقطر با دمای اتاق (۲۰ درجه) غوطه‌ور می‌گردد. سپس نمونه‌ها در آون با دمای ۷۱ درجه سانتیگراد به مدت ۴۲ ساعت قرار داده شده‌اند. همچنین قبل از انجام هر مرحله، نمونه‌ها توزین می‌شود. این مسیر به عنوان یک سیکل در نظر گرفته شد.

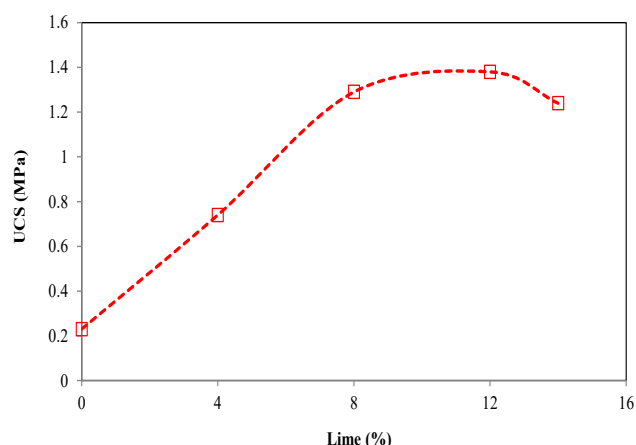
از دیگر شرایط آب و هوایی که به فراوانی در مناطق سردسیر بوجود می‌آید انجماد-ذوب شدن بوده که عملاً موجب گردیده بستر بسیاری از پروژه‌ها از جمله راهسازی یا فونداسیون سازه‌ها تحت چرخه‌های انجماد و ذوب قرار بگیرند. بنابراین نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C666 نمونه‌ها تحت سیکل انجماد و ذوب (تا ۲۸ سیکل) قرار گرفتند. ابتدا دمای محیط از ۵ درجه سانتیگراد به ۱۸- درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت منجمد می‌شود و سپس دمای محیط از ۱۸- به ۵ درجه سانتیگراد در ۱ ساعت افزایش می‌یابد این مسیر که یک سیکل به حساب می‌آید با استفاده از دستگاه با قابلیت کنترل انجام می‌شود. همچنین در این سیکل هم قبل از انجام هر مرحله در انجماد-ذوب، نمونه‌ها توزین می‌شوند.

مطابق گزارش اداره هواشناسی در منطقه غرب ایران (محدوده رشته کوه زاگرس در استان‌های کرمانشاه و همدان) شرایط جوی منطقه شامل یک سوم سال دوره یخبندان و حضور رطوبت در بیش از

نیمی از سال است که عملاً بصورت طبیعی چرخه انجماد-ذوب و تر-خشک شدن اتفاق خواهد افتاد بنابراین اقدامات انجام شده در این تحقیق کاملاً منطبق بر شرایط کوهستانی بوده و قابلیت تعمیم دارد.

۶-۲. روش انجام آزمایش‌ها

واکنش‌های شیمیایی بین خاک نرم و آهک، به صورت سوسپانسیون با نسبت جامد به مایع ۲۰:۱ مطابق EPA پس از به تعادل رسیدن کامل سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت، بنحویکه تست EC و pH پس از آماده سازی نمونه در زمان‌های عمل‌آوری دوساعت، ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شد [۱۶]. در بسیاری از مطالعات [۱۷] به منظور ارزیابی خاک تثبیت و تسلیح شده به ترتیب از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) استفاده شده است. به این منظور مخلوط خاک و افزودنی به مقدار لازم برای رسیدن به دانسیته خشک حداکثر، توزین شده و با رطوبت بهینه کاملاً همگن شد. مخلوط مرطوب همگن شده در سیلندر استیل به قطر ۳۷ و ارتفاع ۷۴ میلیمتر قرارداده شد. سپس هر نمونه به دانسیته مورد نظر رسید و پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، ابتدا عمل-آوری و در نهایت بر روی آن‌ها تست UCS و ITS بترتیب مطابق با ASTM D2166 و ASTM D6931، انجام شد (شکل ۲). علاوه بر آزمایش شیمیایی و مکانیکی، با هدف بررسی رفتار ریزساختاری نمونه‌ها قبل و بعد از اصلاح از آنالیز XRD بر روی نمونه‌های کاملاً پودر همگن توسط دستگاه XRD مدل Bruker D8 بهره برده شد.



