

Experimental Study of Adding Sugarcane Ash (Bagasse) & Nano-Lime (Calcium Hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$) in Clay Soil Improvement

Ebrahim Toghraee Semiri¹, Mohammad Reza Boroomand^{1*}, Naser Arafati¹

¹Geotechnical Engineering Group, Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 07July2024

Revised: 18January2024

Accepted: 03February 2024

Published online: 29March2026

Keywords:

Unconfined compressive strength test
bagasse
soil improvement
calcium hydroxide

ABSTRACT

Objective: Soils containing a significant amount of clay are considered problematic in civil engineering projects, so it is necessary to improve these soils for the establishment of structures by using soil-optimizing materials.

Material and Methods: In this research, to investigate the effect of nano lime (calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) and bagasse on the resistance characteristics of soils, an unconfined compressive strength test was conducted. To make the samples, the maximum dry weight and optimum moisture content were selected. The desired tests are performed on samples of clay, clay and nanolime mixture, clay and bagasse mixture, clay and lime mixture in 3, 5, and 7 weight percentages of dry soil, and a combination of both nanolime and sugarcane bagasse ash. It was done at specified percentages over 7 and 28 days.

Results and Discussion: The results of the experiments showed that the use of nano-lime and sugarcane bagasse ash and lime for soil stabilization increases soil resistance. In the unconfined compressive strength test, the samples stabilized with nanolime showed a greater increase in strength than those stabilized with lime, and the most significant increase occurred with the 5% additive in the 7-day curing period.

Conclusion: In the combined use of nanolime and sugarcane bagasse ash, compared to nanolime, the obtained resistance has decreased.

* Corresponding author, E-mail: boroomand@tafreshu.ac.ir

Cite this article: Toghraee Semiri, E., Boroomand, M. R., and Arafati, N. (2026). Experimental Study of Adding Sugarcane Ash (Bagasse) & Nano-Lime (Calcium Hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$) in Clay Soil Improvement, *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.466717.1094>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.466717.1094>

Publisher: Gonbad Kavous University.



بررسی آزمایشگاهی افزودن خاکستر تفالہ نیشکر و نانواهک برای بهسازی و تثبیت خاک‌های رسی

ابراهیم طغرای سمیری^۱، محمدرضا برومند^{۱*}، ناصر عرفاتی^۱

^۱ گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: خاک‌های حاوی مقدار قابل توجه رس، از نگاه مهندسی عمران از دسته خاک‌های مشکل آفرین در پروژه‌ها محسوب می‌شوند لذا بهسازی این نوع خاک‌ها برای استقرار سازه با به‌کارگیری مواد بهسازکننده خاک الزامی است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹	مواد و روش‌ها: در این تحقیق به منظور بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانو آهک - هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ - و خاکستر تفالہ نیشکر (باگاس) بر ویژگی‌های مقاومتی خاک‌ها، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده انجام شد. برای ساختن نمونه‌ها جرم ویژه خشک بیشینه و رطوبت بهینه انتخاب گردید. آزمایش‌های مورد نظر بر روی نمونه‌هایی از رس، مخلوط رس و نانواهک، مخلوط خاک رس و باگاس، مخلوط رس و آهک در درصدهای وزنی ۳، ۵ و ۷ وزن خاک خشک و ترکیبی از هر دو ماده نانو آهک و خاکستر تفالہ نیشکر در درصدهای مشخص شده و در دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه انجام شد.
کلیدواژه‌ها: آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده باگاس بهسازی خاک هیدروکسید کلسیم	نتایج و بحث: نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از نانو آهک و خاکستر تفالہ نیشکر و آهک برای تثبیت خاک، سبب افزایش مقاومت خاک می‌شود. در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیت شده با نانواهک در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک افزایش مقاومت بیشتری داشتند و بیشترین مقدار افزایش مربوط به نمونه ۵ درصد افزودنی در دوره عمل‌آوری ۷ روزه است. نتیجه‌گیری: در استفاده ترکیبی از نانواهک و خاکستر تفالہ نیشکر در مقایسه با نانو آهک، مقاومت به‌دست آمده کاهش داشته است.

* نویسنده مسئول، Email: Boroomand@tafreshu.ac.ir

استناد: طغرای سمیری، ابراهیم؛ برومند، محمدرضا و عرفاتی، ناصر (۱۴۰۵). بررسی آزمایشگاهی افزودن خاکستر تفالہ نیشکر و نانواهک برای بهسازی و تثبیت خاک‌های رسی. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.466717.1094>



مقدمه

بهسازی خاک، در تمامی مسائل مهندسی خاک و به خصوص در شرایط ضعیف بودن آن مطرح است. این عمل به منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک برای دستیابی به اهداف مختلف انجام می شود. انتخاب روش بهسازی خاک به صورت طبقه بندی شده امر مشکلی است. روش های بهسازی متعددی از جمله استفاده از پی عمیق، برداشت خاک ضعیف و جایگزینی با مصالح پرکننده مهندسی و بهسازی خواص خاک در محل وجود دارد. انتخاب روش های بهسازی بستگی به عوامل متعددی از جمله نوع خاک، درصد ریزدانه (مقدار رس و لای)، مساحت و عمق بهسازی، مقاومت و تراکم پذیری خاک مورد نظر، ضوابط نشست، دسترسی به مهارت های فنی، نوع تجهیزات، مصالح و هزینه بهسازی دارد (قیاسی و والی راستی، ۱۳۹۸). اهداف متفاوتی برای بهسازی خاک وجود دارند. از جمله تحقیق Makusa در سال ۲۰۱۳ به افزایش ظرفیت باربری، افزایش پایداری شیب و کاهش نشست پی برای خاک های ریزدانه و درشت دانه اشاره نمود. مکانیسم های مرتبط با بهسازی خواص خاک های رسی شامل تحکیم خاک رس با انجام پیش بارگذاری، اجرای ستون های سیمان - خاک یا آهک - خاک و یا هر دو مصالح است.

از روش های نوین بهسازی و تثبیت خاک های ریزدانه استفاده از مواد افزودنی است که در سال های اخیر محققان کشورهای مختلف به عنوان یک راه حل جدید سازگار با محیط زیست به آن رو آورده اند که کماکان ابعاد مختلف آن ها در دست بررسی در اقصی نقاط دنیا است. آهک از اقتصادی ترین تثبیت کننده های خاک است و واکنش تثبیت به واسطه تبادل یونی در خاک (جایگزینی یون کلسیم با یون سدیم تورمزا) صورت می گیرد. با کاهش خواص خمیری خاک بیشترین کاربرد را در خاک های با دامنه خمیری بالا داشته و از دیرباز در راهسازی استفاده شده است (اسالنی کتولی و دیگران، ۱۳۹۴). تثبیت با آهک منجر به افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش رطوبت خاک های آلوده مرطوب و پایدارسازی شیب ها و خواص خاک مورد نیاز برای فونداسیون ها می شود (بدو و دوزلی، ۱۳۹۴). مطالعات نشان داده است که بهسازی شیمیایی خاک باعث بهبود مشخصات مکانیکی خاک مانند دوام، سختی و مقاومت خاک شده و بهسازی خاک با سرعت بیشتری صورت می گیرد.

