ارزیابی تاثیر نانو ایلیت بر تراکم‌پذیری و حدود آتربرگ خاک لس (رس سیلتی)، شهرستان گنبد کاووس (استان گلستان)

رسول یازرلو [۱]، امین جمشیدی [۲*]، میلاد عزیزی [۳]، سید عبدالقادر امان‌زاده [۴]

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گنبدکاوس، گنبدکاوس
۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد
۳- کارشناس‌ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تنکابن، تنکابن
۴- کارشناس‌ارشد مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی شمس گنبدکاوس، گنبدکاوس

نویسنده مسئول : jamshidi.am@lu.ac.ir *

دریافت: ۹۹/۱۰/۲۷ پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۳ نوع مقاله: کاربردی

چکیده

خاک‌های لسی (رس سیلتی CL-ML) از مهم‌ترین خاک‌های مسئله‌دار هستند که باعث مخاطرات زمین‌شناسی مختلفی در سطح جهان و به ویژه کشور ایران شده‌اند. بنابراین ضرورت ایجاد می‌کند برای کاهش مخاطرات زمین‌شناسی اینگونه خاک‌ها، تغییراتی در خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها صورت گیرد. هدف از پژوهش حاضر تاثیر نانوایلیت بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس شامل حدود آتربرگ و تراکم‌پذیری است. به این منظور یک نمونه خاک لس از شهرستان گنبدکاووس استان گلستان تهیه و آزمایش‌های ژئوتکنیکی شامل حدود آتربرگ و تراکم روی آن انجام شد. آزمایش‌ها در نمونه‌های خاک با درصدهای ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ نانوایلیت صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در آزمایش حدود آتربرگ، حد خمیری از ۱۹ درصد (بدون نانوایلیت) به ۳۶ درصد (در ۸ درصد نانوایلیت) و حد روانی از ۲۶ درصد (بدون نانوایلیت) به ۴۰ درصد (با ۸ درصد نانوایلیت) افزایش پیدا کرده‌اند. همچنین در آزمایش تراکم حداکثر وزن واحد حجم خشک از ۱/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب (بدون نانوایلیت) تا ۱/۹۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب (در ۲ درصد نانوایلیت) افزایش و پس از آن به ۱/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب (در ۴ درصد نانوایلیت) کاهش، در صورتی که رطوبت بهینه به طور پیوسته با افزایش مقدار نانوایلیت از صفر به ۴ درصد به ترتیب از ۱۲ تا ۱۲/۹ درصد افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: خاک لس، نانوایلیت، تراکم‌پذیری، حدود آتربرگ

۱- پیشگفتار

خاک لس از جمله خاک‌های مسأله‌دار محسوب شده که بایستی قبل از اجرای پروژه در آن، نسبت به اصلاح یا بهبود برخی از مشخصات ژئوتکنیکی آن اقدام کرد. بیش از ۴۰۷ هزار هکتار از مساحت استان گلستان، یعنی بیش از ۳۲ درصد از کل سطح استان را انواع خاک لس با ویژگی‌های رسوب‌شناسی و ژئوتکنیکی متمایز پوشانده است (رضایی، ۱۳۹۲). ساختار و اسکلت لس‌ها در نواحی مختلف، کاملاً با هم متفاوت بوده و تشخیص آن‌ها از یکدیگر به راحتی امکان‌پذیر می‌باشد.

در بسیاری از پروژه‌ها که در سطح استان گلستان اجرا شده، به دلیل عدم توجه کافی به خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس با مشکلات فراوانی مواجه شده‌اند. این موضوع در برخی مناطق روستایی که بر روی این نوع خاک احداث شده‌اند، نمود بیش‌تری داشته است. مخاطراتی مانند رمبندگی، فرونشست، واگرایی، فرسایش‌پذیری و زمین لغزش در لس‌های گلستان گزارش شده است. در استان گلستان، لس‌ها با توجه به گستردگی زیاد آن‌ها و قرار گرفتن بسیاری از روستاها بر روی آن و گزارش‌های زیادی که از مخاطرات آن ثبت شده، بایستی مورد توجه بیش‌تری قرار گیرد. یکی از روش‌های بهسازی رفتار مکانیکی خاک و بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک لس به منظور کاهش مخاطرات زمین‌شناسی، استفاده از مواد افزودنی است (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ گالاگر و همکاران، ۲۰۰۷؛ پاتریکیا و همکاران، ۲۰۰۷؛ لین و همکاران، ۲۰۰۷؛ لامبه و ویتما، ۲۰۰۷؛ بورتون، ۲۰۰۹؛ مجید و طاها، ۲۰۱۱؛ بهمنی و همکاران، ۲۰۱۴). به علت ساختار ریزدانه خاک‌های لسی، کاربرد نانو ذرات کارایی بیش‌تری را ایجاد

می‌کند. نانو مواد به عنوان موادی تعریف می‌شوند که میکروساختارهایی هستند که حداقل یک بعد آن‌ها در مقیاس نانومتر است. در مقیاس نانو، خصوصیات الکترونیکی، مغناطیسی، اپتیکی و شیمیایی تغییر می‌یابد (ژانگ، ۲۰۰۷). مشخصه اصلی نانوذرات، اندازه کوچک، توزیع دانه‌بندی با یک سطح پایین آگلومراته شدن و قابلیت پخش بالاست. این ویژگی‌های منحصر به فرد نانو ذرات سبب شده است که فناوری نانو در عمده علوم وارد شده و بسیاری از مشکلات مربوطه را حل نماید. خوشبختانه علم مهندسی ژئوتکنیک نیز از این قاعده مستثنی نمانده و در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی جهت کاربرد این فنآوری نوین در شاخه‌های مختلف ژئوتکنیک شده است.

