

تغییر حدود آتربرگ و پارامترهای منحنی رطوبتی آب در خاک لس حاوی نانورس مونت موریلونایت^۱

زهرا درویش ایوری^۱، سهیلا ابراهیمی^{۲*}، سید علیرضا موحدی نائینی^۳ و مهدی ذاکری نیا^۴

- (۱) دانش آموخته مهندسی کشاورزی، خاک‌شناسی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
 (۲) استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
 (۳) دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
 (۴) دانشیار گروه آبیاری، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: sohebrahimi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲

چکیده:

بهبودی خاک لس، می‌تواند سبب افزایش استحکام، مقاومت و تغییر یا اصلاح ویژگی‌های مکانیکی آنها گردد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تغییرات پارامترهای منحنی رطوبتی (چگونگی نگهداشت آب در خاک) و برخی شاخص‌های مکانیکی (پایش استحکام و مقاومت مکانیکی) خاک لس حاوی نانورس‌های مونت موریلونایت بود. بدین منظور، باتیمارهای ۱ و ۵ درصد نانورس، میزان نگهداشت آب خاک با دو مدل ون‌گنوختن و بروکس-کوری، تغییرات پارامترهای رطوبتی و حدود آتربرگ در دو زمان ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نانورس تأثیری معنی‌دار بر نگهداشت آب در مکش‌های مختلف داشت و مقادیر آنرا، بخصوص در مکش‌های پایین افزایش داد. همچنین سبب افزایش خلل و فرج ریز در نقطه ورود هوا شد که نشان‌دهنده کاهش سرعت تخلیه آب و افزایش قابلیت نگهداشت آن در خاک سبک بود. در بررسی پارامتریک منحنی رطوبتی خاک-نانورس، با افزایش مقدار نانورس، رطوبت اشباع θ_s افزایش، لیکن، شیب منحنی رطوبتی خاک-نانورس (پارامتر n) و فشار ورود هوا افزایش و مقدار α کاهش یافت. تغییر در رطوبت باقیمانده θ_r قابل ملاحظه نبود و روند افزایشی منطقی خاصی نشان نداد. پیش‌بینی پارامترهای معادله منحنی رطوبتی با استفاده از مدل وان‌گنوختن نتایج بهتری از مدل بروکس-کوری نشان داد. در بررسی شاخص‌های مکانیکی، افزایش حد روانی (به میزان بیشتر) و حد خمیری و در نتیجه، افزایش شاخص پلاستیسیته (بهبود خصوصیات خمیری خاک) مشاهده شد. افزایش میزان سطح مخصوص و قدرت نگهداری آب توسط رس‌ها و مقاومت برشی سطح رس می‌تواند دلیل این امر باشد. پایش حدود آتربرگ و پارامترهای منحنی رطوبتی با زمان، نشانگر مانایی آنها بود.

کلید واژه‌ها: لس؛ نانورس؛ منحنی رطوبتی؛ حدود آتربرگ؛ شاخص پلاستیسیته

مقدمه

بهبودی خاک در کلیه موارد مهندسی خاک و به‌ویژه در شرایط ضعیف بودن خاک مطرح بوده و به‌منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک برای دستیابی به اهدافی چون افزایش مقاومت، تغییر نفوذپذیری و پیشگیری از نشست انجام میشود. اخیراً کاربرد تکنیک‌های تثبیت خاک مانند نانو تکنولوژی به طور چشمگیری افزایش یافته تا راه حل‌های مقرون به صرفه برای بهبود خصوصیات

خاک‌های لس یکی از مشکل‌سازترین خاک‌ها با گستردگی قابل توجه در مناطق مختلف جهان است. این نوع خاک‌ها به دلیل تفکیک‌پذیری ذرات به ویژه در برابر فرسایش آسیب‌پذیر هستند (Abbasi et al, 2018).

^۱ برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

می‌باشد (Taha and Taha, 2016). در بررسی تأثیر نانو مواد بر پارامترهای منحنی‌های مشخصه آب خاک مشخص شد با افزایش مقدار آن در خاک، محتوای آب اشباع (θ_s)، محتوای آب باقیمانده (θ_r) و پارامتر تجربی (α) افزایش یافت (Zhou and Chen, 2017). خصوصیات منحنی رطوبتی خاک نه تنها توسط خواص خاک‌ها (به عنوان مثال، بافت) بلکه همچنین از ویژگی‌های اصلاح کننده‌های افزودنی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Fallah et al, 2015; Ebrahimi, 2004). تاکنون اکثر مطالعات اثر نانوذره‌های مختلف بر جنبه‌های اثرگذاری بر استحکام و مقاومت خاک‌های مختلف از دیدگاه مهندسی مورد پژوهش قرار گرفته است. در این پژوهش، در خاک‌های لس (با توجه به فراگیری پراکنش در استان گلستان) و لزوم انجام عملیات کشت و کار و از سوی آسیب‌پذیری ویژه به فرسایش، راهکار افزودن نانوذرات مونت-موریلونایت امکان‌سنجی گردید. بدین منظور، در این پژوهش، بررسی پارامتریک منحنی رطوبتی خاک در دو تیمار نانورس در خاک شن‌لومی مورد پایش قرارگرفت، سپس تغییر برخی از شاخص‌های مکانیکی خاک مانند حدروانی، حدخمیریایی و شاخص پلاستیسیته خاک سبک بافت متأثر از کاربرد نانورس مونت‌موریلونایت سنجیده و ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه در این پژوهش از حواشی رودخانه روستای زیارت به عرض جغرافیایی $36^{\circ} 44' 33''$ N و طول جغرافیایی $54^{\circ} 29' 57''$ E از عمق ۲۵ سانتی‌متری رویی خاک، برداشت شد. سپس، خاک خشک شد و از الک غربال ۲-۰ میلی‌متر عبور کرد. آنالیز اندازه ذرات با الک و روش پیپت تعیین شد. نانورس استفاده شده در این مطالعه توسط یک شرکت نانو مواد ایرانی (مشهد) تهیه شده و نانورس مونت‌موریلونایت بود (جدول ۱ و جدول ۲).