افزودن آهک به خاک، باعث کاهش خواص خمیری و پتانسیل تورم، افزایش مقاومت، بهبود کارایی و افزایش دوام می شود. افزودن آهک به مصالح دانه ای نیز باعث افزایش مقاومت و سختی می گردد. اثرات تثبیت با آهک بر خواص خاک را می توان به دو بخش آبی و درازمدت تقسیم کرد. در اثر افزایش آهک به خاک و انجام واکنش های آبی، خاک به سرعت تغییر حالت داده و نشانه خمیری آن کاهش و درصد رطوبت بهینه آن افزایش می یابد. تکنولوژی پایدارسازی خاک با آهک به طور گسترده در کاربردهای ژئوتکنیکی و زیست محیطی از قبیل جذب آب خاک های آلوده مرطوب، درزبندی بزرگراهها، پایدارسازی شیبها و اصلاح خاک فونداسیون ساختمان مورد استفاده قرار می گیرد. اگرچه باید به این نکته دقت کرد که وجود سولفور و مواد معدنی به علت واکنش با آهک و ایجاد تورم و در نتیجه کاهش مقاومت خاک، باعث محدودیت استفاده از فرآیند تثبیت آهکی در تمامی خاک ها می شود (نجف کانی و مهدیزاده، ۱۳۹۳).

نانومواد نیز از نوآوری های جدیدی هستند که ایده های بسیار زیادی در کاربرد آن ها در زمینه های مختلف مهندسی از جمله مهندسی ژئوتکنیک و بالاخص مبحث بهسازی زمین مطرح شده است. در سال های اخیر استفاده از نانو ذرات توسعه یافته و تحقیقات محدودی در زمینه استفاده از نانو مواد در مهندسی ژئوتکنیک انجام شده است (جلیلیان مشهود، کوهستانی و ناقدی نیا، ۱۳۹۴).

نانوذرات به علت اندازه کوچکشان خواص سطحی گسترده ای را به نمایش می گذارند و از این رو به طور فعالی با دیگر اجزای خاک واکنش می دهند. با توجه به بالا بودن مساحت سطح ویژه و بارهای سطحی، حتی وجود مقادیر خیلی کم از این نانو ذرات می تواند به تاثیرات فوق العاده ای بر روی خواص شیمیایی، فیزیکی و مهندسی خاک منجر شود. نانو ذرات، قدرت، نفوذپذیری، شاخص ها و خواص مقاومتی خاک را تحت تاثیر قرار می دهند (Kadivar, Barkhordari & Kadivar, ۲۰۱۱). خاک های حاوی نانو ذرات با منافذ بین ذره ای در مقیاس نانو به طور معمول حد روانی و حد خمیری بالاتری را به نمایش می گذارند. عموماً هرچه اندازه ذرات به مقیاس نانو نزدیکتر شوند در مقایسه با ذرات هم نوعشان از اندازه های بزرگتر خواص کاملاً متفاوت و شدیدتری از خود نشان می دهند (حسنی، ۱۳۹۴).

اکثر خاک‌ها، دارای ترکیبات سیلیکا و آلومین سیلیکا هستند، افزایش مقداری آهک زنده (CaO) یا آهک شکفته (Ca(OH)_2) و آب، برای به‌وجودآوردن یک ترکیب پایدار، بسیار موثر است. تجربه نشان داده است که انواع خاک رس با آهک زنده و یا شکفته ترکیبی تولید می‌کنند که خواص آن‌ها مانند خواص ترکیبات سیمانی است. چنانچه از آهک و نانواهک برای تثبیت خاک رس استفاده شود، دامنه خمیری کاهش و حد خمیری افزایش می‌یابد (جلیلیان مشهود، کوهستانی و ناقدی‌نیا، ۱۳۹۴). در این راستا محققان بسیاری به تحقیق در این زمینه پرداختند. Boroomand و Mohammadi در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی اثر یک ماده بازیافتی از جنس گچ بر بهبود پارامترهای مقاومتی خاک پرداختند. آنها دریافتند که با افزودن باسانیت (همراه با سیمان و آهک)، مقاومت فشاری محصورنشده خاک‌های تثبیت‌شده به‌طور قابل توجهی از ۳۷ کیلو پاسکال به ۶۰۳ کیلو پاسکال افزایش یافت. ایشان در تحقیق دیگری به بررسی تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک و ظرفیت باربری پرداختند (Mohammadi, Ebadi, Boroomand, 2019).

تثبیت‌کننده‌های سنتی، واکنش‌های پوزولانی و تبادل کاتیونی، مکانیسم اصلی تثبیت برای بسیاری از تثبیت‌کننده‌های جانبی هستند. وابستگی بیش‌از‌حد به مواد افزودنی تولیدشده صنعتی (سیمان، آهک و...) هزینه ساخت‌وساز راه‌های تثبیت‌شده را بالا نگه داشته است. این امر تا کنون در کشورهای توسعه نیافته و فقیر جهان باعث جلوگیری از ارائه جاده‌های در دسترس به‌منظور پاسخگویی به نیاز ساکنان روستایی شده است. در عوض استفاده از مواد جایگزین، به‌طور قابل توجهی هزینه ساخت و ساز را کاهش خواهد داد و خطرات زیست‌محیطی ناشی از چنین زباله‌هایی را نیز کاهش داده یا محو می‌کند. خاکستر ضایعات کشاورزی مانند خاکستر پوسته برنج و خاکستر باگاس در بسیاری از کشورها به‌عنوان یک محصول جانبی تولید می‌شوند. حدود ۱۵۰۰ میلیون تن نیشکر در سراسر جهان به‌طور سالیانه تولید می‌شود که از آن حدود ۱۰ میلیون تن خاکستر باگاس به‌عنوان مواد پوزولانی می‌تواند استخراج شود (رضایی سوفي، ۱۳۹۴). باگاس نام تفاله فیبری است که پس از خردشدن ساقه‌های نیشکر به‌منظور استخراج شیره باقی می‌ماند. غالباً از باگاس به‌عنوان یک منبع سوخت در کارخانه‌های شکرسازی استفاده می‌شود. محصول سوزاندن این زباله کشاورزی خاکستر باگاس است. خاکستر باگاس یک محصول زائد است که دورریزی آن در کارخانه‌های شکر سازی مشکل‌ساز است و نیازمند روش‌های فوری برای حل این مشکل است. این ماده با هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)_2) که محصول هیدراته شدن اکسید کلسیم (CaO) است واکنش می‌دهد و در ماتریس خاک ترکیبات سیمانی ایجاد می‌کند که در نتیجه باعث بهبود خصوصیات فیزیکی و مقاومتی خاک می‌شود.

نتایج حاصل از پژوهش عبدالمجید کریمی و همکاران در سال ۱۳۹۷ نشان می‌دهد که استفاده از خاکستر تفاله نیشکر به‌منظور بهبود خواص خاک‌های دچار کمبود و مینیمم ساختن هزینه‌ی تثبیت و ساخت‌وساز موثر است. به‌طورکلی افزودن خاکستر تفاله نیشکر و آهک باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌شود. زمان عمل‌آوری نقش مثبتی در افزایش مقاومت فشاری خاک رسی تثبیت شده با مخلوط آهک-خاکستر تفاله نیشکر دارد. افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز باعث افزایش فعالیت‌های پوزولانی خاکستر تفاله نیشکر در ترکیب با آهک می‌گردد، اما در نمونه‌های که تنها دارای خاکستر تفاله نیشکر هستند، زمان عمل‌آوری تأثیر محسوسی بر افزایش مقاومت فشاری خاک ندارد (کریمی، عباسی و سیاوش-نیا، ۱۳۹۷).

بررسی‌های Dang و همکاران در بکارگیری خاکستر باگاس در سال ۲۰۱۶ به نتایج کلیدی زیر اشاره دارد:

- انقباض خطی خاک‌های انبساطی به‌طور قابل توجهی با تغییر محتویات افزودنی و افزایش زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد. مخلوط افزودنی‌های آهک هیدراته و فیبرهای باگاس بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به استفاده تنها از الیاف باگاس در بهبود خاک‌های انبساطی دارند.

