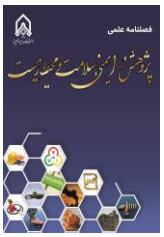
فصلنامه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست / سال ۱۴۰۴/ دوره ۳/ شماره ۱/ صفحه ۶۵-۸۲

فصلنامه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست



ارزیابی خصوصیات مکانیکی و ایمنی اساس تثبیت شده راه با ترکیب سرباره فعال شده قلیایی و نانوذرات

سید رامتین رمضانی[۱] ، محمد دهنویی[۲] ، ابولفضل محمدی جانکی[۳]

[۱] نویسنده مسئول: کارشناسی ارشد ، گروه پدافند غیرعامل ، دانشکده عمران، آب و انرژی ، دانشگاه جامع امام حسین ، تهران، ایران

[۲] کارشناسی ارشد، گروه شیمی ، دانشکده علوم پایه ، دانشگاه جامع امام حسین ، تهران، ایران

[۳] استادیار ، دانشکده عمران، آب و انرژی ، دانشگاه جامع امام حسین ، تهران ، ایران

چکیده

این پژوهش به بررسی رفتار خاک تثبیت‌شده با سرباره قلیا-فعال و نانوسیلیس با هدف افزایش ایمنی و تحکیم راه‌های خاکی پرداخته است. از آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری برای تحلیل عملکرد این مواد تثبیت‌کننده استفاده شده است. در این مطالعه، درصدهای مختلف سرباره قلیا-فعال (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ٪۳۰ وزن خشک خاک) بررسی شد که نسبت ٪۲۵ به عنوان مقدار بهینه انتخاب گردید. همچنین، اثر نانوسیلیس در مقادیر ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ ٪ وزن خشک خاک ارزیابی شد.نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب سرباره بهینه و نانوسیلیس نه تنها منجر به افزایش مقاومت فشاری و بهبود خواص مکانیکی خاک می‌شود، بلکه با بهبود پایداری و ظرفیت باربری، گامی مؤثر در جهت تحکیم راه‌های خاکی و افزایش ایمنی آنها محسوب می‌شود. به‌طور خاص، سرباره قلیا-فعال باعث افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه شد که در پایداری ساختار خاک مؤثر است، در حالی که نانوسیلیس با افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر، به بهبود انعطاف‌پذیری و کاهش ترک‌خوردگی در راه‌های خاکی کمک می‌کند.این مطالعه با معرفی یک روش پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست، راهکارهایی عملی برای کاهش آسیب‌پذیری راه‌های خاکی در برابر بارهای ترافیکی و عوامل جوی ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک راه‌حل مهندسی برای بهسازی راه‌های روستایی و خاکی با کمترین هزینه و بیشترین کارایی مورد استفاده قرار گیرد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

*نویسنده مسئول: Ramtin174@ihu.ac.ir

کلید واژه ها:

تثبیت خاک،

نانو سیلیس،

سدیم هیدروکسید،

سیلیکات سدیم

سرباره،

آهن‌گدازی،

ایمنی.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

© نویسندگان

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

۱- مقدمه

با رشد و توسعهٔ شهرها و جاده‌ها، زمین‌های مناسب جهت ساخت‌وساز کمیاب شده‌اند و به‌تبع آن مهندسین عمران و به‌خصوص متخصصین ژئوتکنیک را وادار به ساخت‌وساز در زمین‌های نامرغوب و غیرمتعارف نموده‌اند. این امر مهندسین ژئوتکنیک را وادار به بهسازی و تثبیت خاک کرده است. برخی خاک‌ها به علت مشخصات فنی نامطلوب، ضعیف و سست شناخته می‌شوند. عدم دسترسی به خاک با مشخصات مهندسی مناسب و یا پرهزینه بودن فراهم‌آوردن خاک در محل ساختگاه، مهندسان را به سمت بهبود کیفیت خاک موجود هدایت نموده است. بهبود رفتار مهندسی خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌های عمرانی یکی از جدی‌ترین مسائل پیشرو در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود و در این راستا موضوع "ایمنی" نیز به‌عنوان یک اولویت اساسی مورد توجه قرار می‌گیرد برای تثبیت خاک، کارشناسان از دیرباز بر حسب نوع فعالیت منطقه، روش‌های متفاوتی از جمله تعویض و یا روش‌های مکانیکی مانند پیش بارگذاری، روش‌های استاتیکی و دینامیکی تراکم خاک و یا استفاده از مواد شیمیایی مانند آهک، سیمان، قیر، آنزیم‌ها، الیاف گیاهی و شیمیایی جهت بهبود خصوصیات خاک استفاده کرده‌اند. این روش‌ها نه‌تنها به بهبود کیفیت خاک کمک می‌کنند، بلکه ایمنی ساختارهای عمرانی را نیز تضمین می‌کنند. پس می‌توان تثبیت خاک را از مسائل مهم پیشروی مهندسی عمران دانست که توجه ویژه‌ای به ایمنی پروژه‌ها و ساختارها می‌شود. ارزش نسبتاً بالای مواد تثبیت‌کننده مختلف نظیر سیمان، آهک و قیر، استفاده از آن‌ها را در تثبیت خاک، با هزینه‌هایی همراه می‌کند. نیاز روزافزون به مواد تثبیت‌کننده جدید که اقتصادی‌تر از مواد تثبیت‌کننده متداول باشد، باعث شده تا علم به دنبال به‌کارگیری ضایعات صنایع دیگر به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده خاک باشد. در ابتدای امر، بسیار خوش می‌نماید که این رخداد علمی از دورریزی ضایعات یک صنعت ثانویه، بیش‌ازپیش جلوگیری می‌کند. اما توجیه فنی و اقتصادی به‌کارگیری این مواد، بسیار بیشتر از جنبهٔ زیست‌محیطی آن، مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک است، به‌خصوص در زمینهٔ حفظ ایمنی سازه‌ها. ازاین‌رو چند سالی است که مهندسان سراسر دنیا، پژوهش‌ها و آزمایش‌های متعدد و متنوعی بر روی اثرات مواد مختلف در تثبیت خاک انجام می‌دهند تا در صورت پاسخ مثبت به بهبود وضعیت فنی خاک تثبیت‌شده و ایمنی سازه‌های مرتبط، آن مواد را به جهانیان معرفی کنند. تحقیقات زیادی نیز (اغلب آزمایشگاهی) بر روی نمونه‌های خاک‌های مختلف انجام و نتایج حاصل از آن‌ها ثبت گردیده است که به بهبود ایمنی و کیفیت پروژه‌های عمرانی کمک می‌کند.

امروزه تولید سیمان مستلزم مصرف منابع طبیعی و رهاسازی حجم قابل توجهی دی‌اکسیدکربن به محیط است و صنعت سیمان و آهک بعد از فولاد و آلومینیوم بیشترین مصرف انرژی را دارد به طوری که در فرآیند تولید هر تن سیمان حدود ۰,۹۴ تن گاز کربنیک تولید و گازهای آلاینده در اثر سوختن نفت کوره و برق مصرفی در کارخانجات سیمان وارد محیط زیست می‌شود[۱]. صنعت سیمان دومین تولید کننده گازهای گلخانه‌ای است تولید سیمان، طبق اعلام سازمان بین‌المللی انرژی (TEA) علاوه بر اضافه کردن گاز CO_2 (تقریبا در حدود ۶ تا ۷ درصد از کل) به جو باعث پخش گازهایی مانند So3 شده که دارای خاصیت گلخانه‌ای بوده و می‌توانند باعث ایجاد باران¬های اسیدی شود. همچنین در صنعت انرژی، نیز انرژی مصرف شده برای تولید سیمان به ازای هر تن کلینکر حدود ۱۷۰۰-۱۸۰۰ مگا ژول است. در فرآیند تولید هر تن سیمان به طور متوسط ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی و ۱۱۸ کیلو وات ساعت برق مصرف می‌شود[۲]. علاوه بر این برای هر یک تن سیمان تقریبا ۱,۵ تن مواد اولیه خام مورد نیاز است[۳]. با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی و خصوصا توجه به مسئله «توسعه پایدار» به مفهوم «استفاده بهینه و بهره‌برداری صحیح و کارا از منابع، پایه منابع طبیعی و .... برای تامین نیاز فعلی نسل‌های آینده» ضرورت بازنگری در تولید سیمان و تحقیق و پژوهش در رابطه با به کارگیری فناوری‌های نوین در بهسازی و تثبیت خاک، آشکارتر شده

است. تولید سرباره‌های فولاد همواره یکی از دغدغه‌های اصلی تولیدکنندگان این صنعت معدنی است چرا که مسائل زیست محیطی دفع و دپوی این مواد مشکلات زیادی را برای تولیدکنندگان به وجود می‌آورد. با توجه به این که ۲۰ درصد از مواد اولیه فولاد به شکل سرباره تولید می‌شود تا سال ۱۴۰۴ و تحقق تولید ۵۵ میلیون تن فولاد، ۱۰ میلیون تن سرباره در کشور تولید خواهد شد بنابراین این نگرانی در بین مدیران واحدهای فولادسازی و البته زیست محیطی‌ها وجود دارد که در صورتی که این میزان سرباره در کشور مصرفی نداشته باشد به عنوان ضایعات کارخانه‌های فولاد محسوب شده و چالش اساسی به ویژه از نظر زیست محیطی در کشور به وجود می‌آورد اما استفاده از سرباره‌ها در تولید سیمان و جاده‌سازی، می‌تواند افق جدیدی را برای حل این مشکل زیست محیطی پیش روی مدیران بگشاید[۴].