شکل ۳. تغییرات UCS با افزایش آهک



شکل ۲. نمونه های آزمایش UCS و ITS

۴. تاثیرات افزودن آهک بر خصوصیات شیمیایی

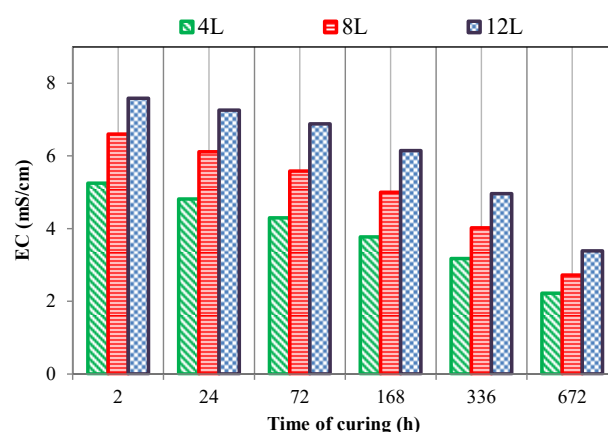
شکل ۴ تغییرات EC نمونه ها پس از افزودن آهک طی عمل آوری ۲۸ روزه را نشان می دهد. اضافه شدن آهک موجب افزایش مقدار EC شده که این به معنی افزایش قابلیت انحلال افزودنی است، در واقع انحلال مناسب آهک در سیستم، غلظت املاح (Ca^{2+} and OH^-) محلول در مایع منفذی را افزایش داده (افزایش EC) و روند واکنش های کوتاه مدت شامل تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمز اطراف پولک رسی را بهبود بخشیده و موجب تجمع ذرات خاک در کنار یکدیگر می گردد. باگذشت زمان ترکیبات موجود در ماده افزودنی به ترتیب مصرف و در نتیجه غلظت املاح کاهش می یابد (کاهش EC) که این روند تکمیل واکنش های پوزولانی را تأیید می کند [۱۸] بمنظور اثبات این موضوع در مقطع بعد، آزمایش های فیزیکی-مکانیکی و ارزیابی پارامترهای مهندسی انجام خواهد شد. شکل ۵ نشان می دهد افزودن آهک به سیستم، بلافاصله موجب افزایش pH در حدود ۱۲.۴ خواهد شد که این شرایط با انحلال کانی رسی، SiO_2 و Al_2O_3 آزاد کرده و پس از ترکیب آن ها با یون Ca^{2+} سبب تشکیل ترکیبات سیمانی CSH و CAH خواهد شد. در نمونه های حاوی ۸ و ۱۲ درصد آهک مقادیر pH اختلاف اندک داشته و در محدوده ۱۲/۴ هستند ولی در نمونه های حاوی ۴ درصد آهک اختلاف مقادیر pH بیشتر است. بر اساس نتایج شیمیایی