- مقادیر UCS خاک‌های انبساطی تحت تأثیر افزایش فیبرهای باگاس و آهک هیدراته به‌همراه طول دوره عمل‌آوری افزایش می‌یابد. افزایش قدرت ترکیبات ترکیبی هیدراته آهک-فیبر باگاس قطعاً بالاتر از الیاف باگاس است که به‌تنهایی استفاده می‌شود. یافته‌های این تحقیقات تجربی نشان می‌دهد ترکیبی از الیاف هیدراته آهک-باگاس باعث افزایش قدرت و کاهش انقباض خطی پایین‌تر از الیاف باگاس به‌تنهایی می‌شود. شایان ذکر است که استفاده از ترکیبی فیبر باگاس آهک هیدراته در خاک‌های انبساطی، بدون شک، مانع از اثر گذاشتن زباله‌های صنعتی در محیط زیست با تولید فیبر باگاس می‌شود.

برطبق مطالعاتی که در تائو منگ در کشور چین صورت گرفته، تاثیر افزودن ترکیب نانو کربنات کلسیم بر افزایش مقاومت و خاک تثبیت شده با سیمان در شرایط محیطی دریایی مطالعه شده است (Meng et al., 2017). نتایج به دست آمده نشان داد افزودن نانوآهک به خاک تثبیت شده با سیمان باعث افزایش قابل توجه مقاومت اولیه خاک در هر دو محیط دریایی و شرایط عمل آوری استاندارد می گردد. به طوری که مقاومت فشاری ۳۰ روزه نمونه های با ۱۵ درصد و ۲۲ درصد سیمان در محیط دریایی به ترتیب ۱۴/۲ و ۷/۸ درصد افزایش داشته، در حالی که نمونه هایی که به صورت عادی عمل آوری شده اند، به ترتیب ۵/۸ و ۱۷/۸ درصد افزایش مقاومت نشان داده اند. دلیل اصلی بهبود مقاومت فشاری این بود که ترکیب نانو کربنات کلسیم باعث ارتقاع عمل هیدراتاسیون سیمان می شود و این عمل باعث کاهش اثر بازدارنده محیط دریایی بر هیدراتاسیون سیمان می شود. از نظر ریزساختاری، هسته سازی و افزودنی نانو پرکننده در فشرده سازی بیشتر خاک و کاهش سرعت خوردگی در طولانی مدت مفید بوده است. Khan در سال ۲۰۱۹ به بررسی تثبیت از دو نوع خاک رس متورم یعنی خاک رس کم پلاستیک و خاک رس با پلاستیک بالا با استفاده از گچ و باگاس پرداخت. نتایج تحقیق وی نشان داد که ترکیب گچ و باگاس می تواند روشی مؤثر و اقتصادی برای اصلاح رس های پلاستیکی کم و زیاد باشد. بختیاری، حیدری و ظهیری در سال ۱۴۰۲ به بررسی بهبود مشخصات مکانیکی خاک کانال های انتقال شبکه دشت آزادگان بر اساس کانی شناسی خاک پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که تغییرات حد خمیری برای کلیه نمونه های مربوط نشان می دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ آهک برابر ۷/۶۵ افزایش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سیمان برابر ۱۱۳/۷۴ افزایش می باشد تغییرات زاویه اصطحاک داخلی برای کلیه نمونه ها نشان می دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ آهک، ۵٪ سرباره برابر ۲۲/۲ درصد و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ سیمان برابر ۶/۱۴٪ افزایش می باشد عابدی کویایی، پورعبدالله و انصاری در سال ۱۴۰۲ به برآورد پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک در مدل های مختلف در خاک های سبک پرداختند. ایشان دریافتند که مدل های ون گنوختن - معلم، ون گنوختن، گاردنر و براتسارت به ترتیب بیشترین و مدل بروکس - کوری کمترین دقت را در تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک دارند. Adnan و همکاران در سال ۲۰۲۳ مروری بر تلاش های تحقیقاتی متعدد انجام شده در زمینه تثبیت خاک، با استفاده از آهک و باگاس به عنوان مواد افزودنی در نسبت های مختلف ارائه می کند. یافته های مطالعات ایشان نشان می دهد که SBA نه تنها عملکرد خاک تثبیت شده را بهبود می بخشد، بلکه هزینه کلی مواد را در بیشتر موارد کاهش می دهد. قنبری، برومند و صبا در سال ۲۰۲۴ به بررسی آزمایشگاهی رفتار جذب رطوبت GCL از خاک زیرین آلوده به شیرابه پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که در حضور شیرابه مقدار رطوبت جذب شده توسط GCL در بازه زمانی مورد آزمایش کمتر از مقدار مورد انتظار بوده است. Ahmed و همکاران در سال ۲۰۲۴ به مطالعه استفاده از خاکستر باگاس نیشکر و آهک به عنوان تثبیت کننده های شیمیایی برای زیرپایه خاک رسی در راهسازی پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که با استفاده از افزودنی های مذکور، هزینه روسازی کاهش می یابد، عمر طراحی را افزایش می دهد و مسائل مربوط به مصرف انرژی و آلودگی مربوط به SBA را به عنوان یک ماده زیاله جامد کاهش می دهد.

سیلیکای موجود در خاکستری که با روش سوختن کنترل شده، از بقایای کشاورزی، با دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی پایه برای مدت یک ساعت تولید می شود، به فاز بی شکل تبدیل می شود. واکنش سیلیکای بی شکل مستقیماً با سطح مخصوص نیشکر تناسب دارد (AAtefi Fard et al., 2011).

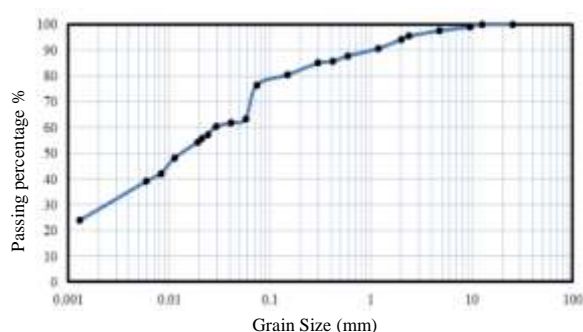
باتوجه به اینکه در گذشته بر روی نانو کربنات کلسیم (CaCO_3) توسط محققان بررسی هایی صورت گرفته است، در این تحقیق از نانوآهک (هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2) استفاده شد که در اینجا هیدروکسید کلسیم جنبه نوآوری را به خود می گیرد. همچنین اگر از ضایعات کشاورزی استفاده نشود، باید آنها را دور ریخت، که دارای پیامدهای زیست محیطی گسترده ای است. محصولات جانبی صنعتی باعث بازیافت مواد و کاهش مصرف منابع طبیعی می شود. استفاده از چنین محصولات جانبی نیاز به تثبیت کننده های سنتی مانند سیمان پرتلند را کاهش می دهد که این امر اهمیت انجام چنین مطالعه ای را نشان می دهد. ضمن اینکه این تحقیق برای منطقه تفرش بومی شده و اثر افزودنی های مورد استفاده بر خاک منطقه تفرش ارزیابی گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از ترکیب مواد افزودنی آهک، نانو آهک و خاکستر تفراله نیشکر بر خاک ریزدانه منطقه نفرش و انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده به ارزیابی اثر مواد افزودنی و همچنین تاثیر میزان عمل‌آوری بر پارامترهای مقاومتی خاک مورد آزمایش خواهیم پرداخت. برای ساختن نمونه‌ها جرم ویژه خشک بیشینه و رطوبت بهینه استفاده گردید. آزمایش‌های مورد نظر بر روی نمونه‌هایی از رس، مخلوط رس و نانوآهک، مخلوط خاک رس و باگاس، مخلوط رس و آهک در درصدهای وزنی ۳، ۵ و ۷ وزن خاک خشک و ترکیبی از هر دو ماده نانو آهک و خاکستر تفراله نیشکر در درصدهای مشخص شده و در دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه انجام شد که در ادامه مواد مورد استفاده، نحوه ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های صورت‌گرفته به تفصیل شرح داده خواهد شد.