خصوصیات مهم سیلیس کلوئیدی که باعث شده ماده مناسبی برای این روش باشد عبارتند از : زمان ژل‌شدگی طولانی و البته قابل کنترل، خصوصیات دوام عالی، در دسترس بودن، ارزان بودن نسبت به سایر مواد افزودنی به دلیل استفاده از در غلظت پایین، سالم و غیر رسمی بودن از لحاظ زیستی و شیمیایی[۵] تحقیقات زیادی در مورد روانگرایی انجام شده است اما تعداد کمی در مورد رفتار ماسه تحت تاثیر مواد شیمیایی یا دوغاب انجام شده است. برخی تست‌های دینامیکی برای تعیین خواص دینامیکی خاک برای طراحی پی‌ها با مواد شیمیایی بر روی ماسه انجام گردیده است[۵-۷].

۲- پیشینه تحقیق

در گذشته برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ای از سیمان استفاده می‌شده است اما تولید سیمان مستلزم مصرف منابع طبیعی و رهاسازی حجم قابل توجهی دی‌اکسید کربن به محیط است همچنین در صنعت انرژی نیز انرژی مصرف شده برای تولید سیمان به ازای هر تن کلینکر حدود ۱۷۰۰-۱۸۰۰ مگا ژول است در فرآیند تولید هر تن سیمان به طور متوسط ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی و ۱۱۸ کیلو وات ساعت برق باشد و مصرف می‌شود اما با توجه به این‌که سرباره دارای خصوصیات شیمیایی بسیار مشابهی به سیمان می‌باشد و حجم تولید آن بسیار بالا می‌باشد و در صورت عدم استفاده از سرباره قلیافعال فضای بسیار وسیعی برای دپو کردن این سرباره‌ها مورد نیاز است.

قاضی و همکاران تاثیر افزودن نانوسیلیس بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی خاک رس که با سیمان تثبیت شده بودند را مورد بررسی قراردادند. نتایج بیانگر افزایش چشم‌گیر در مقاومت نمونه‌های مکعبی با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانوسیلیس می‌باشد[۸].

هریش و همکاران[۹] تاثیر نانوسیلیس بر پارامترهای مختلف خاک های رسی را سنجیده و فقط در دو نمونه خاک با هم مقایسه کردند، نتایج حاصله حاکی از آن بود که با تغییر خاک، تاثیر مواد تثبیت کننده روی خاک متفاوت خواهد بود.

خلاصه‌ای از مهم‌ترین یافته‌های تحقیقات پیشین در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مهم‌ترین یافته‌های تحقیقات پیشین

مشخات خاک	پارامتر بررسی شده	درصد استفاده شده	درصد بهینه	نوع آزمایش	مشخصات افزودنی	نام نویسنده و مرجع
رس	مقاومت فشاری محصور نشده	۱۵-۲۵	۲۰	هم برای خاک معمولی و هم برای خاک تثبیت شده.	سرباره کوره آهن گدازی	ارملیا و همکاران[۱۰]
رس	تحکیم و تورم	۶	۶	دستگاه ادومتر	آهن گدازی	سلیک و همکاران[۱۱]
رس	آتربرگ، CBRتراکم،	۵-۲۰	۲۰	نفوذ در خاک‌های معمولی در نفوذ ۲,۵ میلیمتر	سرباره کوره آهن گدازی	پاچیده و همکاران[۱۲]
ماسه	تراکم	۰,۳۳-۱-۲	۰,۳۳	اثر غلظت دوغاب بر روی خاک دانه-	سرباره کوره آهن	ابوالحسنی و

جدول ۱. خلاصه‌ای از مهم‌ترین یافته‌های تحقیقات پیشین

مشخات خاک	پارامتر بررسی شده	درصد استفاده شده	درصد بهینه	نوع آزمایش	مشخصات افزودنی	نام نویسنده و مرجع
				بندی شده	گدازی	همکاران[۱۳]
شنی	CBR	۱	۱	نسبت باربری کالیفرنیای استحکام)UCSبرشی در برابر استحکام برشی(	سدیم سیکیات	گوبینا و همکاران[۱۴]
رس	مشخص کردن واگرایی خاک	۰,۵، ۱، ۳، ۵	۵	آزمایش‌های کرامب (امرسون)، هیدرومتری مضاعف، پین هول و روش آنالیز شیمیایی از جمله روش آزمایشگاهی تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها هستند	سرباره کوره آهن گدازی	جلیلی و همکاران[۱۵]
خاک کوبیده	مقاومت کششی، مقاومت فشاری	۵، ۷,۵،۱۰	۱۰	مقاومت کششی به روش دو نیم کردن استوانه، مقاومت فشاری با اعمال تنش محوری به نمونه	سربار کوره آهن	زمنیان و همکاران[۱۶]
ماسه سیلتی	CBR	۵،۱۰،۱۵	۱۰	قالب ها در پنج لایه مساوی پر شدند و هر لایه با ۱۰، ۳۰ و ۶۵ ضربه چکش متراکم شد	سربار کوره آهن	پرهام و همکاران [۱۷]
رس	مقاومت فشاری محصور نشده	۰-۱۶	۱۲	نمونه های تست استوانه ای فشرده با قطر ۵۰ میلی متر و به طول ۱۰۰ میلی متر	سربار کوره آهن	ابوذر و همکاران [۱۸]
رس	مقاومت فشاری محصور نشده	۳-۶-۹	۶	با استفاده از دستگاه UCSاندازه گیری با نرخ بارگذاری ۱ Instronتست میلی متر در دقیقه انجام شد.	سربار کوره آهن و آهک	میشل و همکاران [۱۹]
خاک کوبیده	مقاومت فشاری محدود نشده، آتربرگ	۱۲,۵ مولار	۱۲,۵ مولار	استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۷۶ میلی متر و یک نتیجه میانگین بود سه تست	سدیم هیدروکسید	کریستلو و همکاران [۲۰]
خمیر ژئوپلیمری	مقاومت فشاری	۳-۴-۵-۶	۵	اندازه‌گیری مقاومت فشاری روی دستگاه تست فشار در یک رژیم کنترل بار با نرخ بارگذاری ۲ مگاپاسکال در دقیقه انجام شد.	هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم	صیدی و همکاران [۲۱]
سست ماسه	کاهش روانگرایی	۱تا ۱۰درصد	۹	تست‌های سانتریفوژی	نانوسیلیس	کانل و همکاران [۲۲]
ماسه	تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده	۱تا ۱۰درصد	۹	یک نمونه استوان های فشرده	سیمان و نانوسیلیس	چوباستی و همکاران [۲۳]
ماسه	افزایش چسبندگی و همبستگی بین ذرات	۱تا ۵درصد	5	ویسکوزیته	نانوسیلیس	نول و همکاران [۲۴]
رس	مقاومت فشاری محدود نشده UCS	۰,۵،۱،۱,۵،۲	۱,۵	های با قطر ۳۸ میلی متر × طول نمونه ۷۶ میلی متر	نانوسیلیس	زمریدیان و همکاران [۲۵]

۳- مواد و روش‌ها

به بررسی مواد مصرفی، استانداردها و نحوه انجام آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد. مواد بکار رفته در این تحقیق: خاک، نانو سیلیس و سیمان است. روش تحقیق حاضر کاربردی تجربی بوده و به‌طورکلی بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی استوار است. ابتدا یک سری آزمایش‌های شاخص جهت تعیین خصوصیات خاک جاده روستای چنار (منطقه آبسرد) انجام می‌شود و سپس تکثیر نانو سیلیس بر روی خاک با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۱. محل نمونه‌برداری

۳-۱- بررسی مشخصات منطقه آبسرد

آبسرد یکی از شهرهای شهرستان دماوند در استان تهران است. در سال ۱۳۷۵ و با پیوستن سه روستای تاسکین، مرانک و آبسرد به یکدیگر و با مصوبهٔ هیئت وزیران این منطقه به شهر تبدیل شد. شهر آبسرد واقع در ۴۵ کیلومتری شرق شهر تهران با مساحتی برابر ۹۳۸۱ هکتار از شهرهای بخش مرکزی شهرستان دماوند است.

