



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

سید رامتین رضائی^۱، محمد دهنوی^۲، ابولفضل محمدی جانکی^۳

heira@chmail.ir

^۱ کارشناس ارشد ایمنی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران ایران

^۱ دکتری محیط زیست، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران ایران

مشخصات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

Ramtin174@ihu.ac.ir

*نویسنده مسئول:

کلید واژه ها:

تثبیت خاک،

نانو سیلیس،

سدیم هیدروکسید،

سیلیکات سدیم

سرباره،

آهن گذاری،

ایمنی.

این پژوهش به بررسی رفتار خاک تثبیت شده با سرباره قلیا-فعال و نانوسیلیس با هدف افزایش ایمنی و تحکیم راه های خاکی پرداخته است. از آزمایش های تراکم و مقاومت فشاری تک محوری برای تحلیل عملکرد این مواد تثبیت کننده استفاده شده است. در این مطالعه، درصد های 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 می شود، بلکه با بهبود پایداری و ظرفیت باربری، گامی مؤثر در جهت تحکیم راه های خاکی و افزایش ایمنی آنها محسوب می شود. به طور 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 انعطاف پذیری و کاهش ترک خوردگی در راه های خاکی کمک می کند. این مطالعه با معرفی یک روش پایدار و دوست دار محیط زیست، راهکارهایی عملی برای کاهش آسیب پذیری راه های خاکی در برابر بارهای ترافیکی و عوامل جوی ارائه می دهد و می تواند به عنوان یک راه حل مهندسی برای بهسازی راه های روستایی و خاکی با کمترین هزینه و بیشترین کارایی مورد استفاده قرار گیرد.



۱- مقدمه

زمینه حفظ ایمنی سازه‌ها، از این‌رو 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 تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای است تولید سیمان، طبق اعلام سازمان بین‌المللی انرژی (TEA) علاوه بر اضافه کردن گاز CO₂ (تقریباً 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 باران‌های 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 تقریباً ۱,۵ تن مواد اولیه خام مورد نیاز است [۳]. با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی و خصوصاً 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

با رشد و توسعه شهرها و جاده‌ها، زمین‌های مناسب جهت ساخت‌وساز کمیاب شده‌اند و به تبع آن مهندسين عمران و به‌خصوص متخصصین ژئوتکنیک را وادار به ساخت‌وساز در زمین‌های نامرغوب و غیرمعارف نموده‌اند. این امر مهندسين 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 توجه فنی و اقتصادی به‌کارگیری این مواد، بسیار بیشتر از جنبه زیست‌محیطی آن، مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک است، به‌خصوص در

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 قلیا فعال 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 قرار دادند. 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 خاک‌های 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.

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 کلئیدی 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].

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	۲۵-۱۵	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 اودومتر	آهن گدازی	سلیک و همکاران [۱۱]
رس	آتربرگ، CBR تراکم، تراکم	۲۰-۵	۲۰	نفوذ در خاک‌های معمولی در نفوذ ۲،۵ میلیمتر	سرباره کوره آهن گدازی	پاچیده و همکاران [۱۲]
ماسه	تراکم	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 کالیفرنای استحکام UCS) برشی در برابر استحکام برشی)	سدیم سیکیات	گوبینا و همکاران [۱۴]
رس	مشخص کردن واگرایی خاک	۵، ۳، ۱، ۰، ۵	۵	آزمایش‌های کرامپ (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	۷، ۵، ۱۰، ۵	۱۰	مقاومت کششی به روش دو نیم کردن استوانه، مقاومت فشاری با اعمال تنش محوری به نمونه	سربار کوره آهن	زمینیان و همکاران [۱۶]
ماسه سیلتی	CBR	۵، ۱۰، ۱۵	۱۰	قالب‌ها در پنج لایه مساوی پر شدند و هر لایه با ۳۰، ۱۰، ۳ و ۶۵ ضربه چکش متراکم شد	سربار کوره آهن	پرهام و همکاران [۱۷]
رس	مقاومت فشاری محصور نشده	۱۶-۰	۱۲	نمونه‌های تست استوانه‌ای فشرده با قطر ۵۰ میلی متر و به طول ۱۰۰ میلی متر	سربار کوره آهن	ابوذر و همکاران [۱۸]
رس	مقاومت فشاری محصور نشده	۹-۶-۳	۶	با استفاده از دستگاه UCS اندازه‌گیری با نرخ بارگذاری ۱ Instron تست 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	۶-۵-۴-۳	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	۱۰ درصد تا ۱۰۰ درصد	۹	تست‌های سانتیفرژی	نانوسیلیس	کانل و همکاران [۲۲]
ماسه	تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده	۱۰ درصد تا ۱۰۰ درصد	۹	یک نمونه استوان‌های فشرده	سیمان و نانوسیلیس	چوباستی و همکاران [۲۳]
ماسه	افزایش چسبندگی و همبستگی بین ذرات	۵ درصد تا ۱۰ درصد	۵	ویسکوزیته	نانوسیلیس	نول و همکاران [۲۴]
رس	مقاومت فشاری محدود نشده UCS	۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰	۱، ۵	های با قطر ۳۸ میلی متر × طول نمونه ۷۶ میلی متر	نانوسیلیس	زمردیان و همکاران [۲۵]