تاکنون تحقیقاتی در ارتباط با بهسازی انواع خاک‌های مختلف با مواد افزودنی مانند سیمان، قیر، خاکستر، آهک و انواع مختلف نانو ذرات انجام شده است. امروزه استفاده از مواد افزودنی نانو ذرات به دلیل کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی نسبت به سایر مواد افزودنی کاربرد گسترده‌تری در بهبود کیفیت خاک‌های مسئله‌دار پیدا کرده است. قاضی (۱۳۸۹) گزارش کرده است که نانومونت‌موریلونیت اصلاح شده حد روانی را به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داده است. لذا افزودن نانومونت‌موریلونیت اصلاح شده موجب افزایش دامنه خمیری خاک شده است. همچنین افزودن ۸ درصد وزنی مونت‌موریلونیت به خاک رسی، دامنه خمیری خاک را حدود ۶۸ درصد افزایش داده است که می‌تواند در سدهای خاکی با هسته رسی بسیار مفید باشد. این محققین همچنین مقادیر مختلف مونت‌موریلونیت بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رسی را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان‌دهنده افزایش معنادار این پارامتر است. با افزایش مونت‌موریلونیت مقاومت فشاری تک‌محوری یک افزایش ۳۴/۲ درصد نسبت به حالت بدون افزودنی پیدا کرده است. همچنین اثر افزودن نانو سیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مکعبی خاک رس که با سیمان تثبیت شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر افزایش محسوس در مقاومت نمونه‌های مکعبی با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانو سیلیس می‌باشد. تحقیقاتی توسط به‌روزساروکلائی (۱۳۹۲) درخصوص افزودن نانو مواد دیگری از قبیل نانو سیلیس و نانو آلومینیوم بر روی خاک لس جهت یافتن بهترین درصد اختلاط این مواد با خاک لس جهت بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری آن صورت داده است. قاضی‌زاده (۱۳۹۲) به مطالعه رفتار هیدرومکانیکی و برشی خاک‌های فروریزشی (مطالعه موردی خاک لس گرگان) با استفاده از دستگاه سه‌محوری با قابلیت اعمال و کنترل مکش ساختاری برروی نمونه‌های بازسازی شده لس گرگان پرداخته است. نتایج این محقق نشان داد در اکثر موارد، نمونه‌ها رفتار مشابه با خاک‌های پیش تحکیم یافته از خود نشان داده‌اند و نمونه‌های بازسازی شده لس گرگان، قابلیت فروریزش زیادی دارند به طوری که تحت تأثیر دو عامل جذب آب و اعمال بار، فروریزش قابل‌ملاحظه‌ای در آن‌ها مشاهده شده است. خسروانی و قربانی (۱۳۹۷) به بررسی تاثیر افزودنی نانورس بر روی رس لای‌دار شهر رشت پرداخته و مشاهده کرده که با افزودن مقدار نانورس، حد خمیری خاک مورد نظر افزایش کمی داشته است ولی حد روانی و دامنه خمیری افزایش چشمگیری داشته است. همچنین نتایج نشان داد که افزودن نانورس باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل خاک مورد نظر شده است. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که پژوهشی در ارتباط با تاثیر نانو ایلیت بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس استان گلستان انجام نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر نانوایلیت بر خصوصیات ژئوتکنیکی شامل حدود آتربرگ، حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه خاک لس شهرستان گنبد کاووس استان گلستان پرداخته شده است.

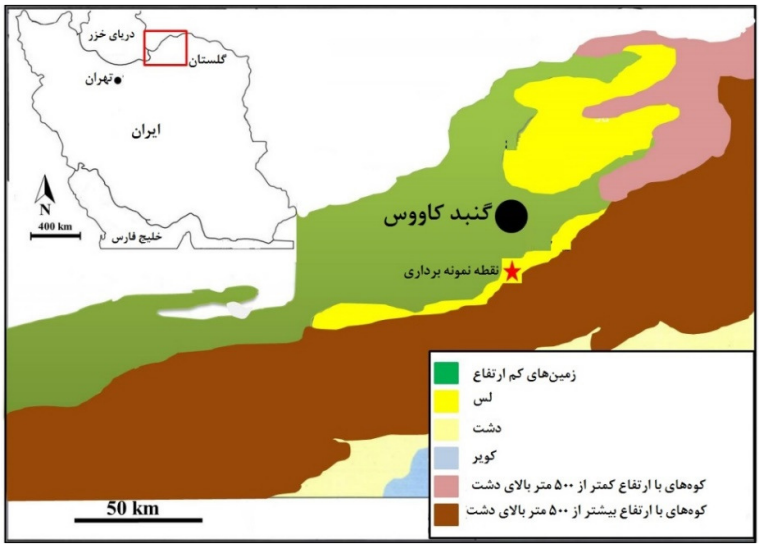
۲- مواد و روش پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر ابتدا نمونه خاک لس از شهرستان گنبد کاووس تهیه شد. به نمونه خاک ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ درصد وزنی نانوایلیت اضافه شد. نمونه خاک در حالت طبیعی (بدون مواد افزودنی) و با ماده افزودنی برای آزمایش‌های حدود آتربرگ و تراکم آماده-سازی شدند. خصوصیات ژئوتکنیکی شامل حد خمیری، حد روانی، شاخص خمیری، حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه در حالت طبیعی و با مواد افزودنی تعیین شدند. داده‌های به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و تاثیر نانوایلیت بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی نمونه خاک لس مورد بررسی قرار گرفت.