ژئوتکنیکی خاک‌های کم‌تناسب در کشاورزی مهیا گردد. استراتژی اصلی نانوتکنولوژی در مهندسی ژئوتکنیک به منظور بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های ضعیف با کاربرد نانو بوده است (Arya and Jain, 2017; Zhang, 2007). به دلیل سطح ویژه زیاد، بارهای سطحی و حتی گاهی اوقات تخلخل نانو، این ذرات حتی در مقادیر کوچک، ممکن است بر رفتار فیزیکی و شیمیایی خاک و خصوصیات مهندسی آن تأثیر بگذارد (Zhou and Chen, 2017). یکی از انواع نانو مواد که در روش‌های بهسازی خاک کاربرد گسترده‌ای داشته، نانو ذرات رسی است (Mohammadi and Niazian, 2013). بررسی منابع متعدد نشان داد که افزایش مقدار نانورس سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک گردیده است. افزایش در محدوده آتربرگ به دلیل سطح بیشتر سطح نانوذرات خاص است که مقدار زیادی از آب را به سطح بیرونی منتقل می‌کند. وجود نانوپورها باعث تجمع آب در این منافذ و در نتیجه افزایش رطوبت بهینه می‌شود (Bahari et al, 2015; Priyadharshini and Arumairaj, 2012; Majeed and Taha, 2013). پژوهشگران در سال ۲۰۱۶ دریافتند با افزودن نانوسیلیس حدود آتربرگ در خاک افزایش یافت لیکن با افزودن زیولیت دارای کاهش بود. از سوی دیگر، افزایش درصد نانوسیلیس و نانوزیولیت، رطوبت بهینه خاک افزایش یافته و چگالی خاک خشک کاهش می‌یافت (Hareesh and Vinoth, 2016). در خاک‌هایی که قابلیت نگهداشت آب بدلیل ساختار ضعیف خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد، افزودن اصلاح‌کننده‌ها بر پارامترهای منحنی رطوبتی تأثیرگذار هستند. در این میان، بافت خاک تأثیری فوق‌العاده بر منحنی رطوبتی خاک داشته، بطوریکه با افزایش مقدار رس، رطوبت موجود در هر مکش، بیشتر و تغییرات شیب منحنی نیز ملایمتر است. اما، در خاک‌های شنی بدلیل درشتی نسبی خلل و فرج، با اعمال مکش، آب آن‌ها خالی و بنابراین تغییرات شیب منحنی نیز تند

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانورس (مونت موریلونایت)

نوع کانی Mineral type	چگالی Density (gr/cm ³)	اندازه ذرات Particle size (nm)	مساحت سطح ویژه Special surface area (m ² /gr)	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (EC)	ضریب تبادل یونی Ion exchange rate (meg/100gr)	فاصله خالی بین ذرات space between (A0) particles	رنگ Color	رطوبت Humidity (%)
مونت موریلونایت Montmorillonite	۰/۷-۰/۵	۲-۱	۲۷۰-۲۲۰	۲۵	۴۸	۶۰	زرد	۲-۱

جدول ۲. مشخصات آنالیز شیمیایی نانورس (مونت موریلونایت %)

LOI	Fe2O3	TiO2	CaO	K2O	SiO2	Al2O3	MgO	Na2o
۱۵/۴۵	۵/۶۲	۰/۶۲	۰/۹۷	۰/۸۶	۵۰/۹۵	۱۹/۶۰	۳/۲۹	۰/۹۸

منحنی مشخصه آب خاک (SWCC): برای تهیه منحنی رطوبتی خاک از دستگاه WP4C استفاده شد که از تکنیک نقطه شبیم حاصل از انعکاس سرما برای اندازه‌گیری پتانسیل آب یک نمونه استفاده می‌کند. در رسم منحنی رطوبتی خاک با این دستگاه، ابتدا نمونه‌های خاک هواخشک و سپس آون خشک می‌گردد. پس از تعیین درصد اشباع نمونه‌های موردنظر، مقادیر خاک به مقدار ۱/۸، ۱/۴، ۱/۲ و ۳/۴ توزین و در رینگ‌های مخصوص دستگاه WP4C که حاوی ۳ یا ۵ گرم از هر کدام با ۳ تکرار به دست آمد که پس از حذف داده‌های غیرمتعارف و میانگین‌گیری، منحنی رطوبتی برای تیمارهای مختلف نانورس- خاک ترسیم شد (Ebrahimi et al, 2011). سپس با گذشت زمان و انجام مجدد، نمودار منحنی رطوبتی برای تیمارهای مختلف نانورس- خاک و اثر گذشت زمان ترسیم شد. نرمال بودن همه داده‌ها با استفاده از دستور نرمالیتی مورد آزمون قرار گرفتند. در مواردی که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کردند با تبدیلات مناسب، نرمال‌سازی داده‌ها انجام شد. سپس، رطوبت اندازه‌گیری شده با مدل‌های مختلف منحنی رطوبت مدل‌های ونگنوختن و بروکس-کوری مجهز شد (Fallah et al, 2013; Ebrahimi et al, 2008).

