بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رس با استفاده از نانورس و پلی‌الکترولیت‌کاتیونی

غلام مرادی
دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
gmoradi@tabrizu.ac.ir

سجاد عباسی
کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
sajadabasi1373@gmail.com،

علیرضا عباس‌نژاد
استادیار،دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
abbasnejad@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این مقاله تأثیر پلیمر محلول در آب پلی‌الکترولیت کاتیونی و نانوذرات نانورس بر مشخصات مختلف خاک رس نوع CL بررسی و مقایسه شده است. نانورس با مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزن خشک خاک و پلی الکترولیت کاتیونی با غلظت‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ گرم بر لیتر و بر اساس رطوبت بهینه به خاک اضافه شده و تأثیر آن‌ها بر مشخصات خاک در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های تراکم‌پذیری، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصور نشده، تورم آزاد، pH و پتانسیل حفظ رطوبت برای نمونه‌های اصلاح نشده، اصلاح شده با نانورس و اصلاح شده با پلی‌الکترولیت کاتیونی انجام شده است. هر دو ماده سبب افزایش رطوبت بهینه، مقاومت فشاری و پتانسیل حفظ رطوبت، و کاهش وزن مخصوص و تورم‌پذیری خاک شده و pH خاک تغییر چندانی نداشته است. برای مقادیر مختلف پلی الکترولیت کاتیونی، با وجود افزایش حد خمیری و حد روانی خاک، تغییرات شاخص خمیری خاک ناچیز بود. نانورس نیز تا ۲٪ تغییر چندانی بر حدود اتربرگ خاک نداشته و به ازای ۳٪، حد روانی و شاخص خمیری خاک را افزایش داده است.

واژهای کلیدی: خاک رس، تثبیت شیمیایی، پلی الکترولیت کاتیونی، نانورس

Improving Geotechnical Properties of Clay Using Cationic Polyelectrolyte and Nanoclay

Gholam Moradi*, Sajjad Abbasi, Alireza abbasnejad

ABSTRACT

In this paper, the effect of the water-soluble polymer of cationic polyelectrolyte and Nano-clay nanoparticles on different properties of CL clay was investigated and compared. Nano-clay with 0.5, 1, 2 and 3% dry weight of soil and cationic polyelectrolyte with concentrations of 3, 6, 9 and 12 gr/liter based on optimum water content were added to the soil, and their effects on the soil details investigated in 3,7,14 and 28 days of processing. Compressibility, Atterberg Limits, unconfined compressive strength, free swelling, pH, and moisture retaining potential tests were performed on untreated soil samples, treated with Nano-clay and treated with cationic polyelectrolyte. Both materials caused an increase in optimum moisture, compressive strength, and moisture-retaining potential, and decreased Maximum dry density and swelling. Soil pH did not change significantly. For different amounts of cationic polyelectrolyte, besides of increases in plastic limit and liquid limit of soil, changes in soil plastic index were not remarkable. Also, Nano-clay had not much effect on Atterberg Limits up to 2%. And for 3% it increased liquid limit and plastic index of soil.