۳. تاثیر افزودن آهک بر مقاومت فشاری محصور نشده

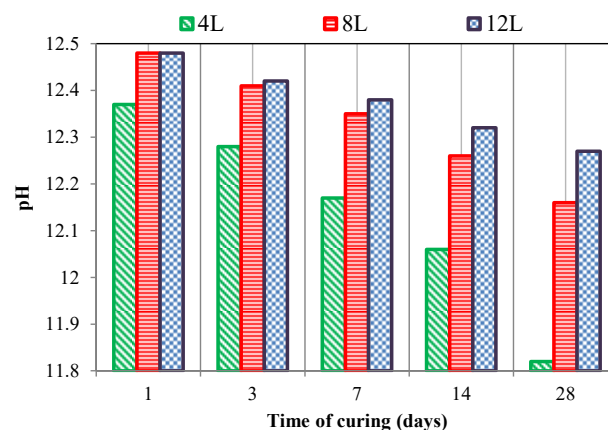
شکل ۳ تغییرات UCS نمونه های تثبیت شده را با افزودن آهک پس از ۲۸ روز عمل آوری نشان می دهد. افزودن آهک به خاک نرم مقاومت را به طور عمده افزایش داده بنحویکه افزودن ۴ درصد آهک بطور میانگین تا ۲۴۰ درصد افزایش مقاومت را ایجاد می کند ولی با این وجود حداقل مقاومت لازم زیر اساس را که ۱-۳ MPa است [۱۸] تامین نمی کند. در خصوص ۴ درصد آهک حضور مقادیر کم آهک در سیستم باعث می شود ترکیبات موجود در خاک با عمده آهک وارد واکنش کوتاه مدت می شود و حضور سیلیس و آلومینا عملاً در فقر آهک، بهبود مناسبی در سیستم ایجاد نمی کند. افزایش مقادیر آهک به ۸ درصد حداقل مقاومت زیراساس را تامین می کند. بمنظور ارتقاء مقاومت، مقدار آهک تا ۱۲ درصد افزایش یافت که در این شرایط حداقل مقاومت مورد نیاز برای زیراساس با لحاظ فاصله اطمینان بیشتر تامین گردید. به دلیل تناسب میزان آهک (۸ و ۱۲ درصد) با مقادیر زیاد SiO_2 و Al_2O_3 در ترکیب شیمیایی خاک واکنش های کوتاه مدت (ظرفیت تبادل کاتیونی) و بلندمدت (واکنش های پوزولانی)، افزایش مقاومت بنحو مطلوبی انجام شده است. بر این اساس حداکثر آهک مورد استفاده در پژوهش ۱۲ درصد انتخاب شد.

برای مقابله با شرایط آب و هوایی و افزایش پایداری خاک تثبیت شده، مسلح سازی است معمولاً برای مسلح سازی خاک‌های تثبیت شده از الیاف استفاده می‌شود که ازجمله پرکاربردترین و کاراترین آن‌ها می‌توان به الیاف مصنوعی پلی‌پروپیلن اشاره کرد [۲۰]. الیاف پلی‌پروپیلن با توزیع تصادفی برای ارتقاء پایداری خاک تثبیت شده، به نمونه‌های افزوده شد. شکل ۶ تغییرات مقاومت کششی (ITS) به نمونه‌های تثبیت شده را با افزودن مقادیر مختلف الیاف (۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۴ درصد وزنی) با طول ۶ و ۱۲ میلی متر نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این موضوع است که با افزودن الیاف به مقدار ۰/۸ درصد وزنی خاک، مقاومت کششی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و با بیشتر شدن مقدار آن این روند صعودی تا یک درصد الیاف ۱۲ میلی‌متری و تا ۱/۲ درصد الیاف ۶ میلی متری با نرخ کمتر همچنان صعودی است و در مقادیر بیشتر از این درصدها، تغییرات محدود می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با ورود الیاف به سیستم، این الیاف موجب انسجام و اتصال بیشتر بین اجزا شده و همچنین با درگیر شدن در اجزای سیمانی، سیستم یکپارچه‌ای ایجاد می‌کنند ولی با اضافه شدن الیاف بیشتر تغییرات محدود بوده و افزودن بیشتر الیاف، موجب قرارگیری الیاف در کنار یکدیگر شده و تا حدودی تاثیرات منفی خواهد داشت. با توجه به نتایج حاصله از مسلح سازی نمونه‌ها برای طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر به ترتیب استفاده از ۱/۲ و ۱ درصد الیاف بهینه بوده و به عنوان مقدار بهینه انتخاب می‌شوند. استفاده از الیاف با طول بیشتر موجب می‌شود مقدار الیاف کاهش یابد به نحوی که با افزودن طول از ۶ به ۱۲ میلی‌متر مقدار بهینه الیاف ۰/۲ درصد کاهش خواهد یافت. در مجموع نتایج آزمایش‌های انجام شده تا این مرحله افزودن ۸ تا ۱۲ درصد آهک با افزودن ۱/۲ درصد الیاف ۶ میلی متری به عنوان طرح تثبیت نهایی انتخاب و تحت سبکل‌های تر-خشک و انجماد-ذوب قرار داده می‌شوند و بازدهی ترکیب‌ها با معیار آزمایش‌های بزرگ ساختمانی و ریز ساختمانی سنجیده خواهد شد.

