

Study of geotechnical properties of silty loess soil stabilized with lime and glass fiber

Amin Jamshidi^{1*}, Rasool Yazarloo², Amin Majidi Hasanabadi³, Amin Mahmoodi Moghadam⁴

1- Department of Geology, Lorestan University, Lorestan, Iran

2- Department of Civil Engineering, Gonbad Kavoods Branch, Islamic Azad University, Gonbad Kavoods, Iran

3- Department of Civil Engineering, Shams Higher Education Institute, Gonbad Kavoods, Iran

4- Department of Civil Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran

Keywords: Silt loess, Lime, Glass fibers, Geotechnical properties, Improvement

1-Introduction

Soil is one of the essential building materials, and the primary support of structures has long been a human interest. However, due to weakness in shear strength and lack of resistance to tensile forces, researchers have consistently sought to increase its bearing capacity, strength, and improve its properties and various methods including mechanical modification such as compaction, chemical modification such as treatment with lime or cement (Al Aghbari, 2005; Tang et al., 2007).

One of the most important issues that should be considered in soil projects is the problematic soils. The most important problematic soils are collapsible soils. If these soils are not identified, if structures, roads, or railroads are built on them, water infiltration into the soil can cause significant problems. Loess deposits are common examples from collapsible soils that, based on their considerable distribution in Iran, research has been done on different aspects.

Loess soil combined with fibers and lime has good integrity, and consistency and causes form a composite material. Threads of fibers are distributed throughout the soil volume, and in different directions, it will create a homogeneous soil (Maher and Gray, 1990).

In this study, to improve geotechnical properties of silty loose soil, lime, glass fiber, and combined lime and glass fiber as a stabilizer be used.

2-Methodology

In this study, lime and glass fibers were used to improve the silty loess soil. The silty loess soil was sampled from a Golestan province region and transferred to the Soil Mechanics Laboratory of the Shams University of Gonbad-e-Kavos, to achieve this. Then, to compare soil stabilization and reinforcement, the effect of lime and glass fiber, each individually and simultaneously on geotechnical characteristics of silty loess soil, has been investigated. The percentages of mixing for lime is (0%, 4% and 8% of dry weight of soil) and glass fiber (0%, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%, 1.5% and 2% of dry weight of soil). The mixing rate and different curing periods on the compaction behavior, compressive strength, and shear strength of the samples have been investigated.

3- Results and discussion

For samples mixed with 0% glass fiber, 4% and 8% lime, the optimum moisture content and maximum dry unit weight have increased and decreased, respectively. For soil mixed with 4% lime, the optimum moisture content

*Corresponding author: Jamshidi.am@lu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2019.29538.1985

Received 2019-05-14

Accepted 2019-11-11

and maximum dry unit weight were 15% and 1.75 g/cm³. In 8% lime, the optimum moisture content and maximum dry unit weight were 15.5% and 1.72 g/cm³.

For samples containing 0% lime and different percentages of fibers, the optimum moisture first decreased and increased. However, the maximum dry unit weight has a decreasing trend, and it reached from 1.76 g/cm³ for natural soil to 1.72 g/cm³ for the sample with 2% fibers. For other samples, the soil mixed simultaneously with lime and fibers, the optimum moisture content increased, and the maximum dry unit weight decreased.

When the soil is mixed with lime alone, with increasing lime, the amount of soil strength increased during all curing duration. When soil is mixed simultaneously with lime and fibers, in samples with short curing duration (1 and 7 days), samples with 8% lime have more strength. However, in the 28-day curing duration, samples containing 4% lime have more strength.

By increasing the curing duration from 7 to 28 days, the internal friction angle increases for a soil sample with specified lime and fibers. Where the soil is only reinforced with glass fibers (0% lime), the amount of soil cohesion increases increasing fiber content, so that by increasing the fiber content to 2%, Soil cohesion reached 0.37 kg/cm². The cohesion of natural soil is 0.03 kg/cm².

4-Conclusion

The results of unconfined compressive strength tests showed that adding glass fiber to lime stabilized soil significantly increases the compressive strength of the samples, increases the strain of the rupture, and reduces the cracks' width. In the direct shear test, it was observed that mixing the soil with lime and glass fibers increases the shear strength, increases displacement at failure, increases the soil's friction angle, and increases cohesion. Unconfined compression strength and direct shear tests showed that there is a fiber percentage that, by increasing the fiber percentage from that, the strength decreases. This amount of fiber was obtained in most tests between 0.9 to 1.2% fibers.

References

- Al Aghbari, M.Y., 2005. Suitability of Desert sand cement mixes for base course in highway pavements. *Electronic Journal of Geotechnical* 10, 21–40.
- Maher M.H., Gray D.H., 1990. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering* 116, 1661–1677.
- Tang, C.S., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y., 2007. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 25, 194–202.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jamshidi, A., Yazarloo, R., Majidi Hasanabadi, A., Mahmoodi Moghadam, A., 2020. Study of geotechnical properties of silty loess soil stabilized with lime and glass fiber. *Adv. Appl. Geol.* 10(2), 137-153.

DOI: 10.22055/AAG.2019.29538.1985

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15077.html?lang=en

بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس سیلتی تثبیت شده با آهک و الیاف شیشه

امین جمشیدی*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

رسول یازرلو

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گنبدکاووس، گنبدکاووس، ایران

امید مجیدی حسن آبادی

گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی شمس گنبد کاووس، گنبدکاووس، ایران

امین محمودی مقدم

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

* Jamshidi.am@lu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش به منظور بهسازی خاک لس سیلتی، از ماده تثبیت کننده آهک و الیاف مسلح کننده شیشه استفاده شده است. بدین منظور خاک لس سیلتی از منطقه‌ای در شهرستان گنبد کاووس در استان گلستان نمونه برداری شده و به آزمایشگاه مکانیک خاک انتقال داده شده است. سپس به منظور مقایسه بین تثبیت و تسلیح خاک، تأثیر آهک و الیاف شیشه هریک به تنهایی و نیز بصورت همزمان بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس سیلتی مورد بررسی شامل تراکم (وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه)، مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) بررسی شده است. درصدهای اختلاط در نظر گرفته شده برای آهک عبارتست از (۰٪، ۴٪، ۸٪ و وزن خشک خاک) و الیاف شیشه (۰٪، ۰/۳٪، ۰/۶٪، ۰/۹٪، ۱/۲٪، ۱/۵٪ و ۲٪ وزن خشک خاک). تأثیر درصد اختلاط و دوره‌های عمل آوری (۱، ۷ و ۲۸ روزه) مختلف بر روی رفتار تراکمی، مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت برشی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش تراکم نشان داد وقتی خاک به تنهایی با آهک مخلوط می‌شود، درصد رطوبت بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. همچنین زمانی که خاک به تنهایی با الیاف شیشه مخلوط می‌شود، درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد در حالیکه حداکثر وزن مخصوص خشک همواره کاهش می‌یابد که نشان دهنده این است که الیاف تراکم پذیری خاک را کاهش داده است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده نشان داد که اضافه کردن الیاف شیشه به خاک تثبیت شده با آهک، باعث افزایش چشمگیری در مقاومت نمونه‌ها شده است. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که مخلوط کردن خاک با آهک و الیاف شیشه، باعث افزایش مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و آزمایش برش مستقیم مشاهده شد که درصد الیافی وجود دارد که پس از آن با افزایش بیشتر الیاف از مقاومت خاک کاسته می‌شود. این مقدار الیاف در اکثر آزمایش‌ها بین ۰/۹٪ تا ۱/۲٪ بدست آمده است.

کلمات کلیدی: لس سیلتی، آهک، الیاف شیشه، خصوصیات ژئوتکنیکی، بهسازی.

مقدمه

جنبه‌های مختلف روی آن‌ها صورت گرفته است. قابلیت رմبندگی خاک‌های لسی حوزه قرناوه در شمال کلاله (استان گلستان) توسط (Hafez Moghadasi et al., 2011) بررسی شد. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی نشان داد که افزایش نسبت تخلخل در این خاک‌ها باعث افزایش رմبندگی شده و افزایش میزان فعالیت کانی‌های رسی باعث کاهش رմبندگی خاک می‌شود. پژوهشی توسط (Behrouzsaroukolai, 2013) در خصوص افزودن نانو مواد از قبیل نانو سیلیس و نانو آلومینیوم بر روی خاک لس جهت یافتن بهترین درصد اختلاط این مواد جهت بهبود مقاومت فشاری محصور نشده خاک لس انجام شد. نتایج این پژوهش نتایج داد افزودن نانو مواد باعث بهبود مقاومت فشاری محصور نشده خاک لس می‌شود. Bahrami و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی خاک‌های لسی شمال کلاله در استان گلستان با انجام آزمایش‌های تحکیم مضاعف و واگرایی پرداختند. نتایج آزمایش تحکیم مضاعف نشان داد که این خاک‌ها مستعد رմبندگی می‌باشند. همچنین نتایج آزمایش واگرایی دلالت بر این داشت که پدیده واگرایی ناشی از حضور سدیم، در فرسایش این خاک‌ها نقشی ندارد و فرسایش پذیری بالای این خاک-ها اساساً یک پدیده مکانیکی است که ناشی از بافت و دانه بندی خاص لس‌ها

خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی و اصلی‌ترین تکیه‌گاه سازه، از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. اما به سبب ضعف در مقاومت برشی و عدم مقاومت در برابر نیروهای کششی، پژوهشگران پیوسته درصدد افزایش ظرفیت باربری، مقاومت و بهبود خواص آن برآمده و روش‌های مختلفی از جمله اصلاح مکانیکی مانند تراکم، اصلاح شیمیایی مانند تثبیت با آهک یا سیمان، استفاده از ایده خاک مسلح یا بکارگیری عناصر کمکی و با مقاومت کششی زیاد را در این زمینه به‌کار گرفته‌اند. (Al Aghbari, 2005; Tang et al., 2007). یکی از مهمترین مسائلی که در پروژه‌های خاکی باید مدنظر قرارگیرد، مقابله با خاک‌های مسئله‌دار است. از مهم‌ترین خاک‌های مسئله‌دار، خاک‌های رմبند یا فروریزی می‌باشند. درصورت عدم شناسایی اینگونه خاک‌ها، اگر سازه، راه و یا خطوط ریلی روی آنها احداث شود، می‌تواند در اثر نفوذ آب در خاک، مشکلات قابل توجهی را ایجاد نماید (Amini Varki, 2011).