۳- مواد و روش ها

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 به طور کلی بر اساس آزمایشهای آزمایشگاهی استوار است. ابتدا یک سری آزمایشهای شاخص جهت تعیین خصوصیات خاک جاده روستای چنار (منطقه آبسرد) انجام می شود و سپس تکثیر نانو سیلیس بر روی خاک با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱. محل نمونه برداری

۱-۳- 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 مصوبه 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 می شود.

۳-۳- سیمان

همانطور که در جدول ۱ مشخصات شیمیایی ماده تشکیل دهنده سیمان مصرفی با توجه به درصد وزنی مشاهده می شود.

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 ₂ O ₃	۳/۵۵
Al ₂ O ₃	۴/۸	MnO	۰/۲۲۴
MgO	۳/۹	TiO ₂	۰/۳۳
Na ₂ O	۰/۱۸	CaO	۶۲/۸
-	-	KO ₂	۰/۵۱

۳-۴- خاک

دو نوع خاک نام گذاری 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

۵-۳- نانوسیلیس

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

جدول ۳. مشخصات نانوسیلیس کلئیدی

فرمول	وزن	اندازه	سطح	pH	رنگ
شیمیایی	مولکولی	ذرات	خاص		

جدول ۵. مشخصات سدیم هیدروکسید

ماده	مقدار مورد نیاز	نتیجه
NaOH	%۹۹ Min	%۹۹
Na ₂ CO ₃	%۰/۰۵ Max	%۰/۱۰
Fe ₂ O 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 ₂ SiO ₃
وزن مولکولی	۱۲۲/۰۶۲ g/mol
چگالی	۲/۶۱ g/L
نقطه ذوب	۱/۰۸۸ °C
حلالیت در آب (۲۵ درجه)	گرم/۱۰۰ میلی لیتر ۲۲/۲

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 ذوب آهن 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

سفید	۲۵۰	۲۰-۱۰	۶۰/۰۸	SiO ₂ nH ₂ O
شیری	۱۰	m/g ²	g/mol	

۳-۶- سرباره آهن‌گذاری

سرباره استفاده شده در این تحقیق از کوره شماره ۲ کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده که توسط شرکت بنا بنیان زیست فناوری 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 جدول ۳. ارائه شده است.