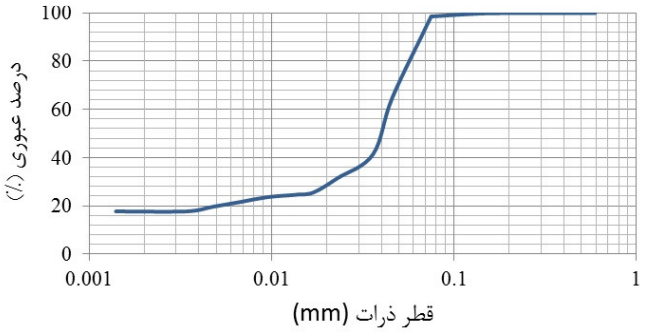
۳- مصالح مورد استفاده

۳-۱- نمونه خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش از شهرستان گنبد کاووس در استان گلستان که در انواع خاک‌های لسی استان از نوع خاک لس سیلتی محسوب می‌گردد، تهیه شده است (شکل ۱). شکل (۲) منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. خاک مورد استفاده براساس طبقه‌بندی روش متحد CL-ML می‌باشد. نمونه خاک مورد مطالعه، در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان گلستان مورد آزمایش‌های ژئوتکنیکی و آنالیز XRF قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول‌های ۱و ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی و نقطه نمونه‌برداری (لشکری‌پور و غفوری، ۲۰۱۹)



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه

شاخص خمیری	حد خمیری (٪)	حد روانی (٪)	وزن مخصوص ذرات	رده خاک	رنگ ظاهری
۶	۲۰	۲۸	۲/۶۹	CL-ML	زرد نخودی
	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	رطوبت بهینه (٪)	وزن واحد حجم خشک حداکثر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقاومت فشاری تک‌محوری (کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب)
	۲۴/۵	۰/۰۷	۱۳/۴	۱/۹۵	۱/۲۲

جدول ۲. نتایج آنالیز XRF بر روی نمونه خاک لس

ترکیب	SiO_2	Al_2O_3	CaO	L.O.I	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	Na_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5
٪	۴۸/۸۰	۱۶/۶۹	۶/۳۸	۷/۳۸	۸/۸۶	۳/۴۳	۵/۰۹	۱/۳۱	۰/۵۸	۰/۱۳	۰/۲۹

۳-۲- نانوایلیت

نانوایلیت مورد استفاده توسط روش آسیاب گلوله‌ای و طی مکانیسم خردکردن تهیه شده است. پودر ایلیت اولیه از کارخانه کاشی تبریز تهیه شده که به خاطر فرآوری شدن، درجه خلوص خیلی بالا (تقریباً ۹۸ درصد) داشت.

۴- آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده روی نمونه خاک

۴-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا نمونه خاک لس بدون هیچگونه افزودنی برای آزمایش‌های حدود آتربرگ و تراکم آماده شد. سپس به نمونه خاک ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ درصد نانوایلیت برحسب وزن خشک خاک اضافه و آزمایش‌ها برای هر نمونه به صورت جداگانه انجام پذیرفت. دلیل انتخاب درصدهای مختلف نانوایلیت این است که در تحقیقات گذشته مقدار نانوایلیت در حدود ۱۰ درصد وزن خشک خاک بوده است. بنابراین در این تحقیق نیز این موضوع معیار قرار گرفت و درصدهای مختلف نانوایلیت انتخاب شدند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌ها ابتدا مقادیر نانوایلیت برحسب درصدهای فوق به نمونه خاک اضافه و خاک توسط همزن برقی با دور کند به مدت حداقل ۱۰ دقیقه هم زده شده و نمونه حداقل به مدت ۴۸ ساعت داخل محفظه‌های پلاستیکی جهت انجام واکنش‌های شیمیایی بین نانو ذرات و ترکیب خاک قرار داده شد.

۴-۲- آزمایش حدود آتربرگ

برای تعیین حدود آتربرگ شامل حد خمیری (PL)، حد روانی (LL) و شاخص خمیری (PI) از استاندارد ASTM (D4318 استفاده شده است. شکل (۳) دستگاه آزمایش کاساگرانده برای تعیین حد روانی را نشان می‌دهد. آزمایش تعیین حدود آتربرگ برای ذرات خاک عبوری از الک شماره #۴۰ (۰/۴۲۵ میلی‌متر) انجام شد. به این منظور ابتدا نمونه خاک لس‌سیلتی بدون هیچگونه افزودنی مورد آزمایش حدود اتربرگ جهت بدست آوردن حد خمیری و حد روانی قرار گرفت. از تفاضل حد روانی و حد خمیری می‌توان شاخص خمیری خاک را به دست آورد (PI=LL-PL). سپس به نمونه خاک ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ درصد نانوایلیت برحسب وزن خشک خاک اضافه و آزمایش حدود آتربرگ برای هر نمونه به صورت جداگانه انجام پذیرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