عملکرد تثبیت کننده ۸ درصد و بیشتر آهک، واکنش‌های پوزولانی را به صورت کامل و با سرعت انجام می‌دهد [۱۹] که نتایج آزمایش UCS در شکل ۳ کاملاً این موضوع را تأیید می‌کند. در واقع برای ۴، ۸ و ۱۲ درصد آهک، بترتیب ۲۴۰، ۴۶۰ و ۵۰۰ درصد افزایش مقاومت ایجاد شده‌است.



شکل ۴. تغییرات EC در نمونه‌های تثبیت شده

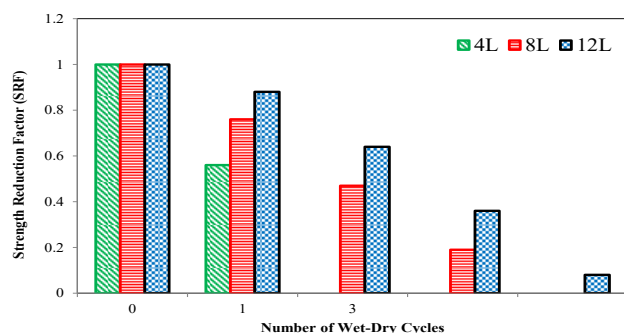


شکل ۵. تغییرات pH در نمونه‌های تثبیت شده

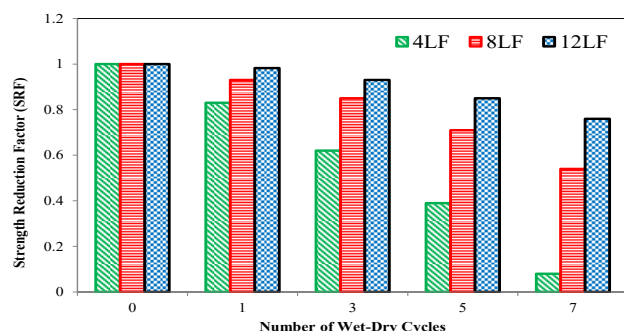
۵. تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت کششی

شرایط محیطی یکی از عوامل مخرب خاک‌های تثبیت شده است که با تغییرات فیزیکی موجب کاهش دوام (پایداری) محصول شده و به تدریج موجب تخریب آن خواهد شد. یکی از موثرترین روش‌ها

می‌دهد اما ورود الیاف به سیستم در نمونه دارای ۴ درصد تثبیت کننده همچنان ناکارآمد بوده و نمی‌تواند به دلیل کمبود واحدهای چسبنده ساختاری یکپارچه ایجاد کنند اما با اضافه شدن آهک به ۸ درصد تا حدودی الیاف‌ها توسط ساختارهای سیمانی حمایت شده اما تحت سیکل‌های مختلف تا ۷ دوره مقداری از ساختار سیمانی شسته و مقداری شکسته شده‌اند و در نتیجه دوام نمونه قابل قبول نخواهد بود اما در حضور ۱۲ درصد آهک ساختار یکپارچه حفظ شده و عملکرد نمونه‌ها با حفظ ۷۶ درصد مقاومت موفقیت آمیز است بنحویکه مقدار مقاومت فشاری نمونه 12LF از ۱/۳۸ به ۱/۰۵ کاهش یافته و در محدوده قابل قبول ۱ تا ۳ مگاپاسکال است.