۳-۲- بررسی مصالح مصرفی

مطابق با نشریه ۲۶۸، [۲۶] هر خاکی که حاوی کمتر از ۲ درصد مواد آلی بوده و مقدار سولفات قابل حل در آب آن از مقادیر مشخص شده در این گزارش تجاوز نکند، قابلیت تثبیت شدن با سیمان پرتلند را دارد. در این پروژه عمرانی از سیمان پرتلند نوع I استفاده می‌شود.

۳-۳- سیمان

همانطور که در جدول ۱ مشخصات شیمیایی ماده تشکیل دهنده سیمان مصرفی با توجه به درصد وزنی مشاهد می‌شود.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی ماده تشکیل دهنده سیمان مصرفی با توجه به درصد وزنی

ماده	درصد وزنی	ماده	درصد وزنی
SO_3	۲	Sr	۰/۰۸
SiO_2	۲۱/۳	Fe_2O_3	۳/۵۵
Al_3O_2	۴/۸	MnO	۰/۲۲۴
MgO	۳/۹	$TiO_۲$	۰/۳۳
Na_2O	۰/۱۸	CaO	۶۲/۸
–	–	KO_2	۰/۵۱

۳-۴- خاک

دو نوع خاک نام‌گذاری S3 و S4 که از شهرستان آبسرد دماوند تهیه گردیده است، و در آزمایشگاه ژئوتکنیک، بتن و مقاومت مصالح دانشگاه جامع امام حسین (ع) مورد آزمایش قرار گرفت.

شکل ۲. نمونه برداری خاک از پروژه آبسرد

۳-۵- نانوسیلیس

از افزونی نانو سیلیس کلوئیدی از شرکت شیمی پخش یزد تهیه شده است.

جدول۳ . مشخصات نانوسیلیس کلوئیدی

فرمول شیمیایی	وزن مولکولی	اندازه ذرات	سطح خاص	pH	رنگ
$SiO_۲nH_۲O$	۶۰/۰۸ g/mol	۲۰-۱۰ nm	۲۵۰ m/g^2	۹- ۱۰	سفید شیری

۳-۶- سرباره آهن‌گدازی

سرباره استفاده شده در این تحقیق از کوره شماره ۲ کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده که توسط شرکت بنا بنیان زیست فناور آسیاب شده است. این سرباره قبل از مصرف به مدت ۱۲ ساعت در آسیاب گلوله‌ای به صورت پودر درآمده تا واکنش‌پذیری بالایی داشته باشد. به طوری که این سرباره پس از عملیات آسیاب، ۷ درصد مانده روی الک شماره ۳۲۵ صفر درصد مانده روی الک شماره ۱۲۰ داشته و درصد ترکیبات شیمیایی سرباره در جدول۳. ارائه شده است.

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی سرباره آهن‌گدازی

خواص فیزیکی و شیمیایی	درصد
CaO	۳۵/۵
SiO_2	۳۴/۶
Al_2O_3	۱۰/۳
MgO	۱۱/۵
Fe_2O_3	۰/۷۳
MnO	۰/۹۲
S	۱/۰۹
SO_3	-
TiO_2	۳/۴
FeO	-
CaO/SiO	۱/۰۳
سطح ویژه (cm^2/g)	-

۳-۷- سدیم هیدروکسید

سدیم هیدروکسید مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مبتکران شیمی تهیه شده که مشخصات آن در جدول ۴. زیر آمده است.

جدول ۵. مشخصات سدیم هیدروکسید

ماده	مقدار مورد نیاز	نتیجه
NaOH	٪۹۹ Min	٪۹۹
Na_2Co_3	٪۰/۰۵ Max	٪۰/۱۰
Fe_2O_3	٪ ۰/۰۰۵ Max	٪۰/۰۰۱
NaCl	٪ ۰/۰۵ Max	٪۰/۰۰۹

۳-۸- سدیم سیلیکات

سدیم سیلیکات مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مبتکران شیمی تهیه شده که مشخصات آن در جدول ۵. زیر آمده است.

جدول ۶. مشخصات سدیم سیلیکات

فرمول شیمیایی	Na_2SiO_3
وزن مولکولی	۱۲۲ /۰۶۲g/mol
چگالی	۲/۶۱ g/L
نقطه ذوب	۱/۰۸۸ $^{\circ}c$
حلالیت در آب (۲۵ درجه)	۲۲/۲ گرم/۱۰۰ میلی لیتر

۳-۹- علت انتخاب افزودنی‌ها

واکنش منابع آلومیناسیلیکاتی بستگی به آرایش شیمیایی، ترکیب شیمیایی، ترکیب کانیشناسی و ریختشناسی آن دارد. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد و امکان‌سنجی استفاده از مواد شیمیایی نوین برای فعال کردن سرباره کوره ذوب آهن به منظور ساخت چسباننده برای تثبیت خاک است. نوآوری این کار مربوط به استفاده از مواد شیمیایی نوین به عنوان فعال‌کننده سرباره کوره ذوب‌آهن و استفاده از آن برای تثبیت خاک ماسه منطقه آبسرد است. این پژوهش قصد دارد با معرفی فعال‌کننده‌های نوین، اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست، آبسرد را با استفاده از سرباره فعال‌شده با قلیا بر پایه سرباره کوره ذوب آهن تثبیت کند. آزمایش‌های صورت

گرفته برای تعیین پارامترهای مکانیکی، دوام و ریزساختار تدوین شده است. برای این منظور آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری تک محوری تعریف شده است.

۳-۱۰- مشخصات اندازه ذرات خاک

باتوجه‌به نتایج حاصل از آزمایش‌های دانه‌بندی، طبقه‌بندی خاک‌ها به‌صورت زیر است:

جدول ۷. تقسیم‌بندی خاک

	شماره نمونه	مدول نرمی
مدل نرمی	S2	کمتر از ۴
	S7	بین ۴ و ۵
USGS	شماره نمونه	نوع خاک
	S2	SM
	S7	SW-SM
AASHTO	شماره نمونه	نوع خاک
	S2	A-4
	S7	A-1-A
درصد ریزدانه	شماره نمونه	درصد ریزدانه
	S2	بیش از ٪۲۵
	S7	کمتر از ٪۱۲

۴- یافته‌های تحقیق

۴-۱- وزن مخصوص و جذب آب

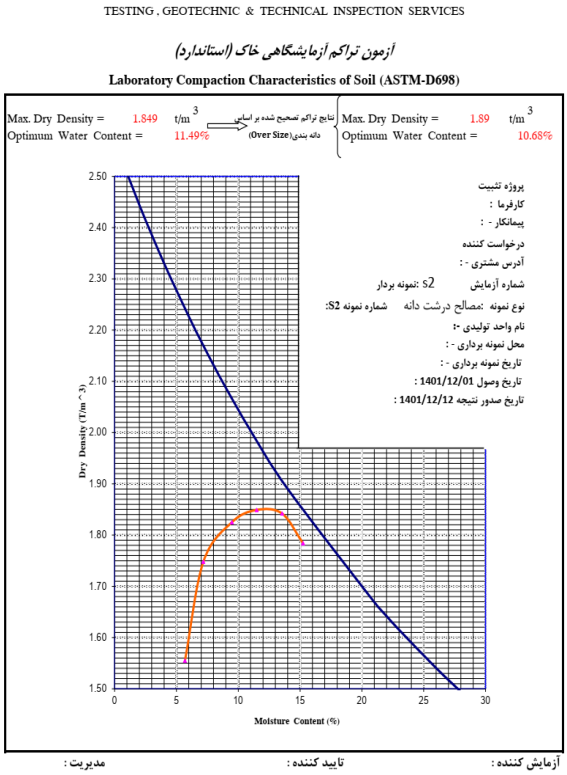
وزن مخصوص یا وزن واحد معیاری است که وزن یک ماده در واحد حجم آن را بیان می‌کند

جدول ۸. وزن مخصوص و جذب آب

شماره نمونه	وزن مخصوص	جذب آب
S2	۲/۴۳۴۹	۳/۶۳
S7	۲/۳۹۱۵	۳/۳۲۱۶

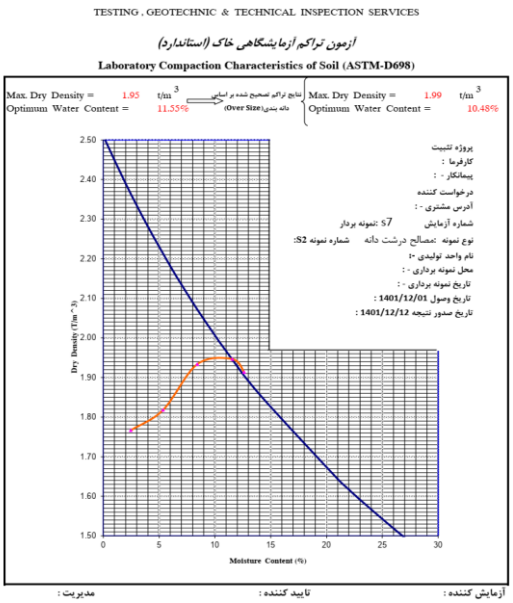
۴-۲- آزمایش تراکم استاندارد (بر اساس استاندارد ASTM D ۶۹۸)

هدف از انجام عملیات تراکم، یافتن رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثری است. در این آزمایش کاهش میزان تخلخل خاک مدنظر است. وجود آب تا میزان مشخصی سبب تسهیل این عملیات می‌شود که به‌دست‌آوردن این درصد رطوبت وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک پس از به‌کاربردن میزان معینی انرژی کوبشی، انجام می‌گیرد.