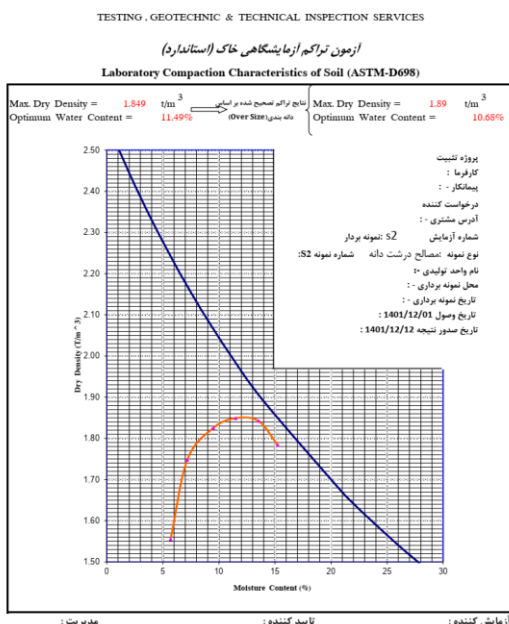
جدول ۴. ترکیبات شیمیایی سرباره آهن‌گذاری

خواص فیزیکی و شیمیایی	درصد
CaO	۳۵/۵
SiO ₂	۳۴/۶
Al ₂ O ₃	۱۰/۳
MgO	۱۱/۵
Fe ₂ O 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.

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 به دست آوردن این درصد رطوبت وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک پس از به کار بردن 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 اضافه کردن 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.

آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری تک محوری تعریف شده است.

۳-۱۰- مشخصات اندازه ذرات خاک

باتوجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های دانه‌بندی، طبقه‌بندی خاک‌ها به صورت زیر است:

جدول ۷. تقسیم‌بندی خاک

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

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 لس آنجلس (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

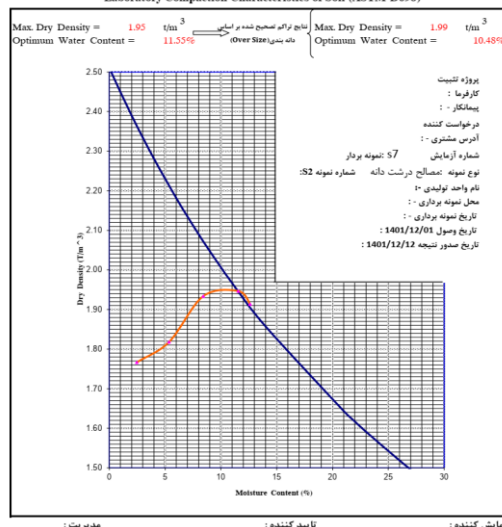
جدول ۱۰. آزمایش لس آنجلس

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

TESTING, GEOTECHNICAL & TECHNICAL INSPECTION SERVICES

آزمون تراکم آزمایشگاهی خاک (استاندارد)

Laboratory Compaction Characteristics of Soil (ASTM-D698)



شکل ۴. گزارش تراکم خاک S7

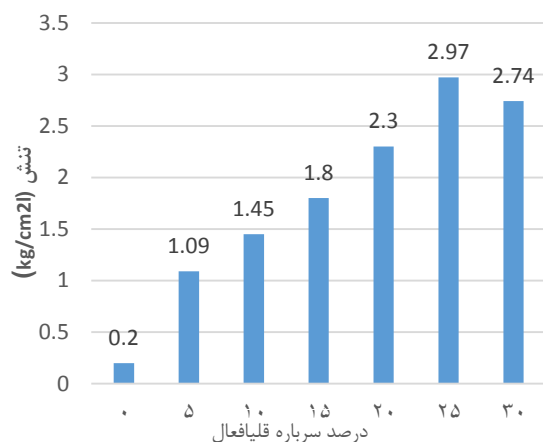
با افزایش محتوای رطوبت، چگالی حجمی خشک در ابتدا افزایش می‌یابد تا به حداکثر نقطه خود برسد و سپس به‌تدریج کاهش می‌یابد. این نمودار کمک می‌کند تا بتوانیم ویژگی‌های مکانیکی خاک را پیش‌بینی کنیم. چگالی حجمی خشک حداکثری و رطوبت بهینه می‌تواند برای طراحی سازه‌ها و تحلیل پایداری مهم باشد.