KEYWORDS

Clay soil, chemical stabilization, cationic polyelectrolyte, Nano-clay

تاریخ دریافت : ۱۳۹۷/۱۰/۲۰ تاریخ آخرین اصلاحات : ۱۴۰۰/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در خصوص استفاده از مواد شیمیایی نوین از جمله پلیمرهای شیمیایی و نانوذرات به منظور اصلاح خاک‌های ریزدانه صورت گرفته است. استفاده از پلیمرهای آلی در سالیان اخیر اهمیت فراوانی یافته است و این پلیمرها توانایی خود را برای آنکه به عنوان ماده‌ی افزودنی جهت تثبیت خاک استفاده شوند، نشان داده‌اند. از سوی دیگر در سال‌های اخیر گام‌های بزرگی در زمینه فناوری نانو برداشته شده است و پیشرفت‌های فراوانی مبتنی بر فناوری نانو در مهندسی ژئوتکنیک اتفاق افتاده است. پلیمرها اغلب با ذرات رس خاک واکنش شیمیایی نشان می‌دهند. میزان اندرکنش خاک و پلیمر به خواص پلیمر و خواص خاک بستگی دارد. آن دسته از خواص پلیمر که مهم هستند عبارتند از: نوع و مقدار بار سطحی، شکل پلیمر، وزن مولکولی و اندازه مولکولی. خواص مهم خاک نیز عبارتند از: نوع و مقدار رس خاک، نیروهای یونی خاک، نوع یون‌های موجود در ترکیب خاک و pH [۱]. نانوذرات نیز به دلیل داشتن سطح ویژه بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی، به طور فعالی با دیگر ذرات برهم کنش دارند[۲]. همچنین، این مواد گرچه چسباننده نیستند، اما در یک خاک وارد می‌شوند و انتظار می‌رود که فاصله‌ی بین ذرات را کاهش داده و خاک را در ابعاد نانو، مسلح نمایند. این امر منجر به ایجاد ساختاری سخت‌تر و مقاوم‌تر برای خاک می‌شود[۳]. در حوزه استفاده از نانومواد در تثبیت خاک، یونکورا[۱] و میوا[۲] در سال ۱۹۹۲ مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای را با استفاده از نانوسیلیس افزایش دادند[۴]. در مطالعه گالاگر[۳] و همکاران در سال ۲۰۰۲، به منظور بررسی تأثیر محلول کلوئید سیلیکا بر خواص تغییر شکل ماسه سست اشباع، آزمایش‌های سه محوری دوره‌ای بر روی نمونه‌های با غلظت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد کلوئید سیلیکا انجام گرفت. به طور کلی، نمونه‌های تثبیت‌شده با غلظت‌های بالاتر کلوئید سیلیکا کرنش بسیار کم‌تری در طی بارگذاری دوره‌ای تجربه کردند. ماسه‌های تثبیت‌شده با غلظت‌های کم‌تر نیز، بارگذاری دوره‌ای را به خوبی تحمل نمودند، اما کرنش بیشتری تجربه کردند[۵]. در سال ۲۰۰۴، آزمایشات ژانگ[۴] نشان داد که وجود نانوساختارها در خاک موجب افزایش حدود اتربرگ خاک می‌شود[۶]. وی در سال ۲۰۰۷ به بررسی اثر تحکیمی نانوذرات در خاک پرداخت. نتایج تحقیقات او نشان داد که با افزودن نانوذرات به خاک، ثابت تحکیم در نمونه‌ها افزایش می‌یابد[۷]. در مطالعه‌ای توسط بهمنی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر روی تأثیر نانوذرات نانوسیلیکا بر مشخصات خاک پسماند تثبیت شده با سیمان، مشاهده شد که نانوسیلیکا تأثیر مناسبی روی هدایت هیدرولیکی و تراکم پذیری خاک داشته و از طرف دیگر اضافه کردن ۰/۴ درصد نانوسیلیکا به خاک تثبیت شده با سیمان مقاومت فشاری آن را تا ۸۰ درصد افزایش می‌دهد[۸]. هاس[۵] و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار DTPA، در حذف فلزات سنگین از شیرابه‌های خاک را بررسی کردند. طبق نتایج، این نانوذرات می‌توانند Cd، Co و Cu را از شیرابه در محدوده‌ای از pH حذف کنند[۹]. احمدی و شفیعی در سال ۲۰۱۹ تاثیر نانوسیلیس و میکروسیلیس را بر خاک رس بررسی و مقایسه نمودند. نتایج آزمایشات مقاومت تک‌محوری نشان داد که برای مقادیر کمتر از ۲ درصد، نانوسیلیس مقاومت نمونه‌ها را بیش از میکروسیلیس افزایش می‌دهد و با افزایش درصد مواد، نتایج نزدیکی برای دو ماده بدست می‌آید[۱۰]. شهیدی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ تأثیر دو نوع نانورس را بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل بررسی کردند. تغییر خواص خمیری خاک باعث کاهش آبگریزی خاک آلوده اصلاح شده با نانورس شد. همچنین، دوام خاک آلوده اصلاح شده با نانوذرات در برابر سیکل‌های مختلف ذوب و انجماد افزایش یافت[۱۱]. در سوی دیگر، مطالعات گسترده‌ای نیز بر روی پلیمرهای تثبیت‌کننده خاک انجام شده است. الدهام[۶] و همکارانش طی سال‌های ۱۹۴۶ تا ۱۹۷۷، پژوهش‌های کاملی بر روی تثبیت‌کننده‌های شناخته شده تا آن زمان انجام دادند. گزارش آن‌ها در ارتباط با کاربرد اسیدها، قیر، سیمان، آهک، رزین‌ها، نمک‌ها و دیگر محصولاتی است که دارای پتانسیل تثبیت‌کنندگی هستند. طبق گزارش آن‌ها رزین‌های پلیمری بیشترین افزایش را در مقاومت فشاری مصالح ماسه‌ای نشان دادند[۱۲]. زرنبرگ[۷] و همکاران در سال ۲۰۰۴ اثر تثبیت‌کننده‌های نوین بر خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از اوره، فرمالدهید و اوره فرمالدهید به عنوان تثبیت‌کننده استفاده کردند. نتایج نشان دادند که افزایش ۲٪ اوره، فرمالدهید و ملامین و یا ۲/۵٪ اوره فرمالدهید مقاومت خاک ماسه‌ای را به ۲/۴ مگاپاسکال می‌رساند، در صورتی که برای انجام پروژه‌های راه‌سازی رسیدن به مقاومت ۱/۷ مگاپاسکال کافی است[۱۳]. والسکوئز[۸] و همکاران در سال ۲۰۰۶ مقاومت برشی و ضریب برجهندگی دو نوع خاک، یکی با نشانه خمیری ۹/۴ و دیگری با نشانه خمیری ۱۵/۲ را که با پلیمر تثبیت شده بودند، بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که ضریب برجهندگی نمونه‌های تثبیت شده بسیار بیشتر از نمونه‌های کنترل است که میزان این اختلاف به نوع خاک و میزان پلیمر بستگی دارد[۱۴]. جین لیو[۹] در سال ۲۰۱۰، رفتار خاک رس تثبیت شده با پلیمر آلی STW را بررسی نمود. در این پژوهش مقاومت محصورنشده افزایش یافته و تغییرات اصلی در ۲۴ ساعت اول اتفاق افتاد. با افزایش مقدار پلیمر، مقاومت، پایداری در آب و مقاومت فرسایشی افزایش یافت، اما در مورد زاویه اصطکاک تغییرات محسوسی مشاهده نشد. سرانجام یک آزمایش صحرایی انجام شد و نتایج نشان داد که آزمایش با STW بر روی رس‌های شیب‌دار مؤثر است[۱۵]. نتایج مطالعه میرزابابایی و همکارانشان بر روی نمونه‌های مقاومت فشاری محصورنشده نشان داد که پلیمر PVA می‌تواند مقاومت فشاری محدود نشده و شکل‌پذیری خاک رس را به طور اساسی بهبود بخشد. مقدار بهینه پلی وینیل الکل به وزن مخصوص خشک حداکثر، نسبت تخلخل خاک و درصد رطوبت وابسته است[۱۶].

