

Effect of Nanosilica on the Mechanical and Physical Soil Characteristics

Mohammad Saeid Hosseini and Aliashraf Amirinejad^{1*} 

(Received: September 19-2025 ; Revised: November 18-2025 ; Accepted: November 25-2025)

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

*: Corresponding author, Email: aliamirinejad@gmail.com

Abstract

Improvement of soil characteristics is one of the important issues in agricultural and engineering sciences. To investigate the effect of silica nanoparticles on the soil's mechanical and physical properties, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications. The factors included silica nanoparticles at three levels (0%, 0.5%, and 1% by weight) and two soil types with loam and clay loam textures. The results of the shear strength test showed that the addition of nanosilica increased the internal friction angle and particle adhesion in both loam and clay loam textures, but the liquid limit and plasticity index decreased in both soils. In the consolidation test, the compressibility coefficient in loam decreased from 0.38 to 0.21 and in clay loam from 0.42 to 0.23, while the swelling coefficient in loam decreased from 0.13 to 0.07 and in clay loam from 0.18 to 0.08. Overall, the results showed a significant effect of nanosilica particles on improving soil mechanical strength, especially in clay loam with higher clay content and specific surface area. Therefore, it can be concluded that the use of silica nanoparticles is an effective method for stabilizing problematic soils.

Keywords: Nanoparticles, Mechanical strength, Physical properties, Soil texture

How to cite this article: Hosseini, M.S. and Amirinejad, A. 2025. Effect of Nanosilica on the Mechanical and Physical Soil Characteristics. *J. Water and Soil Sci.* 29(4): 154-163. DOI: [10.47176/jwss.29.4.12634](https://doi.org/10.47176/jwss.29.4.12634)

Copyright © 2025 Hosseini and Amirinejad. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

اثر نانوذرات سیلیس بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی خاک

محمدسعید حسینی و علی‌اشرف امیری‌نژاد^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۴)

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: aliamirinejad@gmail.com

چکیده

اصلاح ویژگی‌های خاک از مسائل دارای اهمیت در علوم کشاورزی و مهندسی است. به منظور بررسی تأثیر نانوذرات سیلیس بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی خاک، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل نانوذرات سیلیس در سه سطح (۰، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی) و دو نوع خاک با بافت لوم و لوم رسی بودند. نتایج آزمایش مقاومت برشی نشان داد افزودن نانوذرات سیلیس، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذرات را در هر دو خاک لومی و لوم رسی افزایش داده؛ اما حد مایع و شاخص خمیری در هر دو خاک کاهش یافت. در آزمایش تحکیم نیز ضریب تراکم‌پذیری در خاک لوم از ۰/۳۸ به ۰/۲۱ و در خاک لوم رسی از ۰/۴۲ به ۰/۲۳ و ضریب تورم در خاک لوم از ۰/۱۳ به ۰/۰۷ و در خاک لوم رسی از ۰/۱۸ به ۰/۰۸ کاهش یافت. به طور کلی، نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار نانوذرات سیلیس بر اصلاح مقاومت مکانیکی خاک، به ویژه در خاک لوم رسی با مقدار رس و سطح ویژه بیشتر بود؛ بنابراین می‌توان گفت که استفاده از نانوذرات سیلیس یک روش مؤثر در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار است.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات، مقاومت مکانیکی، ویژگی‌های فیزیکی، بافت خاک

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

اصلاح و بهبود ویژگی‌های خاک از مسائل دارای اهمیت در علوم کشاورزی و مهندسی است. با توجه به نوع کاربری، از گذشته تا به امروز از روش‌های متعددی برای بهسازی و اصلاح خصوصیات خاک استفاده می‌شود. برای نمونه، افزودن سیمان در اصلاح مقاومت فشاری خاک (۱۲)، استفاده از آهک و خاکستر بادی در کاهش پلاستیسیته (۱۳)، کاربرد ترکیب بیوپچار و کمپوست باگاس نیشکر در کاهش مقاومت برشی، ضریب انبساط و انقباض خاک و افزایش رطوبت حد روانی و خمیری (۴) یا افزودن رس در افزایش استحکام کششی خاک (۱۴) از جمله روش‌های مؤثر در این راستا بوده است.