از نمونه‌های رایج خاک‌های رմبند، می‌توان نهشته‌های بادرفتی لسی را نام برد که با توجه به گسترش قابل توجه آن‌ها در ایران، تاکنون تحقیقاتی از

به کائولینیت تثبیت شده با ۵ درصد آهک، شیب منحنی تنش- کرنش افزایش یافته و شکست از حالت پلاستیک به شکننده (ترد) تبدیل می‌شود (Cai et al., 2006). آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده، برش مستقیم و تحلیل عکس‌های SEM را روی نمونه‌های خاک رس مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن دوازده میلیمتری و تثبیت شده با آهک انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که درصد الیاف، درصد آهک و زمان عمل‌آوری در مشخصات مهندسی خاک تثبیت شده موثر هستند. Tang و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی تأثیر سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم پرداختند. آنها مشاهده نمودند که الیاف در نمونه‌های غیر سیمانی شده و سیمانی شده مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم و کرنش محوری در شکست را افزایش و سختی و مقاومت اوج را کاهش می‌دهد (Naderi و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر الیاف ضایعاتی کارخانجات فرش و دو چسب پلیمری پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌وینیل‌استات را بر روی ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک ماسه‌ای بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش مقاومت در استفاده از پلی‌وینیل‌الکل بیشتر از پلی‌وینیل‌استات است و کاربرد الیاف بدون استفاده از چسب پلیمری تأثیر زیادی در افزایش مقاومت ندارد. Sadak و همکاران (۲۰۱۳) یک سری آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ای تثبیت شده با الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان انجام دادند. الیاف پلی‌پروپیلن در طول‌های ۶، ۱۲ و ۲۰ میلیمتری و به نسبت‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۱ درصد و سیمان به نسبت ۰/۵ و ۱ درصد انتخاب شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت فشاری محصور نشده و سختی دارد.

در این پژوهش، استفاده از آهک، الیاف شیشه و مخلوط آهک-الیاف شیشه به عنوان تثبیت کننده و مسلح کننده یک خاک لس سیلتی به منظور بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک با استفاده از آزمایش‌های تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم تعیین خواهند شد.

خاک‌های لسی استان گلستان

نهشته‌های لسی بیش از ۴۷۷ هزار هکتار از مساحت استان گلستان معادل تقریباً ۲۰ درصد از مساحت استان را پوشانده و پهنه وسیعی از شرق و شمال-شرق استان گلستان را فراگرفته است. گزارش‌های فراوانی از ناتوانی انسان در برابر مخاطرات لسی در حفظ و پایداری سازه‌های متأثر از آن وجود دارد و در سطح استان گلستان روستاهای زیادی در معرض تهدید و خطر رمیش فروچاله‌های لسی قرار دارند. بخش‌های وسیعی از گرگان، داشلیبر و نومرواه تپه توسط نهشته‌های لسی پوشانده شده‌اند که بخش‌هایی از کمربند لسی هستند که خاورمیانه را پوشانده و به سمت شمال به کشورهای ترکمنستان، قزاقستان و تاجیکستان امتداد یافته است (Setayesh, 2017) و (and Ghafoori, 2011 Lashkaripour) بیان داشتند که لسی‌های استان گلستان با ضخامت زیاد (بیش از هفتاد متر) و با مساحت ۳۸۸ هزار هکتار، بیش از ۱۷ درصد از سطح استان را پوشانده‌اند. پراکندگی نهشته‌های لسی در استان گلستان در شکل ۱ نشان داده شده است.

منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، در استان گلستان، شمال شهرستان گنبد کاووس، در حوالی روستای ترشکلی می‌باشد. این منطقه در بخش جنوبی حوزه آبخیز اترک و فاصله حدود ۵۰ کیلومتری شمال شهرستان گنبد کاووس و

است. تأثیر نانو کائولینیت بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک لس سیلتی استان گلستان توسط Rezaei و همکاران (۲۰۱۵) بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد افزایش نانو کائولینیت تا ۲ درصد باعث افزایش چسبندگی خاک لس سیلتی می‌شود در صورتی که افزایش نانو کائولینیت تأثیر محسوس افزایشی با کاهشی روی زاویه اصطکاک داخلی نداشته و مقدار آن با تغییرات نانو کائولینیت تقریباً ثابت مانده است. Enayat و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر تراکم استاتیکی بر نفوذپذیری خاک لس را مطالعه کردند. نتایج این محققین نشان داد نسبت پوکی خاک لس با نفوذپذیری آن یک رابطه لگاریتمی مثبت دارد.

برای تثبیت و بهسازی خاک‌های لسی غالباً از آهک استفاده می‌شود. کشور ایران با داشتن منابع غنی آهک، می‌تواند به عنوان یکی از کشورهای صاحب‌نظر در زمینه تثبیت خاک با آن مواد محسوب شود (Janali Chubesti and Bagherpour, 2003). خاک تثبیت شده با آهک بدلیل داشتن خصوصیات ژئوتکنیکی مناسب که نتیجه گیرش آهک در طول دوره عمل آمدن است، سال‌های زیادی است که مورد توجه مهندسی عمران قرار گرفته است (Al Pei و همکاران (۲۰۱۵) خصوصیات فیزیکی- شیمیایی لسی‌های تثبیت شده با آهک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این محققین نشان داد که آهک یک ماده افزودنی مناسب و مؤثر در کاهش رهمبندگی خاک لسی است (Zhang et al., 2018) و همکاران (۲۰۱۸) خصوصیات فیزیکی- شیمیایی و مکانیکی لس تثبیت شده با آهک را مطالعه کردند. نتایج نشان داد لس تثبیت شده با آهک خصوصیات فیزیکی- شیمیایی و مکانیکی بهتری نسبت به لس تثبیت نشده دارد. تأثیر آهک روی نفوذپذیری خاک لسی توسط Gao و همکاران (۲۰۱۸) بررسی شد. نتایج این محققین نشان داد اضافه کردن آهک به خاک باعث کاهش نفوذپذیری خاک لسی می‌شود. Garakani Akbari و همکاران (۲۰۱۹) رفتار هیدرومکانیکی خاک لسی تثبیت شده با آهک را با ارائه یک مدل پیشگو بررسی کردند. نتایج این محققین نشان داد که مدل به خوبی می‌تواند رفتار هیدرومکانیکی خاک لسی تثبیت شده با آهک را پیش‌بینی کند. استفاده از آهک به تنهایی هزینه بر است و در مناطق مرطوب به خوبی با خاک رس واکنش نمی‌دهد (Bagherian et al., 2005). جهت کاستن از مصرف آهک و بهبود شرایط تثبیت خاک، می‌توان از ترکیب آهک با افزودنی‌های دیگر و یا تلفیق آن با تکنیک‌های دیگر نظیر تسلیح خاک استفاده نمود که مورد هدف این پژوهش می‌باشد. الیاف به عنوان یکی از انواع المان‌های تسلیح، جهت افزایش مقاومت برشی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. خاک مسلح به الیاف قابلیت جذب انرژی بالایی دارد و تحت اثر بارهای ضربه‌ای به راحتی از هم نمی‌پاشد. شاهد تاریخی این فناوری، کاربرد کاه‌گل در بناهای ساختمان است. از آنجا که الیاف در توده خاک در تمام جهات پراکنده می‌شود، در صورت تشکیل یک ترک در جهات مختلف، الیاف اتصالاتی را بوجود آورده و از گسترش ترک جلوگیری می‌نماید (Tang et al., 2007).

خاک ترکیب شده با الیاف و آهک یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و باعث تشکیل یک ماده کامپوزیت می‌شود. رشته‌های نازک الیاف در تمام حجم خاک و در جهات مختلف توزیع می‌شود و باعث ایجاد یک شرایط همگن برای خاک خواهد شد (Maher and Gray, 1990). تاکنون تحقیقاتی در ارتباط با بهسازی خاک‌ها با آهک و الیاف صورت گرفته است. Asna Ashari و Jafari (۲۰۱۰) به منظور بررسی رفتار مقاومتی خاک کائولینیت اصلاح شده با آهک و الیاف، از آهک و ضایعات نوعی الیاف تولیدی کارخانجات نخ تابر به طول ۲ سانتیمتر، استفاده نمودند. Abdi و Baharlooie Khayat (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر خاک کائولینیت تثبیت شده با آهک پرداختند. نتایج این محققین نشان داد با افزودن ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن

متوسط منطقه از سطح دریاهای آزاد حدود ۳۰ متر می‌باشد (اداره کل هواشناسی استان گلستان). منطقه دارای بادهای محلی در فصول پاییز و زمستان بوده و معمولاً این بادهای از شمال غرب به سمت جنوب شرقی می‌وزد. بخش وسیعی از منطقه، توسط نهشته‌های ریزدانه جوان پوشیده شده است. قسمتی از این رسوبات منشأ بادی (لس) داشته که شامل لای، رس و ماسه است.