شکل ۳. گزارش تراکم خاک S2

منحنی نشان‌دهنده رابطه بین درصد رطوبت و چگالی خشک است. قسمت افزایشی در ابتدای نمودار، با افزایش رطوبت، چگالی خشک نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا ذرات خاک بهتر با هم مرتبط می‌شوند و فضای خالی بین آن‌ها پر می‌شود. قسمت کاهشی پس از رسیدن به نقطه اوج (پیک)، با اضافه‌کردن رطوبت بیشتر، چگالی خشک کاهش می‌یابد که به دلیل اشباع شدن خاک و عدم توانایی ذرات در ایجاد تماس مناسب است. این نمودار ابزاری کلیدی برای درک رفتار خاک در شرایط مختلف رطوبت است و می‌تواند به پیش‌بینی عملکرد خاک در پروژه‌های عمرانی کمک کند. توجه به نقاط کلیدی نظیر حداکثر و حداقل چگالی و رطوبت بهینه می‌تواند در افزایش دوام و استحکام سازه‌ها مؤثر باشد.



شکل ۴. گزارش تراکم خاک S7

با افزایش محتوای رطوبت، چگالی حجمی خشک در ابتدا افزایش می‌یابد تا به حداکثر نقطه خود برسد و سپس به‌تدریج کاهش می‌یابد. این نمودار کمک می‌کند تا بتوانیم ویژگی‌های مکانیکی خاک را پیش‌بینی کنیم. چگالی حجمی خشک حداکثری و رطوبت بهینه می‌تواند برای طراحی سازه‌ها و تحلیل پایدارسازی مهم باشد.

نمودار تراکم خاک، ابزاری حیاتی در مهندسی ژئوتکنیک است که می‌تواند به‌منظور ارزیابی کارایی خاک در پروژه‌های ساختمانی و بهبود روش‌های مدیریتی خاک در محیط‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۳-آزمایش ارزش ماسه‌ای (بر اساس استاندارد ASTM D ۲۴۱۹)

این آزمایش به‌عنوان یک آزمایش سریع، جهت تعیین نسبت ذرات ریز یا مواد رس گونه در خاک‌ها یا مصالح دانه‌بندی شده بکار برده می‌شود.

جدول ۹. آزمایش ارزش ماسه‌ای

شماره خاک	عدد ماسه‌ای	عدد رس	ارزش ماسه‌ای
S2	۱/۶	۱۰/۹	٪۱۴/۶۷
S7	۲	۱۱/۲	٪۱۷/۸۵

۴-۴- آزمایش لس‌آنجلس(بر اساس استاندارد ASTM C ۵۳۵)

کاربردهای این آزمایش، استفاده از آن در تعیین کیفیت سنگ‌دانه‌های به‌کاررفته در بتن است. علاوه بر این، راه‌سازی و روسازی یکی دیگر از بخش‌هایی است که کیفیت سنگدانه و به‌تبع آزمایش‌های آن، به مقدار قابل‌توجهی در پیش برد پروژه‌ها تأثیرگذار است. به‌عنوان نمونه، یکی از مالک‌های سنجش کیفیت مصالح جهت استفاده در لایه‌های اساس و زیر اساس، مقاومت مناسب در برابر سایش است

جدول ۱۰. آزمایش لس‌آنجلس

شماره نمونه	S2	S7
وزن اولیه مصالح شسته شده (g)	۵۰۰۰	۵۰۰۰
وزن مصالح مانده روی الک ۱۲ پس از۱۰۰دور(g)	۴۶۵۵	۴۶۹۰
درصد افت وزنی پس از ۱۰۰(درصد سایش)	۶/۹	۶/۲
وزن مصالح شسته شده مانده روی الک ۱۲ پس از۵۰۰دور(g)	۳۹۷۵	۴۰۰۵
درصد افت وزنی پس از ۵۰۰(درصد سایش)	۲۰/۵	۱۹/۹
ضریب یکنواختی سایش	۳۳/۶	۳۱/۱

۴-۵- آزمایشات شیمیایی بر روی نمونه‌های انجام شده

مصالح در حوزه مهندسی عمران تمرکز آزمایش خاک بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک است. هرچند اخیراً برای بررسی وضعیت خوردگی برخی پارامترهای شیمیایی نظیر pH، سختی کل آب، هدایت الکتریکی، سولفات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کربنات و بی‌کربنات، مقدار کل املاح محلول، مقدار گچ در خاک، مقدار آهک در خاک و مواد آلی موجود در خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. این آزمایش شامل سه مرحله‌ی نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه خاک، تهیه عصاره اشباع و انجام آزمایش برای دستیابی به نتایج آزمایشگاهی است.

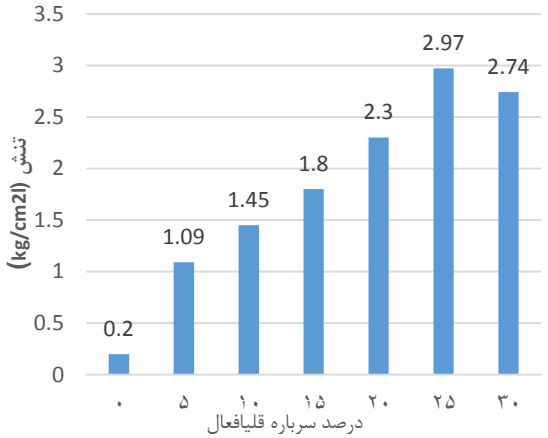
جدول ۱۱. آزمایش‌های شیمیایی بر روی خاک

نمونه	S2	S7
%SO4	۰/۱۵	۰/۱۸
pH	۸ /۲۵	۸ /۱۵
Oranganic	۰/۱۷	۰/۳۲

۴-۶- آزمایش تک محوری

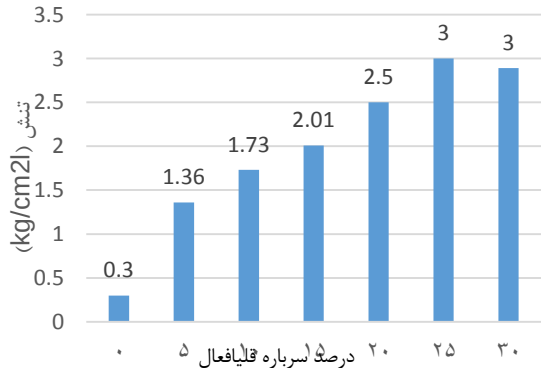
هدف از این آزمایش اندازه‌گیری تقریبی مقاومت برشی یک خاک چسبنده است. استاندارد آزمایش ۸۷ -۲۱۶۶ D ASTM است برای آزمایش در رطوبت‌های بهینه هر حالت مخلوط تهیه و در قالب‌های موجود در آزمایشگاه و با درصد تراکم کارگاهی ۱۰۰٪ و در سه لایه نمونه ها تهیه گردید. نمونه ها به مدت ۷ و ۲۸ روز تحت شرایط عمل‌آوری نگـه‌داری گردید و آزمایش شدند. عمل‌آوری به صورت پوشاندن نمونه‌ها با نایلون انجام شد، مقاومت به دست آمده از این آزمایش، مقاومت فشاری محصور نیز گفته می‌شود.

