



The Effect of Lime and Coal Ash Mixture on the Geotechnical Properties of Clay for use in Engineering Embankments

Zahra Aghayan¹, Rouzbeh Dabiri²✉

1. M.Sc. of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. E-mail: zahraaghayan1377@gmail.com

2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. E-mail: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 July 2024
Received in revised form
17 November 2024
Accepted 19 November 2024

Keywords:
Improvement, Clay, Hydrated lime, Coal ash, Engineering embankments, Bearing capacity.

ABSTRACT

Recently, the demand for rapid and cost-effective infrastructure development has led to the development of various soil improvement techniques, including stabilization. Studies on the incorporation of mineral materials such as lime and coal ash into soil stabilization have been carried out in several countries, and these studies have shown promising results. Given the beneficial properties or properties of coal ash, together with its availability and cost-effectiveness, the combination of coal ash with lime for clay soil stabilization is a viable option. This study evaluates lime and coal ash on the behavior and geotechnical properties of clay soils. The evaluation includes plasticity index (PI), compaction, uniaxial compressive strength, California bearing ratio (CBR) and direct shear tests, and direct shear tests. To achieve this, the process began with the mixing of clay with varying percentages of hydrated lime (4%, 6% and 7%), followed by a 28-day curing period for the samples. Coal ash was then added at different (5%, 15%, 25% and 50%) was incorporated into the clay and also cured for 28 days. In the final stage, the optimum amount of hydrated lime was determined, an amount of hydrated lime, equivalent to the amount of coal ash used, was added to the clay and the mixture was cured for a further 28 days. The results indicate that A mixture of 7% hydrated lime and 50% coal ash, after 28 days of curing, is an optimum combination for stabilizing the clay in the study area. This combination increased the uniaxial compressive strength by 1.87 times, the shear strength by 1.34 times and the CBR value by 6.4 times, making it suitable for use in the for use in the construction of pavement layers.

Introduction

Clay soils have long been important due to the challenges they pose in soil engineering, such as swelling and sensitivity to moisture, prompting engineers to continuously explore ways to enhance this type of soil. Soil stabilization involves techniques that maintain the soil mass's stability and introduce chemical changes to improve its engineering characteristics. In regions where the pavement subgrade is composed of weak or problematic soils, various methods are applied to enhance its quality. One such method is combining the soil with coarse-grained materials to form a reinforcement layer.

Among other methods, soil stabilization by adding chemicals can be mentioned. Soil stabilization is categorized into two groups—physical and chemical—based on the type of additives used. Additives such as lime, cement, pozzolans, hydrated lime, and cement slurry are used in chemical stabilization. Clay is one of the most complex and unstable materials, but due to its low cost, it is often used in many constructions. However, in some cases, clay may not be suitable for the intended purpose. In some cases, it is possible to alter the properties of clay by adding materials such as lime to the soil. In addition, the behavior of clay depends not only

Cite this article: Aghayan, Z., Dabiri, R. (2024). The Effect of Lime and Coal Ash Mixture on the Geotechnical Properties of Clay for use in Engineering Embankments. *Journal of Engineering Geology*, 18 (3), 382-410. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.3.10140410>



on the amount and type of cementitious materials added, but also on the chemical composition and mineralogy of the soil. Extensive research into the application of lime to clay has shown that when lime is added it initiates chemical reactions such as ion exchange, rapid aggregation condensation (leading to the formation of a coarse grain structure) and pozzolanic reactions (the formation of a strong skeleton between the newly formed grains). Ash, on the other hand, is the soft, fine residue that remains after a material is burned. The production and spread of ash from coal combustion for electricity generation has become a major environmental problem in many countries. Statistics from the last decade show that 500 million tonnes of coal ash are produced annually, and due to a 50% increase in coal consumption, this figure has now reached approximately 750 million tonnes. Currently, 39% of ash is used in America and 47% in Europe, with a global average of 25%. When coal ash is added to soil, it causes rapid hydration, which causes clay particles to clump together into larger aggregates. The addition of coal ash significantly increases the pH of the soil. As the pH rises, silicon is released from its tetrahedral structure, while alumina is released from its octahedral sheet structure in the soil. The clots that form are the result of cementitious products formed by pozzolanic reactions between the soil and the coal ash, called silicate hydrates. The formation of calcium silicate hydrate (CSH) and calcium aluminate hydrate (CAH) increases soil strength and reduces swelling over time. The purpose of this study is to investigate the feasibility of stabilizing and improving the geotechnical properties of clay through the use of hydrated lime, coal ash and the simultaneous combination of the two.

Materials and Methods

In the present research, the clay samples studied were collected from the slopes of Aun Ibn Ali Mountain in the northwest region of Tabriz city. The reason for the selection of clay from this region is that its characteristics are such that in unstable weather conditions (rain, snow, and

frost), it causes serious damage to the pavement layers implemented in the road body, resulting in significant expenditure to improve the clay in this area. The hydrated lime used in this research is of industrial and expanded types, produced by the Pars Shimi Lime Factory, and is packaged in 50 kg bags. Coal powder is sourced from the Zarand mine in Kerman and is then burned in the furnace of the charcoal workshop under vacuum conditions at a temperature of 700 degrees Celsius. The particle size distribution of materials was determined in accordance with ASTM D421 and ASTM D422. Based on the Unified Soil Classification System, the sodium saline fine soil is CL. The plasticity index (PI) and the specific gravity (Gs) the materials determined according to ASTM D4318-95a and ASTM D854, respectively.

In this study, hydrated lime at 4%, 6% and 7% by weight was mixed with the soil samples and its effect on the geotechnical properties of the stabilized soil was evaluated in two states: uncured and cured (28 days). Next, the same clay was combined with coal dust at 5%, 15%, 25% and 50% by weight and, similarly to the previous case, the geotechnical parameters of the stabilized soil were evaluated in both untreated and treated states (28 days). In the final stage, after determining the optimum amount of hydrated lime that effectively improves the mechanical properties of the clay, the optimum mixture of hydrated lime with coal dust (5%, 15%, 25% and 50%) was added to the clay. The possibility of stabilizing the clay was then evaluated based on the changes in its geotechnical properties in both the uncured and cured (28 days) states. The ASTM C305 standard was used to prepare uniform and homogeneous mix samples for the evaluation of geotechnical parameters. First, water was added to the soil samples (according to the optimum moisture content). They were then mixed in a mixer to create a good bond between the added materials and the soil. In accordance with the standard, the mixing process was paused for 30 seconds to allow the materials to absorb moisture. Hydrated lime powder was then added

to the mixed sample. Mixing was carried out for 30 seconds at low speed, followed by 15 seconds of cleaning and 60 seconds at medium speed. After mixing, the samples were stored in a closed plastic container at ambient temperature for 28 days until processing was completed. In the other cases, the soil samples were stabilized using a mixture of coal ash powder and hydrated lime, together with additional coal ash powder. The compaction test was initially carried out in accordance with ASTM D698 to meet the research objectives. A number of tests, such as the UCS test according to ASTM D2166 and the direct shear test according to ASTM D3080, were then carried out to determine the geotechnical properties of the improved sodium-saline silty soil. Finally, the CBR test according to ASTM D1883 was carried out to evaluate the effect of the added materials on the amount of bearing capacity.

Results and Discussion

The results obtained show that the optimum combination of 7% hydrated lime and 50% coal ash effectively stabilizes the clay after 28 days of curing. This mixture has resulted in an 8.7% increase in the value of γ_{dmax} compared to the unstabilized condition and a 24.5% reduction in optimum moisture content. As a result, there is a reduction in settlement and deformation during the construction of engineered embankments within the pavement layers, as well as a reduction in damage caused by freeze-thaw cycles in the road structure. Furthermore, this optimum combination has enhanced the uniaxial compressive strength under curing conditions, indicating a significant synergistic effect between hydrated lime and coal ash. Specifically, the combination of 7% lime and 50% coal ash has increased the uniaxial compressive strength by 1.96 times, and the modulus of elasticity has also risen by 1.24

times. It can therefore be concluded that this formulation is effective in reducing settlement and deformation in road pavement layers due to vehicular traffic. In addition, results from the direct shear test revealed that mixing 7% lime with 50% coal ash increased the internal friction angle of the stabilized sample by 2.28 times and enhanced the adhesion value by 68%. Finally, the California Bearing Ratio (CBR) test results indicated that this combination boosts the load capacity of stabilized clay by 4.6 times, confirming the feasibility of using stabilized soil in accordance with Code 234, and the availability of funding for the construction of the embankment layer and sub base layer.

Conclusions

The results of the present study indicate that the optimum combination of 7% hydrated lime and 50% coal ash can effectively stabilize clay after 28 days of curing. This is because the simultaneous addition of hydrated lime and ash to the clay significantly increases the uniaxial compressive strength and soil hardness. This improvement is due to the formation of cement compounds, such as hydrated calcium silicate and hydrated calcium aluminate, which enhance the soil structure. In addition, the concurrent application of hydrated lime and coal ash in clay creates a favorable synergy that reduces the optimum moisture content and increases the density of the stabilized soil, thereby improving its mechanical and structural properties. It also enhances the angle of internal friction and cohesion, and by creating a rigid behavior in stabilized clay, it significantly reduces settlement and deformation. Furthermore, by decreasing water absorption and permeability, it helps prevent damage caused by thawing and freezing during the construction of pavement layers.



تأثیر مخلوط آهک و خاکستر ذغال سنگ بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس جهت استفاده در خاکریزی‌های مهندسی

زهرا آقایان^۱، روزبه دبیری^۲✉

۱. کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. رایانامه: zahraaghayan1377@gmail.com
۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. رایانامه: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

اخیراً پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از مواد معدنی مانند آهک و خاکستر ذغال سنگ در تثبیت خاک انجام پذیرفته و نتایج قابل قبولی بدست آمده است. با توجه به خصوصیات بالای خاکستر ذغال سنگ، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی در ترکیب آن با آهک برای تثبیت خاک‌های رسی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، تأثیر همزمان آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ بر رفتار و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس طی آزمایش‌های خصوصیات خمیری، تراکم، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، برش مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا خاک رس با درصد‌های مختلف آهک هیدراته ۴، ۶ و ۷ درصد مخلوط شده و عمل‌آوری ۲۸ روزه بر روی نمونه‌ها انجام یافته است. سپس، خاکستر ذغال سنگ با درصد‌های ۵، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ با خاک رس مورد مطالعه مجدداً مخلوط گردیده و ۲۸ روز عمل‌آوری صورت گرفته است. در انتها، مقدار بهینه آهک تعیین شده به مقادیر مشابه خاکستر ذغال سنگ به خاک رس افزوده شده و سپس ۲۸ روز عمل‌آوری صورت گرفته است. نتایج بدست آمده نشان داد که مخلوط ۷٪ آهک هیدراته با ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌توان به عنوان ترکیب مناسب جهت تثبیت خاک رس پیشنهاد نمود. زیرا ترکیب اشاره شده باعث گردیده تا مقاومت فشاری تک محوری را ۱/۸۷ برابر، مقاومت برشی را ۱/۳۴ برابر و عدد CBR را ۶/۴ برابر افزایش دهد و شرایط را برای کاربرد خاک رس تثبیت شده جهت استفاده در خاکریز مهندسی را فراهم آورد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

کلیدواژه‌ها:

تثبیت خاک، رس، آهک هیدراته، خاکستر ذغال سنگ، خاکریز مهندسی، CBR.

مقدمه

می‌گیرد که یکی از این روش‌ها، ترکیب خاک با مصالح درشت دانه و ایجاد یک لایه تقویتی است. از جمله روش‌های دیگر می‌توان به روش تثبیت خاک با افزودن مواد شیمیایی اشاره کرد. تثبیت خاک از دیدگاه نوع افزودنی‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرد به دو گروه فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شود. در تثبیت شیمیایی از افزودنی‌هایی نظیر آهک، سیمان، انواع پوزولان‌ها، آهک هیدراته، دوغاب سیمان و غیره استفاده می‌شود. خاک رس یکی از مصالح پیچیده و بی‌ثبات است، اما به دلیل هزینه پایین آن، غالباً در اکثر

خاک‌های رسی معمولاً به دلیل بروز مشکلات زیاد در رفتارهای مهندسی خاک، مثل تورم و حساسیت به رطوبت، همیشه قابل توجه بوده و مهندسیین همواره به فکر بهسازی این نوع از خاک‌ها بوده‌اند. تثبیت خاک روشی برای حفظ ثبات توده خاک و تغییرات شیمیایی برای بهبود خواص مهندسی آن است. در مناطقی که در خاکریز مهندسی استفاده از خاک‌های ضعیف و مسئله‌دار مد نظر است، روش‌های مختلفی جهت ارتقای کیفیت آن مورد استفاده قرار

استناد: آقایان، ز، دبیری، ر. (۱۴۰۳). تأثیر مخلوط آهک و خاکستر ذغال سنگ بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس جهت استفاده در خاکریزی‌های مهندسی. مجله

زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۳)، ۳۸۲-۴۱۰. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.3.10140410>



مقاومت فشاری خاک بهبود یافته با سیمان و آهک با گذشت دوره عمل‌آوری، افزایشی است.

قبادی و همکاران (Ghobadi et al., 2012)، در مطالعه‌ای با عنوان بهسازی خاک‌های رسی جنوب غرب همدان با استفاده از آهک به بررسی نتایج مطالعات کانی‌شناختی و ژئوتکنیکی خاک‌های رسی نرم بهسازی شده با آهک پرداختند. بدین منظور آهک شکفته با درصد‌های وزنی ۱، ۳، ۵ و ۷ را به خاک اضافه کرده و بعد از ۳۰، ۱۵، ۷ و ۴۵ روز دوره عمل‌آوری مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد آهک، خاک مورد نظر به تدریج خواص خمیری خود را از دست می‌دهد و در نهایت غیر خمیری می‌شود. همچنین با افزایش درصد آهک و افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌های مخلوط شده با آهک افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل شده خاک رس نرم مورد مطالعه با افزایش ۷٪ آهک و بعد از گذشت یک دوره عمل‌آوری ۳۰ روز به صورت مطلوبی بهسازی شد.