---

[۱] Yone Kura
[۲] Miwa
[۳] Gallagher
[۴] Zhang
[۵] Hughes
[۶] Oldham
[۷] Zornberg
[۸] Velasquez
[۹] Jin Liu

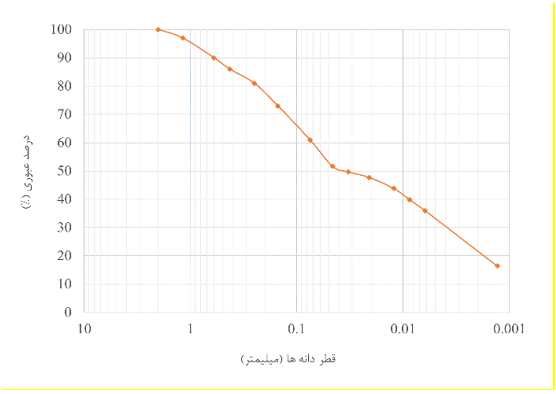
در این مقاله به بررسی و مقایسه تأثیر پلی‌الکترولیت کاتیونی و نانورس به عنوان تثبیت‌کننده‌های خاک پرداخته شد. نانورس با مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزن خشک خاک و پلی‌الکترولیت کاتیونی با غلظت‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ گرم بر لیتر و بر اساس رطوبت بهینه به خاک اضافه شدند. در ادامه تأثیر درصدهای مختلف این مواد بر تراکم‌پذیری، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده، سختی، تورم آزاد، pH و پتانسیل حفظ رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفت.