۱-۲- خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق در تمامی آزمایش‌های خاک ریزدانه منطقه سرکوره نفرش است. دانه‌بندی ذرات بزرگتر از الک شماره ۲۰۰ طبق استاندارد ASTM D422-87 انجام شد. برای ذرات عبور کرده از الک شماره ۲۰۰ از روش هیدرومتری طبق استاندارد شماره ASTM D421-58 استفاده شد. نمودار دانه‌بندی خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. این خاک با ۷۸ درصد عبوری از الک ۲۰۰ در گروه خاک رس لای‌دار با دامنه خمیری کم (CL-ML) طبقه‌بندی می‌گردد.



شکل ۱- نمودار دانه بندی خاک

۲-۲- آهک (آهک هیدراته Ca(OH)_2)

پودر آهک هیدراته Ca(OH)_2 استفاده شده محصول کارخانه آذرشهر است و مشخصات فیزیکی و شیمیایی اجزای تشکیل‌دهنده آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی آهک مورد استفاد

$92\% < \text{Ca(OH)}_2 < 94\%$	$\text{P}_2\text{O}_5 < 0.02\%$
$69.7\% < \text{CaO}$ (Available) $< 71.2\%$	$\text{MnO} < 0.02\%$
$3\% < \text{CaCO}_3 < 5\%$	$\text{Na}_2 < 0.1\%$
$\text{CaO (Free)} < 1.5\%$	$\text{K}_2\text{O} < 0.1\%$
$\text{MgO} < 0.5\%$	$\text{SO}_3 = \text{Trace}$
$\text{SiO}_2 < 0.3\%$	$19\% < \text{L.O.I} < 25\%$
$\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.2\%$	$\text{Moisture} < 0.1\%$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.15\%$	

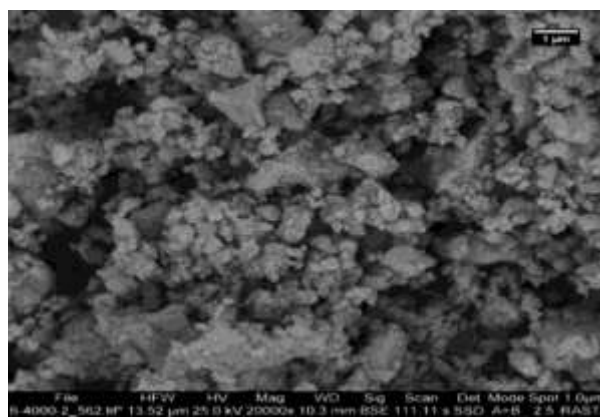
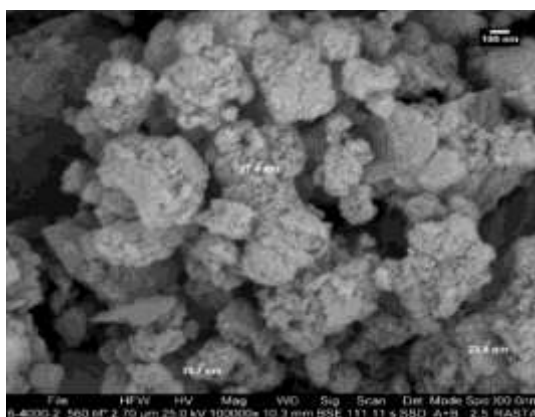
جدول ۱- مشخصات فیزیکی آهک مورد استفاد

Name	Calcium Hydroxide, Hydrated Lime
Linear Formula	Ca(OH)_2
Molecular Weight	74.09 g/mol
Form	Powder
Specific Gravity	(2.2-2.4)
Density	(400-450) kg/m^3
PH	(11.7 - 122) at 20°C , saturated solution
Solubility in Water	0.173/100 cm^3 sat.soln

۳-۲- نانوآهک (Nano-Ca(OH)_2)

با توجه هزینه‌های بالای تهیه نانو مواد وارداتی، نانو آهک مورد استفاده در طرح با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای پره‌ای توسط مرکز صنعتی‌سازی نانوفناوری آیکن در استان تهران تهیه شد. نتایج آزمایش‌های SEM و X-Ray نشان داد که ترکیب شیمیایی نانوذرات حاصل از روش آسیاب گلوله‌ای پره‌ای مشابه ترکیب شیمیایی پودر اصلی بوده است. به این ترتیب در حدود ۸۰٪ صرفه‌جویی در هزینه مواد افزودنی صورت می‌پذیرد.

به منظور تعیین قطر ذرات نانو، از روش بررسی تصاویر آزمایش SEM توسط نرم‌افزار ایمیج جی استفاده شد. تعداد دفعات تکرار هر ذره و درصد مواد ذرات با قطرهای متفاوت نشان داد که حدود ۹۶ درصد ذرات زیر ۹۹ نانومتر و میانگین قطر ذرات به دست آمده حدود ۲۳ نانومتر است. تصاویر آزمایش SEM از این نانو آهک در شکل ۲ و شکل ظاهری نانو آهک در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویر گرفته شده از نانو آهک با آزمایش SEM



شکل ۳- شکل ظاهری نانو آهک استفاده شده

۲-۴- خاکستر تفاله نیشکر (باگاس)

در این طرح از خاکستر تفاله نیشکر سوزانده و عبور داده شده از الک نمره ۱۰۰ مش کارخانه کشت و صنعت کارون استان خوزستان استفاده شده است.

بر اساس نتایج جدول ۳، میزان SiO_2 خاکستر باگاس نیشکر نزدیک به ۵۳ درصد است که این مقدار به میزان درجه حرارت خاکستر باگاس در هنگام سوزاندن و نوع نیشکر مورد استفاده بستگی دارد. در تحقیق حاضر خاکستر باگاس پس از خشک شدن در هوای آزاد، جمع‌آوری و در هوای آزاد سوزانده شده است؛ بنابراین با ایجاد شرایط ویژه برای سوزاندن خاکستر باگاس می‌توان درصد SiO_2 در خاکستر باگاس را افزایش داد (کریمی، عباسی و سیاوش نیا، ۱۳۹۷).

جدول ۳- ترکیبات شیمیایی خاکستر تفالنه نیشکر (باگاس) مورد استفاده

Composition	Weight percent
SiO ₂	53.27
Al ₂ O ₃	5.63
Fe ₂ O ₃	4.96
CaO	3.85
MgO	3.25
K ₂ O	5.3
LOI ¹	13.8
Other compounds	9.74

۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

در این تحقیق از دستگاه مقاومت فشاری محدود نشده نوع آنالوگ ساخت شرکت بنیان صنعت آزمون استفاده گردید. دستگاه مذکور قابلیت اعمال بار تا ۵ کیلو نیوتون را دارد و برای نمونه‌ای که نیروی بیشتری تحمل می‌کند، از حلقه نیروی محکم‌تر استفاده گردید. سرعت بارگذاری نمونه ۱ میلی‌متر به دقیقه بود که در حد استاندارد ASTM است که باید مقدار تغییر شکلی بین ۰/۵ تا ۲ درصد در دقیقه باشد.