اسکندری و هدهدی (Eskandari and Hodhodi, 2014)، در مطالعه‌ای با عنوان بررسی اثر تثبیت خاک رس با آهک، تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک رس با اضافه کردن آهک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با اضافه کردن آهک به خاک بعد از مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر نیز کاهش می‌یابد. وجود آهک در خاک موجب کاهش حد خمیری می‌شود. افزایش میزان آهک در خاک باعث افزایش فشار پیش تحکیمی ضریب تحکیم و ضریب نفوذپذیری می‌گردد. حسین زاده و همکاران (Hoseinzadeh et al., 2021) تأثیر همزمان آهک و سرباره کوره فولاد را جهت تثبیت خاک ریزدانه منطقه اروند خرمشهر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد افزودن سرباره و آهک بعد از مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه سبب افزایش توانایی باربری خاک رس و کاهش

ساخت و سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ هرچند که در بخش‌های خاص، ممکن است خاک رس برای هدف مورد نظر مناسب نباشد. در برخی موارد نیز این امکان وجود دارد تا مشخصات خاک رس با مقداری افزودنی به خاک، مانند آهک، تغییر کند. همچنین رفتار خاک رس تنها به مقدار و نوع مصالح سیمانی افزوده شده به خاک بستگی نداشته و به ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خاک نیز وابسته است. تحقیقات گسترده در مورد کاربرد آهک بر روی خاک رس نشان داده است، هنگامی که این ماده به رس افزوده می‌شود سبب می‌گردد واکنش‌های شیمیایی همچون تبادل یونی، تجمع-تراکم آبی (تشکیل ساختار و بافت درشت دانه) و پوزولان (استخوان‌بندی قوی بین بافت تازه تشکیل یافته) بین آن دو برقرار گردد (Muhamed and Wanatowski, 2013). مدت زمان عمل‌آوری به عنوان عامل کلیدی در فرآیند سمنتاسیون شناخته می‌شود، زیرا طولانی‌تر شدن این مدت می‌تواند منجر به واکنش‌های شیمیایی بیشتر و تشکیل هیدرات‌های تثبیت‌کننده در خاک شود. تحقیقات گسترده در زمینه کاربرد آهک نشان می‌دهند که با افزایش زمان عمل‌آوری، استحکام و پایداری خاک به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابد. بطوری که زارعی و همکاران (Zarei et al., 2013)، اثر افزودن سیمان و آهک بر ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های رسی نرم محدوده بندر ماهشهر در شرایط اشباع را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. ایشان در این تحقیق جهت بررسی اثر مقادیر مختلف آهک و سیمان، درصد‌های ۰٪، ۲٪، ۴٪، ۶٪، ۸٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و با زمان‌های گیرش متفاوت را انتخاب کردند و سپس اثرات این مواد افزودنی را از طریق آزمایش‌های مقاومت فشاری و حدود اتربرگ مورد تحلیل قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بهبود بخشی خاک‌های رسی ریزدانه توسط سیمان و آهک موجب افزایش حد خمیری و روانی و کاهش پیوسته شاخص خمیری خاک با گذشت زمان می‌شود. جهت تغییرات

پوزولانی میان خاک و خاکستر ذغال سنگ به نام‌های هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) به وجود می‌آیند که در دراز مدت موجب افزایش مقاومت و کاهش تورم خاک خواهند شد (Sezar et al., 2006).

در زمینه امکان کاربرد خاکستر ذغال سنگ در تثبیت خاک-های رسی نیز مطالعات مختلفی انجام یافته است. بطوری که باوندپوری و همکاران (Bavandi Pour, 2008) به بررسی تأثیر خاکستر ذغال سنگ بر خصوصیات مهندسی خاک رس متورم شونده پرداختند. خاک‌های متورم شونده به دلیل قابلیت تغییر حجم فوق‌العاده ناشی از نوسانات فصلی رطوبت به عنوان پدیده‌ای زیان بخش در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌روند. با این منظر بهبود مشکلات زیادی از قبیل مقاومت پایین، خاصیت خمیری بالا، مشکلات تراکمی و پتانسیل تورم بالا در این خاک‌ها می‌تواند با به کارگیری روش‌های مختلفی از قبیل تثبیت خاک و به کارگیری تقویت کننده‌ها انجام گیرد. در این مطالعه از خاکستر ذغال سنگ به عنوان گزینه‌ای جدید و اقتصادی جهت بهبود خواص تورمی، تراکمی و خمیری خاک‌های متورم شونده استفاده شده است و نتایج حاصل، بیانگر تأثیر فوق‌العاده این ماده در رفع مشکلات خاک‌های متورم شونده می‌باشد. نوروزی و همکاران (Norouzi and Atrchian, 2012)، به بررسی تأثیر افزودن خاکستر بر خواص ژئوتکنیکی مخلوط خاک رس و آهک پرداخته‌اند که در نهایت با استفاده از نتایج می‌توان بیان نمود که افزودن مقدار کمی آهک به خاک عمدتاً باعث بهبود خواص مقاومتی می‌گردد ولی اگر خاک دارای یون سولفات باشد و یا در معرض آب سولفات قرار گیرد، استفاده از آهک نه تنها باعث کاهش تورم لایه تثبیت شده نمی‌گردد بلکه نتیجه عکس داده و سبب افزایش تورم و کاهش مقاومت می‌گردد. ابوالحسنی راد و قاسمی (Abolhasani and Ghasemi, 2016)، تثبیت خاک با

خاصیت خمیری در آن شده است. لیو و همکاران (Liu et al., 2009) برای تثبیت خاک رسی با استفاده از عامل تقویت کننده (Firming Agent) و مقدار کمی آهک هیدراته تحقیقاتی را انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان داد مقاومت فشاری محصور نشده هر یک از خاک‌های تثبیت شده در سن ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه با ازدیاد سن نمونه‌ها، افزایش یافته است.

خاکستر گرد نرمی است که از سوختن چیزی باقی می‌ماند. در طبیعت خاکسترهای زیادی وجود دارد و روزانه حجم زیادی از زائدات در صنایع مختلف تولید می‌شود که مشکل دفن و انهدام آن‌ها و بازیافت این مواد را به دنبال دارد. زائداتی چون خاکستر پوسته برنج، خاکستر چوب، خاکستر پوسته نارگیل گیاهی، خاکستر بادی، خاکستر ذغال‌سنگ، خاکستر پوسته برنج و خاکستر باگاس از جمله مانده‌هایی هستند که بحران نابودی زائدات را به دنبال دارند. تولید و گسترش خاکستر در اثر سوختن ذغال سنگ برای تولید برق در بسیاری از کشورها به یکی از مشکلات بزرگ محیط زیست تبدیل شده است. آمار سال‌های اخیر نشان می‌دهد که سالانه ۵۰۰ میلیون تن خاکستر ذغال سنگ تولید می‌شود و با توجه به رشد ۵۰ درصدی مصرف ذغال سنگ این عدد امروزه بطور تقریبی به ۷۵۰ میلیون تن رسیده است. در حال حاضر در آمریکا ۳۹ درصد از خاکستر و اروپا ۴۷ درصد از خاکستر را مورد استفاده قرار می‌دهند و میانگین جهانی استفاده از آن ۲۵ درصد است. زمانی که خاکستر ذغال سنگ به خاک اضافه می‌شود نتیجه آن عمل هیدراسیون سریع، همراه با کلوخه شدن ذرات خاک‌های رسی به ذرات بزرگ‌تر می‌باشد. اضافه کردن خاکستر ذغال سنگ به مقدار قابل توجهی pH خاک را افزایش می‌دهد. با بالا رفتن pH، سیلیکون خاک از ساختمان چهار وجهی و آلومینای خاک از ساختمان ورقه‌ای هشت وجهی خود آزاد می‌شود و کلوخه‌ها در اثر محصولات سیمان گونه‌ای ناشی از واکنش‌های

خاک پرداختند. این مطالعه با هدف بررسی تکنیک استفاده مجدد اخیر از خاکستر ذغال سنگ مانند خاکستر بادی در بهبود خاک است. ایشان ابتدا نمونه‌های مخلوط را به مدت یک هفته در دمای محیط نگاه داشته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه عمل‌آوری نموده است. بر اساس بررسی گسترده، مشخص شد که خاکستر بادی برای افزایش ویژگی‌های خاک، در نتیجه افزایش کارایی آن مفید است. خاکستر بادی به دلیل خواص پوزولانی که دارد تورم را کاهش می‌دهد و به افزایش استحکام خاک کمک می‌کند. جمال‌الدین و همکاران (Jamaludin et al., 2018) به مقایسه بین زائادات سیمان و بتن بر روی رفتار مقاومتی خاک رس با خاکستر ذغال سنگ پرداختند. هدف این تحقیق مقایسه رفتار مقاومتی مواد بتن تخریب شده (DCM) و سیمان پرتلند معمولی (OPC) به اضافه خاکستر ذغال سنگ برای تثبیت خاک رس دریایی، و تعیین مخلوط بهینه این مواد است. نتایج نشان داد که مقاومت خاک رس دریایی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری با افزایش درصد خاکستر ذغال سنگ و همچنین برای DCM و OPC به طور معنی‌داری افزایش یافت. هاش و همکاران (Hauashdh et al., 2020) به روش‌های بهبود خاک و کاهش زائادات خاکستر ذغال سنگ پرداختند. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی تثبیت خاک نباتی با استفاده از خاکستر بادی، خاکستر کف و سیمان پرتلند معمولی (OPC) به منظور بهبود خواص مهندسی خاک می‌باشد. در این مطالعه، خاکستر بادی و خاکستر کف از پسماندهای تولیدی با نیروی برق ذغال سوز جمع‌آوری شد و تثبیت خاک نباتی با اختلاط آن خاک با خاکستر بادی، خاکستر کف و سیمان پرتلند معمولی انجام شد. پس از مدت ۲۸ روز عمل‌آوری یافته‌ها اثربخشی خاکستر بادی و خاکستر کف را برای بهبود استحکام ذغال سنگ نارس و قابلیت استفاده از خاکستر ذغال سنگ به عنوان مواد چسباننده نشان داده‌اند. آکین‌وومی و همکاران

استفاده از ضایعات معادن ذغال سنگ همراه با آهک را مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که افزودن زائادات معدن ذغال سنگ به همراه آهک به خاک باعث تثبیت خاک می‌گردد. این تحقیق نشان داد که مقاومت فشاری خاک رس در هنگام افزودن ضایعات خالص، در اثر بهم خوردن ساختار اولیه خاک کاهش می‌یابد.

شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) تثبیت خاک رسی با آهک و خاکستر بادی را مورد بررسی قرار دادند و اثرات تثبیت بر روی خصوصیات خمیری، ویژگی‌های تورمی، مقاومت فشاری محصور نشده و نسبت باربری کالیفرنیا ارزیابی نمودند. در تحقیق صورت گرفته توسط شبی و کامئی (Shibi and Kamei, 2014) از خاکستر ذغال سنگ به عنوان تثبیت‌کننده مکانیکی خاک زیرین استفاده کردند. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داد خواص مکانیکی خاک زیرین با افزودن خاکستر بهبود می‌یابد. بالاترین مقادیر CBR خیس شده و خیس نشده برای مخلوط حاوی ۳۰ درصد وزنی خاکستر به دست آمد که به ترتیب ۱۴۵ درصد و ۹۵ درصد بود. مدرس و نوسودی (Modarres and Nosoudy, 2015) روی تثبیت خاک رس با آهک و زائادات ذغال سنگ و خاکستر آن مطالعاتی را انجام دادند. بدین منظور از آزمایش‌های حدود آتربرگ، نسبت باربری کالیفرنیا، تحکیم و مقاومت فشاری تک محوری استفاده نمودند. همچنین تغییرات ساختار خاک استفاده از آزمایش‌های SEM و XRD ارزیابی شد. نتایج بدست آمده نشان داد در مقایسه با آهک، باطله ذغال سنگ و خاکستر آن اثر کمتری بر خواص خمیری دارند. استفاده از باطله ذغال سنگ آن عدد CBR خاک را افزایش می‌دهد و آهک هیدراته اثر قابل ملاحظه‌ای بر CBR و خصوصیات تورمی داشته است و مقاومت فشار محصور نشده ترکیب باطله و آهک و رس افزایش چشمگیری داشته است. جمال‌الدین و همکاران (Jamaludin et al., 2018a) به بررسی استفاده از خاکستر ذغال سنگ در بهبود

و یخبندان) باعث وقوع آسیب‌های جدی به لایه‌های روسازی اجرا شده در بدنه راه می‌گردد که نتیجه آن صرف هزینه‌های زیاد جهت بهسازی خاک رس آن منطقه می‌گردد. اگرچه آهک زنده دارای CaO بیشتری است و می‌تواند نسبت به آهک هیدراته در تثبیت و بهسازی خاک مؤثرتر باشد ولی واکنش شیمیایی آهک زنده با آب همراه با تولید گاز CO_2 و درجه حرارت بالا است که برای سلامتی انسان مضر است. بنابراین کاربرد آهک هیدراته $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ ایمن‌تر بوده و در صنعت مرسوم‌تر می‌باشد. آهک هیدراته مصرفی مورد استفاده در این تحقیق از نوع صنعتی و شکفته بوده که تولید کارخانه آهک پارس شیمی بوده و در کیسه‌های ۵۰ کیلوگرمی تهیه شده است. مشخصات شیمیایی آهک هیدراته که پودری به رنگ سفید است در جدول ۲ آورده شده است. پودر ذغال سنگ از معدن زرنند کرمان تهیه شده و سپس در کوره کارگاه ذغال پزی در شرایط خلأ و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شده است. خصوصیات شیمیایی خاکستر پودر ذغال سنگ طبق آزمایش‌ها XRF در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. با انجام XRD مشخص شده است که عناصر تشکیل دهنده پودر ذغال سنگ شامل کوارتز و کربنات کلسیم به همراه کائولینیت می‌باشد. تصاویر مصالح مصرفی در شکل ۱ قابل مشاهده است. منحنی دانه-بندی مصالح مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D421 و ASTM D422 تعیین گردیده و در شکل ۲ می‌توان مشاهده نمود. طبق طبقه‌بندی خاک‌ها به روش متحد، خاک رس مورد مطالعه از نوع CL بوده و خصوصیات خمیری آن طبق استاندارد ASTM D4318 و چگالی ویژه نیز بر اساس استاندارد ASTM D854 اندازه‌گیری شده و مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده است.

(Akinwumi et al., 2023) به بهسازی خاک با استفاده از مخلوط خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوست درخت چنار به عنوان مصالح ساخت لایه روسازی راه پرداختند. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک طبیعی با خاکستر ذغال سنگ (CA) و خاکستر پوست درخت چنار (PPA) مشخص شد و تحت آزمایش‌هایی برای حدود آتربرگ، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و تراکم و همچنین بررسی‌های مربوط به آن قرار گرفت. پس از یک روز عمل‌آوری بر روی نمونه‌های ساخته شده، ایشان دریافتند که مخلوط خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوست درخت چنار با هم می‌تواند پتانسیل تثبیت خاک را به عنوان مصالح لایه روسازی داشته باشد و همچنین آلودگی ناشی از دفع نادرست ذغال‌سنگ و پوست چنار از محیط را حذف کند.