در نوار مرزی با کشور ترکمنستان با مختصات جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵۲ دقیقه و ۵۷ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه و ۵۱ ثانیه عرض جغرافیایی واقع شده است. موقعیت محل نمونه برداری خاک در شکل ۲ نشان داده شده است. این منطقه دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های ملایم می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه حدود ۱۷۳ میلیمتر و دمای متوسط سالیانه آن معادل ۱۷ درجه سانتیگراد است. دمای متوسط حداکثر و حداقل به ترتیب معادل ۳۵/۹ (در مردادماه) و ۳ سانتیگراد (بهمن ماه) می‌باشد. میزان تبخیر منطقه حدود ۲۲۲۰ میلیمتر در سال برآورد شده است. ارتفاع



شکل ۱- پراکندگی نهشته‌های لسی در استان گلستان (Lashkaripour and Ghafoori, 2011).

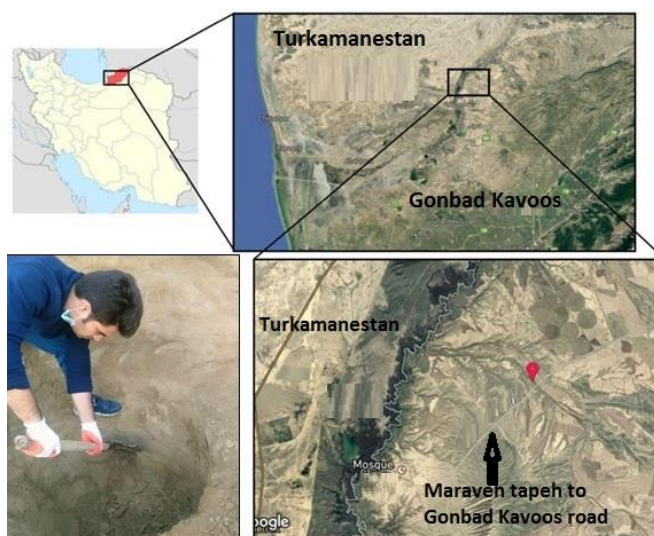
Fig. 1. Distribution of loess sediments in Golestan province (Lashkaripour and Ghafoori, 2011).

روش کار

(ASTM D2166, 2007)، برش مستقیم (ASTM D3080, 2007)

قرار گرفته است. هدف از انجام این آزمایش‌ها تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی شامل حداکثر وزن مخصوص خشک، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری محصور نشده، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی است. دوره عمل‌آوری در نظر گرفته شده نیز برای آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده زمان‌های ۱، ۷ و ۲۸ روزه و برای آزمایش برش مستقیم زمان‌های ۷ و ۲۸ روزه می‌باشد. نام نمونه‌ها و مقدار مصالح موردنیاز برای ساختن آن‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است.

در این پژوهش یک خاک لس سیلتی از روستای ترشکلی در شمال شهرستان گنبد کاووس (استان گلستان) تهیه شد (شکل ۲). به منظور بررسی تأثیر آهک و الیاف شیشه بصورت جداگانه و نیز بصورت همزمان بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه، ۲۰ نوع ترکیب متفاوت با مخلوط کردن همزمان خاک با درصد‌های وزنی مختلف آهک (۰، ۴، ۸٪) و وزن خشک خاک) و الیاف شیشه با مقادیر مختلف (۰، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵، ۲٪) وزن خشک خاک) آماده سازی شده و تحت آزمایش‌های تراکم استاندارد (ASTM D698, 2007)، مقاومت فشاری محصورنشده



شکل ۲- محل نمونه‌برداری روی نقشه ایران و تصویری از محل نمونه‌برداری.

Fig. 2. Location of sampling location on Iran map and an illustration from sampling location.

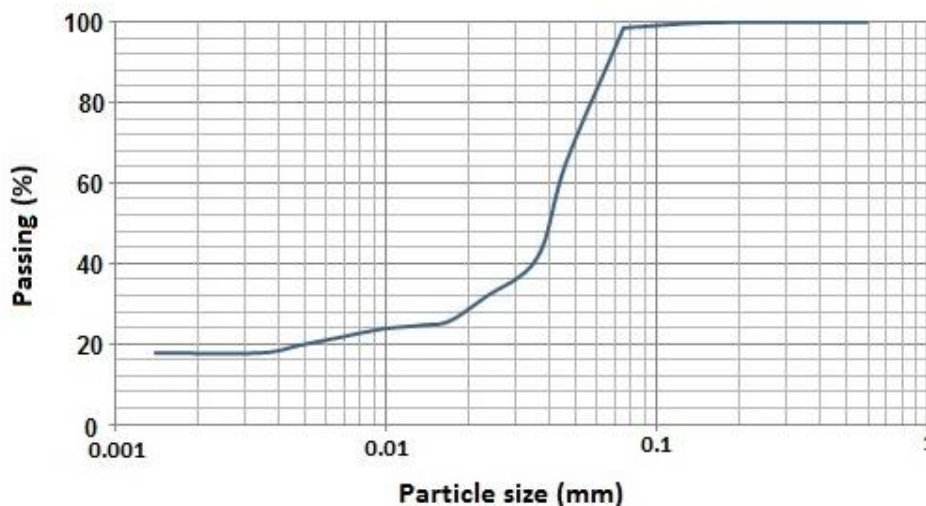
جدول ۱- نمونه‌های خاک تهیه شده با درصد مصالح مختلف.

Table 1. Soil samples made with different amounts of materials.

Soil Sample	% Of materials		
	Soil	Lime	Fibr
Natural Soil (With 0% Lime)	100	0	-
Soil with 4% Lime	96	4	-
Soil with 8% Lime	92	8	-
Soil with 0.3% Fibr	99.7	-	0.3
Soil with 0.6% Fibr	99.4	-	0.6
Soil with 0.9% Fibr	99.1	-	0.9
Soil with 1.2% Fibr	98.8	-	1.2
Soil with 1.5% Fibr	98.5	-	1.5
Soil with 2% Fibr	98	-	2
Soil with 4% Lime and 0.3% Fibr	95.7	4	0.3
Soil with 4% Lime and 0.6% Fibr	95.4	4	0.6
Soil with 4% Lime and 0.9% Fibr	95.1	4	0.9
Soil with 4% Lime and 1.2% Fibr	94.8	4	1.2
Soil with 4% Lime and 1.5% Fibr	94.5	4	1.5
Soil with 4% Lime and 2.0% Fibr	94	4	2
Soil with 8% Lime and 0.3% Fibr	91.7	8	0.3
Soil with 8% Lime and 0.6% Fibr	91.4	8	0.6
Soil with 8% Lime and 0.9% Fibr	91.1	8	0.9
Soil with 8% Lime and 1.2% Fibr	90.8	8	1.2
Soil with 8% Lime and 1.5% Fibr	90.5	8	1.5
Soil with 8% Lime and 2.0% Fibr	90	8	2

رسلایدار (CL-ML) می‌باشد. منحنی دانه‌بندی کامل این خاک در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که ذرات تشکیل دهنده خاک حداکثر قطر ۰/۱ میلی‌متر دارند. بر اساس منحنی دانه بندی، تقریباً ۲۲ درصد ذرات خاک مورد مطالعه دارای قطر کوچکتر از ۰/۰۱ میلی‌متر و تقریباً ۷۸ قطری بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی‌متر دارند.

مصلح مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل خاک لس سیلتی، آهک و الیاف شیشه می‌باشند. برای نمونه‌برداری از خاک لس سیلتی، به منظور جلوگیری از هوازدگی آن چاله‌هایی به عمق و قطر ۱۰۰ سانتی متر به وسیله بیلچه در زمین حفر شد (شکل ۲). سپس خاک برای آزمایش‌های تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم در داخل محفظه‌های پلاستیکی بسته‌بندی شدند و به آزمایشگاه مکانیک خاک انتقال داده شدند. براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک مورد مطالعه، خاک



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی خام مورد مطالعه.

Fig. 3. Grading Curve studied soil.

در این پژوهش، از الیاف چپد شیشه نوع E و با طول ۱۴ میلی‌متر به عنوان مسلح‌کننده استفاده شده است. الیاف شیشه از شرکت میسون تهیه شده است. تصویر این الیاف در شکل ۴ نشان داده شده است. برخی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این الیاف در جدول ۲ خلاصه شده است.

آهک مورد استفاده در این پژوهش آهک صنعتی شاهرود و از نوع شکفته است که در کیسه‌های ۲۰ کیلوگرمی در بازار موجود می‌باشد. آهک فوق ابتدا از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده و سپس مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴- الیاف شیشه نوع E استفاده شده در مطالعه حاضر.
Fig. 4. Type E glass fibers used in this study.

جدول ۲- برخی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف شیشه استفاده شده در مطالعه حاضر.
Table 2. Some physical and mechanical properties of glass fibers used in this study.

Length (mm)	14
Specific weight	2.56
Young's modulus (Gpa)	77
Tensile strength (MPa)	1700

آمریکا (ASTM D698, 2007) استفاده شده است. مطابق این روش، خاک در ۳ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه با چکش استاندارد کوبیده می‌شود. قالب و چکش تراکم مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۵ نشان داده شده است.

آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده روی نمونه خاک آزمایش تراکم استاندارد

به منظور بررسی رفتار تراکمی خاک لس سیلتی در حالت تثبیت شده با آهک، الیاف و مخلوط آهک-الیاف (جدول ۱) و مقایسه آن با حالت بدون مواد افزودنی از آزمایش پروکتور استاندارد طبق استاندارد انجمن تست



شکل ۵- چکش و قالب تراکم استاندارد استفاده شده در مطالعه حاضر.
Fig. 5. Hammer and standard compression mold used in this study.

آمده، آماده شده‌اند. بدین صورت که با توجه به حجم قالب، مقدار خاک خشک، آهک، الیاف و رطوبت مورد نیاز محاسبه شده است.