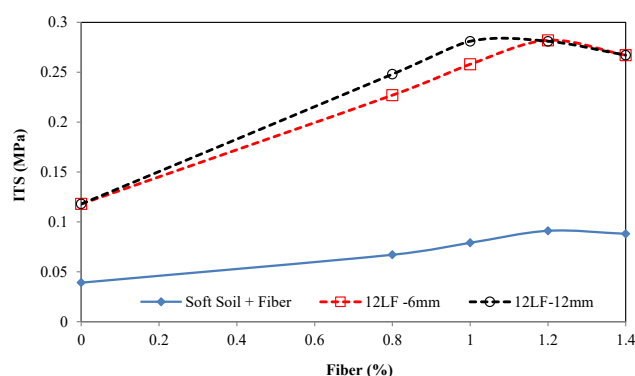


شکل ۷. تغییرات ضریب کاهش مقاومت در نمونه های تثبیت شده با آهک تحت سیکل تر-خشک



شکل ۸. تغییرات ضریب کاهش مقاومت در نمونه های تثبیت شده با آهک و مسلح به الیاف تحت سیکل تر-خشک

شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز تغییرات ضریب کاهش مقاومت خاک‌های تثبیت شده با آهک را تحت سیکل انجماد-ذوب نشان می‌دهد.



شکل ۶. تغییرات ITS در نمونه‌ها با افزودن الیاف

۶. ضریب کاهش مقاومت

در ادامه مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های اصلاح شده اندازه-گیری شد بمنظور تحلیل بازدهی نمونه‌های اصلاح شده تحت سیکل تر-خشک و انجماد-ذوب، از پارامتر بی بعد ضریب کاهش مقاومت (رابطه ۴) مطابق زیر بهره برده شد [۱۸]:

$$(۴) \quad \text{ضریب کاهش مقاومت} = \frac{UCS_{\text{بعد از سیکل}}}{UCS_{\text{اولیه}}}$$

شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات ضریب کاهش مقاومت خاک‌های تثبیت شده با آهک را تحت سیکل تر-خشک نشان می‌دهد. با افزایش تعداد سیکل مقاومت نمونه‌ها به شدت کاهش یافته، بنحویکه نمونه حاوی ۱۲ درصد آهک پس از ۷ سیکل، ۲۴ درصد مقاومت خود را از دست می‌دهد. افزودن ۴ درصد تثبیت کننده در طی سه سیکل اول پایدار بوده ولی بعد از آن تخریب رخ خواهد داد با افزایش مقدار آهک به ۸ درصد وضعیت پایداری بهتر بوده اما پس از سیکل هفتم تقریباً ناپایدار می‌گردد. ورود ۱۲ درصد آهک به دلیل افزایش واکنش‌های پوزولانی توسط مقادیر بیشتر آهک با خاک انحلال یافته بوده که تا حدودی با یکپارچه نگه‌داشتن نمونه نسبت به مقادیر کمتر آهک، دوام خاک تثبیت شده را بهبود بخشیده و تا سیکل هفتم مقاومت می‌کند اما همچنان مقدار مقاومت نمونه‌ها قابل قبول نبوده که ناکارآمد بودن این روش با آهک تنها را نشان

(۱) با اضافه شدن آهک تولید ژل‌های سیمانی در مخلوط تثبیت شده، موجب کاهش نفوذ آب شده و این کاهش نفوذ آب، در شرایط خشک ترک‌های کمتری در اطراف منافذ ایجاد خواهد کرد.

(۲) انحلال ساختارهای خاک و ترکیب با آهک ژل‌های سیمانی ایجاد کرده که الیاف را احاطه و با چسباندن آن‌ها به یکدیگر سیستم یکپارچه ایجاد می‌کنند.

(۳) الیاف با چگالی کم پس از حضور در سیستم موجب افزایش دانسیته شده و سیستم خاک تثبیت شده متراکم‌تری ایجاد می‌کند. این افزایش دانسیته اولاً باعث تداخل و درگیری بیشتر بین ذرات مخلوط تثبیت شده و الیاف می‌شود که با ایجاد ساختار یکپارچه اجازه شسته شدن خاک یا تثبیت کننده را نداده و همچنین موجب کاهش منافذ در ساختار خاک تثبیت شده می‌شود.