با مرور مطالعات گذشته مشاهده می‌شود ترکیب همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ به‌منظور تثبیت خاک رس کمتر مورد مطالعه قرار گرفته که از نوع‌آوری‌های تحقیق حاضر می‌باشد.

مواد و مصالح

همچنان که در بخش‌های گذشته به آن اشاره شد، هدف از مطالعه حاضر بررسی امکان تثبیت و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس با استفاده از آهک هیدراته، خاکستر ذغال سنگ و ترکیب همزمان آن دو می‌باشد. نمونه‌های خاک رس مورد مطالعه از دامنه کوه عون ابن علی در منطقه شمال غرب شهر تبریز گردآوری شده که ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. دلیل انتخاب خاک رس آن منطقه آن است که ویژگی‌های آن به گونه‌ای است در هنگام شرایط جوی ناپایدار (بارندگی، برف



شکل ۱. تصویر مصالح مصرفی مورد مطالعه در تحقیق حاضر
Fig. 1. Pictures of materials used in present research

جدول ۱. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس مورد استفاده.

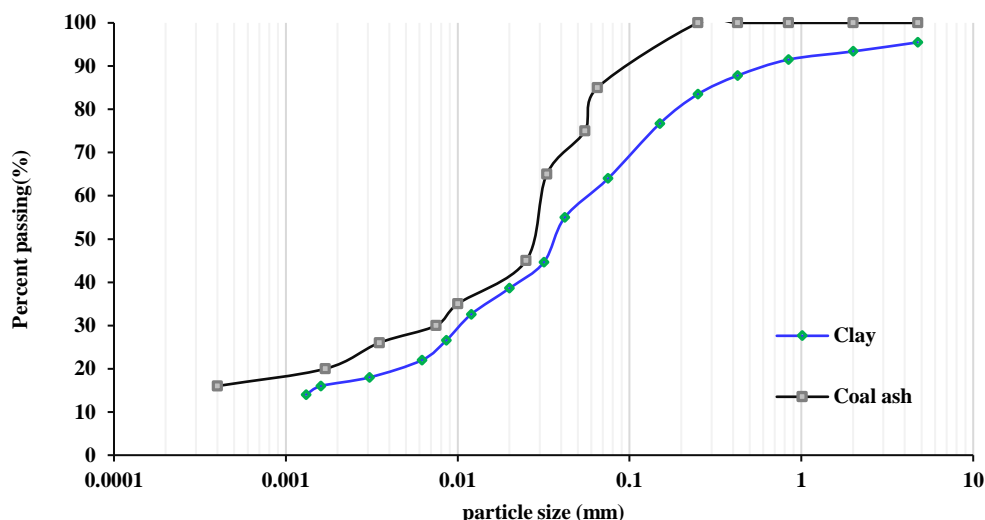
Table 1. Geotechnical properties of clay

Geotechnical parameters	Value
LL (%)	33.0
PL (%)	16.3
PI (%)	16.7
Gs	2.63
pH	8.1

جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی عناصر آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ و خاک رس مورد استفاده

Table 2. Chemical properties of hydrated lime and coal ash

Material	Clay (%)	Hydrated lime (%)	Coal ash (%)
Na ₂ O	0.71	0.1	0.1
MgO	6.67	4.27	0.7
Al ₂ O ₃	9.13	0.69	20
SiO ₂	35.48	1.19	64
SO ₃	1.76	0.4	1.4
K ₂ O	2.47	0.1	1.7
CaO	16.4	71	1.7
TiO ₂	0.43	-	0.7
Fe ₂ O ₃	4.7	0.74	4
L.O.I	22.25	21.51	5.7



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده

Fig. 2. Particle size distribution curves of used materials

حالت بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده (۲۸ روزه) پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده برآورد شد. در مرحله آخر، پس از تعیین مقدار بهینه آهک هیدراته مؤثر بر خصوصیات مکانیکی خاک رس، مخلوط بهینه آهک هیدراته به همراه خاکستر پودر ذغال سنگ (۵، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ درصد) به خاک رس افزوده شده و امکان تثبیت آن با توجه به تغییرات در خصوصیات ژئوتکنیکی آن در حالت‌های بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری (۲۸ روزه) ارزیابی شد. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های مخلوط یکنواخت و همگن جهت ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی از استاندارد ASTM C305 استفاده شد. بطوری‌که ابتدا آب (با توجه به رطوبت بهینه) به خاک مورد مطالعه اضافه گردید. سپس در داخل میکسر (مخلوط کن) مخلوط شدند تا چسبندگی مناسب بین مصالح افزوده شده و خاک بوجود آید. طبق استاندارد ۳۰ ثانیه عملیات مخلوط متوقف شده تا مصالح رطوبت را جذب نمایند. در ادامه پودر آهک هیدراته به نمونه مخلوط اضافه شد. عملیات مخلوط کردن نمونه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با دور کند، ۱۵ ثانیه تمیزکاری و ۶۰ ثانیه با دور متوسط انجام

بررسی‌های آزمایشگاهی و آماده‌سازی نمونه‌ها

طبق استاندارد ASTM C618 هنگامی که میزان مجموع مخلوط عناصر $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ نزدیک به ۷۰ درصد باشد، رفتار پوزولانی یا سمنتاسیون مشاهده می‌شود. طبق جدول ۲ می‌توان دریافت خاکستر پودر ذغال سنگ تا حدود زیاد دارای این خاصیت است. از سوی دیگر، آهک هیدراته با توجه به دارا بودن ذرات اکسید کلسیم، آلومینات و سیلیس، هنگامی‌که با خاک رس مخلوط می‌شود مقدار pH محیط را به ۱۲/۴ می‌رساند که شرایط را برای آغاز واکنش سمنتاسیون فراهم می‌نماید. با توجه به این‌که هدف از تحقیق حاضر، بررسی امکان تأثیرگذاری این دو ماده پوزولان بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس است، در این مطالعه، ابتدا آهک هیدراته با درصد‌های وزنی ۴، ۶ و ۷ با خاک مورد مطالعه مخلوط گردید و اثر آن در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده در دو حالت بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده (۲۸ روزه) ارزیابی شد. سپس، همان خاک رس مورد تحقیق با خاکستر پودر ذغال سنگ با درصد وزنی ۵، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ ترکیب شده و مشابه با حالت قبل در دو

بصورت کنترل کرنش تحت اثر بارهای قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال با سرعت بارگذاری ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه صورت پذیرفت. در انتها، به منظور تعیین میزان توانایی باربری نمونه‌ها جهت پیش‌بینی امکان کاربرد مصالح برای ساخت لایه‌های روسازی آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مطابق با استاندارد ASTM D1883 در شرایط خشک و انرژی تراکمی ۵۶ ضربه انجام گرفته است. بگونه‌ای که مطابق استاندارد سرعت بارگذاری ۱/۲۷ mm/min انتخاب شده و عدد CBR برای نفوذ سنبه به میزان ۵ میلی‌متر برآورد گردیده است. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه طبق جدول ۳ بوده است.

گرفت. پس از اتمام عملیات اختلاط، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در ظرف پلاستیکی سر بسته در شرایط دمای محیطی نگهداری کرده تا فرایند عمل‌آوری انجام پذیرد. این فرایند برای هر دو حالت دیگر ذکر شده جهت ساخت نمونه خاک-های تثبیت شده با پودر خاکستر ذغال سنگ و مخلوط آهک هیدراته بعلاوه پودر خاکستر ذغال سنگ انجام پذیرفته است. برای نیل به اهداف تحقیق، ابتدا آزمون تراکم پروکتور طبق استاندارد ASTM D698 انجام گرفت. سپس به‌منظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده، آزمون مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166، آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080 برای نمونه‌های با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتیمتر مربع

جدول ۳. برنامه آزمون‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه.

Table 3. The program of tests performed on the studied samples in present research.

No	Sample Name	Soil Matrix	Hydrated lime (%)	Coal ash (%)	Tests				
					Atterberg limit	Compaction	Uniaxial compressive strength	Direct shear	CBR
1	C0	Clay	0	0	*	*	*	*	*
2	CLI4	Clay	4	0	*	*	*	*	*
3	CLI6	Clay	6	0	*	*	*	*	*
4	CLI7	Clay	7	0	*	*	*	*	*
5	CCO5	Clay	0	5	*	*	*	*	*
6	CCO15	Clay	0	15	*	*	*	*	*
7	CCO25	Clay	0	25	*	*	*	*	*
8	CCO50	Clay	0	50	*	*	*	*	*
9	CLI7CO5	Clay	7	5	*	*	*	*	*
10	CLI7CO15	Clay	7	15	*	*	*	*	*
11	CLI7CO25	Clay	7	25	*	*	*	*	*
12	CLI7CO50	Clay	7	50	*	*	*	*	*

نتایج آزمایش‌ها

۱- آزمایش تعیین حدود آتربرگ

رس در دو حالت بلافاصله بعد از اختلاط (بدون عمل‌آوری) و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری دیده می‌شود. همان‌طور که قابل پیش‌بینی است با بالا رفتن مقدار آهک هیدراته در خاک رس مقدار شاخص خمیری خاک تثبیت شده کاهش یافته است. میزان کاهش خمیری بوقوع پیوسته در شاخص خمیری به ازای افزودن ۷٪ آهک به خاک رس افزوده در حالت‌های

در نمودارهای شکل (۳-الف، ب و ج) می‌توان تأثیر آهک هیدراته و ذغال سنگ را به صورت جداگانه و همزمان بر روی تغییرات شاخص خمیری خاک رس مورد مطالعه مشاهده نمود. در شکل (۳-الف) تأثیر آهک هیدراته بر روی خاک

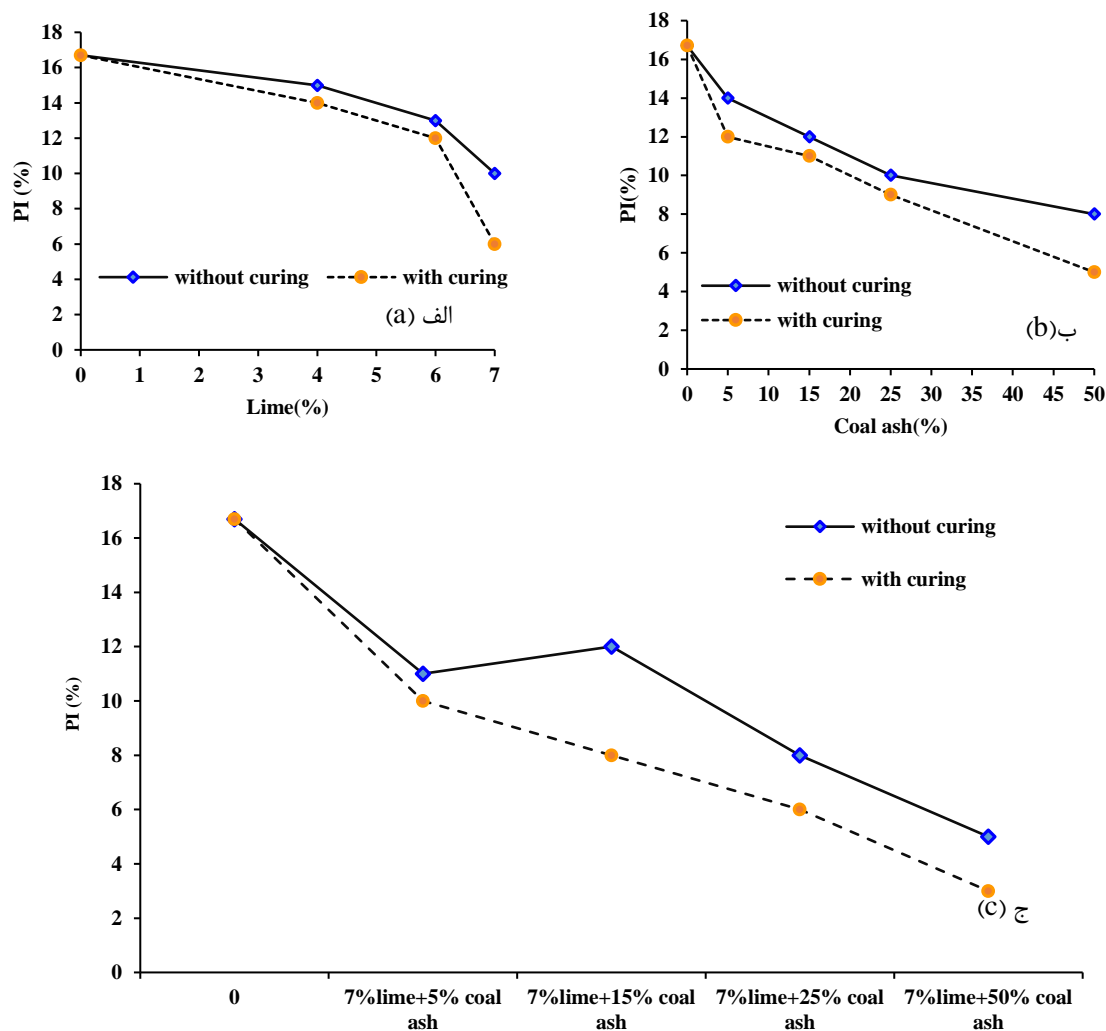
نتیجه کاهش جذب آب می‌شود. کاهش جذب آب منجر به کاهش شاخص خمیری خاک می‌شود. همچنین، خاکستر ذغال سنگ به عنوان یک پرکننده عمل می‌کند و فضای خالی بین ذرات خاک رس را پر می‌کند. این پرکنندگی منجر به افزایش چگالی و کاهش فضاهای خالی می‌شود که در نهایت به کاهش پلاستیسیته خاک کمک می‌کند. نتایج بدست آمده هم راستا با مطالعات صورت گرفته توسط سزار و همکاران (Sezar et al., 2006) می‌باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده از تأثیرگذاری آهک و خاکستر ذغال سنگ دیده می‌شود واکنش پوزولانی ناشی از خاکستر نسبت به آهک سبب کاهش مناسب‌تر خاصیت خمیری خاک رس گردیده است. در ادامه به منظور بررسی تأثیرگذاری همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ در بهسازی خاصیت خمیری خاک رس، میزان آهک بهینه (۷٪) انتخاب گردیده و با مقادیر خاکستر ذغال سنگ مخلوط شده و سپس به رس افزوده شده و عمل-آوری صورت گرفته است. نتایج بدست آمده در نمودار شکل (۳-ج) ارائه شده است. همان طور که دیده می‌شود به ازای مخلوط نمودن همزمان ۷٪ آهک هیدراته و ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ میزان شاخص خمیری را در حالت بدون عمل-آوری ۷۰٪ و در شرایط عمل‌آوری پس از ۲۸ روز ۸۲٪ کاهش می‌دهد. این شرایط بیان کننده آن است که آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ با خاک رس واکنش‌های شیمیایی ایجاد می‌کند. این واکنش‌ها منجر به تشکیل ترکیبات سیمانی مانند سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته می‌شوند. این ترکیبات سیمانی به تدریج تشکیل می‌شوند و باعث تثبیت ساختار خاک و کاهش پلاستیسیته آن می‌شوند. همچنین، چون آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ دارای خاصیت پوزولانی هستند، بنابراین باعث تسریع در واکنش شیمیایی سیمان‌تاسیون شده و به دلیل تغییر ساختار میکروسکوپی در خاک رس و تشکیل ذرات بزرگ‌تر (در مقایسه با تأثیرگذاری جداگانه آهک

بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۴۰٪ و ۶۴٪ است. علت این شرایط آن است که آهک هیدراته با سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در خاک رس واکنش می‌دهد و ترکیباتی مانند سیلیکات و آلومینات کلسیم را تشکیل می‌دهد (Muhamed and Wanatowski, 2013). این واکنش‌ها باعث می‌شود تا ساختار خاک تغییر کند و پلاستیسیته آن کاهش یابد. همچنین، آهک هیدراته باعث تشکیل ذرات درشت‌تر در خاک می‌شود که این امر منجر به کاهش سطح مخصوص ذرات و کاهش جذب آب توسط خاک می‌گردد. کاهش جذب آب منجر به کاهش شاخص خمیری خاک می‌شود. در انتها، در حضور آهک هیدراته، واکنش‌های پوزولانی اتفاق می‌افتد که منجر به تشکیل ترکیبات سیمانی در خاک می‌شود. این ترکیبات باعث سخت‌تر شدن و کاهش پلاستیسیته خاک می‌شوند. نتایج بدست آمده مشابه با تحقیقات صورت گرفته توسط قبادی و همکاران (Ghobadi et al., 2012) و سزار و همکاران (Sezar et al., 2006) می‌باشد.

مطابق با نمودارهای شکل (۳-ب) مشابه با روند آهک هیدراته، زمانی که خاکستر ذغال سنگ به رس افزوده شده است شاخص خمیری با شیب تندتری کاسته می‌شود. بطوری که مخلوط کردن ۵۰ درصد خاکستر ذغال سنگ با رس باعث شده است تا میزان شاخص خمیری (PI) در هر دو شرایط بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۵۲٪ و ۷۰٪ کاهش یابد. علت این رفتار آن است که خاکستر ذغال سنگ دارای خواص پوزولانی است و در حضور رطوبت ترکیبات سیمانی مانند سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم تشکیل می‌دهد. این ترکیبات سیمانی باعث تقویت و تثبیت خاک می‌شوند و خاصیت خمیری خاک را کاهش می‌دهند. از سوی دیگر، ذرات ریز خاکستر ذغال سنگ به ذرات خاک رس می‌چسبند و توده‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند. این پدیده منجر به کاهش سطح مخصوص ذرات خاک و در

خاک رس منطقه مورد مطالعه مخلوط می‌گردند پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌تواند از وقوع آسیب‌های جدی به لایه-های بدنه راه ناشی از شرایط ذوب و یخبندان جلوگیری نماید. نتایج بدست آمده مطابق با مطالعات صورت گرفته توسط شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) و مدرس و نوسودی (Modarrea and Nosoudy, 2015) است.

هیدراته و خاکستر ذغال سنگ در خاک رس) همراه با تغییر ساختار و ایجاد بافت جدید در خاک تثبیت شده می‌شوند فضاهای خالی بین ذرات خاک پر می‌گردد که نتیجه آن کاهش هرچه بیشتر شاخص خمیری خاک رس می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود، ترکیب بهینه ۷٪ آهک و هیدراته به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ زمانی که با



شکل ۳: تغییرات شاخص خمیری (PI) خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک ، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ، ج- اثر مخلوط همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ.

Fig 3. Variations of Plasticity Index (PI) in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash, c- The effect of the simultaneous mixture of lime and coal ash.

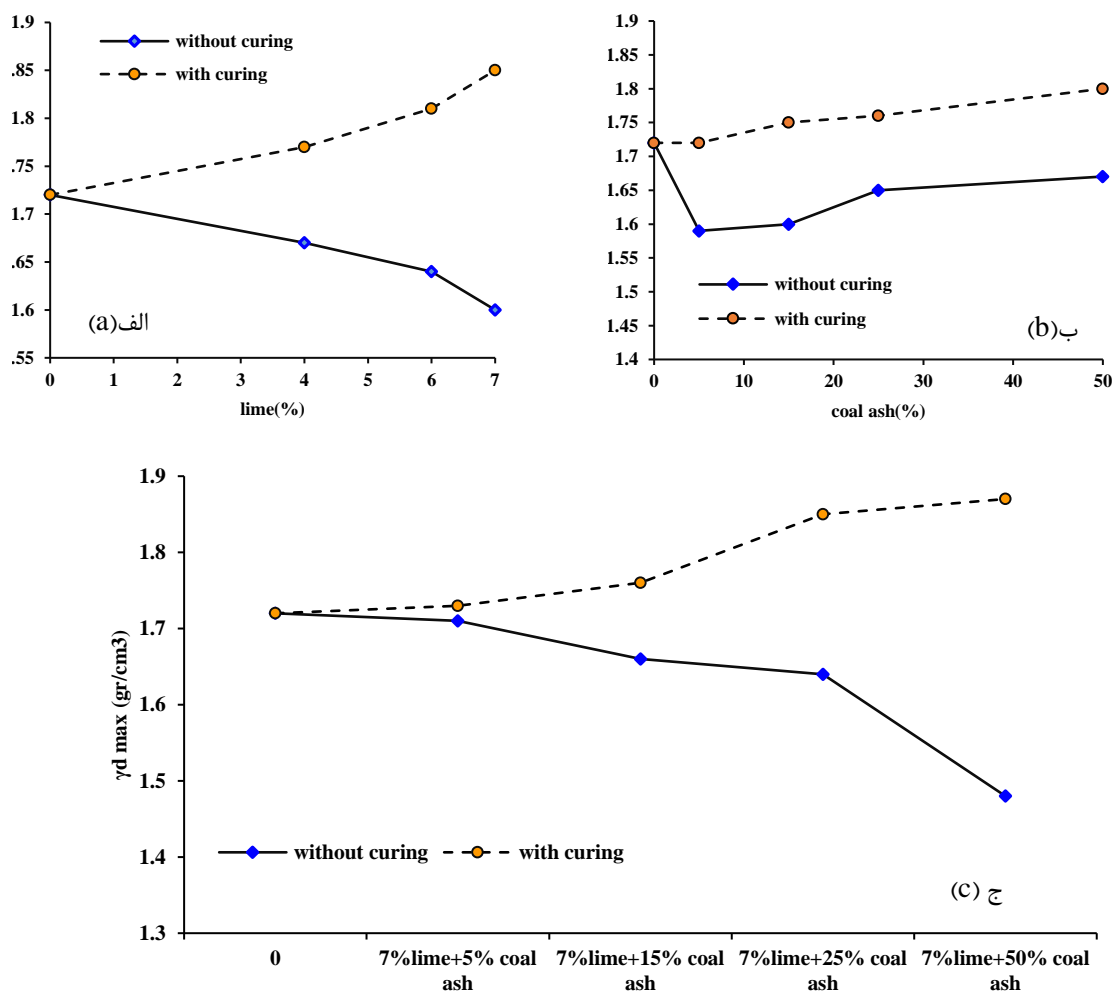
۲- نتایج آزمایش‌ها تراکم

نتایج حاصل از آزمون تراکم بر روی نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با آهک و ذغال سنگ را می‌توان در نمودارهای شکل (۴-الف، ب و ج) و شکل (۵-الف، ب و ج) مشاهده نمود. همان طوری که در شکل (۴-الف) ارائه شده است با افزایش مقدار آهک هیدراته در خاک رس بدون انجام عملیات عمل‌آوری باعث شده به دلیل خاصیت جذب بالای آب توسط آهک هیدراته و عدم وجود زمان برای اتمام واکنش‌های شیمیایی بین آهک هیدراته و خاک رس، وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) با بالا رفتن میزان آهک یک روند کاهشی را طی نماید. به گونه‌ای که در خاک رس حاوی ۷٪ آهک مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر ۷٪ کاسته شده است. این روند پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه و اتمام واکنش‌های شیمیایی تجمع-تراکم آبی و سمناسیون ساختار و اسکلت خاک رس تثبیت شده اصلاح شده و مشاهده می‌شود با افزودن ۷٪ وزنی آهک هیدراته به خاک رس، وزن مخصوص حداکثر خاک اصلاح شده به اندازه ۷/۵٪ افزایش می‌یابد. علت آن این است که آهک هیدراته با مواد رسی خاک واکنش می‌دهد و ترکیبات سیمانی مانند سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینات کلسیم هیدراته (C-A-H) تولید می‌کند (Muhammed and Wanatowski, 2013). این ترکیبات سیمانی بعد از گذشت ۲۸ روز عمل‌آوری به مرور زمان باعث ایجاد یک شبکه قوی و پایدار در خاک می‌شود که موجب کاهش تخلخل و فضای خالی بین ذرات بدلیل تشکیل ذرات بزرگ‌تر شده که در نتیجه باعث افزایش چگالی خاک تثبیت شده گردیده و در انتها افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر بوقوع پیوسته است. زمانی که خاکستر ذغال سنگ با خاک رس مخلوط می‌شود طبق نمودارهای شکل (۴-ب) قابل مشاهده است مشابه با آهک هیدراته زمان عمل‌آوری بر تشکیل واکنش پوزولان بین ذرات خاکستر ذغال سنگ و رس تأثیرگذار است. در شرایط بدون

عمل‌آوری، زمانی که ۵ درصد خاکستر با رس مخلوط می‌شود میزان γ_{dmax} به مقدار ۷/۵٪ کاهش می‌یابد. سپس با بالا رفتن میزان خاکستر ذغال سنگ تا ۵۰٪، تا حدودی روند تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر اصلاح شده و صعودی می‌گردد. اگرچه مقدار γ_{dmax} خاک اصلاح شده نسبت به حالت تثبیت نشده تقریباً ۳٪ کاهش یافته است. ولی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، دیده می‌شود افزایش میزان خاکستر ذغال سنگ باعث گردیده تا تغییرات γ_{dmax} یک مسیر پیش رونده را طی نماید. بطوری که اضافه کردن ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ با خاک رس مقدار γ_{dmax} تقریباً ۴/۶٪ افزایش می‌دهد. اگرچه تأثیرگذاری خاکستر ذغال سنگ در مقایسه با آهک در بهبود شرایط ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده اندکی کمتر است. دلیل مشاهده این رفتار را می‌توان بدین صورت بیان نمود آهک هیدراته به دلیل خواص قلیایی بالا و توانایی بالای تشکیل ترکیبات سیمانی به سرعت تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش بیشتر وزن مخصوص خشک می‌شود. در حالی که خاکستر ذغال سنگ به دلیل واکنش‌های پوزولانی کندتر و به میزان کمتری بر روی γ_{dmax} تأثیر می‌گذارد. نتایج بدست آمده نزدیک به مطالعات صورت گرفته توسط شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) می‌باشد. در ادامه، مقدار بهینه آهک هیدراته (۷٪) انتخاب شده با خاکستر ذغال سنگ با درصدهای مختلف مخلوط شده و جهت تثبیت به خاک رس افزوده شده است. طبق نمودارهای شکل (۴-ج) می‌توان دریافت که در شرایط بدون عمل‌آوری با افزایش درصد خاکستر ذغال سنگ در ترکیب ذکر شده مقدار γ_{dmax} یک روند کاهندگی را طی می‌نماید و بطور میانگین ۵/۶۷٪ نسبت به حالت تثبیت نشده کاسته شده است. این روند بیان کننده آن است بدون انجام عمل‌آوری و عدم تکمیل واکنش‌های شیمیایی آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ با خاک رس باعث افزایش فضای خالی بین ذرات شده و بافت سستی را بوجود آورده‌اند

γ_{dmax} را نسبت به حالت تثبیت نشده ۸/۷٪ افزایش داده است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود، ترکیب بهینه ۷٪ آهک هیدراته به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ زمانی که با خاک رس منطقه مورد مطالعه مخلوط می‌گردند پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌تواند باعث کاهش وقوع نشست و تغییر شکل در لایه‌های روسازی گردد.