۴-۳- آزمایش تراکم آزمایشگاهی

در این پژوهش، آزمایش تراکم به روش پروکتور اصلاح شده مطابق استاندارد (ASTM D 698) انجام شد. این استاندارد ارائه دهنده روش تراکم آزمایشگاهی به منظور تعیین ارتباط بین درصد رطوبت و وزن واحد حجم خشک خاک‌ها (منحنی تراکم) می‌باشد. برای تعیین حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه متناظر با آن، ابتدا نمونه خاک لس بدون هیچگونه افزودنی مورد آزمایش تراکم آزمایشگاهی قرار گرفت. سپس به نمونه سپس به نمونه خاک ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ درصد نانوایلیت برحسب وزن خشک خاک اضافه و آزمایش‌های تراکم برای هر نمونه به صورت جداگانه انجام پذیرفت. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌ها ابتدا مقادیر نانوایلیت برحسب درصدهای فوق به نمونه خاک اضافه و خاک توسط همزن برقی با دور کند به مدت حداقل ۱۰ دقیقه هم زده شده و نمونه حداقل به مدت ۴۸ ساعت داخل محفظه‌های پلاستیکی جهت انجام واکنش‌های شیمیایی قرار داده شد. بعد از این مدت، بر روی نمونه‌ها آزمایش‌های تراکم مطابق با استاندارد مربوطه انجام شد. شکل (۴) دستگاه آزمایش تراکم مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. شکل (۵) و جدول (۳) نتایج تراکم آزمایشگاهی روی نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد.

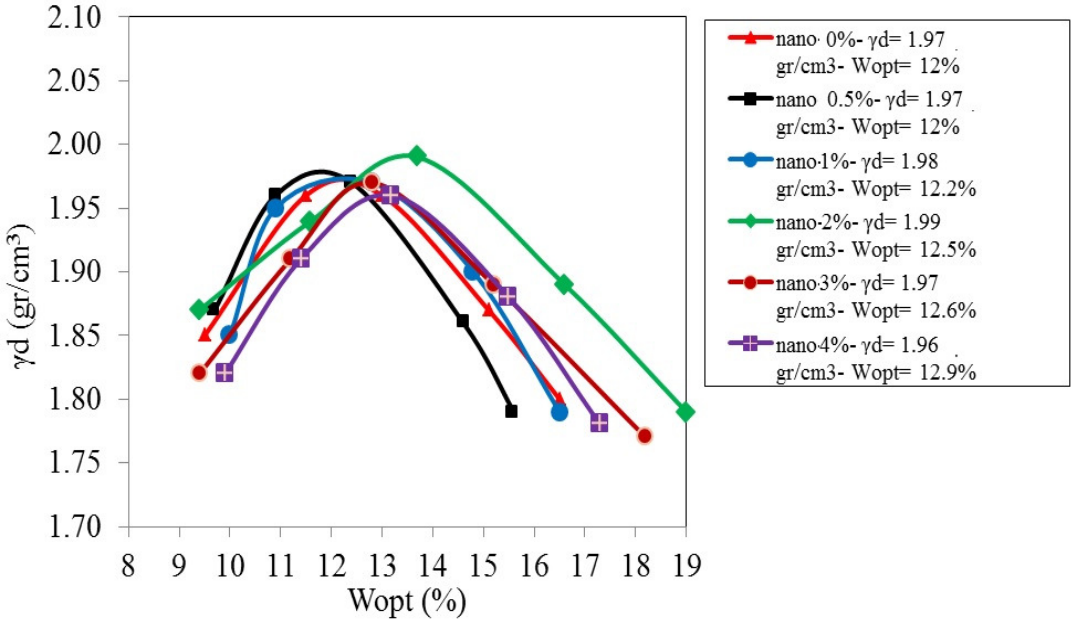
۵- بحث

۵-۱- نتایج آزمایش تعیین حدود آتربرگ

با انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ و ترسیم نمودارهای مربوط به حدود خمیری و روانی در شکل‌های (۶) و (۷) مشخص گردید که با افزایش میزان نانوایلیت در ترکیب خاک، حدود خمیری و روانی خاک افزایش یافته است. با افزایش نانوایلیت از ۰ تا ۸ درصد وزنی به خاک، حد خمیری از ۱۹ تا ۳۶ درصد و حد روانی از ۲۶ تا ۴۰ درصد افزایش یافته است. همانطور که از شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، حدود خمیری و روانی با افزایش نانوایلیت از ۵ به ۸ درصد دچار یک افزایش قابل توجه شده‌اند. این افزایش در درصدهای پایین‌تر نانوکائولینت به صورت تدریجی اتفاق افتاده است.

شکل ۳. دستگاه کاساگرانده برای تعیین حد روانی خاک مورد مطالعه

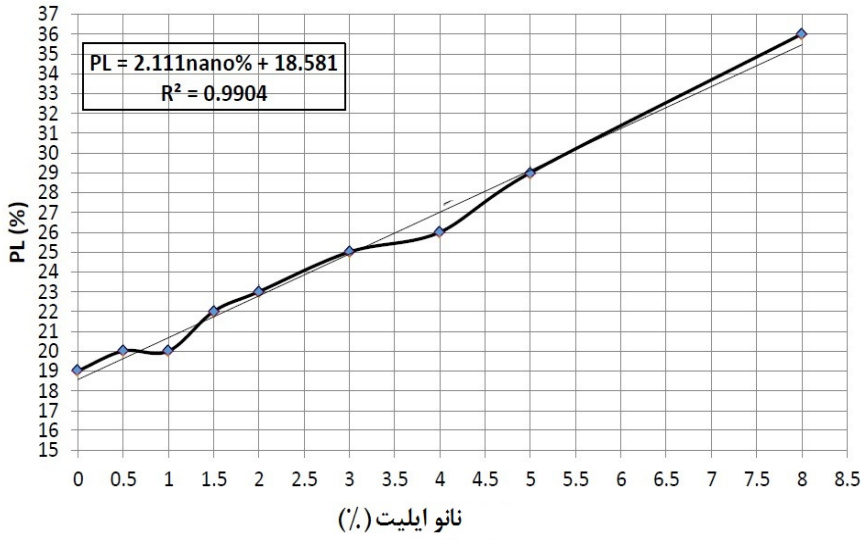
شکل ۴. دستگاه آزمایش تراکم مورد استفاده در پژوهش حاضر