برای بازسازی نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، ابتدا نمونه‌های خاک با درصد‌های مختلف آهک و الیاف آماده شدند (جدول ۱) و بلافاصله در قالب مخصوص مقاومت فشاری با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر بازسازی شده‌اند. تلاش بسیاری به منظور ساختن نمونه‌هایی که از لحاظ وزن، تراکم و ارتفاع مشابه باشند، صورت گرفته‌است. بدین منظور خاک در ۵ لایه تقریباً مساوی در درون قالب ریخته شده و با چکش و سنبه در قالب مترکم شده است. در پایان ساختن نمونه و خارج کردن آن وزن نمونه کنترل شده و اگر اختلاف زیادی (بیش از ۵٪) با مقدار محاسبه شده

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

منظور از این مقاومت، تنش فشاری است که نمونه استوانه‌ای شکلی از خاک را در شرایط غیرمحصور تحت بارگذاری ساده به گسیختگی برساند. در این تعریف مقاومت فشاری محصور نشده به صورت تنش فشاری بیشینه برای گسیختگی نمونه خاک تعریف می‌شود. در این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده مطابق با استاندارد انجمن تست آمریکا (ASTM D2166, 2007) بر روی نمونه‌ها انجام شد. تمامی نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، در درصد رطوبت بهینه و با حداکثر وزن مخصوص خشک که از آزمایش تراکم استاندارد به دست

نیلونی قرار داده شده‌اند. تمامی نمونه‌ها جهت عمل‌آوری، در یک اتاق که دمای آن بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد بوده نگهداری شدند. نمونه‌های مقاومت فشاری محصور نشده برای دوره عمل‌آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه ساخته شد شکل ۷ یک نمونه آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده و شکل ۸ نمونه خاک گسیخته شده پس از آزمایش را نشان می‌دهد.

داشته است آن نمونه خراب شده و دوباره ساخته شده است. به منظور سهولت در ساختن نمونه‌ها از یک قالب باز شو که تصویر آن در شکل ۶ قابل مشاهده است، استفاده شده است. پس از عملیات متراکم کردن نمونه‌ها در قالب، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به منظور حفظ رطوبت موردنیاز برای عمل‌آوری در دو کیسه



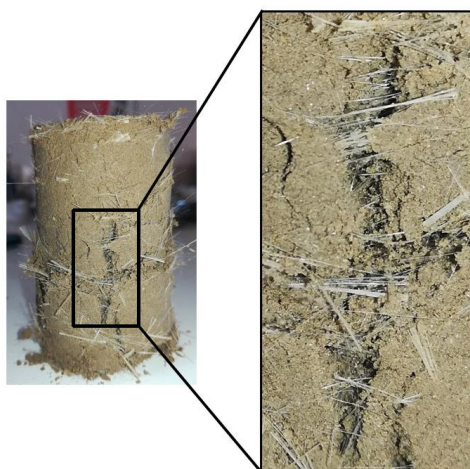
شکل ۶- قالب باز شو برای ساختن نمونه‌های مقاومت فشاری محصور نشده.

Fig. 6. Pop-up mold for making specimens of unconfined compressive strength.



شکل ۷- یکی از نمونه‌های ساخته شده از خاک لس سیلتی برای آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده.

Fig. 7. One of the specimens prepared from loose silty soil for unconfined compressive strength testing.



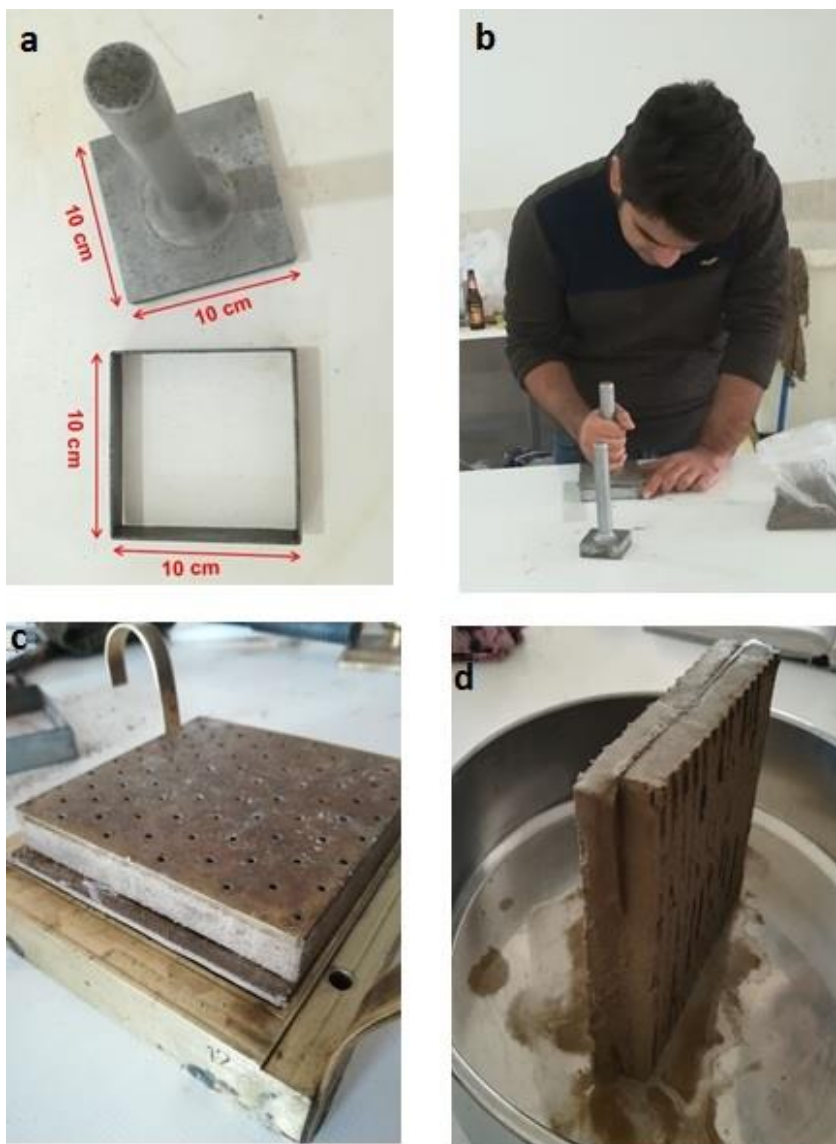
شکل ۸- گسختگی نمونه خاک با ۴ درصد آهک و ۱/۵ درصد الیاف شیشه بعد از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده.

Fig. 8. Failure of soil specimen with 4% lime and 1.5% glass fiber after unconfined compressive strength test.

آزمایش برش مستقیم

در این آزمایش نمونه‌های بازسازی شده خاک در دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد انجمن تست آمریکا (ASTM D3080, 2007) روی نمونه‌های خاک طبیعی و تثبیت شده با آهک، الیاف و مخلوط آهک و الیاف انجام شد (جدول ۱). در پایان زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در قالب مخصوص آزمایش برش مستقیم با ابعاد $100 \times 100 \times 20$ میلی‌متر ریخته و بازسازی شده و با کمک نمونه درآور مخصوص، به داخل جعبه برش انتقال داده

شده است. لازم به ذکر است که تلاش بسیاری به منظور یکنواخت بودن توده خاک و کنترل تراکم خاک درون قالب صورت گرفته است. با توجه به اینکه در آزمایش برش مستقیم نمونه از وسط و در سطح افقی برش می‌خورد، سطح مشترک هر یک از لایه‌ها نباید از وسط قالب بگذرد و همچنین پس از متراکم کردن هر لایه به منظور چفت و بست لایه‌ها، سطح هر لایه با کاردک خراش داده شد و لایه بعدی ریخته و متراکم شده است. در شکل ۹ تصاویری از نحوه بازسازی نمونه‌ها و نمونه‌های برش خورده نشان داده شده است.



شکل ۹- (a-d) تصویری از چگونگی تهیه نمونه بازسازی شده برای آزمایش برش مستقیم و یکی از نمونه‌های گسیخته شده.
 Fig. 9. (a-d) Illustration of how to rebuild specimens for direct shear test and one of the failed specimens

نتایج و بحث

آزمایش تراکم استاندارد

نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با

آهک و الیاف در جدول ۳ خلاصه شده است. نمودارهای تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک نیز به ترتیب در شکل‌های ۱۰ تا ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش تراکم روی نمونه‌های خاک.

Table 3. Results of compaction tests on soil samples.

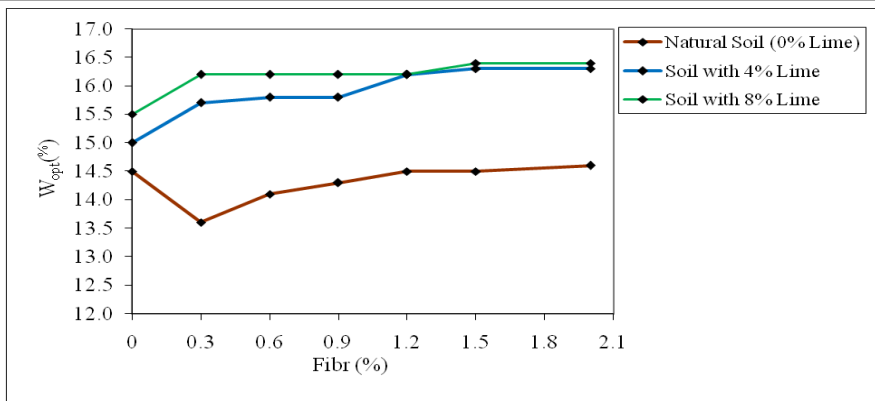
Soil Sample	$d_{max} \gamma$ (g/cm ³)	Wopt (%)
Natural Soil (With 0% Lime)	1.76	14.50
Soil with 4% Lime	1.75	15.00
Soil with 8% Lime	1.72	15.50
Soil with 0.3% Fibr	1.75	14.50
Soil with 0.6% Fibr	1.75	13.60
Soil with 0.9% Fibr	1.73	14.10
Soil with 1.2% Fibr	1.73	14.30
Soil with 1.5% Fibr	1.72	14.50
Soil with 2% Fibr	1.72	14.50
Soil with 4% Lime and 0.3% Fibr	1.70	14.60
Soil with 4% Lime and 0.6% Fibr	1.68	15.00
Soil with 4% Lime and 0.9% Fibr	1.66	15.70
Soil with 4% Lime and 1.2% Fibr	1.66	15.80
Soil with 4% Lime and 1.5% Fibr	1.65	15.80
Soil with 4% Lime and 2.0% Fibr	1.65	16.20
Soil with 8% Lime and 0.3% Fibr	1.69	16.30
Soil with 8% Lime and 0.6% Fibr	1.67	16.30
Soil with 8% Lime and 0.9% Fibr	1.67	15.50
Soil with 8% Lime and 1.2% Fibr	1.66	16.20
Soil with 8% Lime and 1.5% Fibr	1.66	16.20
Soil with 8% Lime and 2.0% Fibr	1.65	16.20

گرم بر سانتیمتر مکعب برای نمونه تسلیح شده با ۲٪ الیاف رسیده است. این مورد می‌تواند ناشی از عدم جذب آب توسط الیاف شیشه باشد، اما در صورت افزایش درصد الیاف، الیاف به همدیگر چسبیده و مقداری آب را بین خودش محبوس می‌کند که باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک خواهد شد.