در ساخت نمونه برای آزمایش فشاری محصور نشده باید به چند نکته اشاره کرد از جمله اینکه حداقل قطر نمونه در استاندارد ASTM D2166-87، ۳۳ میلی‌متر و حداکثر قطر بزرگ‌ترین دانه یک‌دهم قطر نمونه برای نمونه‌های با قطر ۷۱ میلی‌متر یا بزرگ‌تر باشد. همچنین حداکثر قطر بزرگ‌ترین دانه باید کمتر از یک ششم قطر نمونه و نسبت طول به قطر نمونه باید بین ۲ تا ۳ باشد. از اینرو نمونه‌های تک‌محوری که در این تحقیق آماده شده‌اند، دارای قطر ۳/۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۷/۲ سانتی‌متر هستند. همچنین خاک مورد آزمایش از الک شماره ۶ عبور داده شد.

۲-۶- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های آزمایش فشاری تک‌محوری، از مواد با درصدهای مشخص و درصد رطوبت بهینه به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم استاندارد استفاده می‌شود. پس از به‌دست‌آوردن حداکثر وزن مخصوص خشک و همچنین رطوبت بهینه از آزمایش‌های تراکم استاندارد برای هر مخلوط، مقادیر مورد نیاز از خاک، نانو آهک و خاکستر تفالنه نیشکر با در نظر گرفتن رطوبت بهینه و حجم قالب و حداکثر وزن مخصوص خشک، توزین می‌گردید.

به‌منظور محاسبه مقادیر مورد نیاز خاک، نانو آهک و خاکستر تفالنه نیشکر ابتدا حداکثر وزن مخصوص خشک، حجم قالب و درصد رطوبت بهینه هر نمونه، محاسبه شد و با استفاده از رابطه ۱ وزن کل هر نمونه (W) محاسبه گردید.

$$d = \gamma \frac{W_t}{V_t} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه:

W: وزن کل نمونه؛

γ : حداکثر وزن مخصوص خشک؛

V: حجم کل نمونه که برابر حجم قالب استاندارد مقاومت فشاری محدود نشده است.

سپس مواد با همدیگر مخلوط می‌شدند تا رنگ مخلوط کاملاً یکنواخت گردد؛ سپس آب مورد نیاز به آن اضافه و در ۳ لایه درون قالب کوبیده می‌شدند. بعد از کوبیدن مخلوط، نمونه از قالب در آورده شده و برای جلوگیری از ازدست‌دادن رطوبت، داخل زیپ کیف قرار داده و در دما و رطوبت ثابت آزمایشگاه در دوره‌های نگهداری ۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شدند. برای اطمینان از نتایج

¹. The loss of ignition

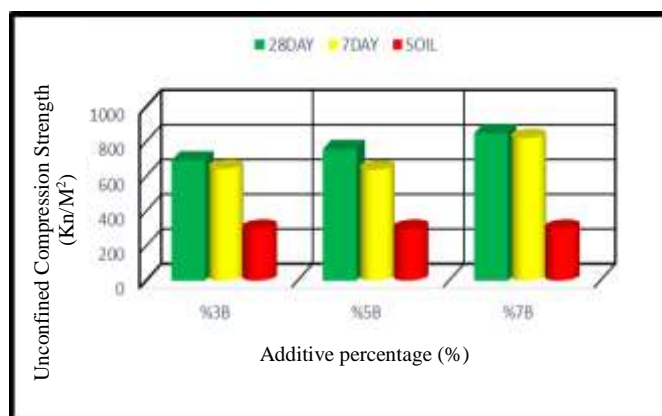
آزمایش‌ها، از هر حالت سه نمونه ساخته شد. در این مقاله میانگین نتایج سه نمونه ارائه گردیده است. نمونه‌ها پس از دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، تحت آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده قرار گرفتند و نمودار تنش- کرنش مربوط به هر نمونه ترسیم گردید. در شکل ۴ نحوه شکستن نمونه نشان داده شده است.



شکل ۴- نحوه شکستن نمونه‌های مقاومت فشاری محدودنشده

۳- نتایج و بحث

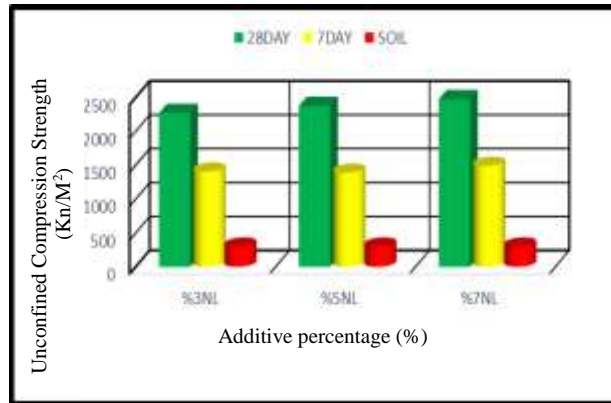
برای خاک فاقد افزودنی حداکثر مقاومت فشاری محدودنشده خاک فاقد افزودنی ۲۹۸ کیلونیوتن بر متر مربع به دست آمد. تاثیر زمان عمل‌آوری بر تغییرات مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌های دارای خاکستر تفال نیشکر، در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان مقاومت پس از زمان عمل‌آوری ۷ روزه، در اثر وقوع واکنش‌های پوزولانی افزایش چشمگیری نسبت به زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان نداده و و اندکی افزایش پیدا کرده است.



شکل ۵- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری حداکثر در درصد‌های مختلف خاکستر تفال نیشکر

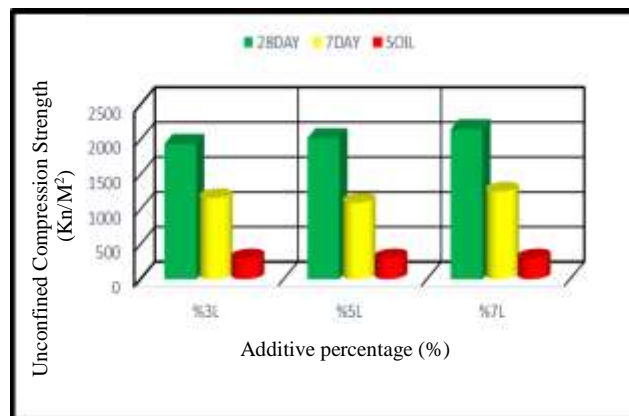
تاثیر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف نانو آهک، در شکل ۶ نشان داده شده است. اکثر مقاومت کسب‌شده در نمونه‌های رسی تثبیت‌شده با نانوآهک ناشی از ایجاد و گسترش پیوندهای بین ذره‌ای ناشی از واکنش پوزولانی است که تابعی از میزان آهک، سیلیکا و آلومینای موجود در ترکیب و زمان عمل‌آوری است. واکنش‌های پوزولانی باعث تغییر در

بافت کریستالی خاک رس می‌شود و در نتیجه تغییرات عمده‌ای در خواص فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک به وجود می‌آورد. این واکنش در طول زمان انجام می‌شود، بنابراین مقاومت با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد (حسینی، ۲۰۱۰).



شکل ۶- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری حداکثر در درصد‌های مختلف نانوآهک

در نمونه‌ها تثبیت‌شده با آهک پس از دوره عمل‌آوری ۷ روز، با افزایش ۳ درصد آهک به ۴ برابر مقاومت خاک بدون افزودنی رسیده است و بار افزایش آهک به ۵ و ۷ درصد، ابتدا مقاومت خاک نسبت به نمونه ۳ درصد آهک کاهش و مجدداً افزایش یافته است. این در حالی است که با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز، تغییر زیادی نسبت به نمونه‌های ۷ روز داشته و روندی افزایشی را شاهد بودیم و بیشترین مقدار افزایش مقاومت نیز مربوط به نمونه با ۷ درصد آهک بود است.