۲-مواد و مصالح

در تحقیق حاضر، مجموعه‌ای از مصالح شامل خاک و مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه مشخصات آن‌ها، به ترتیب ارائه می‌گردد.

۲-۱-خاک

خاک مورد استفاده در این آزمایش، از نوع رس بوده که در بسته‌های استاندارد و به صورت مرطوب تهیه شده است. این خاک، متعلق به منطقه آناخاتون تبریز می‌باشد. منحنی دانه‌بندی و مشخصات خاک مطابق استاندارد ASTM D422-63 [۱۰]، به ترتیب در (شکل ۱) و (جدول ۱) ارائه شده است.



شکل ۱ : منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.

جدول ۱ : جدول ویژگی‌های خاک

ویژگی خاک	خاک رس	استاندارد
توده ویژه (G_s)	۲/۷۵	ASTM D854-83
حد روانی (LL) (٪)	۴۶	ASTM D4318-84
حد خمیری (PL) (٪)	۲۲	ASTM D4318-84
نشانه خمیری (PI) (٪)	۲۴	ASTM D4318-84
طبقه‌بندی متحد	CL	USCS
وزن مخصوص حداکثر (KN/m^3)	۱۷/۴۲	ASTM D698-78
رطوبت بهینه (٪)	۲۰	ASTM D698-78

۲-۲- پلی‌الکترولیت کاتیونی یا پلی‌آکریلامید(PAM)

پلی الکترولیت کاتیونی یک منعقدکننده کاتیونی به شکل پودر سفید رنگ می‌باشد که پس از تهیه به شکل پودر، مقادیر مختلف این ماده در آب مقطر حل شده و محلول‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ گرم بر لیتر این پلیمر جهت استفاده در آزمایشات مربوط به پژوهش حاضر، تهیه شد. مشخصات فنی پلیمر مورد استفاده، در (جدول ۲) ارائه شده است.

جدول ۲ : مشخصات فنی پلی الکترولیت کاتیونی

مشخصات عمومی	پودر سفید رنگ
درجه بار الکتریکی	متوسط
pH (محلول ۰/۵٪)	۳-۵ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
چگالی حجمی	۷۵۰±۵۰
ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس	
۰/۱٪	۱۸۰ cps
۰/۲۵٪	۴۰۰ cps
۰/۵۰٪	۸۰۰ cps
۱/۰۰٪	۲۰۰۰ cps

۲-۳-نانورس

نانورس‌ها انواع گوناگونی دارند که عبارتند از: مونت‌موریلونیت، بنتونیت، کائولینیت، هکتوریت و هالوسیت. نانورس‌ها با توجه به نوع، دارای خواص و ویژگی‌های متفاوتی هستند. ولی خواصی چون سطح ویژه بالا و از بین بردن آلودگی‌ها در اکثر آن‌ها مشترک است. این مواد غیرسمی هستند و دارای ضریب الاستیک بالایی می‌باشند. نانورس مورد استفاده در این پژوهش از نوع نانوکلویزیت 25A است. مشخصات نانورس مورد استفاده در آزمایشات در (جدول ۳) ارائه شده است.

جدول ۳ : مشخصات فنی نانورس

مشخصات عمومی	پودر کرمی روشن
درصد خلوص (٪)	+۹۹
اندازه ذرات (nm)	<=۱۳
دانسیته (gr/cm3)	۱/۸۷
سختی	۸۳
درصد رطوبت (٪)	<۲
مدول الاستیسیته (GPA)	۴/۶

۳-روش‌ها

۳-۱-تراکم

خاک رس مورد مطالعه بعد از دو روز قرارگیری در گرمخانه، کوبیده شده و از الک شماره ۴ عبور داده شد و بلافاصله پس از مخلوط شدن با مقادیر مختلف تثبیت‌کننده‌ها، مطابق با استاندارد ASTM D698 (2010) [۱۸] تحت آزمایش تراکم قرار گرفت.