(۴) افزودن الیاف با اتصال دو طرف ترک، مانع از باز شدن و رشد ترک‌ها می‌شود.

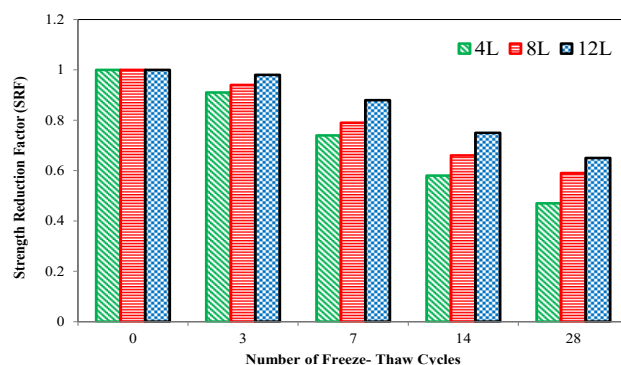
(۵) افزودن الیاف در شرایطی که ذرات خاک تمایل به تورم و پس از خشک شدن کاهش حجم دارند با تحمل نیروی کششی مانع از تغییرات حجم شده و از گسترش ریز ترک‌ها جلوگیری می‌کند.

۷. آنالیز اشعه ایکس

آنالیز XRD بمنظور ارزیابی دقیق، فازهای سیمانی جدید در بکارگیری تثبیت کننده آهک انجام شد بر اساس موارد ارائه شده می‌توان انتظار داشت که خصوصیات الگوهای XRD خاک بخصوص شدت پیک تحت تاثیر ماده تثبیت کننده باشد بنابراین تغییرات شدت بازتاب برای نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده به وسیله طیف‌های XRD تعیین و در شکل ۱۱ ارائه شد. طیف‌های XRD مربوط به خاک نرم شامل دو شدت بازتاب اصلی کانی کائولینیت (۳/۵۶ و ۷/۱۳ آنگستروم) بوده که در نمونه‌های تثبیت شده به شدت کاهش یافته‌اند. می‌توان با توجه به انجام واکنش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت این موضوع را توجیه کرد بنحویکه تشکیل ساختار مجتمع و همچنین مصرف ذرات رس در واکنش‌های

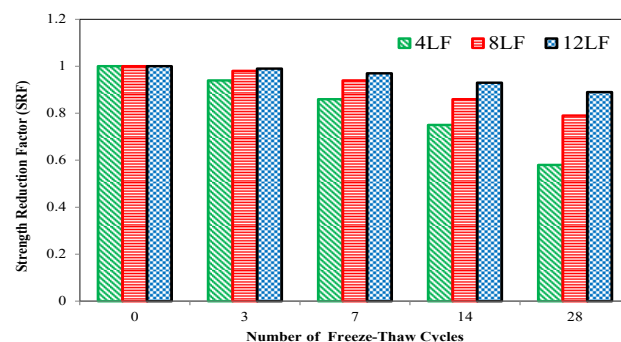
باتوجه به اثر تخریب کمتر این سیکل نسبت به سیکل تر-خشک شدن تعداد سیکل‌ها تا ۲۸ مورد افزایش یافت. نمونه تثبیت شده با ۱۲ درصد آهک و ۱ درصد الیاف با عملکرد مناسب را داشته و ۸۲ درصد مقاومت خود را حفظ کرده و مقاومت فشاری آن از ۱/۳۹ به ۱/۱۷ کاهش یافته که همچنان در محدوده قابل قبول است.

با مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ با شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود شدت کاهش مقاومت در سیکل انجماد-ذوب بوضوح کمتر از سیکل تر-خشک شدن بوده که می‌توان این نتیجه را گرفت که سیکل تر-خشک بسیار مخرب‌تر از انجماد-ذوب بوده بنحویکه هر سیکل تر-خشک اثری حدودی بیش از ۵ برابر سیکل انجماد-ذوب دارد.