که نتیجه آن پایین آمدن مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر است. در حالی که با انجام روند عمل‌آوری پس از ۲۸ روز مشاهده می‌شود که با اتمام کامل واکنش‌های شیمیایی بین ترکیب آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ با ذرات رس، γ_{dmax} یک مسیر صعودی را در اصلاح وزن مخصوص خشک حداکثر طی می‌نماید. مناسب‌ترین حالت، ترکیب ۷٪ آهک به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ است که مقدار

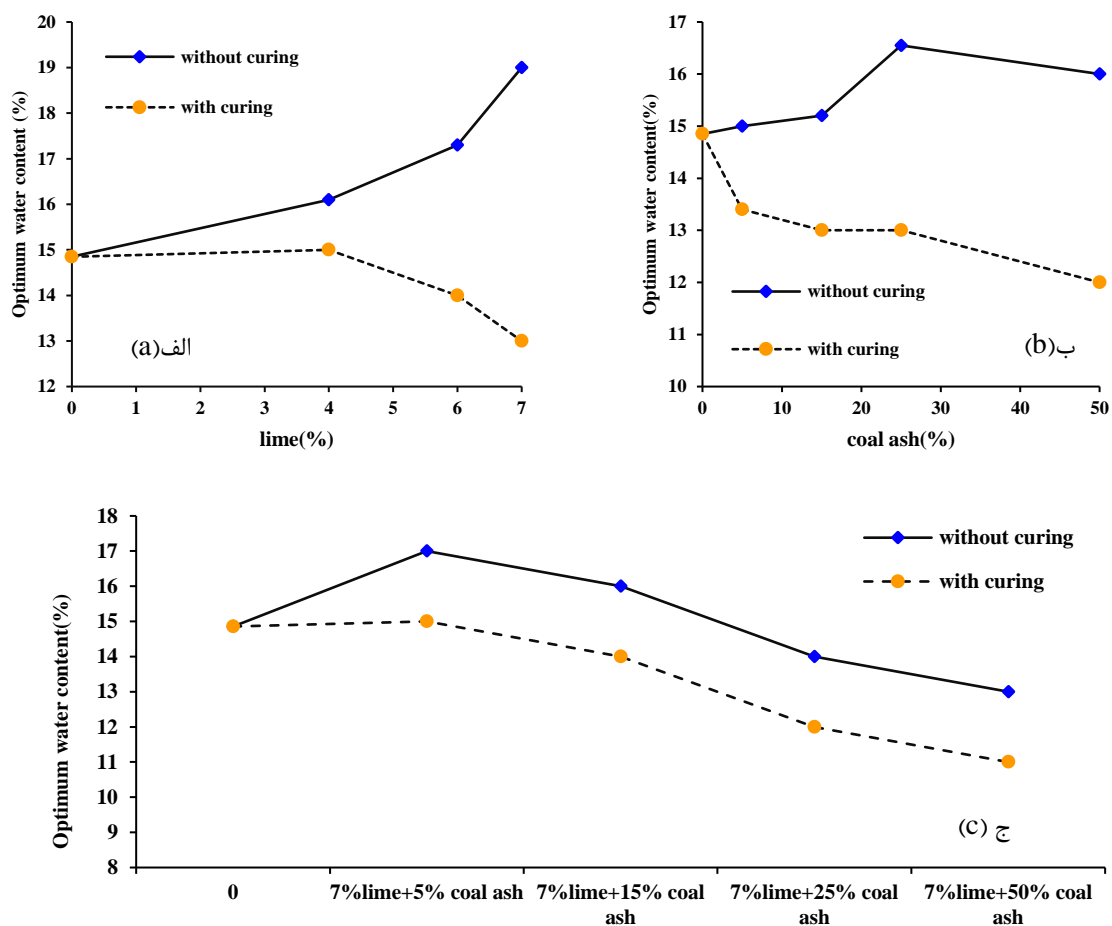


شکل ۴. تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک ، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ، ج- اثر مخلوط همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ.

Fig. 4. Variations of maximum dry density (γ_{dmax}) in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash, c- The effect of the simultaneous mixture of lime and coal ash.

بوده است. در شکل (۵-ج) تأثیرگذاری ترکیب مقدار بهینه آهک هیدراته (۷٪) با درصدهای مختلف خاکستر ذغال سنگ در خاک رس ارائه شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است در هر دو شرایط بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری میزان رطوبت بهینه در نمونه خاک رس تثبیت شده ابتدا افزایش و سپس کاهش را نشان می‌دهد. اگرچه در مقایسه با دو حالت ذکر شده مناسب‌ترین ترکیب مربوط به مخلوط ۷٪ آهک هیدراته به همراه ۵۰ درصد خاکستر ذغال سنگ پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه است که مقدار رطوبت بهینه را ۲۴/۵٪ کاهش داده است. این روند بیان‌کننده آن است که هر دو ماده افزودنی آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ بدلیل دارا بودن خاصیت پوزولانی بعد از انجام عمل‌آوری باعث تغییر در ساختار و بافت رس از ریزدانه به سمت درشت دانه شده است. این نتایج مشابه با روند ارائه شده توسط شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) و مدرس و نوسودی (Modaress and Nosoudy, 2015) می‌باشد. نتیجه این فرایند کاهش در میزان جذب آب است. زمانی که این دو ماده همزمان به خاک رس اضافه می‌شوند مشاهده می‌شود که فرایند واکنش سمناسیون و پوزولانی سریع‌تر بوقوع می‌پیوندد که نتیجه آن کاهش بیشتر در میزان جذب آب است. بنابراین می‌توان بیان کرد، ترکیب بهینه ۷٪ آهک هیدراته به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ زمانی که با خاک رس بدست آمده از منطقه مورد مطالعه اضافه می‌شوند پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه سبب کاهش میزان آب‌پاشی در هنگام تراکم لایه‌های روسازی راه گردد. همچنین، آسیب‌های ناشی از شرایط ذوب و یخبندان را نیز می‌تواند کاهش دهد.

در شکل (۵-الف، ب و ج) تأثیرگذاری آهک هیدراته، خاکستر ذغال سنگ و ترکیب همزمان آن‌ها در میزان جذب آب توسط خاک رس تثبیت شده قابل مشاهده است. نمودارهای شکل (۵-الف) نشان می‌دهد در حالت بدون عمل‌آوری میزان رطوبت بهینه خاک رس تثبیت شده با افزایش مقدار آهک یک سیر صعودی را طی نموده است، بطوری که به ازای ۷٪ آهک هیدراته مخلوط شده، رطوبت بهینه خاک رس تثبیت شده را نسبت به حالت تثبیت نشده به مقدار ۳۰٪ افزایش یافته که بیان‌کننده بالا رفتن میزان جذب آب توسط ذرات کربنات کلسیم موجود در آهک بدلیل عدم تکمیل واکنش‌های شیمیایی بین رس و آهک هیدراته است. پس از انجام عمل‌آوری ۲۸ روزه روی نمونه‌های تثبیت شده خاک رس مشاهده شد روند جذب آب توسط ذرات خاک رس تثبیت شده توسط آهک به خاطر اتمام واکنش‌های شیمیایی پوزولانی بین آن‌ها و تشکیل ساختار جدید و استخوان‌بندی قوی کاسته شده است. بیشترین کاهش در رطوبت بهینه به مقدار ۱۱٪ زمانی که ۷٪ آهک هیدراته به خاک رس افزوده شده دیده شد. همچنین در شکل (۵-ب) می‌توان دریافت در حالت بدون عمل‌آوری، با افزایش مقدار خاکستر ذغال سنگ در خاک رس رطوبت بهینه نمونه مخلوط روند پیش‌رونده‌ای را طی می‌نماید. بطوری که افزودن ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ سبب بالا رفتن جذب آب به مقدار ۹/۷٪ گردد. در صورتی که با انجام عمل‌آوری ۲۸ روزه نتایج بدست آمده نشان داده است روند تغییرات معکوس شده و با افزایش خاکستر ذغال سنگ مقدار رطوبت بهینه در رس تثبیت شده کاهش یافته است. بیشترین میزان کاهش در مخلوط ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ در رس تثبیت شده به مقدار ۱۷/۷٪



شکل ۵. تغییرات رطوبت بهینه خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ، ج- اثر مخلوط همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ.

Fig. 5. Variations of optimum water content in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash, c- The effect of the simultaneous mixture of lime and coal ash.

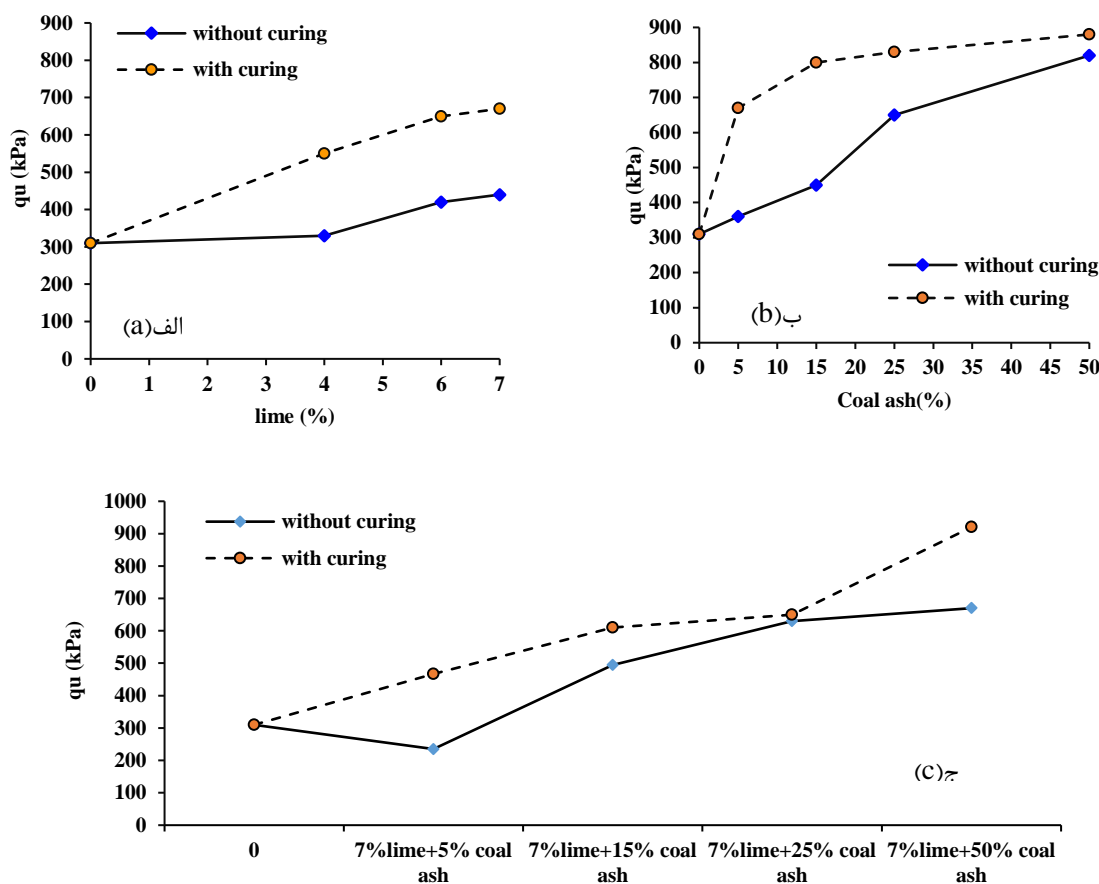
می‌یابد. این روند بیان کننده آن است مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه و تکمیل واکنش شیمیایی پوزولان و تغییر در ساختار و بافت باعث افزایش توانایی باربری خاک رس تثبیت شده با آهک دارای حائز اهمیت بسیاری است. در شکل (۶-۶) (ب) مشاهده می‌گردد، با افزوده شدن خاکستر ذغال سنگ به خاک رس نیز می‌تواند مقاومت فشاری تک محوری را در نمونه‌های تثبیت شده افزایش دهد. نرخ رشد توانایی باربری در نمونه‌های مخلوط شده با ۵۰ درصد خاکستر ذغال سنگ در شرایط بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده به ترتیب ۱/۶۴ و ۱/۸۳ برابر است که در مقایسه با تأثیرگذاری آهک قابل توجه است. در شکل (۶-ج) تأثیر ترکیب مقدار بهینه آهک

۳- نتایج آزمایش‌ها مقاومت فشاری تک محوری

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری طبق نمودارهای شکل‌های (۶-الف، ب و ج)، (۷-الف، ب و ج) و (۸-الف، ب و ج) ارائه شده است. با توجه به نمودار شکل (۶-الف) دیده می‌شود در هر دو حالت بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ازای بالا رفتن میزان درصد آهک هیدراته در خاک رس مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاکی تثبیت شده رشد می‌کند. با رسیدن مقدار آهک هیدراته به ۷٪، مقاومت فشاری در لحظه گسیختگی، در شرایط بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۴۲٪ و ۱/۱۶ برابر افزایش

هیدراته باعث تشکیل ترکیبات سیمانی مانند سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینات کلسیم هیدراته (C-A-H) می‌شود (Muhamed and Wanatowski, 2013). در حالی که خاکستر ذغال سنگ به دلیل خواص پوزولانی خود با آهک هیدراته واکنش داده و ترکیبات سیمانی بیشتری را تولید می‌کند که نتیجه آن افزایش مقاومت فشاری است. بنابراین می‌توان بیان نمود ترکیب بهینه مذکور پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در تثبیت خاک رسی محدوده مورد مطالعه مناسب بوده و جهت احداث لایه‌های روسازی راه می‌توان بکار برد.

(۷٪) با درصدهای مختلف بر روی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک رس تثبیت شده نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان دریافت ترکیب بهینه ۷٪ آهک به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ مقاومت فشاری تک محوری را در شرایط بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۱/۱۶ و ۱/۹۶ برابر افزایش داده است. این روند بیان کننده آن است که بین آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ یک اثر هم‌افزایی مناسب وجود دارد. بطوری‌که آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ به طور هم‌زمان با خاک رس واکنش‌های شیمیایی متفاوتی ایجاد می‌کنند. آهک

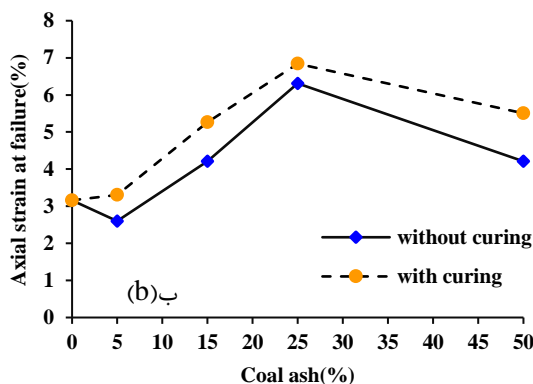
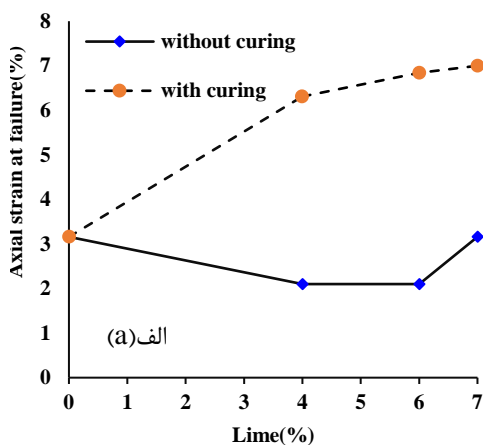