۳-۲-حدود اتربرگ

خاک عبوری از الک ۴۰ پس از مخلوط شدن با مقادیر مختلف مواد افزودنی و اضافه شدن رطوبت، به مدت ۲۴ ساعت در داخل نایلون قرار گرفت تا آب به خوبی و به صورت یکنواخت جذب ذرات خاک شود. پس از گذشت یک روز نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D4318 (2008) [۱۹]، تحت آزمایش قرار گرفته و مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک به ازای مقادیر مختلف نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی به دست آمد.

۳-۳- مقاومت فشاری محصورنشده و پتانسیل حفظ رطوبت

نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده پس از تهیه، به مدت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در دمای آزمایشگاه (۲۰ درجه سانتی‌گراد) عمل‌آوری شدند. پس از طی زمان عمل‌آوری، مطابق استاندارد ASTM D2166 (2006) [۲۰] نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته و مقادیر حداکثر مقاومت نمونه‌ها و منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمد. همچنین آزمایش تعیین درصد رطوبت برای تمامی نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده انجام گرفت و تغییرات رطوبت خاک در بازه‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای نمونه‌های حاوی هر دو ماده‌ی نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی انجام گرفت تا با انجام مقایسه مشخص شود، کدام ماده تغییرات رطوبت کمتری در بازه ۲۸ روزه از خود نشان می‌دهند و اینکه نسبت به خاک طبیعی چه وضعیتی خواهند داشت.

۳-۴- تورم آزاد

مقدار تورم بستگی کامل به شدت نیروی جاذبه و دافعه‌ی فیزیکی و شیمیایی دارد. ساختمان توده‌ی رس، ساختمان شبکه بلوری و ظرفیت تبادل کاتیونی نیز در بروز پدیده تورم نقش بسزایی ایفا می‌کند. نوع کانی رس، نوع یون موجود در خاک و شاخص خمیری خاک نیز عواملی هستند که بر میزان تورم خاک تأثیرگذارند[۲۱]. از مشخص‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری درصد تورم و فشار تورم، روش استاندارد ASTM D4546-96 [۲۲] می‌باشد، بدین صورت که خاک باید به صورت جانبی محدود شده و تغییرات حجم به صورت محوری انجام می‌گیرد و نمونه باید به آب آزاد دسترسی داشته باشد. در این مطالعه، نمونه‌ها پس از تهیه تحت زمان عمل‌آوری ۳، ۱۴ و ۲۸ روز قرار گرفته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه تحکیم یک بعدی قرار گرفتند، تا تغییرات حجم خاک در فواصل زمانی مختلف ثبت گردد.

۳-۵- pH

بسیاری از واکنش‌های شیمیایی و زیست‌شیمیایی خاک تنها در pH مشخصی از آن رخ می‌دهد. در این تحقیق، نمونه‌ها برای آزمایش pH مطابق با استاندارد ASTM D4972-95 [۲۳]، با نسبت‌های مشخص شده با مواد مضاف مخلوط گشته و به مدت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. هر نمونه پس از طی زمان عمل‌آوری، از الک ۱۰ عبور کرده و سپس مقداری آب مقطر به نمونه‌ها اضافه شد و یک ساعت در محلی بدون حرکت قرار داده شد. دستگاه با استفاده از تامپون‌های ۷ و ۹ کالیبره شده و آزمایش انجام گرفت.