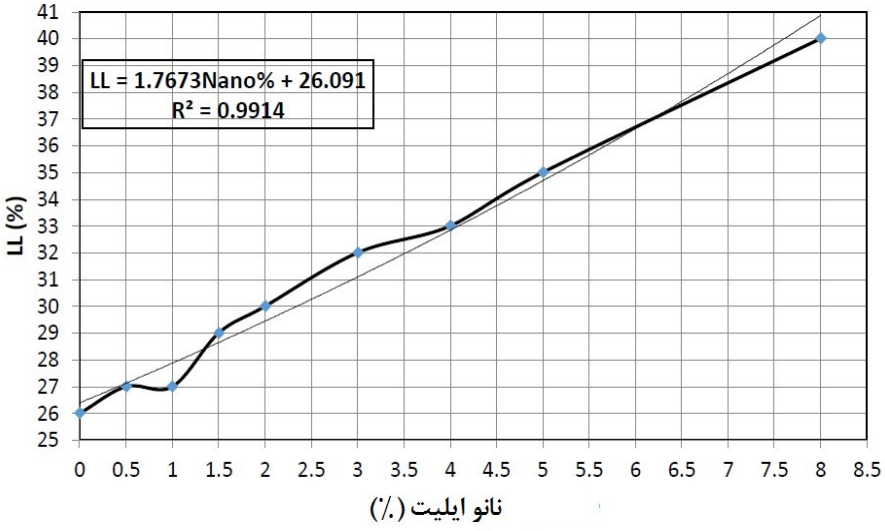
شکل ۵. نمودار آزمایش تراکم برای نمونه خاک با درصدهای مختلف نانوایلیت

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ و تراکم روی نمونه‌های خاک

نانو ایلیت (٪)	آزمایش حدود آتربرگ			آزمایش تراکم	
	PL (%)	LL (%)	PI (%)	γ_d (gr/cm^3)	W_{opt} (%)
۰	۱۹	۲۶	۷	۱/۹۷	۱۲
۰/۵	۲۰	۲۷	۷	۱/۹۷	۱۲
۱	۲۰	۲۷	۷	۱/۹۸	۱۲/۲
۱/۵	۲۲	۲۹	۷	۱/۹۸	۱۲/۳
۲	۲۳	۳۰	۷	۱/۹۹	۱۲/۵
۳	۲۵	۳۲	۷	۱/۹۷	۱۲/۶
۴	۲۶	۳۳	۷	۱/۹۶	۱۲/۹
۵	۲۹	۳۵	۶	-	-
۸	۳۶	۴۰	۴	-	-



شکل ۶. نمودار تغییرات حد خمیری با درصد نانو ایلیت



شکل ۷. نمودار تغییرات حد روانی با درصد نانو ایلیت

یکی از دلایل افزایش حدود خمیری و روانی با افزایش نانوایلیت می‌تواند ناشی از نسبت بالای سطح به حجم (سطح ویژه) نانوایلیت و همچنین واکنش‌پذیری بالای آن با آب باشد. علاوه بر این، با توجه به اندازه بسیار کوچک نانوایلیت، این مواد توانایی نفوذ به داخل نانوحفرات طبیعی موجود در ساختار خاک را داشته بنابراین این موضوع نیز می‌تواند از علل تغییر حدود روانی و خمیری خاک در اثر ترکیب با نانو مواد باشد. به طور کلی نانوذرات رسی، خصوصیات خمیری خاک را به سه روش تحت تأثیر قرار می‌دهند: ۱) مساحت سطح ویژه بسیار بزرگ و بارهای سطحی. بارهای سطحی نانوذرات معمولاً با کاتیون‌های هیدراته شده (آبیده شده) و یا لایه‌های دوبل الکتریکی مرتبط می‌شود و مساحت سطح ویژه بسیار بزرگ باعث ایجاد فعل و انفعالات بین ذره‌ای گسترده‌تری می‌شود. ذرات نانورس نسبت به ذرات رس با اندازه میکرونی در خصوصیاتی مانند مساحت سطح ویژه، بارهای سطحی و نانوتخلخل اختلاف بسیار بزرگی دارند. ۲) نانوتخلخل درون‌ذره‌ای. معمولاً در نانو سوراخ‌های درون ذره‌ای به دلیل جذب و یا هیدراسیون در خلال فرآیند تشکیل شدن معدنی آب وجود دارد. این مقدار از آب، اگرچه نمی‌تواند به صورت خیلی ویژه و برجسته در فعل و انفعالات سطحی ذره با ذره شرکت و همکاری کند و همچنین در خلال خشک شدن در گرمخانه از بین رود. بنابراین می‌تواند با حدود اتربرگ بزرگ نانو ذرات متخلخل شرکت و همکاری کند. ۳) میکرو ساختار انبوه و متراکم. ساختار متراکم، انبوه، قوی و محکم که شامل سوراخ‌هایی در همین ساختار متراکم می‌باشد و با آب پرشده‌اند به آسانی در حین آزمایش خمیری خاک برای اندازه‌گیری حدود آتربرگ پراکنده نمی‌شوند و فرو نمی‌ریزند. مشابه آب موجود درون سوراخ‌های درون‌ذره‌ای، آب قرار گرفته درون ساختار متراکم، در حدود آتربرگ بالا شرکت و همکاری می‌کند.