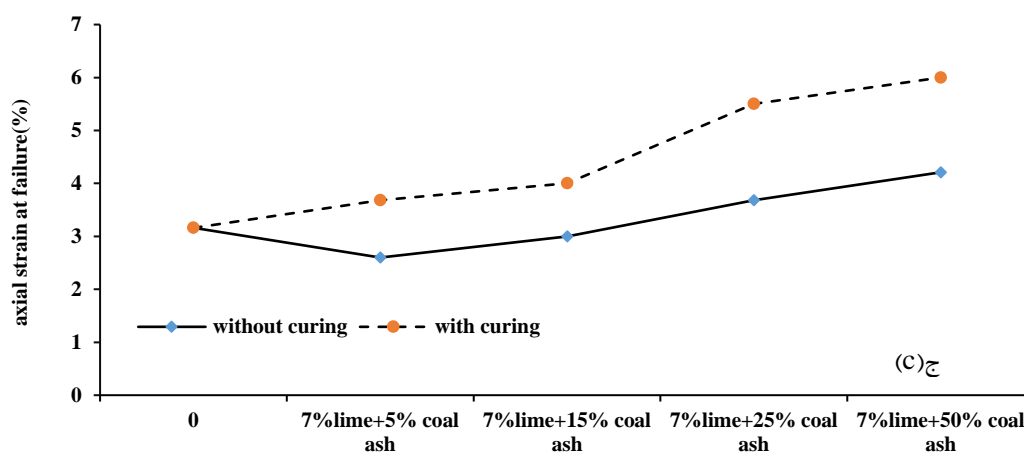
شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک ، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ، ج- اثر مخلوط هم‌زمان آهک و خاکستر ذغال سنگ

Fig. 6. Variations of uniaxial compressive strength in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash, c- The effect of the simultaneous mixture of lime and coal ash

شدن می‌رود. نتایج ارائه شده در شکل (۷-ب) بیان می‌کند در هردو حالت بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری (پس از ۲۸ روز) زمانی که مقدار خاکستر ذغال سنگ به ۲۵ درصد می‌رسد مقدار کرنش محوری به ترتیب ۱ و ۱/۱۶ برابر افزایش و سپس با رشد مقدار خاکستر ذغال سنگ کاهش می‌یابد. بنابراین خاکستر ذغال سنگ در مقایسه با آهک هیدراته رفتار انعطاف‌پذیری را در خاک رس تثبیت شده نشان می‌دهد. زمانی که مقدار بهینه آهک هیدراته (۷٪) با خاکستر ذغال سنگ با درصدهای مختلف ترکیب شده و به خاک رس افزوده می‌شود، طبق نمودارهای شکل (۷-ج) می‌توان دید مقدار کرنش محوری در ترکیب ۷٪ آهک با ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ در دو حالت بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۳۳٪ و ۸۹٪ افزایش می‌دهد که بیان‌کننده ارائه رفتار تردتر و صلب‌تر بیشتر در مقایسه با حالت اشاره شده در قبلی است.

در نمودارهای شکل (۷-الف، ب و ج) تغییرات کرنش محوری در لحظه گسیختگی در نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با آهک هیدراته، خاکستر ذغال سنگ و ترکیب همزمان آن دو قابل مقایسه است. نمودارهای شکل (۷-الف) نشان می‌دهد هنگامی که آهک هیدراته به خاک رس افزوده می‌شود، مقدار کرنش محوری در حالت بدون عمل‌آوری ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و تقریباً با مقدار حالت رس تثبیت نشده برابر می‌شود. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها، کرنش محوری با بالا رفتن مقدار آهک هیدراته تا ۷ درصد رشد می‌نماید. بطوری که کرنش محوری نمونه تثبیت شده ۱/۲۱ برابر افزایش می‌یابد که بیان‌کننده رفتار صلب است. زیرا طبق نمودارهای شکل (۵-الف) وقتی مقاومت خاک افزایش پیدا کند، به این معنی است که خاک توانایی بیشتری برای تحمل بارها و تغییرات شکل دارد و رفتار آن به سمت صلب‌تر



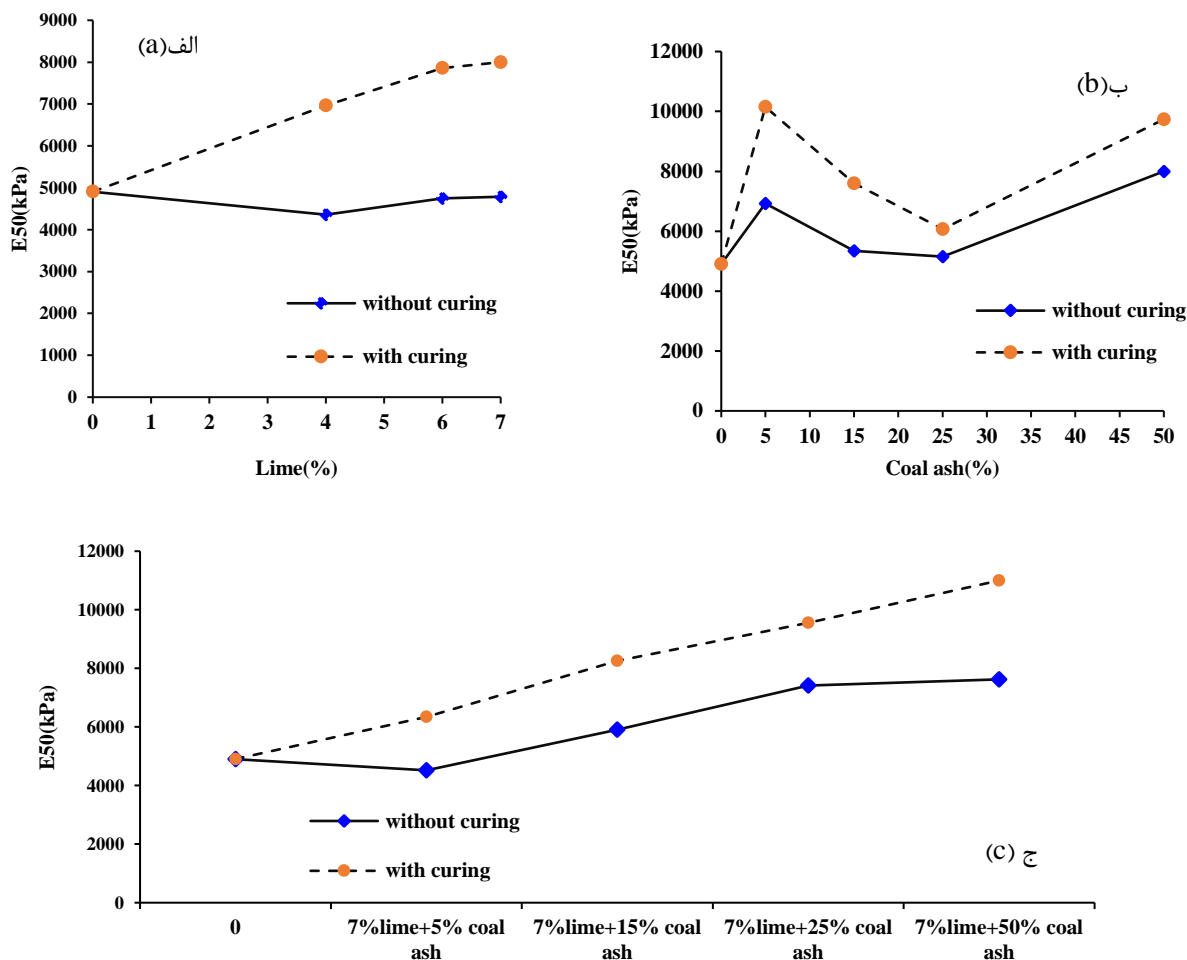


شکل ۷. تغییرات کرنش محوری در لحظه گسیختگی خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک ، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ، ج- اثر مخلوط همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ

Fig. 7. Variations of axial strain at failure in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash, c- The effect of the simultaneous mixture of lime and coal ash

(۷-ب) می توان دریافت ۵٪ خاکستر ذغال سنگ باعث صلب با مقاومت کششی بالا در خاک رس تثبیت شده گردیده است. سپس با افزایش میزان خاکستر ذغال سنگ رفتار رس تثبیت شده انعطاف پذیرتر گردیده است. با ترکیب ۷٪ آهک هیدراته با درصدهای مختلف خاکستر ذغال سنگ و مخلوط کردن آن با رس طبق نمودار شکل (۸-ج) می توان بیان نمود، با رشد میزان خاکستر در ترکیب ذکر شده مدول سکانت مسیر صعودی را طی نموده است. بطوریکه ترکیب ۷٪ آهک به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ میزان مدول سکانت را دو شرایط بدون عمل آوری و با عمل آوری به ترتیب ۵۵٪ و ۱/۲۴ برابر افزایش داده است. با مقایسه این روند با نمودارهای شکل (۷-ج) می توان نتیجه گیری نمود ترکیب بهینه ذکر شده در اثر هم افزایی باعث بالا رفتن بیشتر همزمان صلبیت و مدول سکانت در خاک رس تثبیت شده محدوده مورد مطالعه از نقطه نظر تغییر شکل و رفتار شده است که از بیان کننده امکان کاهش وقوع نشست و تغییر شکل در لایه های روسازی راه ناشی از وسایل نقلیه می گردد.

یکی از موضوعات مهم در مباحث مربوط به تثبیت خاک های مورد استفاده در زیرسازی راه میزان نشست و تغییر شکل آن ها تحت اثر بارهای وارده است. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون مقاومت فشاری تک محوری می توان تغییرات مدول سکانت (E_{50}) را در نمونه های خاک رسی تثبیت شده را در شکل (۸-الف، ب و ج) مشاهده نمود. همان طور که در نمودارهای شکل (۸-الف) دیده می شود مقدار مدول سکانت زمانی که ۷٪ آهک هیدراته به رس افزوده می شود در حالت های بدون عمل آوری و با عمل آوری به ترتیب ۲/۴۴٪ کاهش و ۶۳٪ افزایش یافته است. این روند بیان کننده آن است با انجام عمل آوری مقاومت کششی در خاک رس تثبیت شده با آهک هیدراته افزایش یافته و تغییر کاسته شده است. در شکل (۸-ب) می توان مشاهده نمود زمانی که ۵٪ خاکستر ذغال سنگ با خاک رس مخلوط می شود در دو حالت بدون عمل آوری و با عمل آوری مدول سکانت به ترتیب ۴۱٪ و ۱/۰۷ برابر بیشتر شده است. در ادامه، با بالا رفتن مقدار خاکستر ذغال سنگ مدول سکانت کاهش و سپس افزایش یافته است. با مقایسه نتایج بدست آمده با نمودارهای شکل



شکل ۸. تغییرات مدول سکانت (E_{50}) خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ، ج- اثر مخلوط همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ

Fig. 8. Variations of secant modulus (E_{50}) in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash, c- The effect of the simultaneous mixture of lime and coal ash

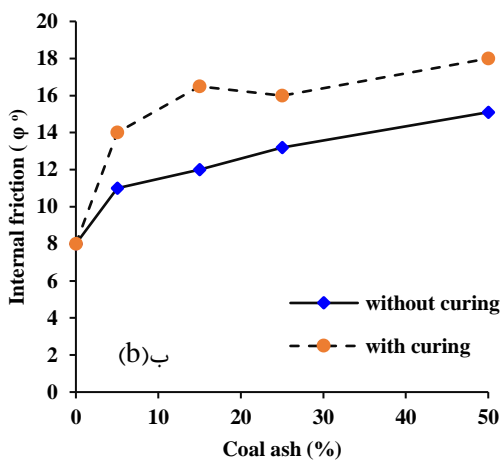
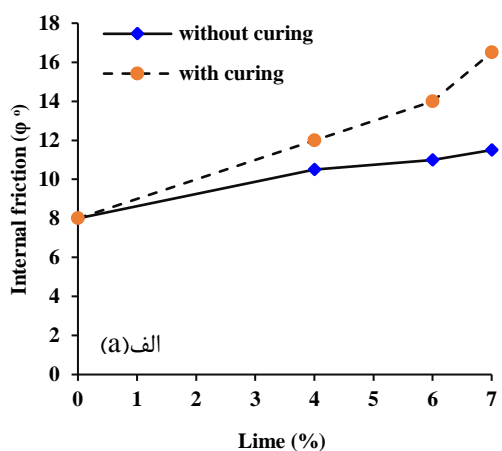
شکل (۹-الف) می‌توان مشاهده نمود در هر دو حالت بدون- عمل‌آوری و با عمل‌آوری با افزایش مقدار درصد آهک هیدراته زاویه اصطکاک داخلی رس تثبیت شده نیز یک روند افزایش را طی می‌نماید. نرخ رشد زاویه اصطکاک داخلی زمانی که آهک هیدراته در رس به ۷٪ می‌رسد در شرایط بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۴۴٪ و ۱/۰۶ برابر برآورد شده است. این روند بیان‌کننده آن است در حالت

۴- نتایج آزمایش‌ها برش مستقیم

در این بخش به نتایج بدست آمده از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ و تأثیر همزمان آن‌ها اشاره شده است. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده در شکل (۹-الف، ب و ج) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای

نمایش گذارده است. بطوریکه در هر دو حالت بدون عمل-آوری و با عمل آوری مقدار زاویه اصطکاک داخلی رس تثبیت شده زمانی که خاکستر ذغال سنگ به ۵۰ درصد می‌رسد به ترتیب ۸۸٪ و ۱/۲۵ برابر افزایش یافته است. خاکستر ذغال سنگ می‌تواند به طور هم‌افزایی با خاک رس واکنش دهد و در ترکیب با عمل‌آوری منجر به تشکیل ترکیبات سیمانی بیشتری نسبت به استفاده تنها از آهک شود. این ترکیبات می‌توانند باعث بهبود بیشتر ساختار و افزایش زاویه اصطکاک داخلی شوند. با مقایسه نتایج می‌توان بیان کرد که خاکستر ذغال سنگ نسبت به آهک اثرگذاری مناسب‌تری در افزایش و بهبود زاویه اصطکاک داخلی رس تثبیت شده داشته است. نتایج بدست آمده مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط مدرس و نوسودی (Modarres and Nosoudy, 2015) می‌باشد.