با توجه به جدول ۳، برای سایر نمونه‌هایی که خاک به صورت همزمان با آهک و الیاف مخلوط شده است رطوبت بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش یافته است. تا جاییکه برای نمونه مخلوط شده با ۸٪ آهک و ۲٪ الیاف شیشه رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به ترتیب به ۱۶/۲۰ درصد و ۱/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب رسیده است. به منظور مقایسه بهتر، روند تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک برای کلیه نمونه‌ها در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌ها قابل مشاهده است، هرچه میزان الیاف افزایش داده می‌شود، مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک برای نمونه‌های حاوی ۴٪ و ۸٪ آهک به هم نزدیک تر می‌شوند تا جایی که برای نمونه‌های حاوی ۲٪ الیاف و مقادیر مختلف آهک، رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک با هم برابر می‌شود. این مورد می‌تواند ناشی از حجم بالای الیاف موجود در نمونه‌ها باشد. از آنجاییکه حجم مصالح به کار رفته در آزمایش تراکم نیز بسیار مهم می‌باشد، با افزایش الیاف تا ۲٪، الیاف حجم وسیعی از نمونه را فراگرفته و تأثیر به مراتب بیشتری نسبت به آهک بر خصوصیات تراکمی خاک خواهد گذاشت.

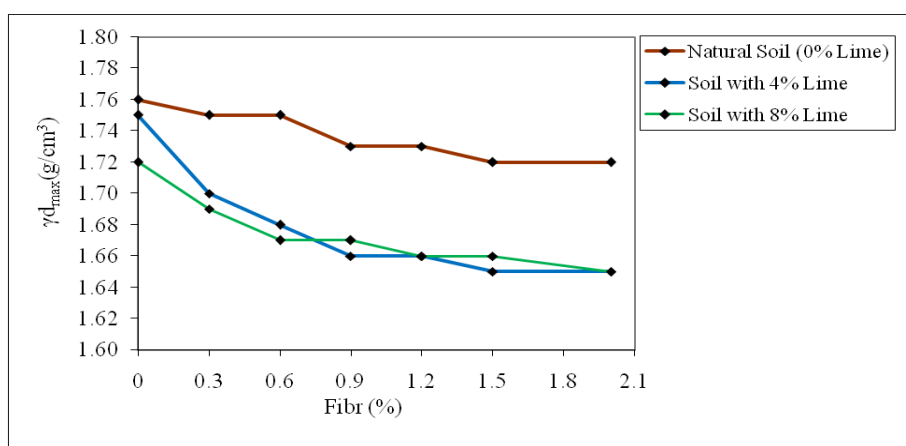
مطابق با جدول ۳، برای نمونه‌های مخلوط شده با ۰٪ الیاف شیشه و ۴٪ و ۸٪ آهک، رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به ترتیب روند افزایشی و کاهشی داشته است بدین صورت که برای خاک مخلوط شده با ۴ درصد آهک، رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به ترتیب به ۱۵ درصد و ۱/۷۵ گرم بر سانتیمتر مکعب بوده است و در ۸٪ آهک، رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به ترتیب به ۱۵/۵ درصد و ۱/۷۲ گرم بر سانتیمتر مکعب رسیده است. افزایش رطوبت بهینه به این دلیل است که با افزودن آهک، ویژگی‌های خمیری خاک و لزجی محیط کاهش می‌یابد و در نتیجه برای در هم غلتیدن و لغزش و نزدیکی ذرات خاک به هم، آب بیشتری لازم خواهد بود. این باعث افزایش رطوبت بهینه با افزایش آهک می‌شود. از طرف دیگر دلیل کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را می‌توان اینگونه توجیه کرد. افزودن آهک مانع از نزدیک شدن، لختگی و متراکم شدن کانی‌های رسی موجود در خاک می‌شود و همچنین از قوت و جاذبه الکتروستاتیکی کانی‌های رسی خاک می‌کاهد. اینها به نوبه خود باعث کاهش حداکثر وزن واحد مخصوص خشک خاک با افزایش مقدار آهک می‌شود (Gillman and Sumpters, 1986).

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، برای نمونه‌های حاوی ۰٪ آهک و درصدهای مختلف الیاف، رطوبت بهینه ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است در حالی که حداکثر وزن مخصوص خشک روند کاهشی داشته است و از ۱/۷۶ گرم بر سانتیمتر مکعب برای خاک طبیعی به ۱/۷۲



شکل ۱۰- تغییرات رطوبت بهینه برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف.

Fig. 10. Optimum moisture variations for soil samples mixed with lime and fiber.



شکل ۱۱- تغییرات وزن واحد حجم حداکثر برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف.

Fig. 11. Maximum volume unit weight variations for soil samples mixed with lime and fiber.

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده کلیه نمونه‌های خاک، در جدول ۴ خلاصه شده‌اند. در این پژوهش، تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری) خاک لس سیلتی که با آهک و الیاف بصورت مجزا و نیز بصورت همزمان تثبیت و تسلیح شده است، در دوره‌های عمل‌آوری مختلف (۱روزه، ۷ روزه و ۲۸ روزه) مورد بررسی قرار گرفته است. از جدول ۴ مشاهده می‌شود در حالتی که خاک به تنهایی با آهک مخلوط می‌شود، با افزایش آهک، مقدار مقاومت خاک نیز در همه دوره‌های عمل‌آوری افزایش می‌یابد. برای مثال برای دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، وقتی درصد آهک از ۴ به ۸ درصد افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری محصور نشده خاک به ترتیب از ۷/۹۳ به ۱۳/۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع تغییر می‌کند. افزایش در مقاومت فشاری محصور نشده با افزایش مقدار آهک از صفر به ۸ درصد به علت سیمان شدگی ذرات خاک در نتیجه واکنش‌های پوزولانی است که در سطح گسترده‌تری در درصد‌های بیشتر آهک صورت می‌گیرد. واکنش پوزولانی بین آب، آهک و مواد سیلیس دار و آلومین دار خاک انجام می‌شود که موجب تولید نوعی مواد سیمانی کننده در خاک می‌گردد و افزایش مقاومت خاک را به دنبال دارد. از جدول ۴ مشاهده می‌شود که در

یک درصد مشخص آهک (برای مثال ۴ درصد آهک و صفر درصد الیاف)، با افزایش دوره عمل‌آوری از ۱ به ۲۸ روز مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک افزایش می‌یابد. در واقع عمل‌آوری طولانی مدت، زمان بیشتری برای انجام واکنش‌های پوزولانی می‌دهد و در نتیجه این واکنش-ها، اسکلت قوی‌تری از دانه‌های خاک به دلیل سیمانی شدن ایجاد می‌شود (Naji, 2002).

با توجه به شکل ۱۲، بیشترین مقاومت برای حالتی از نمونه‌ها که صرفاً از الیاف استفاده شده است برای نمونه مسلح شده با ۰/۹٪ الیاف می‌باشد. بدین صورت که با اضافه کردن ۰/۹٪ الیاف به نمونه خاک، مقاومت فشاری محصور نشده به ۲/۰۹ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رسیده است، که یک افزایش تقریباً ۱۱۰٪ در مقاومت فشاری محصور نشده نسبت به خاک طبیعی مشاهده می‌گردد. با اضافه کردن بیشتر الیاف تا ۲٪ وزن خشک خاک، مقاومت فشاری محصور نشده خاک کاهش می‌یابد اما در هیچ موردی از خاک طبیعی کمتر نمی‌شود. دلایل این کاهش مقاومت را می‌توان افزایش بیش از اندازه حجم الیاف در کل توده خاک دانست، که در این حالت اندرکنش از حالت خاک-الیاف به اندرکنش الیاف-الیاف تبدیل می‌شود و نمونه به راحتی ترک می‌خورد. مورد بعدی کاهش وزن واحد حجم خاک با افزایش میزان الیاف می‌باشد، زیرا مطابق با توضیحات

با ۸٪ آهک مقاومت بیشتری دارند اما در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، نمونه‌های حاوی ۴٪ آهک مقاومت بالاتری از خود نشان دادند. این مورد می‌تواند ناشی از مواردی چون ترد شدن بیش از اندازه نمونه‌های حاوی ۸٪ آهک در بلند مدت، وجود بیش از اندازه افزودنی‌ها در حجم توده خاک، پایین آمدن وزن واحد حجم خاک و ... باشد.