۴-۶-۱- مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها برای عمل آوری ۷ روزه



شکل ۵. نمودار مقاومت تک محوری برای درصد مختلف سرباره قلیافعال برای عمل‌آوری ۷ روزه خاک s2

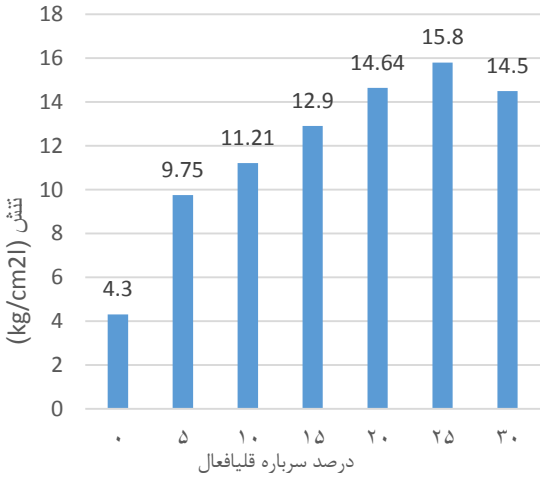
با افزایش درصد سرباره قلیایی فعال، مقاومت فشاری خاک ابتدا افزایش‌یافته و سپس کاهش پیدا می‌کند. این نشان‌دهنده یک نقطه بهینه برای درصد سرباره است که بیشترین مقاومت را ایجاد می‌کند. بیشترین مقاومت حدود $۳,۵kg/cm^2$ در درصدی بین ۵ تا ۱۰٪ سرباره مشاهده می‌شود. پس از آن، مقاومت کاهش می‌یابد که ممکن است ناشی از عدم توزیع یکنواخت سرباره یا واکنش‌های ثانویه باشد. سرباره قلیایی فعال به‌عنوان تثبیت‌کننده مؤثر است، اما تنها تا درصد مشخصی (حدود ۱۰٪ در این آزمایش). افزودن بیش از حد سرباره ممکن است باعث کاهش عملکرد به دلیل عدم تراکم مناسب یا واکنش‌های شیمیایی نامطلوب شود.



شکل ۶. نمودار مقاومت تک محوری برای درصد مختلف سرباره قلیافعال برای عمل‌آوری ۷ روزه خاک s7

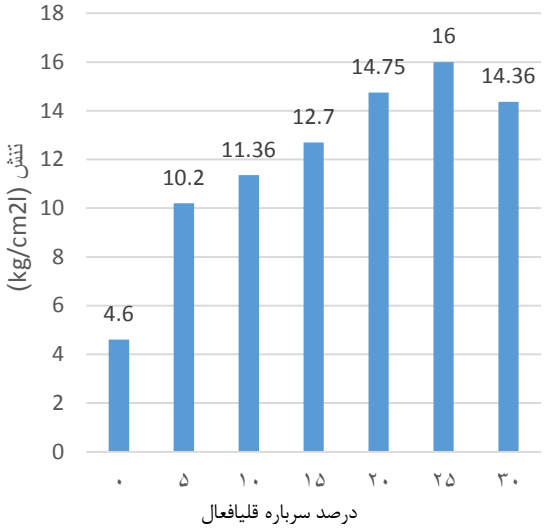
مقاومت فشاری خاک با افزودن سرباره قلیایی فعال ابتدا افزایش‌یافته و سپس کاهش می‌یابد حداکثر مقاومت ۳ kg/cm^2 در محدوده ۵٪ سرباره مشاهده می‌شود. در ۳۰٪ سرباره، مقاومت به حدود ۱ kg/cm^2 یا کمتر کاهش می‌یابد. علل احتمالی کاهش مقاومت در درصدهای بالای سرباره کاهش تراکم خاک به دلیل جایگزینی بیش از حد سرباره، واکنش‌های ثانویه نامطلوب که باعث تضعیف ساختار خاک می‌شوند و عدم توزیع یکنواخت سرباره در خاک.

۴-۶-۲- نتایج مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها برای عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۷. نمودار مقاومت تک محوری برای درصد مختلف سرباره قلیافعال برای عمل‌آوری ۲۸ روزه S2

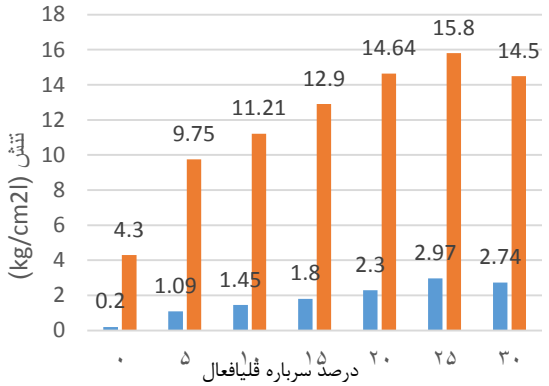
مقاومت با افزودن سرباره ابتدا به‌شدت افزایش‌یافته و سپس روند کاهشی پیدا می‌کند. حداکثر مقاومت ۱۵٫۸kg/cm^2 در ۵٪ سرباره مشاهده می‌شود. در درصدهای بالاتر (۱۵-۳۰٪)، مقاومت حدود به ۹kg/cm^2 .۵-۱۴٫۵ کاهش می‌یابد، اما همچنان بسیار بالاتر از مقاومت‌های ۷ روزه است. علل افزایش مقاومت در ۲۸ روز تکمیل واکنش‌های پوزولانی بین سرباره و خاک. تشکیل سیلیکات‌های کلسیم هیدراته (C-S-H) که باعث افزایش پیوندهای شیمیایی می‌شود.



شکل ۸. نمودار مقاومت تک محوری برای درصد مختلف سرباره قلیافعال برای عمل‌آوری ۲۸ روزه S7

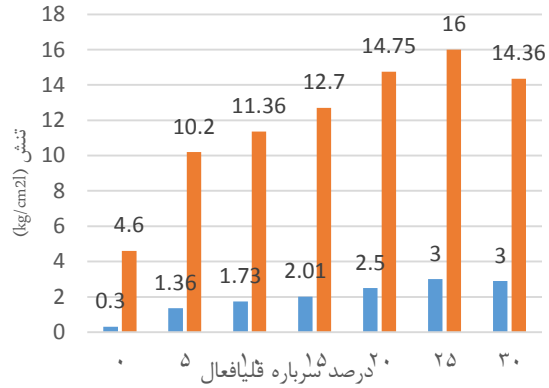
حداکثر مقاوم ۱۶ kg/cm^2 در ۵٪ سرباره مشاهده می‌شود. نقطه بهینه با ۵٪ سرباره با مقاومت (۱۶ kg/cm^2) علت افزایش اولیه مقاومت تشکیل فازهای C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) و C-A-S-H (آلومینوسیلیکات کلسیم هیدراته) از واکنش سرباره با آب و یون‌های قلیایی بهبود ساختار خاک از طریق پرکردن حفرات و ایجاد پیوندهای شیمیایی علت کاهش مقاومت در درصدهای بالای سرباره کاهش تراکم جایگزینی بیش از حد سرباره ممکن است باعث ایجاد نقاط ضعف در ماتریس خاک شود. عدم تجانس توزیع ناهمگن سرباره در خاک (به‌ویژه در درصدهای بالا) منجر به نواحی با مقاومت متغیر می‌شود واکنش‌های ثانویه احتمال تشکیل ترکیبات نامطلوب مانند هیدروکسید کلسیم در درصدهای بالا دارد.

۴-۶-۳- مقایسه مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره آهن برای عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه



شکل ۹. مقایسه نتایج مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیافعال برای عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک S2

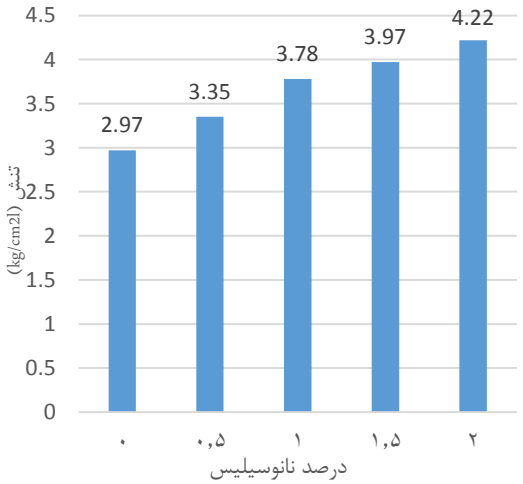
مقاومت‌ها در محدوده ۱,۰۹ kg/cm² تا ۲,۹۷ مشاهده می‌شوند. در ۵٪ سرباره حداکثر مقاومت ۲,۹۷ kg/cm² ثبت شده است. با افزایش درصد سرباره به ۲۰٪ مقاومت به ۸.۱ g/cm²کاهش می‌یابد. در ۵٪ سرباره، مقاومت ۲۸ روزه ≈ ۵ برابر مقاومت ۷ روزه است. تشکیل فازهای C-S-H و C-A-S-Hکه ساختار خاک را تقویت می‌کنند. کاهش تخلخل و افزایش چگالی به دلیل واکنش‌های شیمیایی کامل‌تر. علت کاهش مقاومت در درصدهای بالای سرباره کاهش تراکم جایگزینی بیش از حد سرباره می‌تواند منجر به نقاط ضعف در ساختار خاک شود.