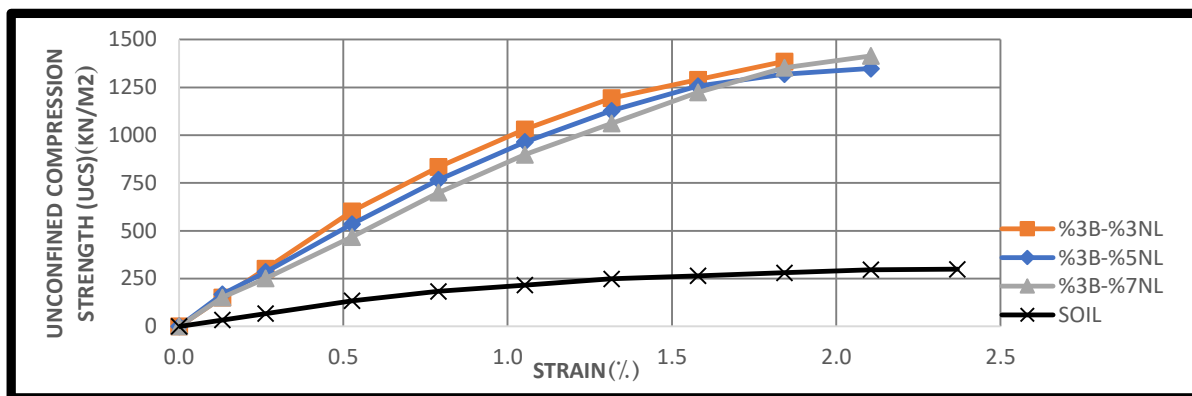
شکل ۷- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری حداکثر در درصد‌های مختلف آهک

در جدول ۴ نیز مقدار بهبود مقاومت خاک تثبیت‌شده با نانوآهک نسبت به آهک آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ روزه بیشترین نسبت بهبود را داشته و نمونه با ۵ درصد افزودنی با ۱/۲۷ برابر بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده عمل‌آوری بهتر نانوآهک در زمان کمتر است

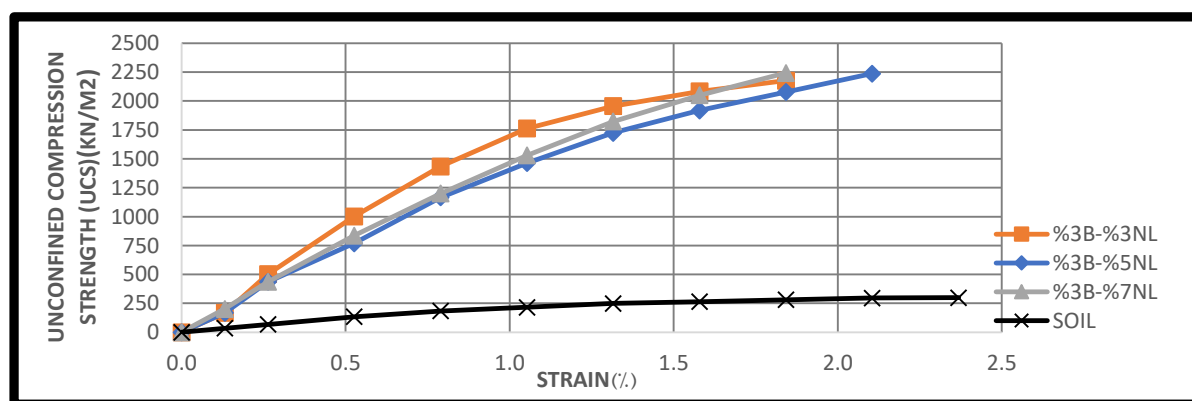
جدول ۴- بررسی نسبت بهبود مقاومت خاک تثبیت‌شده با نانوآهک نسبت به آهک

28days curing	7days curing	Additional percentage
1.17	1.21	3%
1.174	1.27	5%
1.15	1.18	7%

در شکل های ۸ الی ۱۰ نمودار تنش- کرنش ترکیب خاک با ۳، ۵ و ۷ درصد خاکستر تفاله نیشکر و درصدهای مختلف نانواهک در دو دوره عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل های ۸، ۹ و ۱۰ با افزایش نانو آهک به خاک تثبیت شده با خاکستر تفاله نیشکر، مقاومت خاک افزایش می‌یابد. این افزایش پس از دوره عمل آوری ۲۸ روزه به دلیل واکنش های پوزولانی مشاهده می‌شود که تقریباً ۱/۵ برابر مقاومت ۷ روزه است. همچنین کاهش کرنش پس از دوره عمل آوری ۲۸ روزه در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود. شکل ۸ نمودار تنش-کرنش ترکیب خاک با ۷ درصد نانو آهک و ۳ درصد خاکستر تفاله نیشکر، در دوره عمل آوری ۲۸ روزه را نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت را نسبت به دیگر ترکیبات از خود به جا گذاشته است. بیشترین کرنش به دست آمده حدود ۰/۲۶ درصد کمتر از کرنش خاک است.

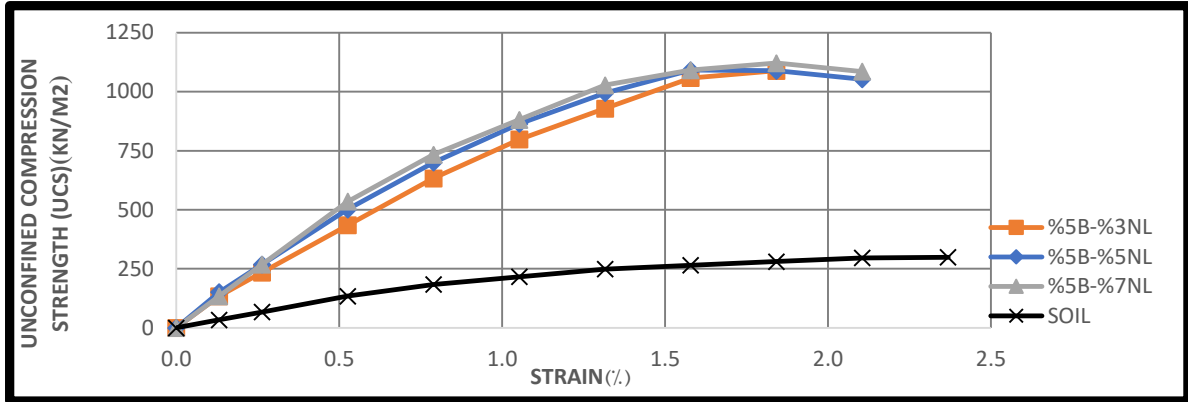


الف) ۷ روزه

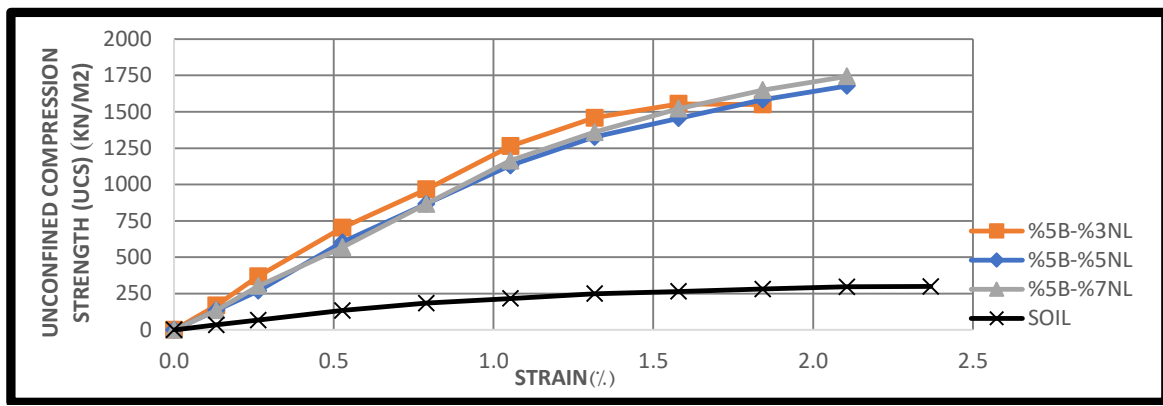


ب) ۲۸ روزه

شکل ۸- نمودار تنش-کرنش خاک با ۳، ۵ و ۷ درصد نانوآهک و ۳ درصد خاکستر تفاله نیشکر پس از دوره عمل آوری الف) ۷ روزه ب) ۲۸ روزه