بدون عمل‌آوری آهک هیدراته می‌تواند ترکیبات سیمانی اولیه مانند سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته تولید می‌کند. این ترکیبات سیمانی به رغم عدم عمل‌آوری کامل، مقداری از ساختار خاک را تقویت می‌کنند و می‌توانند به افزایش زاویه اصطکاک داخلی کمک کنند. در ادامه، با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، تکمیل واکنش‌های شیمیایی بین کانی‌های رس و آهک هیدراته و تشکیل ذرات بزرگ‌تر و تغییر در ساختار و بافت استخوان بندی قوی بوجود آورد که نتیجه آن بالا رفتن مقدار زاویه اصطکاک داخلی است. در شکل (۹-ب) تأثیر خاکستر ذغال سنگ بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک رس تثبیت شده نشان داده شده است. مشابه با آهک با بالا رفتن مقدار خاکستر ذغال سنگ نیز میزان زاویه اصطکاک داخلی نیز روند صعودی را به

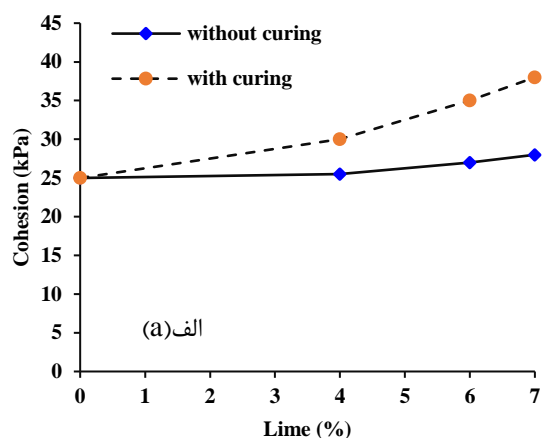


شکل ۹. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک ، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ
Fig. 9. Variations of internal friction in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash

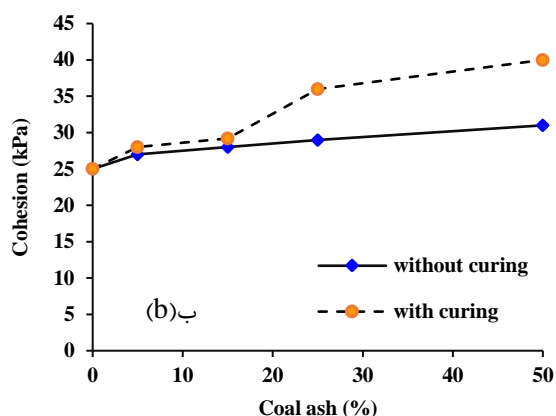
چسبندگی رس در هر دو حالت بدون عمل‌آوری و با عمل-آوری داشته است بطوریکه با افزایش مقدار آهک نرخ رشد چسبندگی نیز بالا می‌رود. طبق نمودارهای ارائه شده مخلوط نمودن ۷٪ آهک میزان چسبندگی را در دو حالت بدون

میزان اثرگذاری آهک و خاکستر ذغال سنگ بر روی میزان چسبندگی خاک رس تثبیت شده را می‌توان در نمودارهای شکل (۱۰-الف و ب) مشاهده نمود. همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) دیده می‌شود ذرات آهک تأثیر مثبتی بر

خاکستر ذغال سنگ به ۵۰٪ می‌رسد در دو حالت بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری کمیت چسبندگی به ترتیب ۲۴٪ و ۶۰٪ ارتقاء می‌یابد. مطابق با نمودارهای شکل (۹-الف و ب) می‌توان بیان نمود خاکستر ذغال سنگ اثر هم‌افزایی بیشتری در مقایسه با آهک هیدراته داشته و هم‌زمان سبب افزایش بیشتر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک رس مورد مطالعه گردیده است.



عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۱۲٪ و ۵۲٪ افزایش می‌یابد. مشابه با این نتایج را سزار و همکاران (Sezar et al., 2006) نیز در تحقیقات خود ارائه نموده است. مطابق با نمودارهای شکل (۱۰-ب) خاکستر ذغال سنگ نیز مشابه با آهک اثرگذاری مناسبی را در بهبود چسبندگی رس نشان می‌دهد. بطوری که با اضافه شدن درصد خاکستر ذغال سنگ چسبندگی رس بهسازی شده نیز فزونی می‌یابد. زمانی که

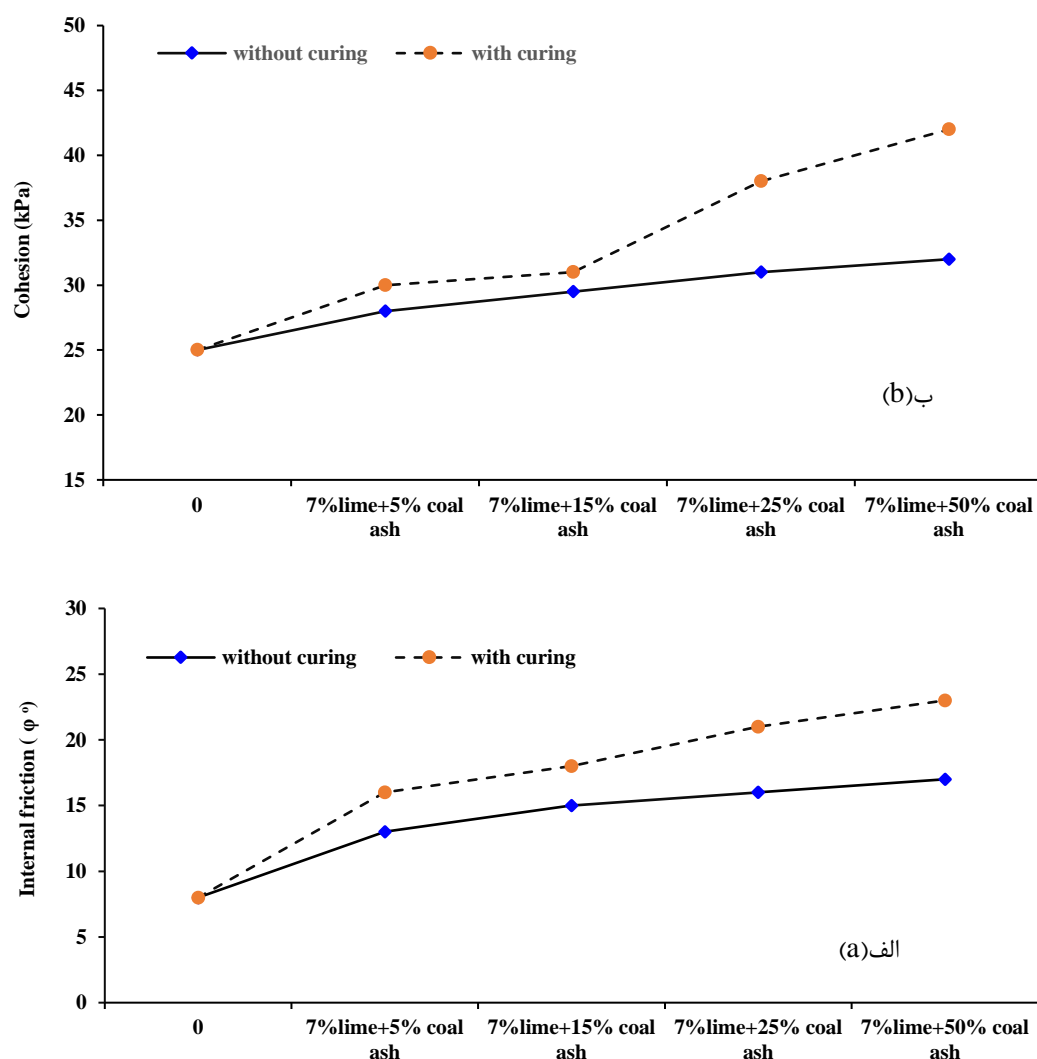


شکل ۱۰. تغییرات چسبندگی خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک ، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ

Fig. 10. Variations of cohesion in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash

در شکل (۱۱-ب) دیده می‌شود. بطوریکه افزودن هم‌زمان ۷٪ آهک و ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ باعث افزایش چسبندگی در نمونه بهسازی شده به ترتیب ۲۸٪ و ۶۸٪ در دو حالت بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده اضافه می‌نماید. این روند توسط شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) و مدر و نوسودی (Modarres and Nosoudy, 2015) نیز مشاهده شده است.

در شکل (۱۱-الف و ب) تأثیر هم‌زمان مخلوط آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ بر روی چسبندگی نمونه‌های خاک رس تثبیت شده قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل (۱۱-الف) می‌توان بیان نمود اختلاط ۷٪ آهک به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده را در حالت بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به ترتیب ۱/۱۲۵ و ۲/۲۸ برابر افزایش می‌دهد. مشابه به همین روند



شکل ۱۱. تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با مخلوط همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ، الف- زاویه اصطکاک داخلی، ب- چسبندگی

Fig. 11. Variations of geotechnical properties in improved clay, a- Internal friction, b- Cohesion

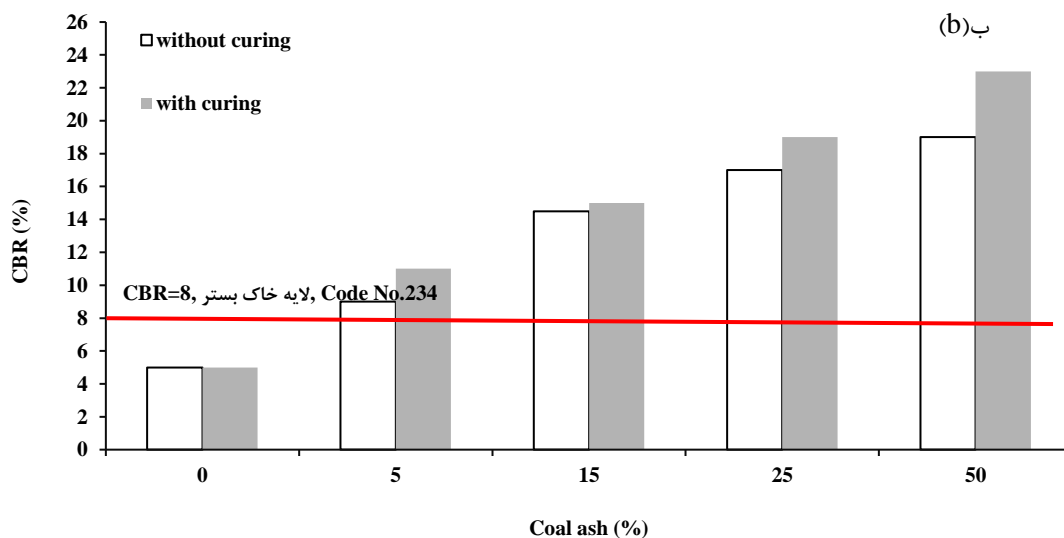
۵- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

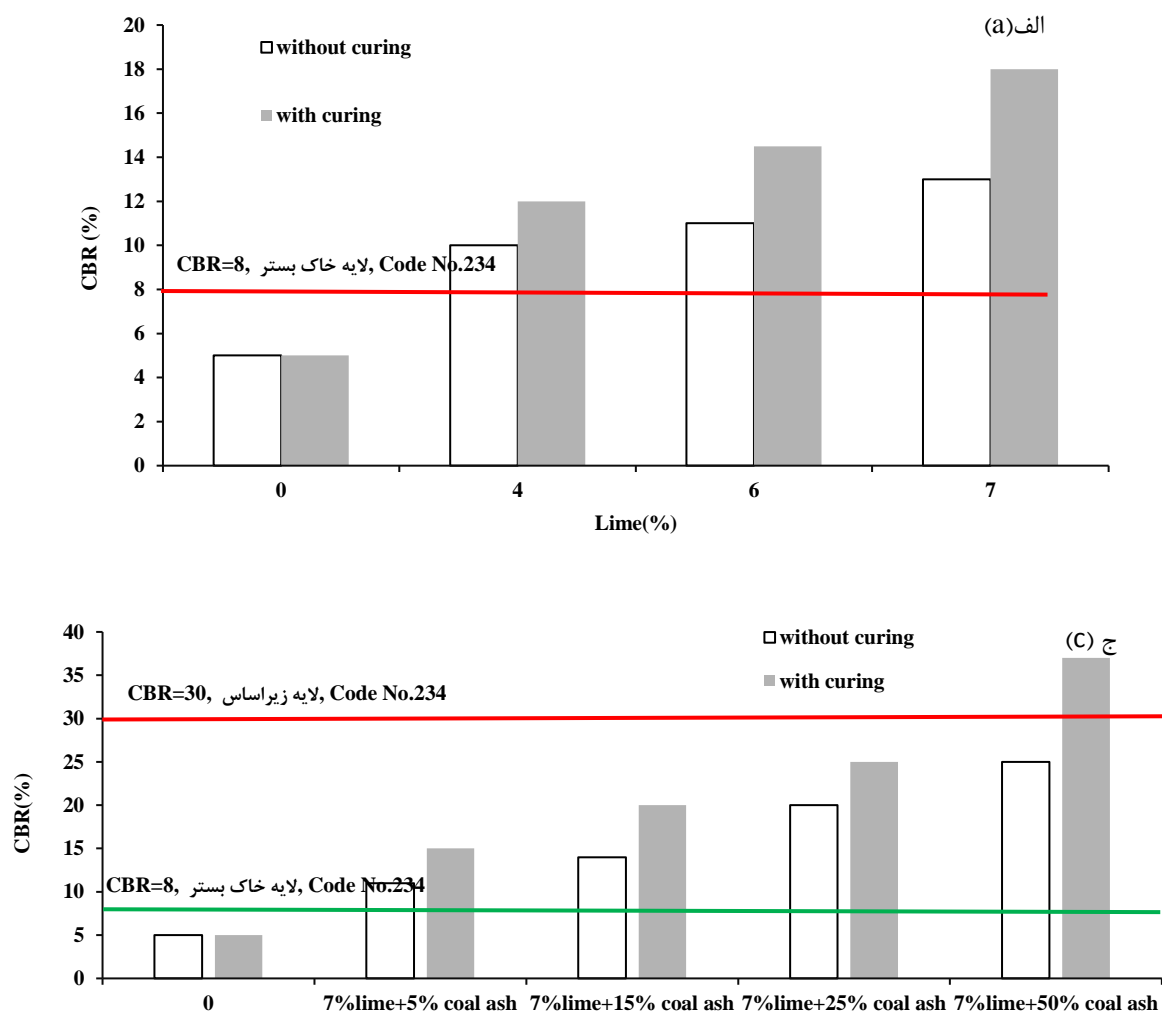
آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، در حالت خشک و در انرژی تراکمی ۵۶ ضربه برای هر لایه بر روی نمونه‌های مخلوط رس حاوی آهک هیدراته، خاکستر ذغال سنگ و مخلوط همزمان آن دو در شرایطی بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده انجام گردید. میزان نفوذ پیستون به مقدار

با مشاهده نمودارهای فوق، می‌توان بیان نمود در حالت عمل‌آوری شده آهک هیدراته، خاکستر ذغال سنگ و مخلوط آن دو تأثیر مناسب در بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده داشته است. نظیر همین روند در تغییرات مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های بهسازی شده خاک رس نیز می‌تواند قابل نمایان باشد.