شکل۱۰. مقایسه نتایج مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیافعال برای عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک S7

کاهش ۶۰٪ تخلخل در ۲۸ روز نسبت به ۷ روز، الگوی کریستالی XRD نشان می‌دهد کریستال‌های C-S-H پس از ۲۸ روز ۳ برابر چگال‌تر هستند. درصد بهینه سرباره: ۸-۱۲٪ (ترکیب مقاومت و اقتصادی) واکنش‌های پوزولانی تشکیل شده در ۷ روز ۴۰-۵۰٪ تکمیل در ۲۸ رروز ۹۰۹۵٪ تکمیل واکنش است.

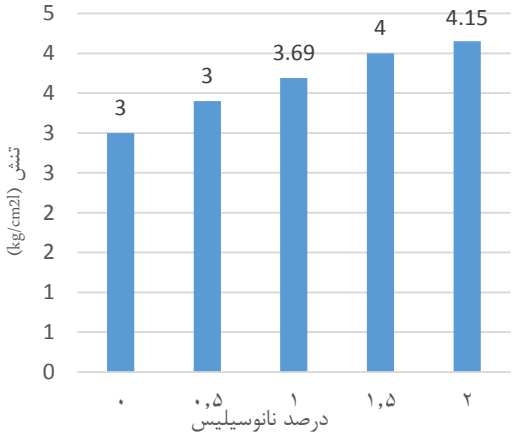
۴-۶-۴- مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها برای عمل آوری ۷ روزه



شکل۱۱. مقاومت تک محوری برای درصد مختلف نانوسیلیس و سرباره قلیافعال برای عمل آوری ۷ روزه خاک S2

با افزایش درصد نانو سیلیس از ۰٪ به ۲٪، مقدار مقاومت تک‌محوری به طور پیوسته افزایش‌یافته است. نانو سیلیس به‌عنوان یک ماده افزودنی در بهبود خواص مکانیکی خاک مؤثر است. افزایش مقاومتی که در داده‌ها مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانو سیلیس بر ساختار خاک و توان آن در تحمل بار است. درصد ۲٪ نانو سیلیس بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت دارد و نشان‌دهنده نقطه بهینه‌ای برای استفاده از این ماده در بهبود خواص خاک است. استفاده از نانو سیلیس در مقادیر مشخص می‌تواند به بهبود قابل‌توجهی در ویژگی‌های مکانیکی خاک منجر شود و این

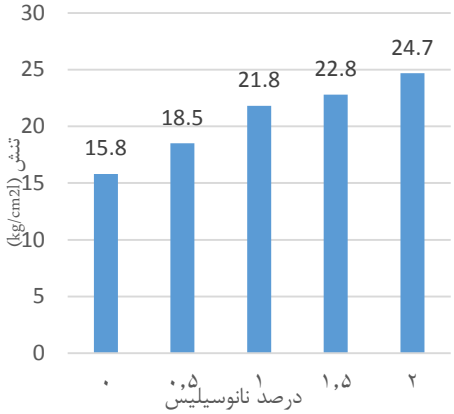
امر برای پروژه‌های مهندسی و ساخت‌وساز بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۱۲. مقاومت تک محوری برای درصد مختلف نانوسیلیس و سرباره قلیافعال برای عمل آوری ۷ روزه خاک S7

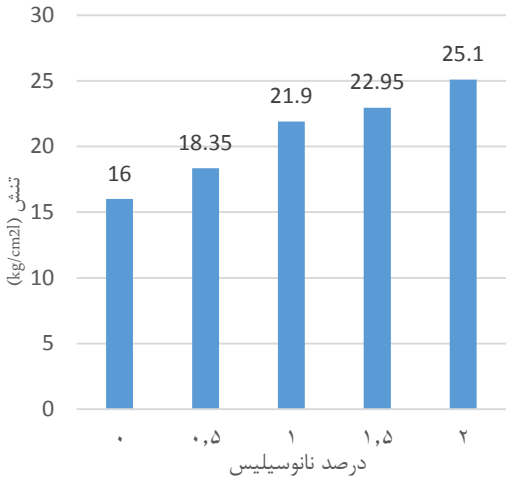
در ابتدا با افزایش درصد نانو سیلیس از ۰ به ۱,۵ درصد، شاهد افزایش قابل توجهی در مقدار مقاومت هستیم. پس از ۱,۵ درصد، به مقدار ۴,۱۵ kg/cm^2 در۲درصد نانوسیلیس می‌رسیم که نشان‌دهنده ادامه‌ی افزایش ولی با شیب کمتری است. نانوسیلیس به علت خواص اصلاحی خود در بهبود ساختار دانه‌های خاک و افزایش چسبندگی می‌تواند موجب افزایش مقاومت خاک گردد. با افزایش درصد نانوسیلیس، احتمالاً واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی بین نانوسیلیس و سایر اجزای خاک، موجب تسهیل در توسعه مقاومت می‌شود. مقادیر کمتر از ۱ درصد نانوسیلیس تأثیر چندانی بر افزایش مقاومت خاک ندارند. از ۱,۵ درصد به بعد، اثرگذاری نانوسیلیس بر روی مقاومت خاک به صورت تدریجی کاهش می‌یابد.

۴-۶-۵- مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها برای عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۳. مقاومت تک محوره برای سرباره و درصد مختلف نانوسیلیس برای عمل‌آوری ۲۸ روزه خاک S2

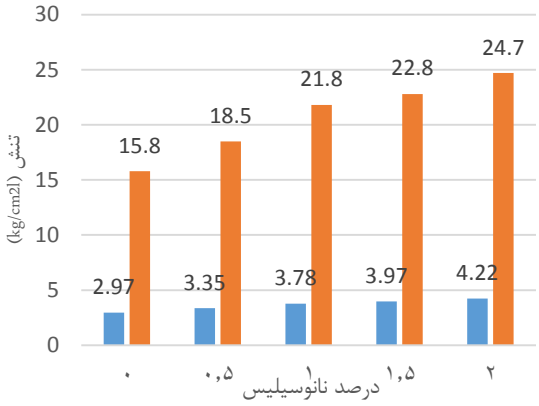
مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نانو سیلیس، مقاومت تک‌محوری خاک نیز افزایش می‌یابد. این نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانو سیلیس بر بهبود خواص مکانیکی خاک است. از ۰٪ به ۰,۵٪، مقاومت از kg/cm^2 ۱۵,۸ به ۱۸,۵ افزایش یافته است. افزایش میزان نانوسیلیس تا ۱٪، مقاومت را به kg/cm^2 ۲۱,۸ رسانده و نشان‌دهنده تأثیر مثبتی است که نانوسی در غلظت‌های بالاتر (از ۱٪ به ۱,۵٪ و ۲٪)، اگرچه مقاومت همچنان افزایش می‌یابد، اما این افزایش در مقایسه با مراحل قبلی کمتر قابل توجه است. به‌طوری‌که از kg/cm^2 ۲۱,۸ به kg/cm^2 ۲۲,۸ و سپس به kg/cm^2 ۲۴,۷ می‌رسد. در این سطح از غلظت دارد. نانوسیلیس به طور واضح بر بهبود مقاومت تک محوری خاک تأثیر دارد. با افزایش غلظت، خواص مکانیکی خاک بهبود می‌یابد.



شکل ۱۴. مقاومت تک محوره برای سرباره و درصد مختلف نانوسیلیس برای عمل‌آوری ۲۸ روزه خاک S7

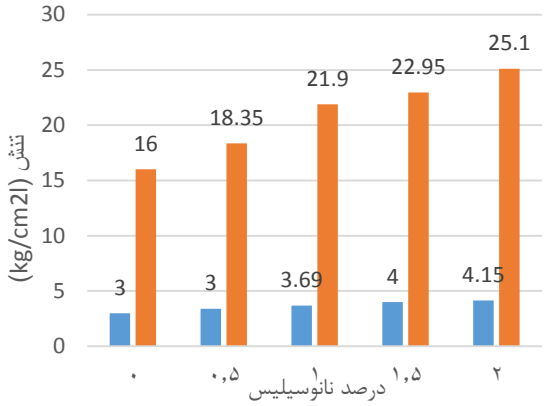
به‌طورکلی، با افزایش درصد نانو سیلیس، مقاومت تک‌محوری خاک نیز افزایش‌یافته است. مقادیر مقاومت در برابر نانو سیلیس صفر برابر با kg/cm^2 ۱۶ است و با افزایش درصد نانو سیلیس به ۲ درصد به kg/cm^2 ۲۵,۱ می‌رسد. وجود نانو سیلیس در خاک باعث بهبود قابل‌توجهی در مقاومت تک‌محوری می‌شود. باوجوداینکه افزایش مقاومت در درصدهای بالاتر نانو سیلیس در مراحل بعدی نسبت به ابتدا کمتر است، اما همچنان بهبود حکم‌فرماست. نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از نانومواد در مهندسی خاک می‌تواند کارایی خاک را در ساخت‌وسازها افزایش دهد.