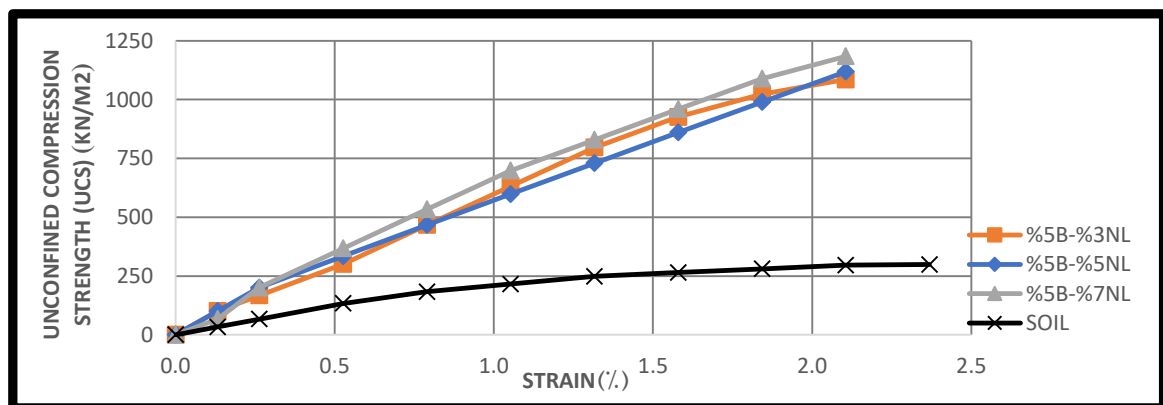


الف) ۷ روزه

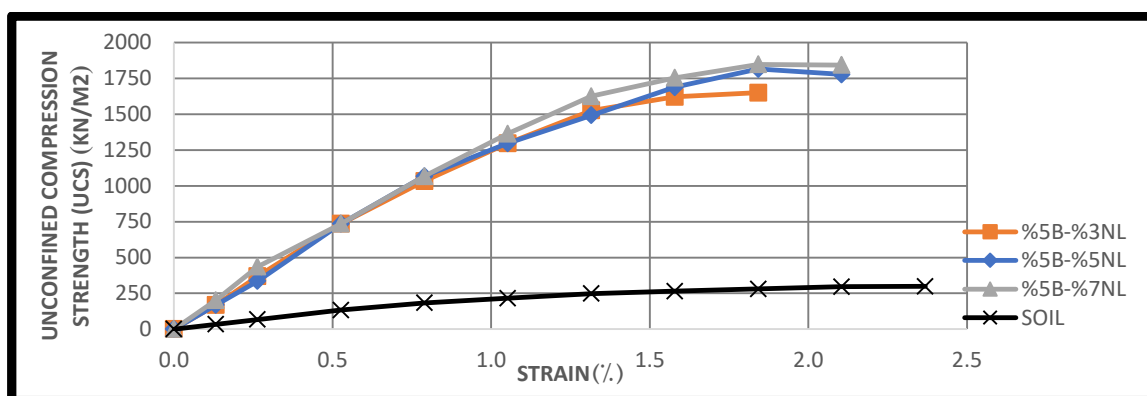


ب) ۲۸ روزه

شکل ۹- نمودار تنش- کرنش خاک با ۳، ۵ و ۷ درصد نانو آهک و ۵ درصد خاکستر تفراله نیشکر پس از دوره عمل آوری الف) ۷ روزه ب) ۲۸ روزه



الف) ۷ روزه



(ب) ۲۸ روزه

شکل ۱۰- نمودار تنش- کرنش خاک با درصد‌های (۳، ۵ و ۷) درصد نانوآهک و ۷ درصد خاکستر تفال نیشکر پس از دوره عمل‌آوری (الف) ۷ روزه (ب) ۲۸ روزه

۳- نتیجه گیری

زمانی که نانو آهک (Nano-Ca(OH)_2) به خاک مرطوب اضافه می‌شود، به‌طور کلی دودسته واکنش کوتاه‌مدت و بلندمدت رخ می‌دهد. واکنش‌های کوتاه‌مدت شامل تبادل کاتیونی، لخته‌شدن و کربناسیون بوده و واکنش‌های بلندمدت شامل واکنش‌های پوزولانی و مقاومتی است. تبادل کاتیونی بین یون کلسیم نانوآهک و کاتیون‌های مختلف جمع‌شده در سطح خاک اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن ذرات خاک به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند که این روند را لخته شدن می‌نامند؛ اما در دسته دوم واکنش‌ها، یعنی واکنش‌های بلندمدت (پوزولانی)، محصولاتی به‌وجود می‌آیند که موجب بالا رفتن مقاومت خاک‌ها می‌شوند. وجود نانوآهک به‌دلیل ریزبودن ذرات و افزایش سرعت واکنش‌پذیری و فرآیند هیدراسیون و افزایش مقاومت نمونه‌ها حتی به میزان کم می‌تواند خصوصیات مهندسی خاک را تغییر دهد که این عامل برای پروژه‌هایی که احتیاج به افزایش مقاومت و بهبود خواص مهندسی خاک در کوتاه‌مدت دارند، بسیار مفید است. نتایج حاصل از نمودارهای تغییر مکان افقی برحسب تنش برشی نیز نشان‌دهنده کاهش جابه‌جایی افقی بوده که این نتیجه با افزایش مقاومت برشی در اثر افزودن نانو هیدروکسید کلسیم امری بدیهی است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت:

- در بین نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه تثبیت‌شده ۷ درصد نانوآهک و نمونه ترکیبی ۷ درصد نانوآهک با ۳ درصد خاکستر تفال نیشکر در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به‌ترتیب بیشترین مقاومت را از خود نشان دادند.
- همچنین استفاده از نانو آهک، آهک و خاکستر تفال نیشکر به‌تنهایی سبب افزایش مقاومت گردید؛ درعین حال مشاهده شد که خاک تثبیت‌شده با نانوآهک مقاومت بهتری نسبت به خاک تثبیت‌شده با آهک و نمونه تثبیت‌شده با ترکیبی از نانوآهک و خاکستر تفال نیشکر ارائه می‌دهد.
- بیشترین نسبت بهبود مقاومت خاک در دوره عمل‌آوری ۷ روزه مربوط به نمونه‌های ۳، ۵ و ۷ درصد نانو آهک و نمونه ترکیبی ۳ درصد خاکستر و ۷ درصد نانوآهک بوده که حدوداً ۴ برابر افزایش داشته است. همچنین در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه این نسبت مربوط به نمونه‌های ۷ درصد نانوآهک و نمونه ترکیبی ۳ درصد خاکستر و ۷ درصد نانوآهک بوده که حدوداً ۸ برابر شده است.
- زمان عمل‌آوری تأثیر زیادی بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده با نانوآهک و آهک داشته، اما در مورد خاکستر تفال نیشکر این تأثیر زیاد قابل توجه نبوده که دلیل این امر می‌تواند متوقف‌شدن دوره عمل‌آوری در کوتاه‌مدت باشد و این موضوع را می‌توان در آینده بررسی کرد.