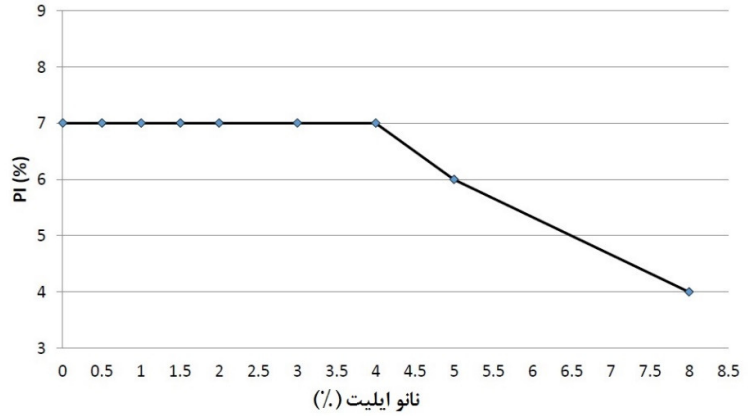
نتایج نشان می‌دهند که آهنگ افزایش حدود خمیری و روانی تقریباً یکسان بوده و با توجه به رابطه شاخص خمیری (PI=LL-PL) با افزایش میزان نانوایلیت در ترکیب خاک لس سیلتی شاخص خمیری در درصدهای پایین نانوایلیت (۰/۵ تا ۴ درصد) تقریباً ثابت است و با افزایش ۵ تا ۸ درصدی نانو ایلیت مقدار شاخص خمیری رو به کاهش می‌گذارد (شکل ۸). کاهش شاخص خمیری به این دلیل است که با افزایش ۵ تا ۸ درصدی نانوایلیت به ترکیب خاک، آهنگ افزایش حد خمیری نسبت به حد روانی بیش‌تر می‌شود. با توجه به رابطه شاخص خمیری (PI=LL-PL)، شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد. کم شدن شاخص خمیری نشانه مطلوبی برای مهندسی ژئوتکنیک جهت عملیات بهسازی خاک‌های سست پروژه‌های عمرانی بوده ولی استفاده زیاد از نانوایلیت با توجه به قیمت آن بایستی بحث اقتصادی بودن موضوع نیز بررسی گردد. نتایج این بخش از پژوهش، با نتایج سایر محققین در گذشته بررسی شده است. طبرسا (۱۳۹۷) تغییرات حدود آتربرگ یک خاک رسی نرم با افزایش نانورسی را مطالعه کردند. نتایج این محقق نشان داد که با افزودن نانو رس به خاک، حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها به تدریج زیاد شده است که نتیجه آن افزایش شاخص خمیری نمونه‌های بهسازی شده با نانورس است. به عنوان نمونه با افزودن ۲ درصد نانورس به خاک، شاخص خمیری نمونه‌های خاک حدود ۸۵ درصد زیاد شده‌اند. خسروانی و قربانی (۱۳۹۷) به بررسی تاثیر افزودنی نانورس برروی رس لای‌دار شهر رشت پرداختند و مشاهده کردند که با افزودن مقدار نانورس، حد خمیری خاک مورد نظر افزایش کمی داشته است ولی حد روانی و دامنه خمیری افزایش چشمگیری داشته است. محمدزاده ثانی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی حدود آتربرگ ماسه‌های رسی با افزایش نانورس پرداختند. آزمایش‌ها در دو حالت استفاده و عدم استفاده از نانورس بر روی خاک‌های مورد نظر انجام گرفتند. بر اساس نتایج بدست آمده، حدود روانی و خمیری مخلوط خاک مورد مطالعه با نانو ذرات در مقایسه با خاک اصلی افزایش یافته است. این افزایش به گونه‌ای بوده است که باعث کاهش شاخص خمیری خاک شده است. غفاری و دبیری (۱۴۰۰) به تاثیر نانورس بر حدود آتربرگ خاک‌های رسی شرق تبریز پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که افزایش نانورس سبب کاهش شاخص خمیری و بهبود ساختار دانه‌بندی خاک مورد نظر شده است. پژوهش حاضر نشان‌دهنده تطابق کلی نتایج آن با تحقیقات سایر محققین است.

برای پیش‌بینی حد خمیری و حد روانی از درصد نانوایلیت، خطوطی بر داده‌ها برازش شدند (شکل‌های ۶ و ۷). روابط این خطوط در روی نمودارهای شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده‌اند. این روابط دارای ضریب تعیین ۰/۹۹ هستند که

مقدار بسیار خوبی محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که روابطه توسعه داده شده در محدوده تا ۸ درصد نانوایلیت دارای اعتبار هستند و از آن‌ها می‌توان برای پیش‌بینی حدود خمیری و روانی بر اساس درصد نانوایلیت استفاده کرد. بهمنی و همکاران (۲۰۱۴) نیز تحقیقی جهت بررسی تأثیر نانوذرات سیلیس با دو اندازه متفاوت (۱۵ و ۸۰ نانومتر) بر روی حدود آتربرگ خاک رسی انجام دادند و به نتایجی مشابه نتایج مقاله حاضر دست یافتند.