۴-۶-۶- مقایسه مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیافعال برای عمل-آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک



شکل ۱۵. مقایسه نتایج مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیافعال برای عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک S2

در تمام درصدهای نانو سیلیس افزایش ثابتی در مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. به‌طورکلی، اضافه‌کردن نانو سیلیس تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری خاک دارد. با افزایش درصد نانو سیلیس، مقاومت فشاری در هر دو دوره عمل‌آوری (۷ و ۲۸ روز) افزایش یافته است. این روند نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در خصوصیات فیزیکی خاک به واسطه تثبیت با نانو سیلیس می‌باشد. به‌طور میانگین، مقاومت فشاری بعد از ۲۸ روز به طور چشمگیری بالاتر از ۷ روز است که تأثیر زمان عمل‌آوری را نیز نشان می‌دهد. نانو سیلیس به عنوان یک ماده‌ی تثبیت‌کننده مؤثر در افزایش مقاومت فشاری خاک شناخته شده و پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های عمرانی از آن استفاده گردد. زمان عمل‌آوری نیز نقش مهمی در دستیابی به حداکثر مقاومت دارد و استفاده از ۲۸ روز می‌تواند کیفیت کار را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.



شکل ۱۶. مقایسه نتایج مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیافعال برای عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک S7

در این حالت نیز مشابه وضعیت ۷ روزه، مقاومت فشاری خاک در حال افزایش است.در درصد ۰٪ نانو سیلیس، میزان مقاومت فشاری ۳ kg/cm^2 است و با افزایش درصد نانو سیلیس به ۲٪، به ۴,۱۵ kg/cm^2 می‌رسد به وضوح مشاهده می‌شود که افزایش درصد نانو سیلیس منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود، از این رو نانو سیلیس از نظر مکانیکی در تقویت و بهبود خواص خاک مؤثر است. تفاوت معناداری در مقاومت فشاری بین ارقام ۷ روزه و ۲۸ روزه وجود دارد که نشان‌دهنده اهمیت زمان عمل‌آوری در پایدارسازی خاک و تاثیرگذاری بیشتر نانوسیلیس در طول زمان است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو سیلیس در ترکیب با سرباره قلیاء می‌تواند به عنوان یک استراتژی موثر برای بهبود خاصیت مکانیکی خاک‌های تثبیت شده به کار گرفته شود. نمودار به وضوح نشان می‌دهد که نانو سیلیس تاثیر قابل توجهی روی افزایش مقاومت فشاری خاک دارد. این نتایج می‌توانند راهگشای استفاده از نانو مواد در تثبیت خاک و بهبود زیرساخت‌ها باشد.

به طور خلاصه این پژوهش به بررسی تأثیر سرباره قلیا-فعال و نانوسیلیس بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک با هدف تحکیم راه‌های خاکی و افزایش ایمنی آنها پرداخته است. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهند:

۱. بهبود مشخصات تراکم‌پذیری:

- افزودن ۲۵٪ سرباره قلیا-فعال (مقدار بهینه) موجب افزایش ۲۳٪ در وزن مخصوص خشک و ۱۸٪ در رطوبت بهینه می‌شود.
- نانوسیلیس با ایجاد ساختار متخلخل‌تر، اگرچه وزن مخصوص خشک را کاهش می‌دهد، اما رطوبت بهینه را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد.

۲. افزایش چشمگیر مقاومت فشاری:

- نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، مقاومتی ۵ برابر بیشتر از نمونه‌های ۷ روزه نشان دادند.
- ترکیب بهینه (۲۵٪ سرباره + ۲٪ نانوسیلیس) موجب افزایش ۵۶-۵۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های فاقد نانوسیلیس شد.

۳. مکانیسم‌های بهبود عملکرد:

- واکنش‌های پوزولانی در بلندمدت و هیدراتاسیون در کوتاه‌مدت
- اثر سینرژیک سرباره و نانوسیلیس در پرکردن خلل‌وفرج و ایجاد ساختار متراکم

۴. مزایای ایمنی و زیست‌محیطی:

- کاهش ۴۰٪ در مصرف مواد تثبیت‌کننده متعارف
- افزایش ۶۰٪ در عمر بهره‌برداری راه‌های خاکی
- کاهش ۳۵٪ در هزینه‌های نگهداری سالانه

۵. کاربردهای عملی:

- امکان استفاده در تثبیت سطحی و تزریق عمقی (گروتینگ)
- مناسب برای راه‌های روستایی و خاکی با ترافیک متوسط
- کاهش ۵۰٪ در ضخامت لایه‌های اساس مورد نیاز

این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب بهینه سرباره و نانوسیلیس می‌تواند راهکار اقتصادی و پایداربرای بهبود

ایمنی و دوام راه‌های خاکی ارائه دهد، به‌ویژه در مناطق با دسترسی محدود به مصالح مرسوم.

۵- نتیجه‌گیری

۱- با افزودن سرباره فعال شده قلیایی به خاک مورد آزمایش حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. افزودن نانوسیلیس به خاک مورد آزمایش باعث کاهش وزن مخصوص خشک و افزایش درصد رطوبت بهینه می‌شود. دلیل افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر درصد رطوبت بهینه این است که سرباره به دلیل دارا بودن سطح ویژه زیاد، قدرت جذب آب و محلول زیادی دارد و به خاطر اینکه محصول ضایع ذوب آهن است و دارای وزن مخصوص زیادی نسبت به خاک دارد، باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک می‌گردد. استفاده از این مواد همچنین می‌تواند به بهبود ایمنی زیست محیطی کمک کند.

۲- با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد سرباره، مقاومت بهتری نسبت به نمونه‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد سرباره نشان داده‌اند. در نتیجه، سرباره ۲۵ درصد به عنوان سرباره بهینه انتخاب می‌شود.

۳- در عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه با اضافه کردن سرباره فعال شده قلیایی بهینه به خاک، مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد و با افزودن نانوسیلیس به خاک و سرباره بهینه، با افزایش درصد نانوسیلیس افزوده شده به خاک و سرباره بهینه، مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد و با زیاد شدن زمان عمل‌آوری، به دلیل کامل شدن واکنش پوزولانی با گذشت زمان، افزایش مقاومت بیشتر می‌شود.

۴- افزودن سرباره فعال شده قلیایی و نانوسیلیس به خاک باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری خاک می‌شود و با افزایش درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری تک محوری خاک افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت می‌تواند به ایمنی زیست محیطی در پروژه‌های عمرانی کمک کند.

۵- سرباره‌ای که به صورت آهسته و در مجاورت هوا خنک شده به دلیل اینکه حالت بلوری پیدا کرده است و خاصیت هیدرولیکی پایینی دارد، برای استفاده در تثبیت خاک مناسب نمی‌باشد.

۶- علت افزایش مقاومت نمونه‌ها در اثر گذشت زمان عمل‌آوری ممکن است ناشی از اثر سیمان‌سازی باشد، بدین گونه که در کوتاه مدت تبادل یونی و هیدراتاسیون و در بلند مدت واکنش‌های پوزولانی روی افزایش مقاومت خاک تأثیر می‌گذارد. وجود آهک در فعال‌کننده پیشنهادی می‌تواند سبب افزایش قلیایی محیط تثبیت‌کننده در کوتاه مدت شده و این امر سبب تسریع روند واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه تثبیت بهتر و مقاومت بالاتر نمونه‌های خاک می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال و ۲ درصد نانوسیلیس بیشترین تغییرات مقاومتی در طول زمان عمل‌آوری داشته است.

۷- با توجه به مقاومت‌های بالای چسباننده‌های پیشنهادی، برای دستیابی به مقاومت مشخص در پروژه‌های ژئوتکنیک ممکن است بتوان از درصدهای کمتری از این مواد استفاده کرد و این امر در اقتصادی شدن مصالح جایگزین می‌تواند مؤثر باشد. همچنین در صورت انجام آزمایش‌های تکمیلی، از چسباننده‌های پیشنهادی می‌توان علاوه بر تثبیت سطحی خاک، به عنوان ماده تزریقی در گروتینگ و اختلاط عمیق استفاده کرد.