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

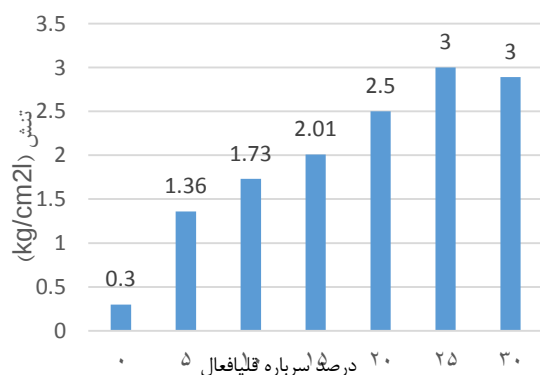
(ASTM D ۲۴۱۹)

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



شکل ۵. نمودار مقاومت تک محوری برای درصد مختلف سرباره قلیا فعال برای عمل آوری ۷ روزه خاک s2

با افزایش درصد سرباره قلیایی فعال، مقاومت فشاری خاک ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش پیدا می‌کند. این نشان‌دهنده یک نقطه بهینه برای درصد سرباره است که بیشترین مقاومت را ایجاد می‌کند. بیشترین مقاومت حدود 3.5 kg/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 قلیا فعال برای عمل آوری ۷ روزه خاک s7

۵-۴- 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

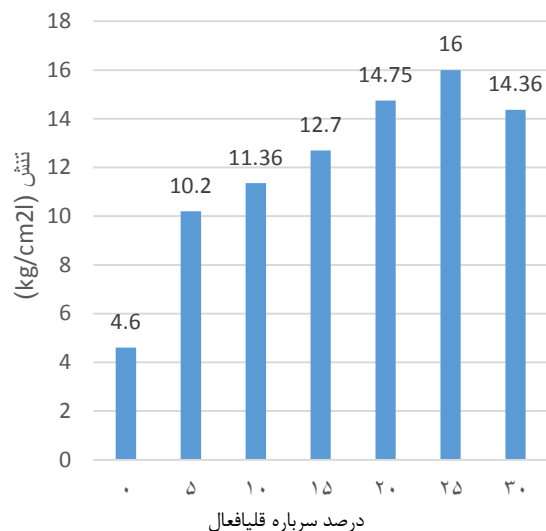
نمونه	S2	S7
%SO4	۰/۱۵	۰/۱۸
pH	۸/۲۵	۸/۱۵
Oraganic	۰/۱۷	۰/۳۲

۶-۴- 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 نمونه‌ها تهیه گردید. نمونه‌ها به مدت ۷ و ۲۸ روز تحت شرایط عمل‌آوری نگهداری 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



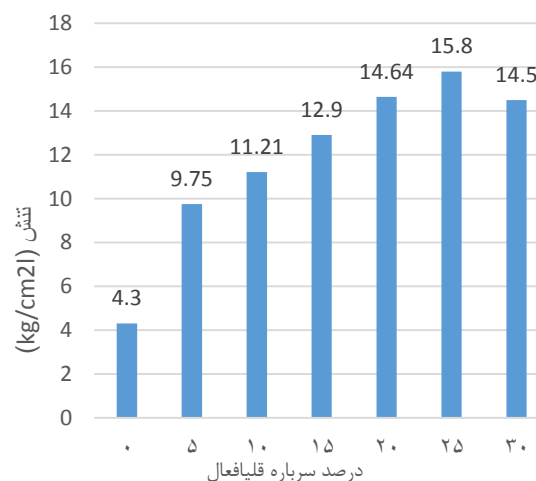
شکل ۸. نمودار مقاومت تک محوری برای درصد مختلف سرباره قلیا فعال برای عمل آوری ۲۸ روزه S7

حداکثر مقاوم 16 kg/cm^2 در ۵٪ سرباره مشاهده می شود. نقطه بهینه با ۵٪ سرباره با مقاومت (16 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 یون های قلیایی بهبود ساختار خاک از طریق پر کردن 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 (به ویژه در درصدهای بالا) منجر به نواحی با مقاومت متغیر می شود واکنش های ثانویه احتمال تشکیل ترکیبات نامطلوب مانند هیدروکسید کلسیم در درصدهای بالا دارد.