البته بعضی از این روش‌ها علاوه بر کاهش کیفیت خاک در بخش کشاورزی، دارای تأثیرات زیان‌بار زیست‌محیطی هستند. برای نمونه، آبسویی فلزات سنگین یا حرکت نمک‌های مختلف، سبب آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود (۱۱). همچنین، افزودن بعضی مواد به خاک با پرکردن منافذ بین ذرات درشت، هدایت هیدرولیکی خاک را کاهش داده و یا اضافه کردن بعضی از این مواد ممکن است قادر به حل کامل و دائم برخی مشکلات مانند تغییرات حجمی خاک نباشد (۶).

با توجه به این مسائل، در دهه‌های اخیر فناوری نانو راهکارهای مدرن و مؤثری را در زمینه بهینه‌سازی عملکرد خاک ارائه کرده است. فناوری نانو علم به‌کارگیری موادی است که دست کم یکی از ابعاد از آنها بین یک تا صد نانومتر است. کاربرد نانوذرات، با توجه به ابعاد کوچک و سطح ویژه زیاد، تغییرات مثبت و قابل توجهی در ویژگی‌های فیزیکی خاک ایجاد گشته و عملکرد قابل توجهی در بحث تثبیت ساختار مکانیکی و فیزیکی خاک از خود به نمایش می‌گذارند (۷).

نانوذرات سیلیس دسته‌ای از مواد جامد شفاف با قابلیت آب‌دوستی زیاد هستند که وقتی فضای بین ذرات را پر کنند با تراکم بیشتر ماتریس، استحکام، پایداری، انقباض‌پذیری و دوام مواد را بهبود می‌بخشند (۱). گزارش شده که استفاده از نانوذرات سیلیس در ترکیب خاک توانسته است بر کاهش

تراکم، بهبود مقاومت فشاری و برشی و بسیاری از پارامترهای دیگر خاک مؤثر واقع شود. همین‌طور، افزودن نانوذرات سیلیس به خاک، استحکام کششی، مقاومت فشاری و استحکام خمشی را بهبود می‌بخشد. نیروهایی که بر این ویژگی‌ها نقش دارند نیروی الکترواستاتیک، واندروالس، نیروی موئینگی و انحلال هستند (۳).

نتایج بررسی تأثیر نانوذرات سیلیس بر حدود آتربرگ یک خاک رسی بیانگر آن است که با کاربرد این نانوذرات، شاخص خمیری کاهش و حد انقباض افزایش یافت. به عبارتی، نانوذرات سیلیس باعث بهبود حدود آتربرگ خاک رسی شد (۵). مطابق گزارش زمردیان و سلیمانی (۱۶)، با افزودن نانوسیلیکا به یک خاک رسی، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش یافت. همچنین، نانوسیلیکا چسبندگی خاک را افزایش داده؛ اما زاویه اصطکاک داخلی به‌صورت چشمگیری کاهش یافت. همین‌طور، افزودن نانوسیلیکا منجر به کاهش شاخص خمیرایی، جرم مخصوص و هدایت هیدرولیکی خاک شده؛ ولی رطوبت بهینه خاک را به‌صورت چشمگیری افزایش داد. طبق نتایج کلهر و همکاران (۸)، افزودن نانوسیلیس به خاک سبب کاهش شاخص خمیرایی و ضریب نفوذپذیری خاک شد. البته، مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه تیمار شده در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یافت. نتایج پژوهش کولانتایول و همکاران (۱۰) نیز نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رسی با افزودن نانوسیلیکا افزایش یافت.

در پژوهش‌های پیشین، بیشترین تمرکز بر تأثیر نانوذرات بر عملکرد مکانیکی خاک مانند مقاومت برشی و تحکیم‌پذیری خاک‌های رسی بوده و توجه چندانی به اثرهای این مواد بر ویژگی‌های فیزیکی، به‌ویژه در خاک‌های لومی صورت نگرفته است؛ بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثرهای نانوذرات سیلیس بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی دو خاک با بافت لوم و لوم رسی انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک از لایه سطحی (۲۰-۰ سانتی متری) اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی (به مختصات ۳۴/۳۲۵۶۴۱ و ۴۷/۰۹۷۷۳۰ درجه) برداشت شدند. ویژگی‌های مهم فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتری، کربن آلی به روش اصلاح شده واکلی-بلک، کربنات کلسیم معادل به روش ریچاردز، هدایت الکتریکی خاک (EC) و pH خاک در نسبت ۱ به ۱ خاک به آب و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با روش استات سدیم نرمال تعیین شد (۹). نتایج تجزیه‌های خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل نانوذرات سیلیس در سه سطح (۰، ۵/۰ و ۱ درصد وزنی) و دو نوع خاک با بافت لوم و لوم رسی بودند. به منظور ایجاد یکنواختی در اعمال تیمارهای آزمایشی، نمونه‌های خاک از الک چهار میلی متری عبور داده و به میزان ۵ کیلوگرم در گلدان‌هایی به ابعاد ۱۸×۲۶×۲۵ سانتی متر ریخته شد. سپس، مقادیر لازم از نانوذرات سیلیس را به همراه نمونه خاک مربوطه روی دستگاه شیکر قرار داده تا به خوبی ترکیب شوند. خاک‌های تیمار شده برای عمل‌آوری به مدت ۲ ماه در وضعیت رطوبتی معادل ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (FC) نگهداری شدند. ویژگی‌های نانوذرات سیلیس مورد استفاده، تولیدی شرکت Evonik Industrials آلمان، در جدول ۲ آمده است.