معادله بروکس و کوری (BC): این معادله سه پارامتری در سال ۱۹۶۴ ارائه و به صورت زیر است:

طراحی سیستم آزمایش: به منظور بررسی تاثیر نانوذره مونت موریلونایت بر حدود آتربرگ و منحنی رطوبتی خاک حاوی نانوذره ابتدا آماده‌سازی تیمارها انجام شد. پس از انجام برخی آزمایش‌های پایه خاک مورد آزمایش، به منظور اختلاط خاک با درصدهای مشخص نانورس مونت- موریلونایت میزان سطوح ۱ و ۵ درصد وزنی برای نانوذرات رس (با توجه به مطالعات قبلی و یافتن سطح بهینه نانورس) در خاک انتخاب شدند خاک‌های نمونه برداری شده با افزودن مقادیر مختلف پودر نانورس در حالت خشک هوا و با میکسر مکانیکی با سرعت کم مخلوط و کاملاً مخلوط شدند (برای دستیابی به مخلوط یکنواخت خاک). سپس مخلوط‌های خاک-نانورس-آب در ۱۶ ساعت در یک ظرف آب بندی شده ذخیره شدند. این روش به اطمینان از توزیع یکنواخت رطوبت در کل نمونه‌ها کمک می‌کند (Tabarsa, 2017). تیمارهای اعمال شده در این آزمایش عبارتند از: تیمار (A): خاک لوم شنی بدون اختلاط نانورس مونت موریلونایت (شاهد)، تیمار (B): خاک لوم شنی با اختلاط ۱ درصد وزنی نانورس، تیمار (C): خاک لوم شنی با اختلاط ۵ درصد وزنی نانورس، تیمار (D): خاک لوم شنی با اختلاط ۱ درصد وزنی نانورس بعد از گذشت ۳ هفته و تیمار (E): خاک لوم شنی با اختلاط ۵ درصد وزنی نانورس بعد از گذشت ۳ هفته.

(۱)

حدود آتربرگ: در تعیین حد روانی، وسیله اصلی این آزمایش دستگاه حد روانی کاساگرانده میباشد که دارای یک جام برنجی است. با چرخاندن دسته یک پیچ تا ارتفاع ۱۰ میلیمتری جام برنجی بالا می‌آید و سپس تحت وزن خودش روی لاستیک کف به صورت سقوط آزاد رها می‌شود. سنجش حد خمیری خاک، تعیین میزان رطوبتی است که به ازای آن فتیله‌های به قطر ۳/۲ میلی-متر که از خمیر خاک نمونه ساخته می‌شود، ترک بخورد.

شاخص پلاستیسیته: شاخص پلاستیسیته (PI) از تفاضل بین رطوبت حد روانی و حد خمیری از طریق فرمول زیر قابل ارزیابی است، که در آن WL و Wp رطوبت در حد روانی و حد خمیری است.

$$I_p = W_l - W_p \quad (۳)$$

شاخص‌های مکانیکی نمونه‌های خاک با درصد وزنی ۰، ۱، ۵ درصد وزنی نانورس مونت‌موریلونایت با سه تکرار مطابق استاندارد ASTM ۸۷-۴۳۱۸ بدست آمد (ASTM, D. 2010). در نهایت پس از حذف داده‌های غیر متعارف و میانگینگیری حدود آتربرگ برای تیمارهای مختلف نانورس مونت‌موریلونایت-خاک حاصل شد. با گذشت زمان ۳ هفته و انجام مجدد آزمایشات، اثر گذشت زمان بر شاخص‌های مکانیکی تیمارهای مختلف نانورس-خاک تعیین شد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش، سپس نتایج منحنی رطوبتی و بررسی پارامتریک خاک شنلومی حاوی تیمارهای نانوذرات رس و سرانجام نتایج تغییر ویژگی‌های مکانیکی خاک ارائه می‌گردد.

$$S_e = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (ah)^{-n} & h < -1/\alpha \\ 1 & h \geq -1/\alpha \end{cases}$$

که Se درجه اشباع، θ محتوای حجمی آب (cm³ cm⁻³)، θ_s مقدار آب حجمی اشباع (cm³ cm⁻³) است θ_r مقدار آب حجمی باقیمانده (cm³ cm⁻³) و α یک پارامتر تجربی (cm⁻¹) است که معکوس آن اغلب به عنوان نقطه ورود هوا یا فشار حباب گفته می‌شود، h ارتفاع فشار آب خاک (سانتی متر) و n پارامتر توزیع اندازه منافذ است که بر شیب منحنی آب خاک تأثیر می‌گذارد (Brooks and Corey, 1964).

معادله منحنی رطوبتی ون‌گنوختن: این معادله چهار پارامتری در سال ۱۹۸۰ ارائه شد و عبارت از:

$$S_e = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن Se، θ_s ، θ_r ، h، n و α همان پارامترهای معادله ۱ می‌باشند (Van Genuchten, 1980). طبق مدل، پارامتر m به صورت $m = 1 - 1/n$ و ($n > 1$) بیان شده است (Mualem, 1976).

پارامترهای معادلات ون‌گنوختن و بروکس-کوری در تیمارهای نانورس-خاک با استفاده از RETC بدست آمد. در برنامه رایانه‌ای RETC که توسط ون‌گنوختن و همکاران (۱۹۹۱) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت و مکش خاک تهیه شده است، ضرایب α ، n، θ_s ، θ_r و n (ضرایب ثابت هیدرولیکی خاک) از رگرسیون غیرخطی و حداقل مربعات اختلاف بین میزان مکش و رطوبت را محاسبه و متناسب می‌کنند (Van Genuchten et al, 1991).