۵-۲- نتایج آزمایش تراکم آزمایشگاهی

افزودن نانوایلیت باعث افزایش وزن واحد حجم خشک خاک شده است. با توجه به شکل (۹) پیداست افزودن نانوایلیت تا حد ۲ درصد موجب افزایش وزن واحد حجم خشک (۱/۹۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب) ذرات خاک لس شده که این موضوع می‌تواند به خاطر جایگزینی ذرات نانوایلیت در منافذ ریز خاک به جای هوا باشد و افزایش بیش از آن می‌تواند باعث تجمع و آگلومره شدن ذرات نانوایلیت شده و افزایش بیش از حد بهینه ۲ درصد سبب کاهش وزن واحد حجم خشک گردیده است (۱/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در ۴ درصد نانوایلیت). با بررسی مساحت‌های زیر منحنی تراکم (شکل ۵) مشاهده می‌شود که با افزایش درصدهای نانوایلیت، مساحت زیر منحنی تراکم رو به افزایش گذاشته و درصد رطوبت خاک نیز در حال افزایش می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده جذب آب بیش‌تر بوسیله خاک بر اثر استفاده از نانوایلیت بوده است. افزودن نانوایلیت تا حد ۲ درصد موجب افزایش وزن واحد حجم خشک خاک می‌شود (به خاطر جایگزینی نانوایلیت در نانو منافذ خاک به جای هوا) و افزایش بیش از آن موجب کاهش می‌شود که این امر به علت آگلومره شدن (تجمع و چسبیدن) نانوذرات ایلیت بعد از حد بهینه ۲ درصد است و سبب کاهش وزن واحد حجم خشک خاک می‌شود.



شکل ۸. نمودار تغییرات شاخص خمیری با درصد نانوایلیت

شکل ۹. تغییرات حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک با درصد نانوایلیت

به طور کلی نتایج آزمایش‌های تراکم نشان دادند که با افزودن مقادیر مختلف نانورس به خاک‌های آزمایش شده، وزن واحد حجم خشک تا ۲ درصد نانوایلیت افزایش یافته است. دلیل افزایش وزن واحد حجم خشک را می‌توان به جایگزینی ذرات ریز نانو با وزن واحد حجم بیش‌تر با خاک مرتبط دانست. همچنین به دلیل تمایل نمونه خاک به جذب آب بیش‌تر ناشی از افزایش سطح ویژه خاک در اثر افزودن نانوایلیت، درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها زیاد شده است. با افزایش درصد نانوایلیت به دلیل تغییر ساختار خاک و تمایل زیاد خاک به جذب آب بیش‌تر، درصد رطوبت بهینه خاک زیاد شده است.

نتایج پژوهش حاضر با نتایج طبرسا (۱۳۹۷) مطابقت دارد. این محقق تأثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم را بررسی کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که با افزودن مقادیر مختلف نانورس به خاک‌های آزمایش شده، وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها افزایش یافته که علت افزایش وزن واحد حجم خشک نمونه‌ها را می‌توان به جایگزینی ذرات ریز نانو با فضای خالی خاک مرتبط دانست. همچنین به دلیل تمایل نمونه‌ها به جذب آب بیش‌تر ناشی از افزایش سطح ویژه خاک در اثر افزودن نانورس، درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها زیاد شده است. غفاری و دبیری (۱۴۰۰) به بررسی تاثیر نانورس بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های رسی شرق تبریز پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که افزایش نانورس و دوره عمل‌آوری خاک باعث بهبود خصوصیات تراکمی خاک شامل وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر نانوایلیت روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس از شهرستان گنبد کاووس گلستان پرداخته شد. به این منظور، خاک مورد نظر بعد از اضافه کردن درصدهای مختلف نانوایلیت مورد آزمایش‌های ژئوتکنیکی شامل تعیین حدود آتربرگ و تراکم قرار گرفت. با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌ها، نتایج زیر حاصل شد.

۱- نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ نشان داد با افزایش میزان نانوایلیت در ترکیب خاک لس، حد روانی و حد خمیری افزایش می‌یابند ولی شاخص خمیری در درصدهای پایین‌تر ثابت مانده و میزان شاخص خمیری با افزودن ۵ درصد نانوایلیت و بیش‌تر کاهش می‌یابد که امری مطلوب در کاربردهای مهندسی جهت بهسازی خاک‌ها بوده ولی باتوجه به میزان زیاد نانوذرات مصرفی و قیمت آن، بایستی کارشناسی دقیق‌تری در خصوص مصرف نانوذرات به جهت کاهش شاخص خمیری صورت گیرد.

۲- با توجه به نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده، مشخص گردید که با افزودن نانوایلیت تا حد ۲ درصد به ترکیب خاک لس، وزن واحد حجم خاک افزایش یافته و بعد از ۲ درصد، وزن واحد حجم خاک شروع به کاهش می‌نماید. همچنین میزان درصد رطوبت بهینه با افزایش میزان درصد نانوایلیت سیر افزایشی را نشان می‌دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از داوران محترم و سردبیر و هیات تحریریه مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

به‌روزساروکلایی، آ (۱۳۹۲) بررسی ویژگی‌های رفتاری و مقاومتی خاک‌های لسی تثبیت شده با نانومواد، مطالعه موردی لس گرگان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان دانشکده مهندسی عمران.