در پایان دوره عمل‌آوری، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک شامل جرم مخصوص ظاهری با روش کلوخه و هدایت الکتریکی خاک (EC) و pH خاک در نسبت ۱:۱ خاک به آب تعیین شدند (۹). همچنین، آزمون دانه‌بندی خاک (Particle Size Analysis) مطابق استاندارد ASTM D 422 انجام شد. در این آزمایش، بعد از اضافه کردن محلول ۵ درصد هگزامتافسفات سدیم به نمونه خاک برای جداسازی ذرات، ترکیب حاصل را روی الک ریخته و آب اضافه شد تا جایی که آب عبوری از الک کاملاً شفاف و بی‌رنگ شود. در پایان،

محتویات روی الک داخل آون خشک و بعد توزین شد. داده‌های حاصله با نرم‌افزار اکسل مورد آنالیز دانه‌بندی قرار گرفت.

آزمایش برش مستقیم (Direct Shear Test) مطابق استاندارد ASTM D 3080 انجام شد. در این روش، نمونه خاک درون جعبه برش قرار گرفته و بعد نیمه تحتانی جعبه در جهت افق نسبت به نیمه فوقانی به حرکت در می‌آید. نیروی لازم به منظور ایجاد برش در طول صفحه ثبت و درصد رطوبت نمونه به عنوان پارامتر وابسته به منظور تعیین پارامترهای اصلی در ابتدا و انتهای آزمایش سنجش می‌شود. با تکرار آزمایش با بارهای نرمال متفاوت، نمودار رابطه بین تنش برشی و تنش نرمال ترسیم شد. نتایج آزمایش شامل پیوستگی، یعنی برش روی محور تنش برشی، زمانی که تنش نرمال صفر است و زاویه اصطکاک داخلی یعنی شیب خط و نشان‌دهنده مقاومت اصطکاکی خاک هستند.

حدود آتربرگ (Atterberg Limits) شامل آزمایش‌های حد مایع، حد خمیری و شاخص خمیری مطابق استاندارد ASTM D 4318 انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها به منظور پیش‌بینی رفتار خاک به لحاظ تراکم‌پذیری، مقاومت برشی و پتانسیل تورم دارای اهمیت هستند. برای نمونه، خاک‌هایی که حد مایع زیادی دارند، اغلب تراکم‌پذیری بیشتر و مقاومت برشی کمتری دارند. خاک‌هایی با خمیری کم نیز تراکم‌پذیری کمتری داشته و در صورت بالارفتن رطوبت ناپایدار می‌شوند.

همچنین، آزمایش تحکیم (Consolidation test) به منظور تعیین سطح نشست خاک بر اثر اعمال بار مطابق استاندارد ASTM D 2435 انجام شد. بدین منظور، یک نمونه خاک استوانه‌ای از آب اشباع شده و درون حلقه تثبیت قرار گرفت. نمونه را درون آدومتر در داخل سلول دستگاه تحکیم قرار داده و بار در جهت عمود بر کل سطح نمونه اعمال شد. به وسیله صفحه مدرج، تغییر ارتفاع نمونه با گذر زمان ثبت شد. با استفاده از بازوی اهرمی بارگیری دستگاه، بار افزایشی دوبرابر مرحله قبل بر نمونه خاک اعمال شد. طی این زمان، تغییرات

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه نمونه‌های خاک

ویژگی خاک	نمونه ۱	نمونه ۲
رس (%)	۲۲	۳۹
سیلت (%)	۴۱	۲۵
شن (%)	۳۷	۳۶
بافت خاک	لوم	لوم رسی
کربن آلی (%)	۰/۹۳	۰/۹۵
آهک (%)	۳۳/۵	۳۸/۵
pH	۷/۶۱	۷/۶۳
EC (dS.m ⁻¹)	۰/۲۳۹	۰/۱۶۳
CEC (cmol _c .kg ⁻¹)	۱۴/۵	۱۵/۱

جدول ۲. ویژگی‌های نانوذرات سیلیس مورد استفاده

خلوص (%)	قطر ذرات (nm)	سطح ویژه (m ² g ⁻¹)	چگالی (g cm ⁻³)	رنگ
> ۹۹	۱۲	۲۰۰	۲/۴	سفید

انجام شد.