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

مقاومت فشاری خاک با افزودن سرباره قلیایی فعال ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می یابد حداکثر مقاومت 3 kg/cm^2 در محدوده ۵٪ سرباره مشاهده می شود. در ۳۰٪ سرباره، مقاومت به حدود 1 kg/cm^2 یا کمتر کاهش می یابد. علل احتمالی کاهش مقاومت در درصدهای بالای سرباره کاهش تراکم خاک به دلیل جایگزینی بیش از حد سرباره، واکنش های ثانویه نامطلوب که باعث تضعیف ساختار خاک می شوند و عدم توزیع یکنواخت سرباره در خاک.

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

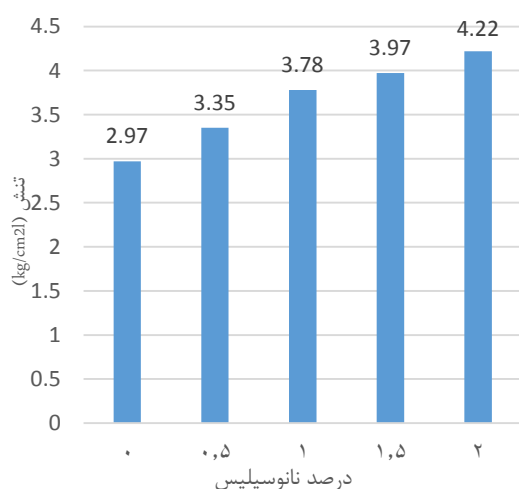


شکل ۷. نمودار مقاومت تک محوری برای درصد مختلف سرباره قلیا فعال برای عمل آوری ۲۸ روزه S2

مقاومت با افزودن سرباره ابتدا به شدت افزایش یافته و سپس روند کاهشی پیدا می کند. حداکثر مقاومت 15.8 kg/cm^2 در ۵٪ سرباره مشاهده می شود. در درصدهای بالاتر (۱۵-۳۰٪)، مقاومت حدود به $14.5-9 \text{ kg/cm}^2$ کاهش می یابد، اما همچنان بسیار بالاتر از مقاومت های ۷ روزه است. علل افزایش مقاومت در ۲۸ روز تکمیل واکنش های پوزولانی بین سرباره و خاک. تشکیل سیلیکات های کلسیم هیدراته (C-S-H) که باعث افزایش پیوندهای شیمیایی می شود.

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 روز ۹۰-۹۵٪ تکمیل واکنش است.

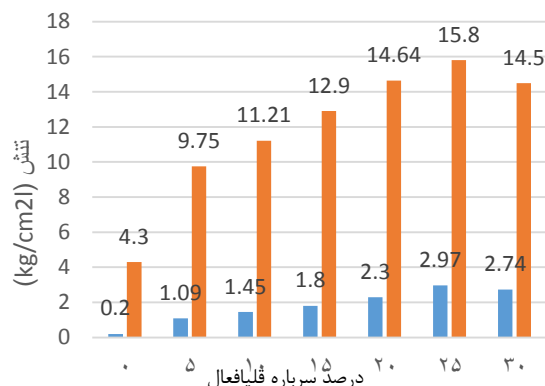
۴-۶-۴- مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها برای عمل آوری ۷ روزه



شکل ۱۱. مقاومت تک محوری برای درصد مختلف

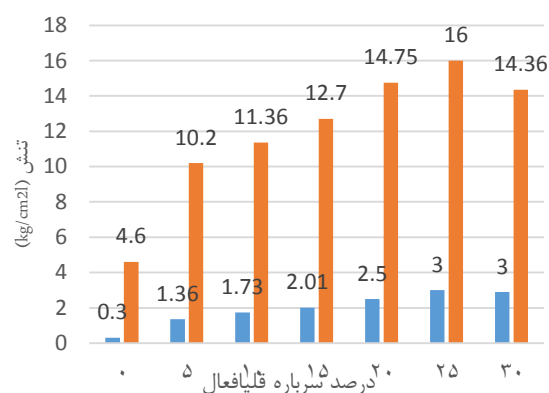
نانوسیلیس و سرباره قلیا فعال برای عمل آوری ۷ روزه خاک S2