شکل ۹. تغییرات ضریب کاهش مقاومت در نمونه‌های تثبیت شده با آهک تحت

سیکل انجماد-ذوب



شکل ۱۰. تغییرات ضریب کاهش مقاومت در نمونه‌های تثبیت شده با آهک و

مسلح به الیاف تحت سیکل انجماد-ذوب

این عملکرد مناسب به دلایل زیر حاصل شده است:

(۳) مقدار بهینه الیاف با طول ۱۲ میلی متر ۱ درصد بوده ولی با کاهش طول الیاف به ۶ میلی متر مقدار بهینه ۱/۲ درصد خواهد بود. (۴) خاک های تثبیت شده با آهک در برابر سیکل تر-خشک به شدت آسیب پذیر بوده و بیشتر مقاومت از بین رفته است پس از آن افزودن الیاف پلی پروپیلن به این سیستم، موجب ایجاد ساختار یکپارچه و مقاوم در برابر شرایط محیطی خواهد شد.

(۵) سیکل تر-خشک در مقایسه با سیکل انجماد-ذوب بسیار مخرب تر بوده بنحویکه می توان میزان تخریب آن را حدوداً بیش از ۵ برابر در نظر گرفت.

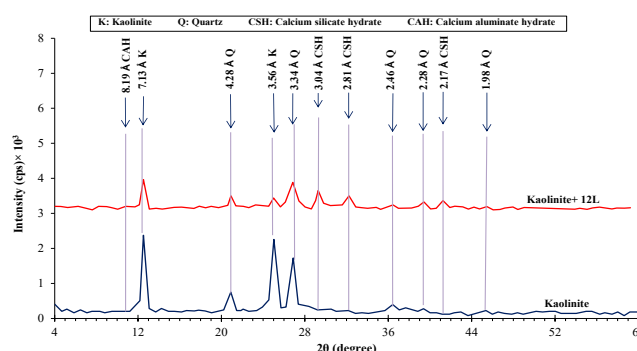
(۶) نمونه خاک نرم تثبیت شده با ۱۲ درصد آهک و ۱ درصد الیاف در برابر شرایط محیطی (تر-خشک و انجماد-ذوب) عملکرد قابل قبولی داشته و حداقل حدود قابل قبول برای زیرساز را تامین می کند.

(۷) نتایج بدست آمده از تست های ریزساختاری و بزرگ ساختاری نشان می دهد که حضور آهک در سیستم باعث افزایش عمده ژل-های سیمانی CSH و CAH و افزودن الیاف با چگال تر کردن سیستم، احاطه کردن ریزترک ها و ایجاد سیستم یکپارچه، عملکردی قابل قبول ارائه می دهند بنحویکه فرآیند اصلاح خاک نرم با استفاده از ترکیب آهک-الیاف علاوه بر ارتقاء پارامترهای مقاومتی، دوام و پایداری را افزایش داده است.

Reference

- [1] Qiyasi, V., Vali Rati, sh. \Investigating problematic soils and presenting new improvement solutions", Iran Geotechnical Association, (2019).
- [2] Meddah, Abdelaziz., Goufi, A.E., & Pantelidis, Lysandros. \Improving Very High Plastic Clays with the Combined Effect of Sand, Lime, and Polypropylene Fibers", Appl. Sci. 19, pp 1-13 (2022).
- [3] Güllü, H., & Khudir, A. \Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime". Cold Regions Science and Technology, 106, pp.55-65 (2014).

پوزولانی موجب کاهش بازتاب شده که نهایتاً منجر به کاهش شدت پیک کانی کائولینیت در نمونه های تثبیت شده نسبت به نمونه تثبیت نشده می گردد. تغییرات شدت پیک CSH نشان می دهد حضور آهک باعث رشد ژل های سیمانی شده است. روند نتایج مقاومت فشاری و کشش غیر مستقیم با پیک های آنالیز اشعه ایکس مطابقت کاملی دارد. در نهایت این نتیجه حاصل خواهد شد که تثبیت کننده با مصرف بهینه آهک و ورود مقادیر قابل توجه SiO_2 و Al_2O_3 واکنش پوزولانی مناسب تری داشته و مقادیر پیوند CSH را افزایش داده که بهبود در سیستم را ایجاد می کند.