نتایج و بحث

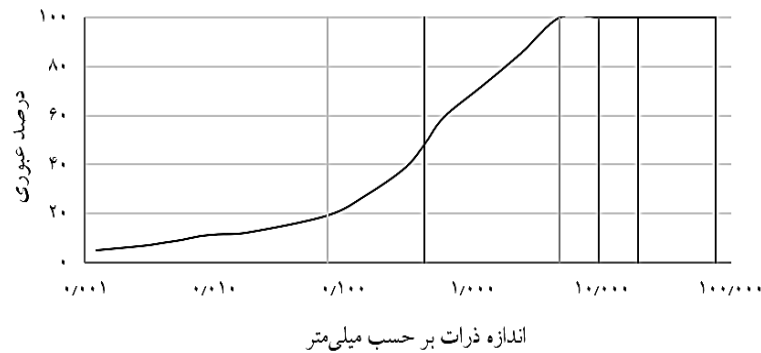
دانه‌بندی خاک

بر اساس سیستم طبقه‌بندی خاک یونیفاید (Unified Soil Classification System)، بافت خاک‌ها به ترتیب ماسه‌سیلتی (SS) و ماسه رسی (SC) شناخته شد. منحنی دانه‌بندی بافت ماسه‌سیلتی نشان می‌دهد که بیشتر ذرات در ابعاد متوسط (بین ۰/۰۱ تا ۱ میلی‌متر) متمرکز شده‌اند (شکل ۱). این نوع خاک به دلیل زهکشی و تهویه خوب، مناسب کشاورزی است. منحنی این خاک دارای شیب یکنواختی بوده و نشانگر توزیع یکنواخت ذرات عبوری از الک‌هاست. اندازه مؤثر ذرات خاک برابر ۰/۰۱ میلی‌متر و ضریب یکنواختی معادل ۳۰ است.

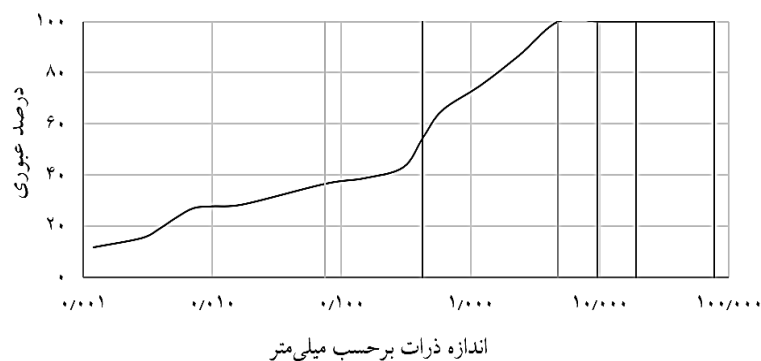
منحنی بافت ماسه رسی دامنه وسیع‌تری از ابعاد ذرات، به‌ویژه در اندازه‌های ریز (کمتر از ۰/۰۱ میلی‌متر) و درشت (بیشتر از ۱ میلی‌متر) نشان می‌دهد (شکل ۲). شیب منحنی این

اعداد نمایشگر ثبت می‌شود. این مرحله تا زمانی که نرخ نشست خاک ناچیز یا ثابت شود، ادامه یافته و درنهایت پس از اعمال بیشینه بار، بار موجود بر نمونه طی چندین مرحله تخلیه شد. داده‌های نرخ بازگشت و تورم نمونه نشان‌دهنده میزان کشسانی خاک و نرخ فشار مجدد در زمان حذف بار سطحی هستند. نتایج آزمون تحکیم روی یک نمودار نیمه لگاریتمی (محور x نشان‌دهنده فشار اعمال‌شده و محور y نسبت خلأ هستند) رسم شده تا در نتیجه این آزمون، دو پارامتر کلیدی یعنی ضریب همبستگی و شاخص فشرده‌سازی تعیین شود. ضریب همبستگی بیانگر سرعت رخ‌دادن تحکیم بوده و به نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک بستگی دارد. شاخص فشرده‌سازی یعنی شیب نسبت خلأ در مقابل منحنی تنش مؤثر در طول تحکیم اولیه، بیانگر تراکم‌پذیری خاک است.