با افزایش درصد نانو سیلیس از ۰٪ به ۲٪، مقدار مقاومت تک‌محوری به طور پیوسته افزایش یافته 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

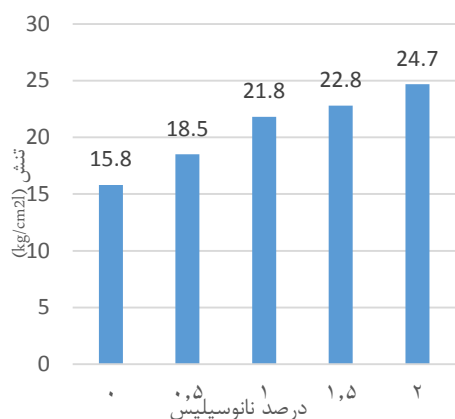


شکل ۹. مقایسه نتایج مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیا فعال برای عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک S2

مقاومت‌ها در محدوده 1.09 تا 2.97 kg/cm^2 مشاهده می‌شوند. در ۵٪ سرباره حداکثر مقاومت 2.97 kg/cm^2 ثبت شده است. با افزایش درصد سرباره به ۲۰٪ مقاومت به 8.1 g/cm^2 کاهش می‌یابد. در ۵٪ سرباره، مقاومت ۲۸ روزه ≈ 5 برابر مقاومت ۷ روزه است. تشکیل فازهای C-S-H و C-A-S-H که 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.



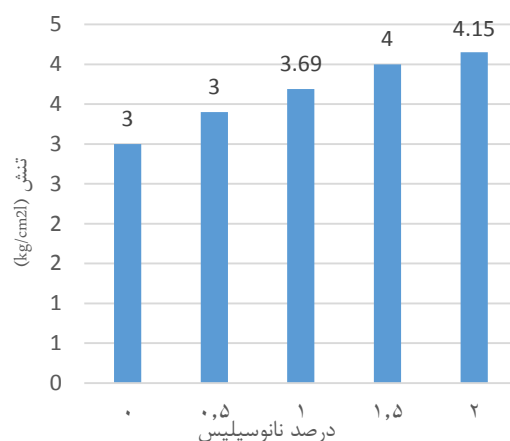
شکل ۱۰. مقایسه نتایج مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیا فعال برای عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک S7



شکل ۱۳. مقاومت تک محوره برای سرباره و درصد مختلف نانوسیلیس برای عمل آوری 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 15.8 kg/cm^2 به 18.5 kg/cm^2 افزایش یافته است. افزایش میزان نانوسیلیس تا ۱٪، مقاومت را به 21.8 kg/cm^2 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 21.8 kg/cm^2 به 22.8 kg/cm^2 و سپس به 24.7 kg/cm^2 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.

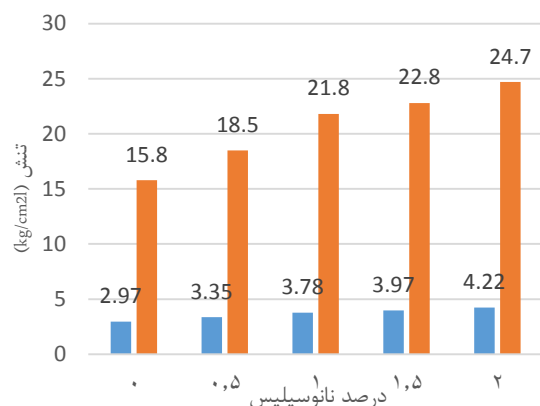
امر برای پروژه‌های مهندسی و ساخت‌وساز بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۱۴. مقاومت تک محوری برای درصد مختلف نانوسیلیس و سرباره قلیا فعال برای عمل آوری ۷ روزه خاک S7