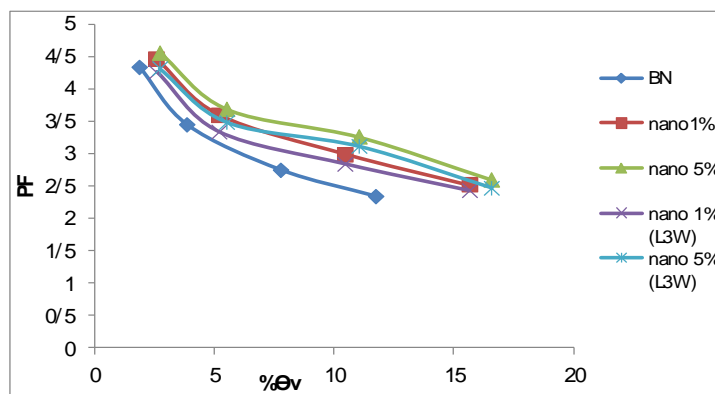
جدول ۳. نتایج اولیه آزمایشات فیزیکی و شیمیایی خاک

مقادیر بدست آمده Values obtained	مشخصات خاک Soil characteristics
لوم شنی (sandy loam)	بافت خاک (soil texture)
۱۴/۵	رس (Clay) (%)
۳۰/۵	سیلت (Silt) (%)
۵۵	شن (Sand) (%)
۰/۲۳۵	کربن آلی (Organic carbon) (%)
۱/۷	چگالی ظاهری (Apparent density)
۰/۸۹۲	شوری (Salinity) (dsm^{-1})
۳۳	آهک (Lime) (%)
۷/۹	pH
۱۶/۷	ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation exchange capacity) ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)
۲۴/۵۲	رطوبت اشباع (Saturated moisture) (%)
۳۳/۵	کلسیم و منیزیم (Calcium and magnesium) (meq l^{-1})

۱۵/۷۱ درصد و در تیمار ۱ و ۵ درصد وزنی نانورس بترتیب ۲۱/۰۲ و ۲۲/۲۴ درصد مشاهده شد. با بررسی منحنی‌های رطوبتی مشاهده شد که با افزایش میزان نانورس، محتوای رطوبت حجمی خاک شن لومی، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در هر مکش رطوبتی معین (pF)، رطوبت حجمی موجود در خاک دارای نانورس بیشتر، بزرگ‌تر بوده، لیکن این افزایش برای مکش‌های پایین بیشترین مقدار را در برمی‌گیرد.

بررسی نتایج منحنی رطوبتی خاک

رطوبت حجمی نمونه‌های خاک با درصد وزنی نانورس ۰، ۱ و ۵ درصد وزنی در هر کدام با ۳ تکرار با استفاده از دستگاه WP4C به دست آمد. سپس، منحنی رطوبتی برای تیمارهای مختلف نانورس- خاک و اثرات گذشت زمان بر آن‌ها ترسیم شد. نمودارهای زیر منحنی رطوبتی اثر افزودن مقادیر مختلف نانوذرات رس و خاک شاهد را به خاک شن لومی نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مقدار رطوبت حجمی نمونه شاهد



شکل ۱. اثر تیمارهای مختلف نانوذرات رس در مکش‌های مختلف بر نگهداشت آب در خاک

Figure 1. Effect of different treatments of clay nanoparticles in different suctions on water retention in soil

با توجه به جدول فوق، چون مقدار سطح معنی‌داری بزرگ‌تر از مقدار ۰/۰۵ است، بنابراین اختلاف معنی‌داری بین تیمارها وجود ندارد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر سطح معنی‌داری در هر دو آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک بیشتر از ۰/۵ شده است می‌توان داده‌ها را نرمال فرض کرد.

بررسی نتایج تجزیه و تحلیل پارامتریک منحنی رطوبتی خاک و تحلیل اثر زمانی

با توجه به جدول زیر، با افزایش مقدار نانورس، رطوبت اشباع Θ_s افزایش یافت. تغییر در رطوبت باقیمانده Θ_r با افزایش مقدار نانورس قابل ملاحظه نبود و روند منطقی خاصی را نشان نداد. در خاک با افزایش مقدار تیمار نانورس، شیب منحنی رطوبتی خاک-نانورس (پارامتر n) کاهش یافت. تغییرات پارامتر α وابسته به نوع خاک است. در بافت شنی، با افزایش میزان نانورس، فشار ورود هوا افزایش و مقدار α کاهش یافت. جدول ۶ اثر متقابل ذرات نانورس اعمال شده را بر پارامترهای مدل ون‌گنوختن، بروکس-کوری با اعمال اولیه و پس از سه هفته نشان می‌دهد.

بعبارتی دیگر، در مکش‌های بیشتر، منافذ خاک تهی از آب بوده و به صورت جذب سطحی نگهداری می‌شود که از بین ذرات تشکیل دهنده خاک، رس دارای بیشترین سطح ویژه می‌باشد. بدین‌سان، هر چه رس در خاک بیشتر باشد، سطح بیشتری برای جذب و نگهداری آب بوجود می‌آید. بدین‌سان، اثر نانو ذرات رس بر نگهداشت آب در مکش پایین نسبت به شاهد افزایش یافت و بیشترین میزان افزایش در سطح ۵ درصد وزنی مشاهده شد (شکل ۱). از سویی دیگر، تاثیر نانورس پس از گذشت زمان ۳ هفته، از بین نرفته است اگرچه نسبت به زمان افزودن نانورس به خاک مقداری کاهش یافت، لیکن همچنان نسبت به شاهد مقدار نگهداشت رطوبت در تیمارهای حاوی ۱ و ۵٪ وزنی در زمان افزودن نانورس و با گذشت زمان بیشتر بوده است. نتایج بررسی اثر معنی‌داری نانورس بر درصد رطوبت و نرمال بودن داده‌ها در جداول ۴ و ۵ قابل مشاهده است که به میزان ۱/۴۰ درصد برای نمونه حاوی یک درصد نانورس و ۱/۵۰ درصد برای نمونه حاوی ۵ درصد نانو رس بود.