در پایان، به‌منظور بررسی آماری اثر نانوذرات سیلیس و بافت خاک بر پارامترهای مکانیکی و فیزیکی مورد مطالعه، آنالیز واریانس و آزمون مقایسه میانگین داده‌ها با نرم‌افزار SAS



شکل ۱. منحنی دانه بندی لگاریتمی بافت ماسه سیلتی (لوم)



شکل ۲. منحنی دانه بندی لگاریتمی بافت لوم رسی

برش مستقیم خاک

نتایج آنالیز برش مستقیم خاک نشان‌دهنده آن است که نانوذرات سیلیس تأثیرات معنی‌داری بر بهبود ویژگی‌های مقاومت برشی خاک و اصلاح پارامترهای چسبندگی ذرات و زاویه اصطکاک داخلی داشته است. به عبارت دیگر، افزایش درصد نانوذرات سیلیس منجر به افزایش خطی در مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در هر دو بافت خاک شد. البته این روند در خاک لوم رسی با مقدار رس بیشتر نسبت به خاک لوم قوی‌تر بود. این مطلب نشان‌دهنده نقش تقویتی نانوذرات سیلیس در افزایش ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی است. بیشترین (میانگین سه تکرار) زاویه اصطکاک داخلی (۲۶/۱۳) در خاک لوم رسی حاوی یک درصد نانوذرات سیلیس و کمترین آن (۲۰/۰۷) در خاک لوم فاقد نانوذرات (تیمار شاهد) مشاهده شد (جدول ۳). در تیمار ۰/۵ درصد نیز روندی مشابه اما با شدتی کمتر دیده شد. افزایش مقاومت برشی با افزایش درصد نانوذرات، به‌ویژه

خاک در بخش‌های مختلف نمودار لگاریتمی تغییرات چشمگیری نسبت به منحنی ماسه سیلتی داشته و نشان‌دهنده دانه‌بندی ناهمگون است. به عبارتی، ضریب یکنواختی (CU) آن بزرگ‌تر از منحنی ماسه سیلتی بوده و دامنه اندازه ذرات بیشتر است. این خاک حاوی مقادیری بیشتری رس بوده و مستعد فشردگی بیشتر است؛ بنابراین، خاک لوم رسی نیازمند بهسازی با مواد تثبیت‌دهنده مانند نانوذرات سیلیس است. اندازه مؤثر ذرات این خاک معادل ۰/۰۰۷ میلی‌متر و ضریب یکنواختی برابر ۲۸/۵۷ است. مقدار ضریب انحنا خاک نیز ۱/۷۹ و نشان‌دهنده یکنواختی کمتر و تأثیرپذیری بیشتر ذرات ریز بر رفتار این خاک است. به عبارت دیگر، اثر نانوذرات سیلیس بر خواص مکانیکی این خاک نسبت به خاک‌های لوم بیشتر قابل مشاهده بوده؛ زیرا ذرات ریز بیشتری وجود دارد که می‌توانند با نانوذرات ترکیب شوند.

جدول ۳. میانگین ضرایب مقاومت برشی بافت‌های لوم و لوم رسی

تیمار	چسبندگی (C) (kg cm^{-2})		زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) (Deg)	
	بافت لوم	لوم رسی	بافت لوم	لوم رسی
شاهد	۰/۰۵	۰/۰۶	۲۰/۰۷	۲۲/۰۳
۰/۵ درصد	۰/۱۱	۰/۱۱	۲۲/۱۱	۲۴/۰۵
۱ درصد	۰/۱۶	۰/۱۴	۲۴/۰۱	۲۶/۱۳

در تیمار یک درصد، به دلیل افزایش پایداری خاکدانه‌ها و استحکام ساختاری خاک است (۵).

به‌طورکلی، نانوذرات به دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه زیاد، نقش قابل توجهی در پرکردن خلل و فرج و فضاهای خالی خاک و بهبود تدریجی پیوندهای بین ذرات خاک دارند. این مسئله به‌ویژه در خاک رسی، با افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی منجر به افزایش مقاومت برشی و پایداری خاک می‌شود (۸). به عبارتی، نانوذرات می‌توانند به‌عنوان چسب‌های نانو عمل کرده و پیوندهای بین ذرات خاک را تقویت کنند (۱۵).