شکل ۱۱. آنالیز XRD نمونه کائولینیت و نمونه تثبیت شده با ۱۲ درصد آهک

۸. نتیجه گیری

تحقیق انجام شده به بررسی کارایی و پتانسیل نمونه های تثبیت و تسلیح شده تحت سیکل های تر-خشک و انجماد-ذوب پرداخت. فرآیند تثبیت با آهک و مسلح سازی با الیاف پلی پروپیلن انجام شد. در طی مطالعه انجام شده نتایج زیر حاصل شد:

- (۱) مقدار بهینه آهک برای تثبیت خاک نرم کائولینیت ۸ تا ۱۲ درصد بوده که مقاومت فشاری قابل قبولی داشته ولی در مقادیر بیشتر مقاومت فشاری دچار افت خواهد شد.
- (۲) استفاده از الیاف در طول های مختلف عملکرد مناسبی داشته بنحویکه افزودن الیاف مقاومت کششی را به شدت افزایش داده اما در تغییر مقاومت فشاری تغییرات محدود است.

- mechanism of red mud waste modified by desulphurization gypsum-fly ash under drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*, 249, 118772 (2020).
- [16] Goodarzi, A. R. and Akbari, H. R. \Assessing the anion type effect on the hydro-mechanical properties of smectite from macro and micro-structure aspects" *Geomechanics and Engineering*, Vol. 7, No. 2 pp183-200 (2014).
- [17] Akbari, H. R., Sharafi, H., & Goodarzi, A. R. \Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40° C". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp.1-15 (2020).
- [18] Akbari, H. R., Sharafi, H., & Goodarzi, A. R. \Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles". *Geotextiles and Geomembranes*, 49, pp1470-1482 (2021).
- [19] Khadka, S. D., Jayawickrama, P. W., Senadheera, S., & Segvic, B. (2020). Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum. *Transportation Geotechnics*, 23, 100327
- [20] Roshan, K., Choobbasti, A. J., & Kutanaei, S. S. \Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition" *Transportation Geotechnics*, 100359 (2020).
- [4] Goodarzi, A. R., Goodarzi, S. H., & Akbari, H. R. \Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste". *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 39(C2), pp.333-350 (2015).
- [5] Goodarzi, A. R., Akbari, H. R., & Salimi, M. \Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume". *Applied Clay Science*, 132, pp.675-684 (2016).
- [6] Wu, Z., Deng, Y., Cui, Y., Chu, C., & Feng, Q. \Geological investigation of the settlement behaviour of two highways in Lianyungang region". *Engineering Geology*, 105648 (2020)
- [7] Kavak, A. and Baykal, G. \Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay" *Environmental Earth Sciences* 66(7) (2011).
- [8] Maubec, N., Deneele, D., Ouvrard, G. \Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material" *V(137)* pp107-114 (2017)
- [9] Thakare, S. W., Priti Chauhan. \Stabilization of Expansive Soil with Micro Silica, Lime and Fly Ash for Pavement". *International Journal of Engineering Research Volume No.5, Issue Special 1* pp 09-13 (2016).
- [10] Ibrahim, H. H., Alshkane, Y. M., Mawlood, Y. E., Krikar, M., Noori, G., Hasan, A. M. \Improving the geotechnical properties of high expansive clay using limestone powder". *Innovative Infrastructure Solutions* 5:112 (2020).
- [11] Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaoud, A., Al-Mukhtar, M. \Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays". *Cold Regions Science and Technology* 119 pp151-157 (2015).
- [12] Saygili, A., & Dayan, M. \Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers". *Cold Regions Science and Technology*, 161, pp107-114 (2019).
- [13] ASTM, \Annual Book of ASTM Standard. 4. American Society for Testing and Materials", Philadelphia, p08 (2006).
- [14] EPA. Process design manual: \Land application of municipal sludge. EPA-625/1-83-016. Municipal Environmental Research Lab (1983).
- [15] Salih, W. T., Yu, W., Dong, X., & Hao, W. Study on stress-strain-resistivity and microscopic