جدول ۴. نتایج آزمون مقایسه میانگین بررسی اثر معنی‌داری نانورس بر درصد رطوبت

Table 4. Results of the comparison of the mean of the significant effect of nanoclay on the percentage of moisture

Sig.	F	متوسط مربعات Average squares	درجه آزادی Degrees of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	
۰/۷۲۸	۰/۳۲۶	۱۶/۵۵۴	۲	۳۳/۱۰۷	بین گروهی (Intergroup)
		۵۰/۷۷۳	۱۲	۶۰۹/۲۸۱	درون گروهی (Interagroup)
			۱۴	۶۴۲/۳۸۸	مجموع (Total)

جدول ۵. نتایج آزمون نرمال بودن متغییر درصد رطوبت (آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک)

Table 5. Test results for normal variability of moisture content (Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk test)

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
رطوبت (Humidity)	۰/۱۸۰	۱۲	۰/۲۰۰	۰/۹۴۴	۱۲	۰/۲۴۱

a. Lilliefors Significance Correction

جدول ۶. اثر تیمارهای مختلف نانوذرات رس مونت موریلونیت بر پارامترهای مدل‌های ون گنوختن، بروکس-کوری (اثر متقابل) با اثر زمان
Table 6. Effect of different treatments of Montmorillonite clay nanoparticles on the parameters of Van Genuchten, Brooks-Corey models (interaction effect) with time effect

پارامترها Parameters					سطوح کاربرد Application levels	مدل Model
m	n	α	Θ_r	Θ_s		
۰/۳۰۸۷	۱/۴۴۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۵	۰/۱۵۷	0 شاهد (Sample)	
۰/۳۲۱۹۴	۱/۴۷۴	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۰۱	۰/۲۱۰	1%	ون گنوختن (Van Genuchten)
۰/۳۱۱۵	۱/۴۵۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۷	۰/۲۲۱	5%	
۰/۳۲۹۸	۱/۴۹۲	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۹۰	۰/۲۰۹۸	۱٪ بعد ۳ هفته (1% after 3 weeks)	
۰/۳۰۴۴	۱/۴۳۷	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۰۳	۰/۲۲۱۱	۵٪ بعد ۳ هفته (5% after 3 weeks)	
۰/۴۴۵	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۴۸	۰/۱۵۷	0 شاهد (Sample)	
۰/۴۱۲	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۲۱۰	1%	بروکس کوری (Brooks- Corey)
۰/۳۷۸	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۹	۰/۲۲۲	5%	
۰/۴۴۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۴۸	۰/۱۵۷۱	۱٪ بعد ۳ هفته (1% after 3 weeks)	
۰/۴۷۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۹	۰/۲۱۰۲	۵٪ بعد ۳ هفته (5% after 3 weeks)	

می‌شود نانورس‌ها، به‌عنوان گروه‌های عالی از مواد جاذب عمل کنند. (Fallah; Mohammadi and Niaziyan, 2013). به‌طور کلی، افزایش رطوبت می‌تواند به دلایل متعددی باشد. مثلاً سطح ویژه بالا، مقدار بیشتری آب در سطح بیرونی ذرات را احاطه می‌کند. هم‌چنین حضور ریز منفذها در ابعاد نانو باعث تجمع آب در این منافذ می‌شود، که سبب افزایش ظرفیت آب موجود و قابل‌استفاده در خاک می‌شود. ساختار نانوذرات در خاک، عامل دیگری برای افزایش ظرفیت نگهداشت آب می‌باشد (Fazlali et al, 2015). در بررسی عملکرد ۲ مدل مختلف برای توصیف منحنی رطوبتی خاک از شاخص‌های آماری مورد.

برای حضور و عدم حضور متغیر مستقل خاص اضافه شده به سیستم خاک، در منابع موجود اختلاف نظرهایی وجود دارد. بل و کلون (۱۹۹۵) برآورد بهتری از pwp در حضور ماده آلی داشتند (Bell and Klun, 1995)، کالهن و همکاران (۱۹۷۳) تنها تأثیر آن را بر روی ۳۳- کیلوپاسکال گزارش کردند (Calhoun et al, 1973)، در حالی که دانالاتوس و همکاران (۱۹۹۴) هیچ تأثیری از ماده آلی بر روی منحنی رطوبتی بدست نیاموردند (Danalatos et al, 1994). ساختار نانو رس‌ها با فضای بین دولایه، لایه‌بندی شده است که از لحاظ الکتریکی خنثی یا باردار می‌باشند. از طرفی ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه بالا، پایداری مکانیکی و شیمیایی، تنوع ساختاری و ویژگی‌های سطوح، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا سبب

جدول ۷. آماره‌های حاصل از کیفیت برازش دو مدل منحنی رطوبتی

Table 7. Statistics of the quality of fit of two models of moisture curve

RMSE	R ²	مدل منحنی رطوبتی Moisture curve model
۰/۰۲	۰/۹۷	ون گنوختن (۱۹۶۴) 1964 (Van Genuchten)
۰/۰۷۲	۰/۷۸	بروکس-کوری (۱۹۶۴) 1964 (Brooks-Corey)

جدول ۸. اثر تیمارهای مختلف نانوذرات رس مونت موریلونیت بر شاخص‌های مکانیکی (حدود آتربرگ) با اثر زمان

Table 8. The effect of different treatments of Montmorillonite clay nanoparticles on mechanical properties (Atterberg limits) with time effect

سطوح کاربرد	حد روانی (LL)	حد خمیری (PL)	شاخص خمیریایی (PI)
Application levels	Liquid limit	Plastic limit	Plastic index
خاک شاهد (Sample soil)	۲۸/۱۴	۲۲/۲۰	۵/۹۴
تیمار نانو ۱٪ (Nano treatment 1%)	۲۹/۹۶	۲۳/۷۵	۶/۲۰
تیمار نانو ۵٪ (Nano treatment 5%)	۳۰/۹۵	۲۴/۱۶	۶/۷۹
تیمار نانو ۱٪ بعد از سه هفته (Nano treatment 1% after 3 weeks)	۲۹/۹۳	۲۳/۳۷	۵/۹۵
تیمار نانو ۵٪ بعد از سه هفته (Nano treatment 5% after 3 weeks)	۳۰/۳۷	۲۳/۹۸	۶/۰۹