در تمام تیمارهای آزمایشی نانوذرات سیلیس، مقاومت برشی خاک با بافت لوم رسی بیشتر از بافت لوم بود. این تفاوت ناشی از ترکیب ذرات خاک لوم رسی است که سطح ویژه بیشتری داشته و از این‌رو بهتر با نانوذرات تعامل برقرار می‌کند. به عبارت دیگر، اگرچه در بافت لوم مقاومت برشی کمتر است، اما با افزودن نانوذرات سیلیس، رفتار مکانیکی آن نیز افزایش عملکرد قابل توجهی داشت. نانوذرات سیلیس با ورود به فضاهای خالی بین ذرات خاک، تخلخل خاک را کاهش داده و ساختار خاک را متراکم‌تر می‌کند. این تراکم سبب افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود. در خاک‌های لوم رسی که تراکم پایه کمتری دارند، اثر نانوذرات بیشتر به چشم می‌آید. به عبارت دیگر، کاهش تخلخل با افزودن نانوذرات می‌تواند پایداری خاک را بهبود بخشد.

همان‌طور که گفته شد، حضور نانوذرات سیلیس با بهبود سطح تماس بین ذرات خاک، زاویه اصطکاک داخلی را افزایش

می‌دهد. این افزایش ناشی از افزایش نیروهای اصطکاکی و مکانیکی بین ذرات خاک است که موجب بهبود پایداری خاک تحت شرایط برشی می‌شود. به عبارت دیگر، افزودن نانوذرات به خاک با افزایش زبری در سطح ذرات، منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی بین آنها می‌شود.

حدود آتربرگ

نتایج میانگین سه تکرار آزمایش نشان می‌دهد که در نمونه خاک‌های شاهد، حد مایع (Liquid Limit) و حد خمیری (Plastic limit) خاک لوم رسی بیشتر از خاک لومی است. این به دلیل آن است که خاک رسی با داشتن ذرات بسیار ریز و تخلخل بیشتر، همین‌طور سطح ویژه بزرگ‌تر، آب را بیشتر جذب کرده و افزایش رطوبت، به آن خاصیت روانی و خمیری بیشتری می‌بخشد (جدول ۴).

همین‌طور، نتایج حدود آتربرگ نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیس به هر دو خاک‌های لوم و لوم رسی سبب کاهش حد مایع (سیلان) و حد خمیری و به تبع آن کاهش شاخص خمیری گشته است. شاخص خمیری هر دو خاک لوم و لوم رسی از ۲۱ درصد در نمونه شاهد به ترتیب به ۲۰ و ۲۱ درصد در تیمار ۰/۵ درصد نانوسیلیس و ۱۹ و ۲۰ درصد در تیمار یک درصد آن کاهش یافت. این اثر ممکن است به دلیل کاهش ظرفیت نگهداری آب در خاک از طریق پرشدن منافذ با مواد نانوسیلیس باشد (۸). البته همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار شاخص خمیری خاک با بافت لوم رسی در تیمار ۰/۵ درصد نانوذرات سیلیس تغییری نسبت به تیمار شاهد نداشته و

جدول ۴. نتایج میانگین آزمایش حدود آتربرگ بافت‌های لوم و لوم رسی

تیمار	حد مایع (%)		حد خمیری (%)		شاخص خمیری (%)	
	لوم	لوم رسی	لوم	لوم رسی	لوم	لوم رسی
شاهد	۴۷	۴۹	۲۶	۲۸	۲۱	۲۱
۰/۵ درصد	۴۳	۴۵	۲۳	۲۴	۲۰	۲۱
۱ درصد	۴۰	۴۲	۲۱	۲۲	۱۹	۲۰

به عبارتی، اثر نانوذرات در این سطح از مقدار کاربردی بر بافت لوم رسی مؤثر نبوده است.

کاهش بیشتر حدود مایع و خمیری و همین‌طور شاخص خمیری در تیمار یک درصد نانوذرات سیلیس هر دو بافت لوم و لوم رسی، نشان‌دهنده تأثیر قوی و مؤثر نانوذرات در این سطح است. این می‌تواند به دلیل کاهش ظرفیت نگهداری آب در خاک به واسطه تثبیت نانوذرات سیلیس در بین ذرات خاک باشد. ژانگ و همکاران (۱۵) نیز معتقدند که نانوذرات با پرکردن فضاهای خالی می‌توانند منجر به کاهش خاصیت خمیری خاک شوند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در بهبود خصوصیات مکانیکی و افزایش کارایی پروژه‌های تثبیت خاک مورد استفاده قرار گیرد.