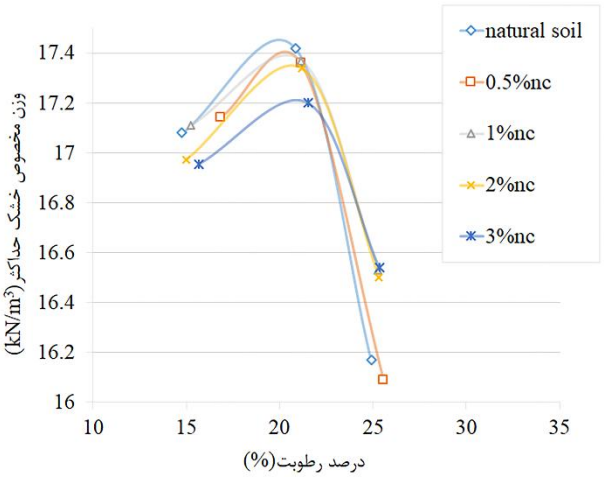
۴-نتایج و بحث

۴-۱-تراکم‌پذیری خاک

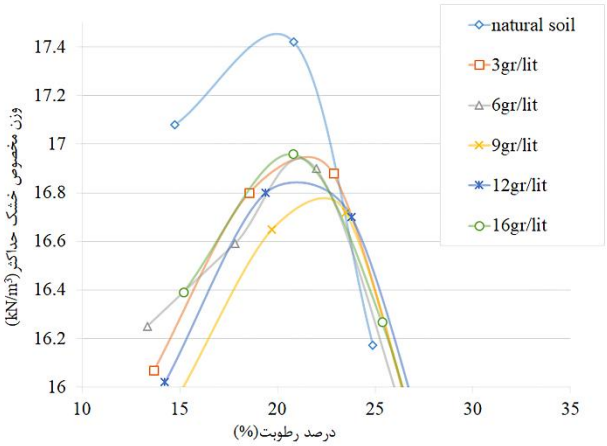
در (شکل ۲) منحنی‌های تراکم خاک به ازای درصدهای مختلف نانورس و در (شکل ۳) منحنی‌های تراکم خاک به ازای مقادیر مختلف پلی‌الکترولیت کاتیونی نشان داده شده است. با توجه به (شکل ۴-الف) با افزایش مقدار نانورس در خاک، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک به تدریج و به مقدار ناچیز کاهش می‌یابد. یکی از دلایل کاهش حداکثر دانسیته خشک در اثر افزودن نانورس به خاک، بالا بودن چگالی دانه‌های خاک نسبت به دانه‌های نانورس است. همچنین این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش مصالح ریزدانه و در نتیجه افزایش سطح ویژه خاک و جذب آب بیشتر به وسیله مخلوط خاک و نانورس باشد؛ به این صورت که با افزایش رطوبت بهینه، آب کم‌کم جای ذرات خاک را گرفته و به دلیل وزن مخصوص کم‌تر آب نسبت به مصالح مصرفی، حداکثر دانسیته خشک نیز کاهش می‌یابد. دلیل سوم وجود نانوتخلخل‌هایی است که نانوذرات در خاک ایجاد می‌کنند و آب در داخل آن‌ها ماندگار می‌شود.

همچنین با توجه به منحنی (شکل ۵-الف) نیز می‌توان دریافت که با افزایش نانورس به خاک، رطوبت بهینه خاک افزایش پیدا می‌کند. با اضافه نمودن نانورس به خاک رس، سطح ویژه مخلوط خاک و نانورس افزایش یافته و رطوبت مورد نیاز برای روغنکاری ذرات افزایش پیدا می‌کند[۲۴].

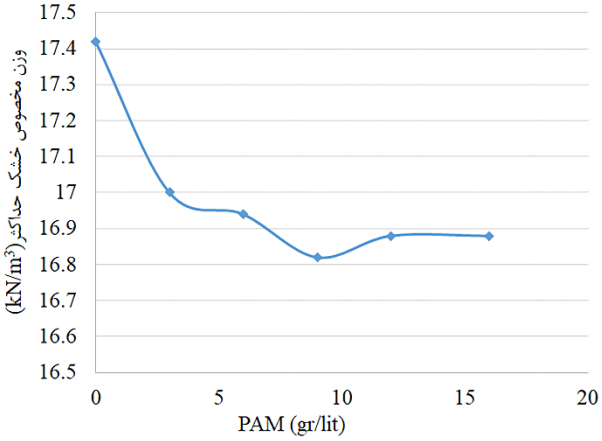
از سوی دیگر، مطابق(شکل ۴-ب) و (شکل ۵-ب) با اضافه شدن پلی الکترولیت کاتیونی به خاک، به طور کلی وزن مخصوص خشک حداکثر خاک نسبت به خاک طبیعی کاهش یافته و رطوبت بهینه خاک نیز افزایش می‌یابد. با این وجود، در خاک‌های حاوی پلی‌الکترولیت کاتیونی، با افزایش غلظت محلول تغییرات وزن مخصوص و رطوبت بهینه خاک قابل ملاحظه نیست؛ طوری که به ازای ۱۶ گرم بر لیتر نیز تغییری اتفاق نمی‌افتد. دلیل عمده کاهش دانسیته و افزایش رطوبت بهینه نمونه‌های حاوی پلی‌الکترولیت خاصیت آبدوستی این ماده است که منجر به افزایش جذب آب و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. آب اضافی جذب شده مقداری از انرژی تراکم را تلف کرده و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک را کاهش می‌دهد[۲۵].