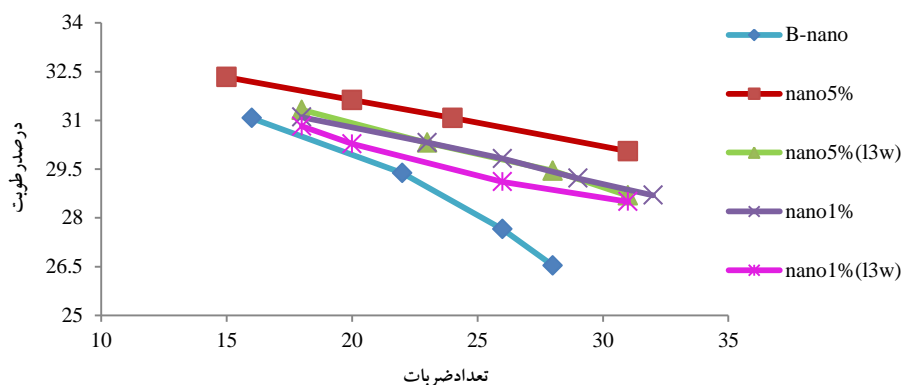
ضربات روی محور نیمه لگاریتمی رسم گردید. نمودار بیانگر این است که با زیاد شدن تعداد ضربات مورد نیاز برای بسته شدن شیار، میزان رطوبت کاهش می‌یابد. سپس، بهترین خط را به داده‌ها برازش کرده و میزان رطوبت مطابق با ۲۵ ضربه حد روانی خواهد بود که نتایج به شرح زیر به همراه نتایج تأثیر گذشت زمان بر روی حدود آتربرگ در جدول ۸ آمده است. طبق مشاهدات، افزودن نانورس باعث افزایش حد روانی و حد خمیری شده است. بیشترین افزایش در حد روانی برای تیمار حاوی ۵٪ وزنی نانورس است که با گذشت زمان از تأثیر آن کاسته شده است ولی همچنان از تیمار حاوی ۱٪ نانورس بیشتر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص پلاستیسیته با افزایش نانورس افزایش پیدا کرده است. بیشترین افزایش برای تیمار حاوی ۵٪ نانورس است. افزودن نانو ذرات به دست آمده از فرایند آسیاب گلوله‌های برای انواعی از خاک‌های ریزدانه و انجام آزمایش‌های حدود آتربرگ بر روی آن‌ها، نشانگر افزایش حد خمیری و روانی، ولی کاهش دامنه خمیری بوده است. همچنین توجه به جدول فوق چون مقدار سطح معنی‌داری برای تمام مولفه‌ها بزرگتر از مقدار خطا ۰/۰۵ است بنابراین دارای توزیع نرمال می‌باشد. افزودن نانو خاک به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان مقاومت فشاری آن‌ها را افزایش داده است. نتایج بررسی بهاری و همکاران در مقایسه تأثیر نانوسیلیس و نانورس بر روی حدود آتربرگ خاک رس مونت موریلونایت، نشان داد افزودن نانورس به خاک، باعث افزایش حد روانی و حد خمیری خاک گردید که آهنگ افزایش در مقدار حد روانی بیشتر از حد خمیری

قضاوت قرار گرفت و کیفیت برازش مدل‌های موردنظر با محاسبه R^2 (میزان همبستگی) و RMSE (میانگین خطای مربعات ریشه) بدست آمد. مدل ون‌گونختن با حداکثر مقدار R^2 و حداقل RMSE کیفیت برازش نسبتاً بهتری نسبت به مدل بروکس-کوری نشان داد. در مدل ون‌گونختن افزودنی نانوذرات رس $97/0=R^2$ درصد را نشان داد. دقت کمتر مدل بروکس-کوری در برازش را می‌توان به این صورت بیان کرد که، هر اندازه منافذ یکنواخت‌تر باشند مقدار پارامتر λ (که نشان‌دهنده توزیع اندازه منافذ است) بزرگتر و با افزایش مقدار λ شیب SWCC در قسمت

غیراشباع بیشتر خواهد شد. پتیل و همکاران (۲۰۱۲) با مطالعه خاک‌های ورتیسول هند نشان دادند که مدل ون‌گونختن نسبت به مدل بروکس-کوری برتری دارد (Patil et al, 2012). واگنر و همکاران (۱۹۹۸) اظهار کردند که مدل بروکس-کوری شاید آب موئینه را بهتر نشان می‌دهد (Wagner et al, 1998). همچنین اصلاحات متفاوتی بر مدل بروکس-کوری توسط محققان به منظور توصیف بهتر نقطه اشباع اعمال شد اما این پژوهش نشان داد که شاید حساسیت مدل با خاک دارای مواد افزودنی نیاز به مطالعات و تحقیقات بیشتری دارد. (جدول ۸)

بررسی نتایج تغییر ویژگی‌های مکانیکی خاک حاوی نانو رس مونت موریلونایت

در این مرحله، تغییرات شاخص‌های مکانیکی خاک تحت تیمارهای مختلف نانورس سنجیده شد. برای محاسبه حد روانی، میزان رطوبت را برحسب تعداد



شکل ۲. اثر تیمارهای مختلف نانورس بر حد روانی (اثر متقابل)

Figure 2. The effect of different nanoclay treatments on liquid limit (interaction effect)

جدول ۹. نتایج آزمون مقایسه میانگین متغیرهای حدود آتربرگ

Table 9. Test results comparing the mean of the variables of the Atherberg limits