درصد خاکستر ذغال سنگ به خاک رس امکان استفاده از نمونه تثبیت شده در احداث لایه خاک بستر در بدنه راه را میسر می‌سازد. در ادامه، تأثیر مخلوط همزمان آهک هیدراته بهینه (۷٪) با درصدهای مختلف خاکستر ذغال سنگ در نتایج عدد CBR خاک رس تثبیت شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده در شکل (۱۲-ج) مشاهده می‌شود، در هر دو شرایط بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده عدد CBR نمونه‌های حاکی بهسازی شده با بالا رفتن درصد خاکستر ذغال سنگ افزایش می‌یابد. بطوری که ترکیب ۷٪ آهک هیدراته به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ توانایی باربری را خاک رس تثبیت شده به ترتیب ۴ و ۶/۴ برابر رشد می‌دهد. ترکیب ذکر شده سبب شده است تا امکان استفاده از خاک تثبیت شده محدوده مورد مطالعه را طبق نشریه شماره ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه برای ساخت لایه‌های خاک بستر و زیر اساس فراهم بسازد. نتایج بدست آمده هم راستا با روند طی شده با مطالعات صورت گرفته توسط حسین زاده و همکاران (Hoseinzadeh et al., 2021) و سزار و همکاران (Sezar et al., 2006) می‌باشد.

۲/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده و نتایج بدست آمده در نمودارهای شکل (۱۲-الف، ب و ج) قابل مشاهده است. طبق نمودارهای شکل (۱۲-الف) می‌توان بیان نمود زمانی که آهک هیدراته با خاک رس مخلوط می‌شود در هر دو حالت بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری توانایی باربری و عدد CBR با بالا رفتن مقدار آهک افزایش یافته است. با رسیدن آهک به ۷٪، عدد CBR در هر دو حالت بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده به ترتیب ۱/۶ و ۲/۶ برابر رشد پیدا می‌کند و طبق نشریه شماره ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه خاک رس تثبیت شده قابلیت کاربرد در لایه خاک بستر را در بدنه راه دارد. خاکستر ذغال سنگ نیز دارای روند مشابه با آهک است و طبق نمودارهای شکل (۱۲-ب) قابل مشاهده است با رسیدن مقدار خاکستر ذغال سنگ در خاک رس به ۵۰ درصد عدد CBR در هر دو حالت بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری شده مسیر صعودی را طی کرده است. میزان افزایش عدد CBR در خاک رس بهسازی شده در مقایسه با شرایط خالص به ترتیب ۲/۸ و ۳/۶ برابر رشد داشته است. در این حالت نیز طبق نشریه ۲۳۴ می‌توان نتیجه گرفت افزودن ۵۰





شکل ۱۲. تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) خاک رس تثبیت شده، الف- اثر آهک، ب- اثر خاکستر ذغال سنگ، ج- اثر مخلوط همزمان آهک و خاکستر ذغال سنگ.

Fig. 12. Variations of CBR in improved clay, a- Effect of lime, b- Effect of coal ash, c- The effect of the simultaneous mixture of lime and coal ash

سنگ بعد از عمل آوری ۲۸ روزه می‌تواند خاک رس را بطور مناسب تثبیت نماید. دلایل آن به شرح ذیل قابل بیان است: ۱- افزودن ۷٪ آهک به خاک رس مورد مطالعه پس از ۲۸ روز عمل آوری باعث کاهش پلاستیسیته خاک گردیده است که مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط قبادی و همکاران (Ghobadi et al., 2012) و سزار و همکاران (Sezar et al., 2006) می‌باشد.

بحث

هدف از تحقیق حاضر بررسی امکان کاربرد مخلوط آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس جهت کاربرد در خاکریزهای مهندسی می‌باشد. نتایج بدست آمده بیان کننده آن است که ترکیب مناسب ۷٪ آهک هیدراته به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال

۶- همچنین، افزودن ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ به تنهایی به خاک رس و عمل‌آوری آن به مدت ۲۸ روز سبب شده است تا زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده ۱/۲۵ برابر افزایش یابد که با نتایج ارائه شده توسط مدرس و نوسودی (Modarres and Nosudy, 2015) هم راستا می‌باشد.

۷- اختلاط ۷٪ آهک به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ زاویه پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده را ۲/۲۸ برابر افزایش داده و مقدار چسبندگی در نمونه بهسازی شده را ۶۸٪ بالا برده است که این روند در تحقیقات انجام شده توسط شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) و مدرس و نوسودی (Modarres and Nosudy, 2015) نیز ارائه شده است.

۶- نتایج حاصل از آزمون باربری کالیفرنیا (CBR) بیان کننده آن است ترکیب ذکر شده توانایی باربری را در خاک رس تثبیت شده ۶/۴ برابر رشد می‌دهد که بیان کننده آن است که امکان استفاده از خاک تثبیت شده طبق نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه برای ساخت لایه خاکریزی بستر و لایه زیر اساس وجود دارد. این رفتار، در تحقیقات انجام یافته توسط حسین زاده و همکاران (Hoseinzadeh et al., 2021) و سزار و همکاران (Sezar et al., 2006) می‌باشد. نیز مشاهده شده است.

نتیجه‌گیری

همانطور که در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید، خاک های رسی معمولاً بدلیل بروز مشکلات زیاد در رفتارهای مهندسی خاک، مثل تورم و حساسیت به رطوبت، همیشه قابل توجه بوده و مهندسين همواره به فکر بهسازی این نوع از خاک‌ها بوده‌اند. تثبیت خاک روشی برای حفظ ثبات توده خاک و تغییرات شیمیایی برای بهبود خواص مهندسی آن است. در مناطقی که بستر روسازی از خاک‌های ضعیف و مسئله‌دار است، روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی جهت ارتقای کیفیت آن می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. با توجه

۲- ترکیب بهینه ۷٪ آهک هیدراته به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ پس از ۲۸ روز عمل‌آوری شاخص خمیری خاک اصلاح شده را تا ۸۲٪ کاهش می‌دهد که هم راستا با مطالعات انجام یافته توسط مدرس و نوسودی (Modarres and Nosudy, 2015) است.

۳- هنگامی که ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ به خاک رس افزوده می‌شود، پس از ۲۸ روز مدت زمان عمل‌آوری وزن مخصوص خشک حداکثر تقریباً ۴/۶٪ رشد می‌نماید که هم راستا با تحقیقات صورت گرفته توسط شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) است. میزان γ_{dmax} برای ترکیب مناسب ارائه شده، نسبت به حالت تثبیت نشده ۸/۷٪ رشد یافته و مقدار رطوبت بهینه را ۲۴/۵٪ افت داشته است. این فرآیند مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) و مدرس و نوسودی (Modarres and Nosudy, 2015) می‌باشد.

۴- همچنین، با توجه آزمون مقاومت فشاری تک محوری، ترکیب بهینه ۷٪ آهک به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ پس از اتمام ۲۸ روز عمل‌آوری مقاومت فشاری تک محوری را ۱/۹۶ برابر افزایش داده و میزان مدول سکانت را نیز ۱/۲۴ برابر نموده است که شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) نیز مشابه با این روند را در تحقیقات خود مشاهده نموده بود. بنابراین می‌توان بیان کرد ترکیب ارائه شده باعث کاهش وقوع نشست و تغییر شکل در لایه‌های روسازی راه ناشی از وسایل نقلیه می‌گردد و آسیب‌های ناشی از شرایط ذوب و یخبندان را می‌کاهد.

۵- بر اساس نتایج آزمون برش مستقیم مشاهده گردید با مخلوط کردن ۷٪ آهک به رس پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، مقدار چسبندگی ۵۲٪ رشد کرده است. این رفتار مشابه با تحقیقات انجام یافته توسط سزار و همکاران (Sezar et al., 2006) می‌باشد.

آهک هیدراته و خاکستر به خاک رس، به طور قابل توجهی مقاومت فشاری تک محوری و سختی خاک را افزایش می دهد. این امر به دلیل تشکیل ترکیبات سیمانی مانند سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته است که ساختار خاک را تقویت می کند. همچنین، کاربرد همزمان آهک هیدراته و خاکستر ذغال سنگ در خاک رس یک هم افزایی مناسب ارائه نموده و باعث کاهش رطوبت بهینه و افزایش چگالی خاک تثبیت شده گردیده که به معنای بهبود وضعیت مکانیکی و ساختاری خاک است. همچنین باعث بهبود زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی شده و با ایجاد یک رفتار صلب در خاک رس تثبیت شده میزان نشست و تغییر شکل آن را بطور قابل ملاحظه ای کاهش داده و با کاستن میزان جذب آب و نفوذپذیری مانع از وقوع آسیب های ناشی از ذوب و یخبندان در هنگام ساخت لایه های روسازی راه می گردد.

به این که آهک هیدراته بصورت گسترده تولید می شود و پودر ذغال سنگ به عنوان پسماند در معادن ذغال سنگ بصورت فراوان در دسترس است. بنابراین در مطالعه حاضر سعی شده است تا تأثیر آهک هیدراته، خاکستر ذغال سنگ و ترکیب همزمان آن دو در تثبیت خاک رس جهت احداث لایه های روسازی راه مورد ارزیابی قرار بگیرد. خاک رس مورد مطالعه از دامنه کوه عون ابن علی در منطقه شمال غرب شهر تبریز گردآوری شده است. ویژگی های ژئوتکنیکی آن بگونه ای است که در هنگام شرایط جوی ناپایدار (بارندگی، برف و یخبندان) باعث وقوع آسیب های جدی به لایه های روسازی اجرا شده در بدنه راه می گردد که در نتیجه جهت تثبیت آن هزینه های زیاد مصرف می گردد. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر بیان کننده آن است که ترکیب بهینه ۷٪ آهک هیدراته به همراه ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ بعد از عمل آوری ۲۸ روزه می تواند خاک رس را بطور مناسب تثبیت نماید. زیرا افزودن همزمان

References

- Abolhasin Rad, S., Ghasemi, M. (2016). Soil stabilization using coal mine waste with lime. Third International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/537743/>. (In Persian)
- Akinwumi, I., Onyeiwu, M., Epelle, P., & Ajayi, V. (2023). Soil Improvement Using Blends of Coal Ash and Plantain Peel Ash as Road Pavement Layer Materials. Resources, 12(3), 41.
- ASTM D421. (2007). Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. Annual book of ASTM standards.
- ASTM D422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Annual book of ASTM standards.
- ASTM D4318. (1995). Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils. Annual book of ASTM standards.
- ASTM D854. (2002). Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer. Annual book of ASTM standards.
- ASTM C618. (2001). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolana for Use as Mineral Admixture. Annual book of ASTM standards.
- ASTM C305. (2016). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual book of ASTM standards
- ASTM D698. (2000). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). Annual book of ASTM standards.
- ASTM D2166. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. Annual book of ASTM standards.
- ASTM-D 3080. (1998). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated

- drained condition, Annual book of ASTM standards.
- ASTM-D 1883. (2002). Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils, (ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 2002)
- Bavandi Pour, P. (2008). The effect of pozzolan on the uniaxial compressive strength of lime-stabilized clay exposed to sulfate. M.Sc. Thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- Eskandari, A., Hodhodi, M. (2014). Study of the effect of clay stabilization with lime. First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1-9, Tehran, Iran. (In Persian)
- Hauashdh, A., Mohamed, R. M. S. R., Jailani, J., & Abd Rahman, J. (2020). Stabilization of peat soil using fly ash, bottom ash and portland cement: soil improvement and coal ash waste reduction approach. In IOP conference series: Earth and environmental science, 498(1), 012011.
- Hoseinzadeh, Z., Asghari-Kalajahi, E., & Mansouri, H. (2021). Improvement of Fine-Grained Soils of Khorramshahr Arvand free Zone with Lime and Steel Slag for using at Earth Works. Journal of Engineering Geology, 15(2), 207-237. (In Persian)
- Ghobadi, M. H., Mohebbi Hasan Abadi, Y., Abdiler, Y., & Babazadeh, R. (2012). The effect of lime on the improvement of fine-grained soils in the poor area of Hamadan. Applied Geology, 8(3), 265-275. <https://sid.ir/paper/127048/fa>. (In Persian)
- Jamaludin, N., Yunus, N. Z. M., Jusoh, S. N., Mohammed, A. M. A., Haron, Z., Kassim, F., & Ahmad, K. (2018a). A Review on coal ash utilization in soil improvement. Proceedings of 7th International Graduate Conference of Engineering. Science and Humaities, Kualalampour, Malaysia, 225.
- Jamaludin, N., Yunus, N. Z. M., Mohammed, A. M. A., Haron, Z., Marto, A., Mashros, N., & Kadir, M. A. A. (2018b). Comparison between cement and concrete waste on the strength behaviour of marine clay treated with coal ash. In MATEC Web of Conferences, 250, 01003. doi:10.1051/mateconf/201825001003
- Liu, S. T., Cao, W. D., Gao, X. C., Cui, X. Z., & Shang, Q. S. (2009). Experimental study on soil stabilized with firming agent and lime. In Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference, 154-160.
- Modarres, A., & Nosoudy, Y. M. (2015). Clay stabilization using coal waste and lime technical and environmental impacts. Applied clay science, 116, 281-288.
- Muhmed, A., and Wanatowski, D. (2013). Effect of lime stabilisation on the strength and microstructure of clay, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 6(3), 87-94.
- Norouzi, H., Atrchian, M. R. (2012). The effect of adding fly ash on the geotechnical properties of clay-lime mixtures. The Second National Conference on Structures, Earthquakes, and Geotechnics. Babolsar, Mazandaran, Iran. <https://civilica.com/doc/190434>. (In Persian)
- Sharma, N. K., Swain, S. K., & Sahoo, U. C. (2012). Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. Geotechnical and geological engineering, 30, 1197-1205.
- Sezar, A., Inan, G., Yolmaz, H. R., and Ramyar, K. (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. Journal of Building and Environment, 41(2), 150-155.
- Shibi, T., Kamei, T. (2014). Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Strength and Physical Properties of Cement Stabilized Soil Containing Recycled Bassanite and Coal Ash, Cold Regions. Science and Technology, 106-107, 36-45.
- Zarei, Y., Orumiehie, A., & Nikoudel, M. (2013). Studying the effect of adding lime and cement on the strength of soft and saturated clays in Mahshahr Port. Journal of geotechnical Geology, 9(4), <https://sid.ir/paper/489557/fa>. (In Persian)