آزمایش‌های تحکیم خاک

آزمایش‌های تحکیم، روند تغییرات حجم منافذ (فشرده‌گی) نسبت به افزایش فشار روی نمونه خاک را بررسی می‌کنند. نتایج اثرهای تیمارهای مختلف نانوذرات سیلیس بر آزمایش‌های تحکیم خاک نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات سیلیس، ضریب تراکم‌پذیری در هر دو بافت لوم و لوم رسی کاهش یافته است. روند کاهشی این ویژگی در هر دو بافت لوم و لوم رسی، بیانگر اثرهای مثبت نانوذرات در هر دو بافت است. این کاهش بر اثر پرکردن فضاهای خالی و افزایش پیوند بین ذرات خاک توسط نانوذرات است. به عبارت دیگر، کاهش ضریب تراکم‌پذیری خاک با کاربرد نانوذرات سیلیس، نشان‌دهنده بهبود

مقاومت خاک در برابر تغییرات حجمی ناشی از تثبیت بهتر نانوذرات در بین ذرات اولیه خاک است.

کاهش ضریب تورم در هر دو بافت نیز نشان می‌دهد که نانوذرات توانسته است انبساط خاک را تحت تنش کاهش دهد. میزان این کاهش در دو نوع بافت خاک، با توجه به اثرهای ترکیب و اندازه ذرات و نیز وجود منافذ درشت‌تر در خاک لوم، متفاوت است.

کاهش فشار پیش‌تحکیم در هر دو بافت با افزایش درصد نانوذرات نیز نشان‌دهنده تثبیت بهتر ذرات خاک و کاهش تغییر شکل‌پذیری آن است؛ بنابراین می‌توان گفت که نانوذرات سیلیس تأثیر قابل‌توجهی در بهبود رفتار مکانیکی خاک‌های لوم و لوم رسی دارند. به عبارت دیگر، با افزایش درصد نانوذرات، مقاومت خاک در برابر تراکم و انبساط افزایش یافته است.

مقایسه ضرایب تراکم‌پذیری و تورم و همین‌طور فشار پیش تحکیم هر دو خاک در تیمارهای ۰/۵ و یک درصد نانوذرات نشان می‌دهد که اگرچه افزایش سطح نانوذرات توانسته است با تثبیت بهتر خاک، موجب کاهش بیشتر تراکم‌پذیری و تورم خاک شود، اما تأثیر معنی‌داری بین دو تیمار دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر، کاهش شیب نمودارهای تراکم و تورم در تیمارهای بالاتر نانوذرات، نشان‌دهنده مقاومت بیشتر خاک‌ها در برابر فشار وارده و کاهش تراکم و فضای خالی بین ذرات است.

به‌طور کلی و بر طبق نتایج، خاک‌های لوم رسی مورد مطالعه دارای درجه تورم و تراکم‌پذیری بیشتری نسبت به خاک‌های لوم هستند (جدول ۵). این به دلیل ساختار ریزدانه‌ای و وجود

جدول ۵. نتایج میانگین آزمایش تحکیم بافت‌های لوم و لوم رسی

تیمار	ضریب تراکم‌پذیری		ضریب تورم خاک		فشار پیش تحکیم (kPa)	
	لوم	لوم رسی	لوم	لوم رسی	لوم	لوم رسی
شاهد	۰/۳۸	۰/۴۲	۰/۱۳	۰/۱۸	۲/۲۴	۳/۴۰
۰/۵ درصد	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۱۱	۲/۰۴	۳/۲۳
۱ درصد	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۲/۰۰	۳/۱۱

منافذ بسیار ریز در خاک رسی است؛ درحالی‌که خاک لوم حاوی ذرات درشت‌تری است که فضای بیشتری برای گردش آب‌وهوا ایجاد می‌کند.

مشخصه خاک متورم‌شونده، وجود کانی‌های رسی از نوع شبکه‌ای منبسط‌شده متعلق به گروه اسمکتیت است که مونت موریلونیت یکی از اعضای مهم آن گروه است. نتایج قبلی نیز نشان می‌دهد که کانی غالب رسی خاک اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی از نوع مونت موریلونایت است (۲).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات سیلیس به خاک‌های لوم و لوم رسی مورد مطالعه، بهبود قابل‌توجهی در پارامترهای مقاومتی و فیزیکی خاک ایجاد می‌کند. در آزمایش برش مستقیم، افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در هر دو