Sig.	آماره F	متوسط مربعات Average squares	درجه آزادی Degrees of freedom	مجموع مربعات sum of squares	
۰/۱۴۸	۷/۷۵۷	۱/۸۸۱	۲	۳/۷۶۳	بین گروهی Intergroup
		۰/۳۲۷	۲	۰/۶۵۴	درون گروهی LL between group
			۴	۴/۴۷۱	مجموع Total
۰/۰۵۳	۱۷/۷۷۸	۱/۱۶۸	۲	۲/۳۳۶	بین گروهی Intergroup
		۰/۰۶۶	۲	۰/۱۳۱	درون گروهی PL between group
			۴	۲/۴۶۷	مجموع Total
۰/۵۶۴	۰/۷۷۴	۰/۱۰۷	۲	۰/۲۱۴	بین گروهی Intergroup
		۰/۱۳۸	۲	۰/۲۷۶	درون گروهی PI between group
			۳	۰/۴۹۰	مجموع Total

هفته که نشان می‌دهد اثر نانورس پس از گذشت این زمان کاملاً از بین نرفته است.

نتایج تحلیل آماری داده‌های حدود آتربرگ

نتایج نرمال بودن متغیرها و مقایسه میانگین داده‌های شاخص‌های مکانیکی در جدول ۱۱ آمده است. باتوجه به جدول فوق برای همه تیمارها در حدود آتربرگ $p\text{-value} > 0.05$ است بنابراین تیمارها دارای میانگین یکسان‌اند و اختلاف معنی‌داری بین تیمارها وجود ندارد.

بوده و در نتیجه مقدار نشانه خمیری خاک افزایش یافت (Karumanchi *et al*, 2020). در شکل ۲ تأثیر متقابل نانوذرات رسی بر حدروانی و حدود آتربرگ در تیمار ۱ و ۵ درصد پس از تعادل اولیه و با گذشت زمان مشاهده می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تأثیر افزودن نانوذرات رسی بر حدروانی در تیمار حاوی ۵٪ وزنی نانورس است که میزان رطوبت در آن بیشترین میزان را دارا می‌باشد و سپس تیمار حاوی ۵٪ پس از گذشت سه

نتیجه‌گیری

شاخص با گذشت زمان کاهش پیدا کرد ولی همچنان حدروانی و حدخمیری نسبت به تیمار شاهد بیشتر بود که این امر موید آن بود که تأثیر نانورس با گذشت زمان هنوز از بین نرفته است. در این پژوهش، در خاک لسی با بافت لومی شنی، افزودن نانوذرات مونت‌موریلونایت سبب استحکام، افزایش مقاومت و افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک گردید. در این پژوهش، افزودن نانوذرات مونت‌موریلونایت به خاک لسی با بافت لومی شنی، از سویی سبب استحکام خاک و افزایش مقاومت و بهبود ساختار ضعیف آن گردیده است. این امر، بخصوص در خاک‌های لسی با قابلیت فرسایش‌پذیری بالا، پارامتری مثبت بشمار می‌رود. از سویی دیگر، با افزایش ظرفیت نگهداشت آب در این نوع خاک، می‌توان در مناطقی که خاک غالب منطقه لسی بوده و انجام عملیات کشاورزی نیز اجتناب‌ناپذیر است، سبب افزایش شانس استقرار مناسب گیاهان گردد که خود اثر زیستی فزاینده‌ای بر استحکام خاک‌ها با فرایندهایی مختلف خواهد داشت. نتیجه حاصله منتج به ایجاد خاکدانه‌هایی مستحکم‌تر و همچنین مقاومت بیشتر این نوع خاک‌ها می‌گردد.

بر اساس مجموعه نتایج حاصل از بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، نتیجه‌گیری زیر قابل استنتاج می‌باشد. افزودن نانورس مونت‌موریلونایت تأثیر معنی‌داری بر نگهداشت آب در مکش‌های مختلف رطوبتی داشته و همه مقادیر رطوبت موجود، مخصوصاً در مکش‌های پایین خاک را افزایش داد. بررسی پارامتریک منحنی رطوبتی خاک- نانورس نشان داد با افزودن نانورس مقدار رطوبت اشباع Θ_s افزایش یافت و بیشترین افزایش در سطح بالاتر نانورس بود. تغییر در رطوبت باقیمانده Θ_r قابل‌ملاحظه نبوده و همانند پارامتر n و α عموماً دارای روند کاهشی بود. در ارزیابی اعتبار مدل‌های به کاربرده شده پیش‌بینی پارامترهای معادله منحنی رطوبتی با استفاده از مدل ون‌گونختن نتایج بهتری از مدل بروکس- کوری نشان داد. در بررسی ویژگی‌های مکانیکی خاک، افزودن نانورس سبب افزایش حدروانی شد، حدخمیری نیز با افزایش سطح نانورس با شدت کمتری افزایش پیدا کرد. به همین دلیل شاخص پلاستیسیته با افزایش سطح کاربرد نانورس افزایش پیدا کرد. این

منابع مورد استفاده

- Abbasi, N., Farjad, A., and Sepehri, S. 2018. The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1): 327-335.
- Arya, A., and Jain, A. 2017. A review of geotechnical characteristics of nano-additives treated soils. *Int J Adv Res Sci Eng*, 6(1): 838-43.
- ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. 2010. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM international.
- Bahari, A., Sadeghi Nik, A., Roodbari, M., Taghavi, K. and Mirshafiei, S. E. 2012. Synthesis and Strength Study of Cement Mortars Containing SiC Nano Particles. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*, 7(4).
- Bell, M. A., and Van Keulen, H. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Science Society of America Journal*, 59(3): 865-871.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Pap. 3. Colorado State Univ., Fort Collins.
- Calhoun, F. G., Hammoud, L. C. and Caldwell, R. E., 1973. Influence of particle size and organic matter on water retention in selected Florida soils, *Soil Crop Sci. Fla. Proc.*, 32, p. 111-113.
- Danalatos, N. G., Kosmas, C. S., Drissen, P.M and Yassoglou, N. 1994. Estimation of the draining soil moisture characteristics from standard data as recorded in soil survey, *Geoderma*, 64(1-2): 155-165.
- Ebrahimi S. 2004. Cyclic swelling behavior of superabsorbent polymers in soil porous media. Master Thesis, Faculty of Agricultural Engineering. Tarbiat Modares University, p 107.
- Ebrahimi, S., Homaei, M., and Vasheghani Farahani, E. 2008. Cyclic Swelling of superabsorbent polymers in soil porous media. *J. Agric. Engin. Res.* 8(4): 1-18.