بخش‌های قبل، با افزایش الیاف از میزان تراکم‌پذیری خاک کاسته می‌شود. موارد دیگری از قبیل خوب باز نشدن الیاف در درصدهای بالاتر و نیز گره خوردن الیاف و چسبیدن آن‌ها به یکدیگر نیز از عوامل کاهش مقاومت خاک مسلح به الیاف برای درصدهای بالاتر از ۰/۹٪ می‌باشند. با توجه به جدول ۴ در حالتی که خاک بصورت همزمان با آهک و الیاف مخلوط می‌شود، در نمونه‌های با مدت عمل‌آوری کوتاه (۱ روزه و ۷ روزه) نمونه‌های

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده روی نمونه‌های خاک.

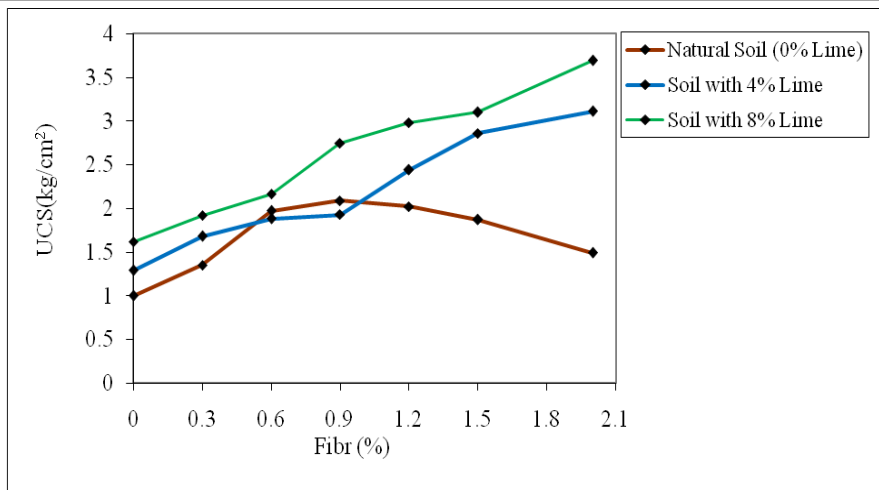
Table 4. Results of unconfined compressive strength tests on soil samples.

Soil Sample	Unconfined compressive strength (kg/cm ²)		
	1 day	7 day	28 day
Natural Soil (With 0% Lime)	1.00	-	
Soil with 4% Lime	1.29	3.65	7.93
Soil with 8% Lime	1.62	5.89	13.10
Soil with 0.3% Fibr	1.35	-	
Soil with 0.6% Fibr	1.97	-	
Soil with 0.9% Fibr	2.09	-	
Soil with 1.2% Fibr	2.02	-	
Soil with 1.5% Fibr	1.87	-	
Soil with 2% Fibr	1.49	-	
Soil with 4% Lime and 0.3% Fibr	1.68	4.96	13.74
Soil with 4% Lime and 0.6% Fibr	1.88	5.68	15.23
Soil with 4% Lime and 0.9% Fibr	1.93	6.11	16.83
Soil with 4% Lime and 1.2% Fibr	2.44	7.80	15.00
Soil with 4% Lime and 1.5% Fibr	2.86	9.58	14.89
Soil with 4% Lime and 2.0% Fibr	3.11	6.92	13.49
Soil with 8% Lime and 0.3% Fibr	1.92	7.37	13.23
Soil with 8% Lime and 0.6% Fibr	2.17	7.53	13.94
Soil with 8% Lime and 0.9% Fibr	2.75	8.58	15.90
Soil with 8% Lime and 1.2% Fibr	2.98	8.94	13.41
Soil with 8% Lime and 1.5% Fibr	3.10	9.91	13.14
Soil with 8% Lime and 2.0% Fibr	3.69	7.93	12.54

دلیل دیگر می‌تواند ناشی از چسبیدن آهک و الیاف به علت افزایش مدت زمان عمل‌آوری باشد.

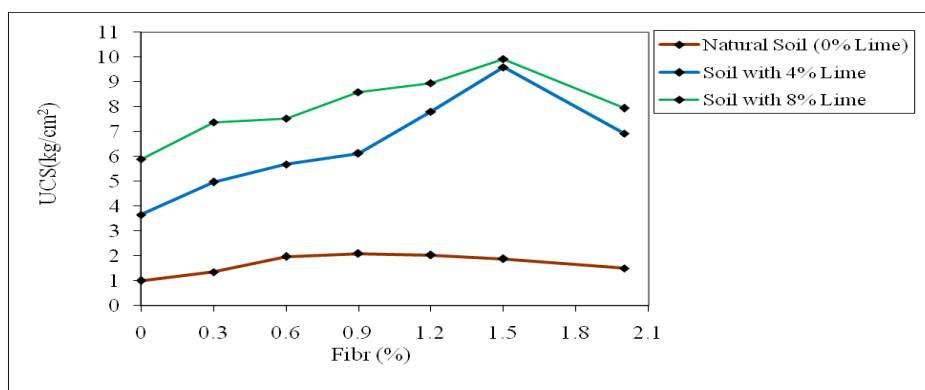
قابل ذکر است که با توجه به در نظر گرفتن میزان افزایش مقاومت نمونه‌ها در عمل‌آوری ۲۸ روزه، نمونه‌های خاک با الیاف شیشه و ۸٪ آهک، مقاومت فشاری محصور نشده کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۴٪ آهک داشته‌اند. این موضوع می‌تواند ناشی از مواردی چون ترد شدن بیش از اندازه نمونه‌های حاوی ۸٪ آهک در بلند مدت، وجود بیش از اندازه افزودنی‌ها در حجم توده خاک، پایین آمدن وزن واحد حجم خاک و ... باشد. از روند تغییرات مقاومت تک‌محوری قابل مشاهده است که با افزودن بیش از ۰/۶٪ الیاف شیشه، مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های ۴٪ آهک از نمونه‌های ۸٪ آهک فراتر رفته است. در تمامی نمونه‌های خاک، بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده نیز برای نمونه تثبیت شده با ۴٪ آهک و ۰/۹٪ الیاف شیشه با مقاومت ۱۶/۸۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بدست آمد.

به منظور بررسی تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک، تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ برای دوره‌های عمل‌آوری مختلف نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، برای دوره عمل‌آوری یک روزه، با افزایش درصد الیاف در خاک‌های تثبیت شده با آهک، مقاومت فشاری محصور نشده در همه نمونه‌ها روند افزایشی دارد اما با گذر زمان و برای دوره‌های عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه (شکل‌های ۱۳ و ۱۴)، مقدار درصد الیافی وجود دارد که بعد از آن مقاومت فشاری محصور نشده خاک کاهش می‌یابد. این مورد می‌تواند ناشی از پیر شدن بیش از اندازه فضای بین دانه‌های خاک با آهک و الیاف باشد، افزودنی‌های مازاد درون توده خاک به همدیگر چسبیده و اندرکنش توده خاک از حالت خاک-آهک-الیاف به حالت آهک-آهک یا الیاف-الیاف تبدیل می‌شود که باعث عدم چسبندگی ذرات خاک و کاهش مقاومت فشاری محصور نشده می‌گردد.



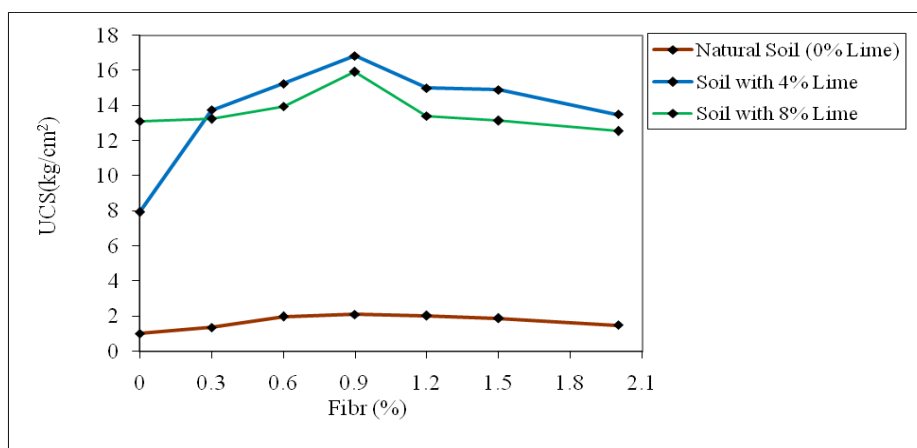
شکل ۱۲- تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف (دوره عمل آوری ۱ روزه).

Fig. 12. Unconfined compressive strength variations for soil samples mixed with lime and fiber (curing duration of 1 day).



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف (دوره عمل آوری ۷ روزه).

Fig. 13. Unconfined compressive strength variations for soil samples mixed with lime and fiber (curing duration of 7 day).



شکل ۱۴- تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف (دوره عمل آوری ۲۸ روزه).

Fig. 14. Unconfined compressive strength variations for soil samples mixed with lime and fiber (curing duration of 28 day).

آزمایش برش مستقیم

آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های خاک لس سیلتی مخلوط شده با مقادیر مختلف آهک (۰٪، ۴٪ و ۸٪ وزن خشک خاک) و الیاف (۰٪، ۰/۳٪، ۰/۶٪، ۰/۹٪، ۱/۲٪، ۱/۵٪ و ۲٪ وزن خشک خاک) در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز تحت تنش‌های نرمال ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر

آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های خاک لس سیلتی مخلوط شده با مقادیر مختلف آهک (۰٪، ۴٪ و ۸٪ وزن خشک خاک) و الیاف (۰٪، ۰/۳٪، ۰/۶٪، ۰/۹٪، ۱/۲٪، ۱/۵٪ و ۲٪ وزن خشک خاک) در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز تحت تنش‌های نرمال ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر

این پژوهش در جدول ۵ و در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ به صورت نمودار ارائه شده‌اند.

سانتی‌متر مربع انجام شده است. پارامترهای مقاومت برشی خاک (زاویه اصطکاک داخلی ϕ) و چسبندگی (C) بدست آمده از نتایج آزمایش‌های

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های خاک.