بافت خاک ناشی از پرشدن فضای خالی بین ذرات و به عبارتی، تقویت پیوندهای بین‌ذره‌ای توسط نانوذرات دیده شد. در آزمایش تحکیم نیز کاهش معنادار ضرایب تراکم‌پذیری و تورم در تیمارهای حاوی نانوذرات سیلیس نشان‌دهنده بهبود رفتار مکانیکی خاک تحت بارهای وارده بود. همچنین، کاهش حدود مایع و خمیری در خاک‌های تیمار شده بیانگر کاهش خاصیت خمیری و بهبود پایداری خاک در برابر تغییرات رطوبتی است. این اثرها در خاک لوم رسی به دلیل سطح ویژه بیشتر ذرات رس، چشمگیرتر بود. به‌طورکلی، نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات سیلیس به‌عنوان یک ماده اصلاح‌کننده مؤثر، می‌تواند مقاومت مکانیکی خاک را افزایش داده و رفتار فیزیکی آن را بهبود بخشند. این یافته‌ها برای پروژه‌های عمرانی و کشاورزی که نیاز به تثبیت خاک دارند، دارای اهمیت است.

References

منابع مورد استفاده

- Aggarwal, P., R. P. Singh and Y. Aggarwal. 2015. Use of nanosilica in cement based materials; A review. *Cogent Engineering* 2(1): 1078018. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1078018>
- Amirinejad, A.A. and M. Baghernejad. 1998. The soil calcification in a toposequence in semiarid conditions of Kermanshah. *Journal of Water and Soil Science* 2(4): 33-47.
- Barbhuiya, G. H. and S.D. Hasan. 2021. Effect of nano-silica on physio-mechanical properties and microstructure of soil: A comprehensive review. *Materials Today Proceedings*, 44: 217-221. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.115>
- Behnam, H. and A. Moezzi. 2016. Effect of biochar and compost sugarcane bagasse on some soil mechanical properties. *Journal of Water and Soil Conservation* 23: 235-250. <https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.9777.2407>
- Changizi, F. and A. Haddad. 2016. Effect of Nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering* 34(2): 725-733. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9962-9>
- Eliaslankaran, Z., N. Nik Daud, Z.M. Yusoff and V. Rostami. 2021. Evaluation of the effects of cement and lime with rice husk ash as an additive on strength behavior of coastal soil. *Materials* 14(5): 1140. <https://doi.org/10.3390/ma14051140>

7. Huang, Y. and I. Wang. 2016. Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review. *Environmental Earth Sciences* 75(6): 497. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5118-8>
8. Kalhor, A., M. Ghazavi and M. Roustaei. 2022. Impacts of nano-silica on physical properties and shear strength of clayey soil. *Arabian Journal for Science and Engineering* 47(4): 5271-5279. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06453-2>
9. Klute, A. 1986. Methods of soil analysis: Part 1 and 2, Physical and chemical methods. 2nd Edition, American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, Wisconsin. ISBN: 9780891180883, 0891180885
10. Kulanthaivel, P., S. Selvakumar, S. Balu and S. Bhuvaneshwari. 2022. Combined effect of nano-silica and randomly distributed fibers on the strength behavior of clay soil. *Nanotechnology for Environmental Engineering* 7(1): 23-34. <https://doi.org/10.1007/s41204-021-00176-3>
11. Magara, D. and H. She. 2024. A systematic review of the effects of soil stabilization on soil mechanical properties: A comparative study of fly ash, cement and lime. *OALib* 11(03): 1-19. <https://doi.org/10.4236/oalib.1111319>
12. Mahedi, M., B. Cetin and D.J., White. 2020. Cement, lime, and fly ashes in stabilizing expansive soils: Performance evaluation and comparison. *Journal of Materials in Civil Engineering* 32(7): 04020177. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003260)
13. Naimul Haque, N. 2023. Stabilization of expansive soil by improving the engineering properties using lime and fly ash. *International Journal of Engineering Management* 7(2): 27-34. <https://doi.org/10.11648/j.ijem.20230702.12>
14. Shirani, H., N. Asgharineghad, S. Sadr, I. Esfandiarpour and H. Shekofteh. 2021. Estimation of soil tensile strength using different modeling methods in some pistachio orchards of Rafsanjan, Iran. *Journal of Soil Research* 35(3): 303-319. <https://doi.org/10.22092/IJSR.2021.354996.614>
15. Zhang, X., J. Gao and X. Li. 2020. Study on the mechanism of nano-SiO₂ for improving the properties of cement-based soil stabilizer. *Nanomaterials* 10(3): 405. <https://doi.org/10.3390/nano10030405>
16. Zomorodian, S.M.A., and A. Soleymani. 2017. The effect of nanosilica additive on soil erodibility. *Journal of Water and Soil Science* 21(1): 217-227.