- Ebrahimi, S., Shayegan, J., Malakouti, M., and Akbari, A. 2011. Environmental Evaluation and Assessment of Some Important Factors of Oil Contamination in Soil around Sarkhoun Gas Refinery of Bandar Abbas. *Journal of Environmental Studies*, 37 (57), 9-26 (In Persian).
- Fallah, M., S. Ebrahimi, and M. Shabanpour. 2013. Hydrocarbon pollution emission in the pilot and pulse condition in saturated porous media of soil. *Journal of Water and Soil Conservation*. 20(3): 227-240.
- Fallah, M., Shabanpor, M., Zakerinia, M., and Ebrahimi, S. 2015. Risk assessment of gas oil and kerosene contamination on some properties of silty clay soil. *Environmental monitoring and assessment*, 187(7): 1-13.
- Fazlali, S., Ebrahimi, S., Zakerinia, M., and Movahedi Naeni, S. A. 2015. Monitoring of the Transfer of Kerosene and Water through the Light Soil Contains Montmorillonite Nanoclay. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 5(1): 55-66.
- Hareesh, P., and Vinoth Kumar, R. 2016. Assessment of nano-materials on geotechnical properties of Clayey soils. In *International Conference on Engineering Innovations and Solutions*.
- Karumanchi, M., Avula, G., Pangi, R. and Sirigiri, S. 2020. Improvement of consistency limits, specific gravities, and permeability characteristics of soft soil with nanomaterial: Nanoclay. *Materials Today: Proceedings*, 33: 232-238.
- Majeed, Z. H., and Taha, M. R. 2013. A review of stabilization of soils by using nanomaterials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(2): 576-581.
- Mohammadi, M., and Niazian, M. 2013. Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. *Int J Adv Sci Tech Res*, 3(3): 37-46.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3):513-522.
- Patil, N.G., Pal, D.K., Mandal, C. and Mandal, D.K., 2012. Soil water retention characteristics of vertisols and pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural networks approaches to estimate AWC. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 138(2):177-184.
- Priyadharshini, R., and Arumairaj, P. D. (2015). Improvement of bearing capacity of soft clay using nanomaterials. *Int J Sci Res*, 4(6): 218-21.
- Tabarsa, A. 2017. Effect of adding nanoclay on the geotechnical behavior of fine-grained soft soils. *Journal of Engineering Geology*, 11(2): 225-246.
- Taha, O. M. E., and Taha, M. R. 2016. Soil-water characteristic curves and hydraulic conductivity of nanomaterial-soil-bentonite mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1): 1-14.
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892-898.
- Van Genuchten, M. V., Leij, F. J., and Yates, S. R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Wagner, B., Tarnawski, V.R., Wessolek, G. and Plagge, R. 1998. Suitability of models for the estimation of soil hydraulic parameters. *Geoderma*, 86(3-4): 229-239.
- Zhang, G. 2007. Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils. In *Advances in measurement and modeling of soil behavior* (pp. 1-13).
- Zhou, B., and Chen, X. 2017. Effect of Nano-carbon on water holding capacity in a Sandy soil of the loess plateau. *Earth Sciences Research Journal*, 21(4): 189-195.



Changing the Atterberg's Limits and Water Retention Characteristics of a Loess Soil Containing Montmorillonite Nanoclay

Zahra Darvish Ayuri¹, Soheila Ebrahimi^{2*}, Seyed Alireza Movahedi Naeeni³ and Mehdi Zakerinia⁴

- 1) MSc Graduated of Soil Science, Department of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
- 2) Assistant Professor of Soil Science, Department of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
- 3) Associate Professor of Soil Science, Department of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
- 4) Associate Professor of Water Science, Department of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

*Corresponding author email: sohebrahimi@gmail.com

Received: 22-05-2020

Accepted: 28-08-2021

Abstract

Soil improvement in loess soils, due to susceptibility to erosion, can increase strength, resistance and change or modify their mechanical properties. The purpose of this study was to investigate the changes in soil moisture curve parameters and some mechanical indices of loamy sand soils containing montmorillonite nanoclay. Thus, soil water retention was investigated by applying 1 and 5% of nanoclay and water holding capacity in soil was investigated by VanGenuchten and Brooks-Corey models. Then mechanical properties of soil were investigated by measuring Atterberg limits and how they change. Both experiments were re-evaluated over time. Nanoclay had a significant effect on water retention in various moisture suction systems and increased volumetric moisture content, especially in low suction. It also increased the fine porosity at the air entry value, indicating a decrease in the rate of water drainage from soil and increased its storage capacity in losses soil. Increasing the amount of nanoclay led to an increase in Θ_s , but the change in Θ_r was not significant. As nanoclay increased, α and n parameters decreased, respectively. Predicting the parameters of the moisture curve equation using the VanGenuchten model showed better results. Liquid and plasticity limits of the soil also increased. However, the increase in the amount of liquid limit was higher and the soil plasticity index increased. The increase in the surface area and the ability to maintain water by the clays and their shear strength can be due to this fact. Monitoring of atterberg and moisture curve parameters over time indicated their persistence.

Keywords: Loesses, Nanoclay, Soil water retention curve, Atterberg limit, Plasticity index