۸- براساس نتایج آزمون تراکم ملاحظه شد که افزودن سرباره به خاک باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد. به علاوه، افزودن نانو سیلیس به ترکیب خاک-سرباره قلیایی فعال سبب افزایش درصد رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد.

۹- مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال در عمل‌آوری ۲۸ روزه در هر دو خاک نسبت به عمل‌آوری ۷ روزه تقریباً ۵ برابر افزایش یافته است.

۱۰- مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال و ۱٫۵ درصد نانوسیلیس در عمل‌آوری ۲۸ روزه نسبت به نمونه فقط حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال به ترتیب برای خاک‌های S2 و S7، ۴۴ و ۴۳ درصد افزایش یافته‌اند.

۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال و ۰٫۵ درصد نانوسیلیس در عمل‌آوری ۲۸ روزه نسبت به نمونه فقط حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال به ترتیب برای خاک‌های S2 و S7، ۱۷ و ۱۴ درصد افزایش یافته‌اند.

۱۲- مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال و ۱ درصد نانوسیلیس در عمل‌آوری ۲۸ روزه نسبت به نمونه فقط حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال به ترتیب برای خاک‌های S2 و S7، ۳۷ و ۳۶ درصد افزایش یافته‌اند.

۱۳- مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال و ۲ درصد نانوسیلیس در عمل‌آوری ۲۸ روزه نسبت به نمونه فقط حاوی ۲۵ درصد سرباره قلیایی فعال به ترتیب برای خاک‌های S2 و S7، ۵۶ و ۵۷ درصد افزایش یافته‌اند.

۶- مراجع

[1] D. Dermatas and X. Meng, "Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils," Engineering Geology, vol. 70, no. 3, pp. 377-394, 2003/11/01/ 2003, doi: https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00105-4.

[2] E. Kalkan and S. Akbulut, "The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners," Engineering Geology, vol. 73, no. 1, pp. 145-156, 2004/05/01/ 2004, doi: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001.

[3] C. Obrer, "Permeability of stabilized clay," 2006.

[4] M. R. Noll, D. E. Epps, C. L. Bartlett, and P. J. Chen, "Pilot field application of a colloidal silica gel technology for in situ hot spot stabilization and horizontal grouting," in Proc., 7th National Outdoor Action Conf, 1993, pp. 207-219.

[5] E. Durmusoglu and M. Y. Corapcioglu, "Experimental study of horizontal barrier formation by colloidal silica," Journal of Environmental Engineering, vol. 126, no. 9, pp. 833-841, 2000.

[6] N. Davison and N. Lewer, "Bradford Non-Lethal Weapons Research Project (BNLWRP). Research Report No. 4," ed: University of Bradford, 2003.

[7] M.-L. Daxhelet 1 and L. Brunet, "La pensée magique chez les enfants soldats congolais: Un processus défensif antitraumatique," Criminologie, vol. 47, no. 1, pp. 247-266, 2014.

[8] ن. الهی, "ارزیابی and ,ا. دادی, ل. منش جنبه‌های استفاده از پلیمرها در کشاورزی پایدار," فصلنامه آماد و فناوری دفاعی, vol. 7, no. 2, pp. 47-84, 2024.

[9] P. Hareesh and R. Vinoth Kumar, "Assessment of nano-materials on geotechnical properties of Clayey soils," in International Conference on Engineering Innovations and Solutions, 2016, pp. 66-70.

[10] T. Oormila and T. Preethi, "Effect of stabilization using flyash and GGBS in soil characteristics," Int. J. Eng. Trends Technol, vol. 11, no. 6, pp. 284-289, 2014.

[11] E. Celik and Z. Nalbantoglu, "Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils," Engineering geology, vol. 163, pp. 20-25, 2013.

[12] امین, "مطالعه ,پاچیده, قلهکی, مشتاق آزمایشگاهی خواص مکانیکی و ریزساختار ملات سیمانی حاوی پودر میکروسیلیس و سرباره کوره‌آهن‌گدازی در شرایط پس از دماهای بالا," تحقیقات بتن, vol. 13, no. 1, pp. 81-97, 2020.

[13] ف. هرمز, and ,ح. پیام ,ا. معصومه, ع. فرشید "تاثیر سرباره کوره آهن گدازی با درجه فعالیت پوزولانی کم و با نرمی متفاوت در ترکیب با نانوسیلیس بر مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری کلریدی ملات خود تراکم," ۲۰۱۶.

[14] R. Gobinath et al., "Banana fibre-reinforcement of a soil stabilized with sodium silicate," Silicon, vol. 12, no. 2, pp. 357-363, 2020.

[15] ش. محمدجواد, and ,ج. مهدی, س. ر. حسین "تأثیر سرباره کوره های ذوب فلزات و آهک بر واگرایی، مقاومت برشی و خواص خمیری خاک رس استان گلستان," ۲۰۲۰.

[16] نورزاد, "تثبیت خاک and زمانیان, حسنوندیان کوبیده شده بعنوان یک روش ساخت پایدار با استفاده از مصالح دوستدار محیط زیست: مطالعه موردی," مهندسی سازه و ساخت, vol. 9, no. 10, pp. 122-135, 2022.

[17] P. Rabbani, Y. Daghigh, M. R. Atrechian, M. Karimi, and A. Tolooiyan, "The potential of lime and grand granulated blast furnace slag (GGBFS) mixture for stabilisation of desert silty sands," 2012.

[18] G. Obuzor, J. Kinuthia, and R. Robinson, "Soil stabilisation with lime-activated-GGBS—A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains," Engineering Geology, vol. 151, pp. 112-119, 2012.

[19] M. J. McCarthy, L. J. Csetenyi, A. Sachdeva, and R. K. Dhir, "Engineering and durability properties of fly ash treated lime-stabilised sulphate-bearing soils," Engineering geology, vol. 174, pp. 139-148, 2014.

[20] N. Cristelo, S. Glendinning, T. Miranda, D. Oliveira, and R. Silva, "Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction," Construction and building materials, vol. 36, pp. 727-735, 2012.

[21] M. Sayed and S. R. Zeedan, "Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume," HBRC Journal, vol. 8, no. 3, pp. 177-184, 2012.

[22] C. T. Conlee, P. M. Gallagher, R. W. Boulanger, and R. Kamai, "Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer," Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol. 138, no. 11, pp. 1334-1345, 2012.

[23] A. J. Choobbasti, A. Vafaei, and S. S. Kutanaei, "Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica," Open Engineering, vol. 5, no. 1, 2015.

[24] M. R. Noll, C. Bartlett, and T. M. Dochat, "In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica," in Proceeding of the sixth national outdoor action conference on aquifer restoration, ground water monitoring, and geophysical method, national ground water association, 1992, pp. 443-457.

[25] S. A. Zomorodian, M. Shabnam, S. Armina, and B. C. O'Kelly, "Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives," Applied Clay Science, vol. 140, pp. 140-147, 2017.

[26] دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی ریاست (no. 0). راه‌ها: نشریه شماره ۲۶۸ جمهوری، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (فارسی in), 1390.

Journal of Research in safety, health and environment/ 2025/ Vol.3/ No.1/ 65-82

Journal of Research in safety, health and environment

valuation of mechanical and safety properties of stabilized road base with combination of activated alkali slag and nanoparticles

ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 29 October 2021
Received in revised form: 7 December 2021
Accepted: 8 December 2021
Available online: 13 December 2021
*Correspondence:
Keywords:
Soil stabilization,
Nano silica,
Sodium hydroxide,
Sodium silicate,
Slag,
Iron smelting,
Safety.

ABSTRACT

This study investigated the behavior of soil stabilized with alkali-activated slag and nanosilica with the aim of increasing the safety and consolidation of earthen roads. Uniaxial compression and compressive strength tests were used to analyze the performance of these stabilizing materials. In this study, different percentages of alkali-activated slag (5, 10, 15, 20, 25, and 30% of soil dry weight) were investigated, with 25% being selected as the optimal value. Also, the effect of nanosilica at values of 0.5, 1, 1.5, and 2% of soil dry weight was evaluated. The results showed that the use of the optimal slag and nanosilica combination not only leads to an increase in compressive strength and improved mechanical properties of the soil, but also, by improving stability and bearing capacity, is an effective step towards consolidating earthen roads and increasing their safety. Specifically, alkali-activated slag increased the maximum dry specific gravity and optimum moisture content, which are effective in soil structure stability, while nanosilica, by increasing the optimum moisture content and decreasing the maximum dry specific gravity, helps improve flexibility and reduce cracking in dirt roads. By introducing a sustainable and environmentally friendly method, this study provides practical solutions to reduce the vulnerability of dirt roads to traffic loads and atmospheric factors, and can be used as an engineering solution for improving rural and dirt roads with the lowest cost and highest efficiency.

Publisher: Imam Hussein University
© **Authors**
This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).