Table 5. Results of direct shear tests on soil samples.

Soil Sample	curing duration of 1 day		curing duration of 7 day		curing duration of 28 day	
	C (kg/cm ²)	ϕ (degree)	C (kg/cm ²)	ϕ (degree)	C (kg/cm ²)	ϕ (degree)
Natural Soil (With 0% Lime)	0.03	25.5	-	-	-	-
Soil with 4% Lime	-	-	0.20	28.6	0.30	36.2
Soil with 8% Lime	-	-	0.25	30.5	0.30	39.2
Soil with 0.3% Fibr	0.15	29.9	-	-	-	-
Soil with 0.6% Fibr	0.18	30.0	-	-	-	-
Soil with 0.9% Fibr	0.26	30.3	-	-	-	-
Soil with 1.2% Fibr	0.30	31.9	-	-	-	-
Soil with 1.5% Fibr	0.34	33.0	-	-	-	-
Soil with 2% Fibr	0.37	28.4	-	-	-	-
Soil with 4% Lime and 0.3% Fibr	-	-	0.28	31.2	0.30	36.9
Soil with 4% Lime and 0.6% Fibr	-	-	0.30	32.5	0.36	38.4
Soil with 4% Lime and 0.9% Fibr	-	-	0.30	33.0	0.36	39.4
Soil with 4% Lime and 1.2% Fibr	-	-	0.31	33.3	0.40	36.0
Soil with 4% Lime and 1.5% Fibr	-	-	0.30	30.7	0.37	35.3
Soil with 4% Lime and 2.0% Fibr	-	-	0.27	30.8	0.36	33.7
Soil with 8% Lime and 0.3% Fibr	-	-	0.27	33.6	0.31	40.3
Soil with 8% Lime and 0.6% Fibr	-	-	0.30	34.1	0.33	42.0
Soil with 8% Lime and 0.9% Fibr	-	-	0.32	35.5	0.33	43.0
Soil with 8% Lime and 1.2% Fibr	-	-	0.33	36.8	0.32	42.3
Soil with 8% Lime and 1.5% Fibr	-	-	0.30	35.4	0.33	39.1
Soil with 8% Lime and 2.0% Fibr	-	-	0.30	34.1	0.33	36.4

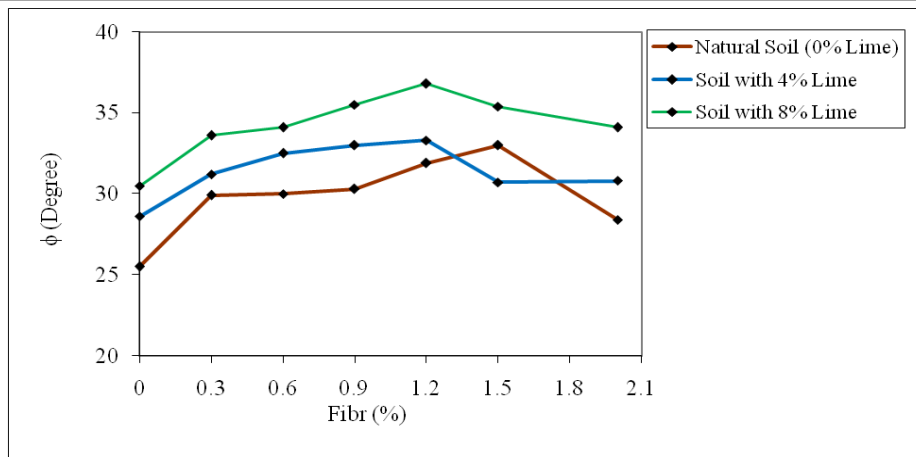
روند تأثیر الیاف بر چسبندگی خاک لس سیلتی (۰٪ آهک) و نیز خاک لس سیلتی تثبیت شده با آهک در دوره‌های عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. در حالتی که خاک فقط با الیاف شیشه مسلح شده است (۰٪ آهک) مقدار چسبندگی خاک روند صعودی داشته و با افزایش درصد الیاف، افزایش می‌یابد، بطوری که با افزایش مقدار الیاف تا ۲٪، چسبندگی خاک به ۰/۳۷ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رسیده است. چسبندگی خاک طبیعی ۰/۰۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد.

در حالتی که خاک با آهک و الیاف شیشه مخلوط شده است، با افزایش درصد الیاف، مقدار چسبندگی ابتدا مقداری افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین چسبندگی (۰/۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) در این حالت برای نمونه حاوی ۴٪ آهک و ۱/۲٪ الیاف شیشه در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه بدست آمده است.

با توجه به تغییرات چسبندگی در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، الیاف باعث افزایش بیشتری در چسبندگی خاک طبیعی نسبت به خاک تثبیت شده با آهک شده است. حضور الیاف در خاک مانند یک شبکه به هم پیوسته عمل می‌کند که ذرات خاک را به هم متصل می‌کند (شکل ۸ را ببینید). اتصال ذرات خاک به همدیگر توسط شبکه الیاف، باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود. به هر حال اضافه کردن آهک به خاک حاوی الیاف، پیوستگی این شبکه را ممکن است تا حدودی مختل کند و در نتیجه تأثیر الیاف روی خاک طبیعی نسبت به خاک تثبیت شده با آهک بیشتر است.

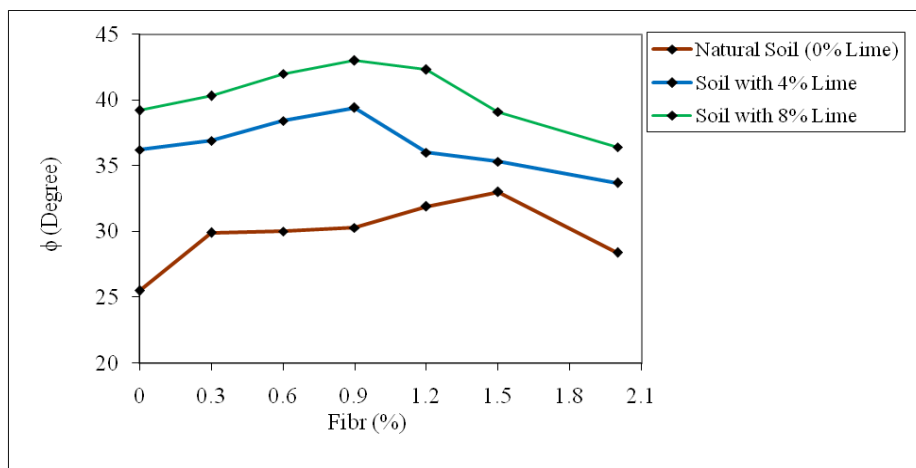
روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزودن الیاف بر خاک لس سیلتی تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک در دوره‌های عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، مقدار زاویه اصطکاک داخلی برای دوره‌های عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه، با افزایش میزان آهک افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهند که با افزودن الیاف به خاک تثبیت شده با آهک، زاویه اصطکاک داخلی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین زاویه اصطکاک داخلی خاک برای نمونه مخلوط شده با ۸٪ آهک و ۰/۹٪ با عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌باشد که برابر است با ۴۳ درجه، یعنی ۱/۷ برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک طبیعی. با افزودن بیش از ۰/۹٪ الیاف شیشه، برای دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد (شکل ۱۶). در واقع با افزایش مقدار الیاف از یک حد مشخصی، سطح تماس ذرات خاک با همدیگر کاهش می‌یابد که این به نوبه خود منجر به کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود.

از جدول ۵ مشخص است که با افزایش دوره عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، زاویه اصطکاک داخلی برای یک نمونه خاک با آهک و الیاف مشخص، افزایش می‌یابد. برای مثال برای خاک حاوی ۸٪ آهک و ۰/۹٪ الیاف، مقدار زاویه اصطکاک داخلی برای دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۳۵/۵ و ۴۳ درجه است. دلیل این موضوع افزایش واکنش پوزولانی آب، خاک و آهک با افزایش مدت زمان عمل‌آوری می‌باشد. واکنش پوزولانی باعث افزایش میزان سیمان شدگی بین ذرات خاک و در نتیجه افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود.



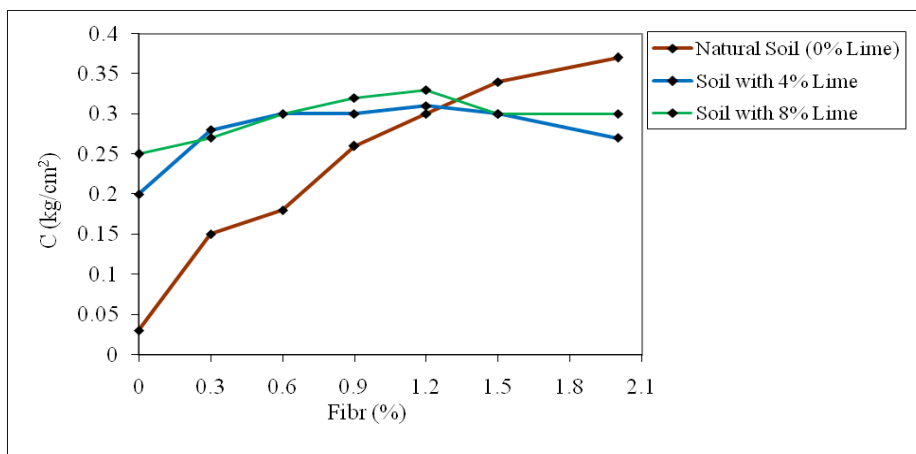
شکل ۱۵- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های ترکیب شده با آهک و الیاف (دوره عمل آوری ۷ روزه).

Fig. 15. Internal friction angle variations for soil samples mixed with lime and fiber (curing duration of 7 day).