خسروانی، ع.، قربانی، ع (۱۳۹۷) بررسی اثر نانورس بر خواص مهندسی خاک‌های چسبنده، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.

رضایی، ح (۱۳۹۲) بررسی اثر تراکم دینامیکی و بارهای استاتیکی بر مقاومت برشی لس‌های استان گلستان، رساله دکتری رشته زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

طبرسا، ع. ر (۱۳۹۷) تأثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۱، شمارهٔ ۲، ص ۲۴۶-۲۲۵.

غفاری، س.، دبیری، ر (۱۴۰۰) مطالعه تاثیر نانورس و پودر سنگ‌آهک بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های رسی شرق تبریز، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۵، شمارهٔ ۳ (در دست چاپ).

قاضی، ح (۱۳۸۹) بررسی تأثیر مصالح در ابعاد نانو بر خواص مهندسی-ژئوتکنیکی خاک، پایان‌نامه دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی عمران.

قاضی‌زاده، ش (۱۳۹۲) بررسی رفتار هیدرومکانیکی و برشی خاک‌های فروریزشی با استفاده از دستگاه سه‌محوری با قابلیت اعمال و کنترل مکش ساختاری، مطالعه موردی لس گرگان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران.

محمدزاده ثانی، ا.، عربان ، م.، خداپرست حقی ، ا.، جمشیدی چناری، ر (۱۳۹۸) تأثیر نانورس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌های رس‌دار، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران.

ASTM D 698-78 (2007) standard test method for compaction test in laboratory.

ASTM D 4318-87 (2007) standard test method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils.

Bahmani, S. H., Haut, B., Asadi, A., and Farzadnia, N (2014) Stabilization of residual soil using SiO_2 nanoparticles and cement. Construction and Building Materials Journal, 64: 350-359.

Burton, C (2009) Silica sol for rock grouting, Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity. Tunneling and Underground Space Technology, 24: 603- 607.

Gallagher, P. M., Conlee, C. T., and Rollins, K. M (2007) Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk. ASCE_1090-0241, 133:2_186.

Lambe, T. W., and Whitman, R. V (2007) Soil Mechanics. John Wiley & Sons. in measurement and modeling of soil behavior, ASCE.

Lashkaripour, G.R., and Ghafoori, M (2019) Engineering Geology Criteria for Evaluation and Classification of Loess in Golestan Province. Journal of Basic and Applied Scientific Research, 23: 165–176.

Lin, D. F., Lin, K. L., Hungc, M. J., and Luoa, H. L (2007) Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. Journal of Hazardous Material,145: 58-64.

Majeed, Z. H., and Taha, M. R (2011) Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a penang soil. Journal of Asian Scientific Research, 2: 587-592.

Patricia, M., Yuanzhi, L., and Gallagher, P (2007) Meter Column Testing of Colloidal Silica Transport through Porous Medium, Innovations in Grouting and Soil Improvement (GSP 136), Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers, Austin, Texas, USA.

Zhang, G., Germaine, J. T., Whittle, A. J., and Ladd, C (2004) Index properties of a highly weathered old alluvium. Geotechnique, 54: 441-451.

Zhang, G (2007) Soil Nanoparticles and Their Influence on Engineering Properties of Soils. Advances in measurement and modeling of soil behavior, ASCE.

Evaluation of the effect of nano-illite on compressibility and Atterberg limits of loess soil (silty clay), Gonbad Kavous Kavous city (Golestan province)

R. Yazarloo[1], A. Jamshidi[2*], M. Azizi[3], S. A. Amanzadeh [4]

1- Assist. Prof., Dept., of Civil Engineering, Islamic Azad University, Gonbad Kavoos Branch, Gonbad Kavoos
2- Assist. Prof., Dept., of Geology, Faculty of sciences, Lorestan University, Khoramabad
3- M. Sc., Geotechnical Engineering, Tonekabon Branch, Islamic Azad University, Tonekabon
4- M. Sc., Civil Engineering, Shams Higher Education Institute Gonbad Kavoos, Gonbad Kavoos

*** jamshidi.am@lu.ac.ir**

Recieved: 2021/1/16 Accepted: 2021/3/3

Abstract

Loose soils (CL-ML silty clays) are one of the most important problematic soils that have caused various geological hazards in the world, especially in Iran. Therefore, in order to reduce the geological hazards of such soils, it is necessary to make changes in their geotechnical properties. The aim of the present study is to investigate the effect of nano-illite on the geotechnical properties of loess soil including Atterberg limits and compressibility. For this purpose, a loose soil sample was prepared from Gonbad Kavous city of Golestan province and geotechnical tests including Atterberg limits and compaction were performed on it. Tests were performed on soil samples with percentages of 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 and 8 nano-ilite. The results show that in the Atterberg limits test, the plastic limit is from 19% (without nano-illite) to 36% (in 8% nano-illite) and the liquid limit is from 26% (without nano-illite) to 40% (with 8% nano-illite) have increased. Also, in the compaction test, the maximum dry unit weight increased from 1.97 g /cm^3 (without nano-illite) to 1.99 g /cm^3 (in 2% nano-illite) and then decrease to 1.96 g /cm^3 (in 4% nano-illite), while the optimum moisture has continuously increased from 12 to 12.9% in 0 to 4% nano-illite, respectively.

Keywords: Loess soil, Nano-illite, Compressibility, Atterberg limits