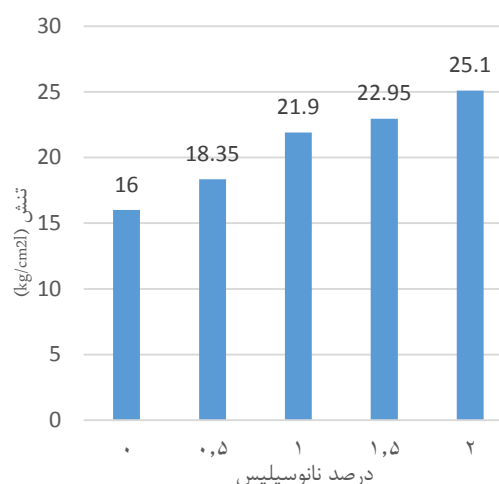
در ابتدا با افزایش درصد نانو سیلیس از ۰ به ۱.۵ درصد، شاهد افزایش قابل توجهی در مقدار مقاومت هستیم. پس از ۱.۵ درصد، به مقدار 4.15 kg/cm^2 در ۲ درصد نانوسیلیس می‌رسیم که نشان‌دهنده ادامه‌ی افزایش ولی با شیب کمتری است. نانوسیلیس به علت خواص اصلاحی خود در بهبود ساختار دانه‌های خاک و افزایش چسبندگی می‌تواند 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 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. به‌طور کلی، 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 ۱۴. مقاومت تک محوره برای سرباره و درصد مختلف نانوسیلیس برای عمل‌آوری ۲۸ روزه خاک S7

به‌طور کلی، با افزایش درصد نانو سیلیس، مقاومت تک‌محوری خاک نیز افزایش یافته است. مقادیر مقاومت در برابر نانو سیلیس صفر برابر با 16 kg/cm^2 است و با افزایش درصد نانو سیلیس به ۲ درصد به 25.1 kg/cm^2 می‌رسد. وجود نانو سیلیس در خاک باعث بهبود قابل‌توجهی در مقاومت تک‌محوری می‌شود. با وجود اینکه 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 عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه خاک

- 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 خلل و فرج و ایجاد ساختار متراکم

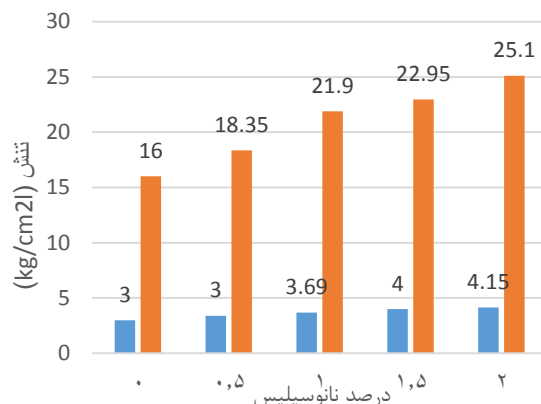
۴. مزایای ایمنی و زیست‌محیطی:

- 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 پایدار برای بهبود



شکل ۱۶. مقایسه نتایج مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سرباره قلیا فعال برای عمل‌آوری 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 3 kg/cm^2 است و با افزایش درصد نانو سیلیس به ۲٪، به 4.15 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 پایداری سازی 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:

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 بهینه می‌گردد. به علاوه، افزودن نانو سیلیس به ترکیب خاک-سرباره قلیایی فعال سبب افزایش درصد رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک بهینه 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.

- 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 آما 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 باچیده، قلهکی، مشتاق آزمایشگاهی خواص مکانیکی و ریزساختار ملات سیمانی حاوی پودر میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی در شرایط پس از دماهای بالا،" *تحقیقات بتن*, vol. 13, no. 1, pp. 81-97, 2020.
- [13] ف. هرمز، and ج. پیام، ا. معصومه، ع. فرشید "تأثیر سرباره کوره آهن‌گدازی 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.
- 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](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

- [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 (فارسی in), 1390.
- [16] نورزاد، "تثبیت خاک and زمانیان، حسنونیدیان کوبیده شده بعنوان یک روش ساخت پایدار با استفاده از مصالح دوستدار محیط زیست: مطالعه موردی," *موردی*, 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.



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.