- اسالنی کتولی، ف.، شوش پاشا، ع.، یازرلو، ر.، بابائی نژاد، ی. ۱۳۹۴. بررسی علت کاهش خاصیت خمیری خاک در اثر افزودن آهک و نانو آهک به خاک رس. کنفرانس بین المللی پژوهش در علم و تکنولوژی، مالزی، کوالالامپور.
- بختیاری، م.، حیدری، م.، ظهیری، ج. ۱۴۰۲. بهبود مشخصات مکانیکی خاک کانال‌های انتقال شبکه دشت آزادگان بر اساس کانی شناسی خاک، رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست. ۱۱۳-۱۲۲، ۲(۲)
- بدو، ک.، دوزالی جوشین، ف. ۱۳۹۴. بررسی روش‌های بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از مواد افزودنی، دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، قم، دانشگاه صنعتی قم
- جلیلیان مشهود، ر.، کوهستانی، م.، ناقدی نیا، ع. ۱۳۹۴. مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه بهسازی خاک با استفاده از نانو ذرات، سومین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دائمی کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی
- حسینی، ع. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانو مواد (نانورس و نانوسیلیس) بر روی پارامترهای مقاومتی خاکهای مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن، دانشگاه شاهد
- رضایی صوفی، غ. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی بهبود پارامترهای مقاومتی خاک رس تثبیت شده با خاکستر تفاله نیشکر (باگاس)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان
- عابدی کوپایی، ج.، پورعبدالله، ن.، انصاری، ش. ۱۴۰۲. برآورد پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک در مدل‌های مختلف در خاک های سبک، رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست ۱۴۸-۱۳۷، ۲(۲).
- عاطفی فرد، م.، خیری، م.، داوودی، س.، آزاد فلاح، ع.، بهنیا، س. ۱۳۹۵. مروری اجمالی بر مهمترین روش‌های بهسازی و تثبیت خاکهای مختلف، دومین کنفرانس بین المللی تحقیقات در عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار، استانبول، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا
- قنبری، ح.، برومند، م.، صبا، ح. ر. بررسی آزمایشگاهی رفتار جذب رطوبت *GCL* از خاک زیرین آلوده به شیرابه، رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست ۵۷-۷۱، ۳(۲).
- قیاسی، و.، والی راستی، ش. ۱۳۹۸. بررسی خاک های مسئله دار و ارائه راهکارهای جدید بهسازی. چهارمین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، تهران.
- کریمی، ع م.، عباسی، ن.، سیاوش نیا، م. استفاده از خاکستر باگاس نیشکر و آهک برای تثبیت خاکهای رسی، تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۹۴، شماره ۱، فروردین و اردیبهشت ۱۱۴۷ ص ۱-۱۱
- نجفی کانی، ا.، مهدیزاده، ح. ۱۳۹۳. بررسی و مطالعه مواد شیمیایی تثبیت کننده خاک‌های نرم، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، تهران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده عمران دانشگاه شهید رجایی

AAtefi Fard, M., Kheiri, M., Daavodi, S., Azad Fallah, A., Behnia, S. 2011. A brief overview of the most important methods of improvement and stabilization of different soils, the second international research conference on civil engineering, architecture and urban planning and sustainable environment, Istanbul (In Persian).

Adnan, M., Kumar, S., Garg, N., Gupta, K., Das, Sourav, K. 2023. Soil stabilization using waste Bagasse ash and lime: A review, Materials Today: Proceeding,

Ahmed, A., El-Emam, M., Ahmad, N., Attom, M. 2024. Stabilization of Pavement Subgrade Clay Soil Using Sugarcane Ash and Lime, geosciences, (14)

American Society for Testing and Material (ASTM). 2002. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual Book of ASTM, ASTM D 854-02.

- American Society for Testing and Material (ASTM).2011. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), Annual Book of ASTM, ASTM D 2487-11.
- Asalani-Katoli, F., Shooshpasha, I., Yazerloo, R., Babae-Nejad, Y. 2015. Investigation of the cause of the decrease in the paste properties of soil due to the addition of lime and nano-lime to clay soil. International Conference on Research in Science and Technology, Malaysia, Kuala Lumpur (In Persian).
- Bado, K., Dozali, F. 2010. Investigating methods of improving fine-grained soils using additives, the second national conference on soil mechanics and foundation engineering, Qom, Qom University of Technology (In Persian).
- Bakhtiari, M., Heydari, M., Zahiri, J. 1402. Improvement of soil mechanical properties of Azadegan plain network transmission channels based on soil mineralogy, *New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 2(2), pp. 113-122. doi: 10.22034/nawee.2023.425617.1056 (In Persian).
- Dang, L. C., Fatahi, B., Khabbaz, H. 2016. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. *Procedia engineering*, 143, 658-665 .
- Ghanbari, H., Boroomand M., Saba H. 1403. Laboratory investigation of GCL moisture absorption behavior from subsoil contaminated with leachate, *New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 3(2):57-71. doi: 10.22034/nawee.2024.463822.1090 (In Persian).
- Hassani, A. 2010. Laboratory investigation of the effect of nanomaterials (nanoclay and nanosilica) on the resistance parameters of soils reinforced with polypropylene fibers, master's thesis, Shahid University (In Persian).
- Jalilian Mashhoud, R., Kohestani, M., Naghedinia, A. 2010. An overview of the research conducted in the field of soil improvement using nanoparticles, the 3rd International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Shahid Beheshti University (In Persian).
- Kadivar, M., Barkhordari, K., Kadivar M. 2011. Nanotechnology in Geotechnical Engineering, *Advanced Materials Research*, Vols. 261-263, pp 524-528.
- Karimi, A. M., Abbasi, N. and Siavoshnia, M. 2013. The use of sugarcane bagasse ash and lime to stabilize clay soils, *Iran Water and Soil Research*, 49(1), 1-12 (In Persian).
- Khan, Sadam Hussain. 2019. Use of Gypsum and Bagasse Ash for Stabilization of Low Plastic and High Plastic Clay, *J. Appl. Res. Ind. Eng.* Vol. 6(3): 251–267
- Makusa, G. P. 2013. Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review. Luleå tekniska universitet.
- Meng, T., Qiang, Y., Hu, A., Xu, C., Lin, L.2017. Effect of compound nano-CaCO₃ addition on strength development and microstructure of cement-stabilized soil in the marine environment. *Construction and Building Materials*, 151, 775-781.
- Mohammadi, A., Boroomand, M. R. 2021. Strength and Durability of Soft Clay Stabilized with Recycled Gypsum (Bassanite), *Advances in Civil Engineering Materials* 10(1). 16-33. DOI: 10.1520/ACEM20190154
- Mohammadi, A., Ebadi T, Boroomand, MR. 2019. Physical modelling of axial compressive bearing capacity of instrumented piles in oil-contaminated sandy soil. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.*
- Najafi Kani, E., Mehdizadeh, H. 2009. Investigation and study of soft soil stabilizing chemicals, the first national conference on soil mechanics and foundation engineering, Tehran, Shahid Rajaei University of Tarbiat, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei University (In Persian).
- Rezaee Soofi, GH. 2010. Laboratory investigation of improving the resistance parameters of clay stabilized with sugarcane bagasse ash (bagasse), master's thesis, Gilan University (In Persian).