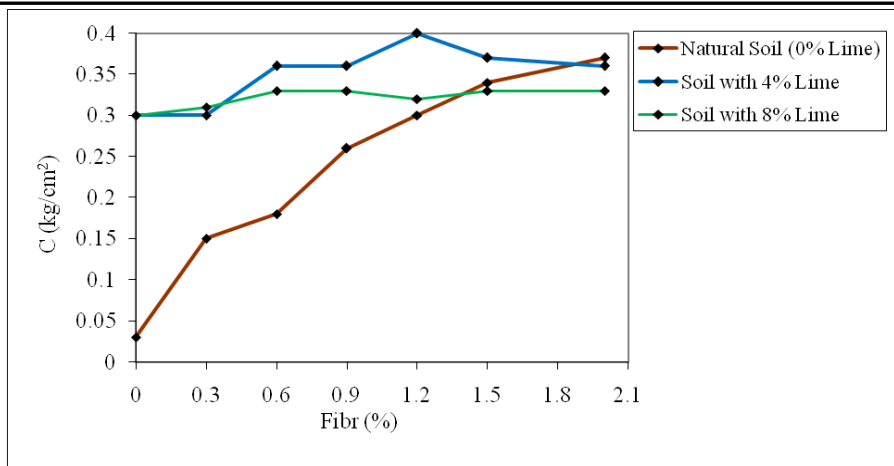
شکل ۱۶- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف (دوره عمل آوری ۲۸ روزه).

Fig. 16. Internal friction angle variations for soil samples mixed with lime and fiber (curing duration of 28 day).



شکل ۱۷- تغییرات چسبندگی برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف (دوره عمل آوری ۷ روزه).

Fig. 17. Cohesion variations for soil samples mixed with lime and fiber (curing duration of 7 day).



شکل ۱۸- تغییرات چسبندگی برای نمونه‌های خاک ترکیب شده با آهک و الیاف (دوره عمل آوری ۲۸ روزه).

Fig. 18. Cohesion variations for soil samples mixed with lime and fiber (curing duration of 28 day).

نتیجه‌گیری

برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک تثبیت شده با ۴٪ آهک و خاک تثبیت شده با ۸٪ آهک، با افزودن ۰/۹٪ الیاف شیشه مقاومت فشاری آنها به ترتیب به ۲/۰۹، ۱۶/۸۳ و ۱۵/۹۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است که درصد افزایش مقاومت آنها نسبت به خاک طبیعی به ترتیب عبارتست از ۱۱۰٪، ۱۵۸۳٪ و ۱۴۹۰٪.

- نتایج نشان داد که با افزایش دوره عمل آوری مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده تمامی نمونه‌های خاک افزایش می‌یابد.

- مقدار زاویه اصطکاک برای دوره‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه، با افزایش میزان آهک افزایش می‌یابد. با افزودن الیاف به خاک تثبیت شده با آهک، زاویه اصطکاک داخلی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین زاویه اصطکاک داخلی خاک برای نمونه مخلوط شده با ۸٪ آهک و ۰/۹٪ الیاف با عمل آوری ۲۸ روزه می‌باشد که برابر است با ۴۳ درجه، یعنی ۱/۷ برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک طبیعی. با افزودن بیش از ۰/۹٪ الیاف شیشه، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد.

- در حالتی که خاک فقط با الیاف شیشه مسلح شده است (۰٪ آهک) مقدار چسبندگی خاک روند صعودی داشته و با افزایش درصد الیاف افزایش می‌یابد. بطوری که با افزایش مقدار الیاف تا ۰/۲٪، چسبندگی خاک به ۰/۳۷ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رسیده است. در حالتی که خاک با آهک و الیاف شیشه مخلوط شده است، با افزایش درصد الیاف، مقدار چسبندگی ابتدا مقداری افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین چسبندگی (۰/۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) در این حالت برای نمونه حاوی ۴٪ آهک و ۱/۲٪ الیاف شیشه در دوره عمل آوری ۲۸ روزه بدست آمد.

در این پژوهش خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس سیلتی تثبیت شده با آهک و الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های خاک لس سیلتی تثبیت شده با آهک و الیاف شیشه در درصدهای اختلاط متفاوت آماده سازی شد و بر روی آنها آزمایش‌های مختلفی از قبیل تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم انجام شد. اهم نتایج این پژوهش بصورت زیر خلاصه می‌گردد.

- وقتی خاک به تنهایی با آهک مخلوط می‌شود، درصد رطوبت بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد.

- زمانی که خاک به تنهایی با الیاف شیشه مخلوط می‌شود، به دلیل عدم جذب آب توسط الیاف شیشه در درصد اختلاط پایین (در این تحقیق ۰/۳٪) درصد رطوبت بهینه ابتدا کاهش می‌یابد اما با بیشتر شدن درصد اختلاط (۰/۶٪، ۰/۹٪ و ...) و به دلیل چسبیدن رشته‌های الیاف به همدیگر و محبوس شدن آب در بین الیاف، درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد در حالیکه حداکثر وزن مخصوص خشک همواره کاهش می‌یابد که نشان دهنده این است که الیاف تراکم پذیری خاک را کاهش داده است.

- وقتی خاک بطور همزمان با آهک و الیاف شیشه مخلوط می‌شود، درصد رطوبت بهینه به مقدار بیشتری نسبت به زمانی که آهک به تنهایی به کار می‌رود افزایش می‌یابد. حداکثر وزن مخصوص خشک نیز بطور مشابه به کمترین مقدار خود می‌رسد.

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده نشان داد که الیاف شیشه‌تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با آهک می‌گذارد. برای کلیه حالات، بیشترین مقاومت برای نمونه‌های مخلوط شده با ۰/۹٪ الیاف شیشه بدست آمده است، بطوری که

منابع

- Abdi, M.R., Baharlooie Khayat, H., 2010. Study of the effects of combined use of polypropylene fiber and lime on the strength properties of kaolinite. 5th National Congress of Civil Engineering.
- Akbari Garakani, A., Haeri, M., Desai, S.C., Seyed Ghafouri, M.H., 2019. Testing and Constitutive Modeling of Lime-Stabilized Collapsible Loess. II: Modeling and Validations. International Journal of Geomechanics 19, 43-53.

- Al Aghbari, M.Y., 2005. Suitability of Desert sand cement mixes for base course in highway pavements. *Electronic Journal of Geotechnical* 10, 21–40.
- Amini Varki, S., 2011. Investigating and identifying problematic soils and ways to deal with them. Fourth National Conference on Rebuilding and Preserving Durable Buildings.
- Asna Ashari, M., Jafari, M., 2010. Unconfined compressive strength of clay-stabilized clay reinforced with polymeric fibers. 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics of Iran.
- ASTM D2166., 2007. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080., 2007. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (400 12ft-lbf/ft³(600kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bagherian, A., Janalizadeh, A., Hesami, Saeed., 2005. Application of rice husk ash in soil stabilization with lime. Second Congress of Civil Engineering.
- Bahrami, K., Nikudel, M.R., Hafezi Moghadas, N., 2014. Investigation of geological engineering characteristics of loess soils north of kalaleh in golestan province with special attitude on collapsibility and erodibility. *Quarterly Iranian Journal of Geology* 29, 21–34.
- Behrouzсарoukolai, A., 2013. Investigation of behavioral and resistance properties of nano-stabilized loess Soils, case study of loess Gorgan. MS.C thesis in Civil Engineering, Isfahan University of Technology.
- Enayat, M., Shoaie, G.R., Nikudel, M.R., 2018. Evaluation of collapsibility of loess deposits of Gharnaveh catchment in north of Kalale, Golestan province. *Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology* 10, 29–41.
- Gao, Y., Qian, H., Li, X., Chen, J., Jia, H., 2018. Effects of lime treatment on the hydraulic conductivity and microstructure of loess. *Environmental Earth Sciences* 77:529.
- Gillman, G.P., Sumpters, E.A., 1986. Modification to the Compulsive Exchange Method for Measuring Exchange Characteristics of Soils. *Australian Journal of soil Research* 24(1), 61–66.
- Hafezi Moghadas, N., Nikudel, M.R., Bahrami, K., 2011. Evaluation of collapsibility of loess deposits of Gharnaveh catchment in north of Kalale, Golestan province. *Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology* 4, 39-46.
- Janali Chubesti, A., Bagherpour, A., 2003. Stabilization of fine grains soils by adding microsilica with lime or cement. 6th International Conference on Civil Engineering.
- Lashkaripour, G.R., Ghafoori, M., 2011. Engineering Geology Criteria for Evaluation and Classification of Loess in Golestan Province. *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 23, 165–176.
- Maher M.H., Gray D.H., 1990. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering* 116, 1661–1677.
- Naderi, M.B., Bazayr, A.D, Roshan Zamir, M.A., 2011. Investigation of the effects of fibers and polymeric adhesives on soil mechanical properties. 6th National Congress of Civil Engineering.
- Naji, S.A., 2002. The use of lime to stabilize granular volcanic ash material for road construction. *Journal of Sciences and Technology* 7, 115–123.
- Pei, X., Zhang, F., Wub, W., Liang, S., 2015. Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles. *Applied Clay Science* 114, 77–84.
- Rezaei, H., Yazarloo, R., Amanzadeh, A., 2015. Investigation of the effect of nano-kaolinite on shear strength parameters of loess silty soil of Golestan province. Second International Conference on Cement and Concrete Industry Research and Second National Conference on Civil Engineering, Urban Development and Sustainable Development.
- Sadek, S., Najjar, S., Abboud, A., 2013. Compressive Strength of Fiber Reinforced Lighty Cement Stabilized Sand. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- Setayesh, A., 2017. Loose soils, Free Publications.
- Tang, C.S., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y., 2007. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 25, 194–202.
- Yi Cai, B.S., Charles, W.W.N., Chao-sheng, T., 2006. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* 87, 230–240.
- Zhang, F., Pei, X., Yan, X., 2018. Physicochemical and Mechanical Properties of Lime-Treated Loess. *Geotechnical and Geological Engineering* 36, 685–696.