شکل ۲ : منحنی تراکم خاک طبیعی و درصدهای مختلف نانورس.

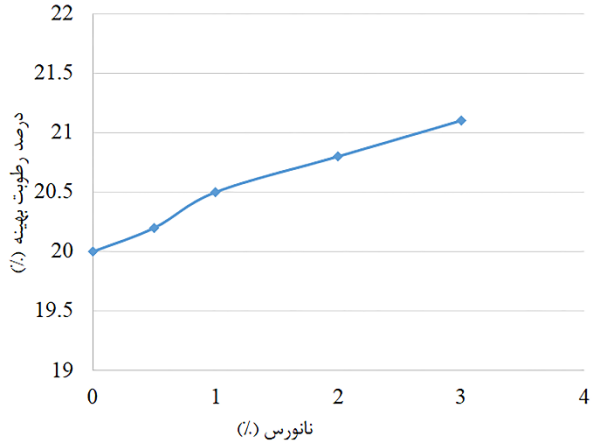


شکل ۳ : منحنی تراکم خاک طبیعی و درصدهای مختلف پلی الکترولیت کاتیونی.

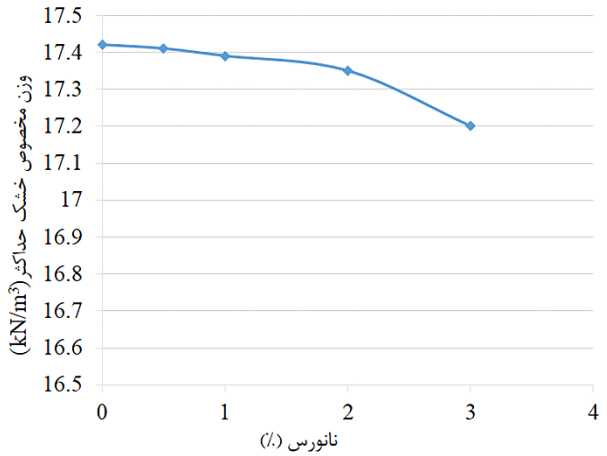


(ب)

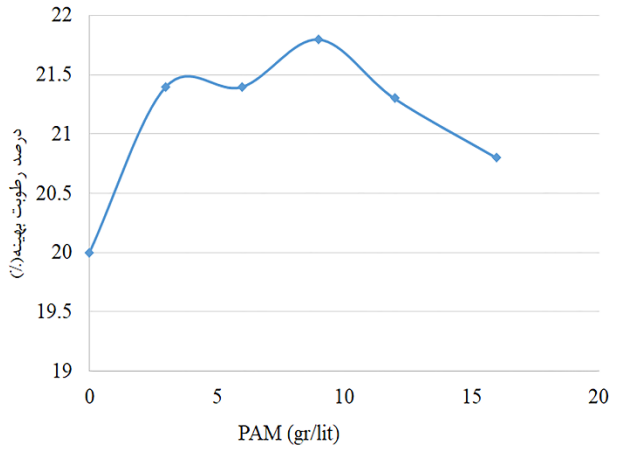
شکل ۴ : منحنی تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر نسبت به مقادیر مختلف (الف) نانورس و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.



(الف)



(الف)

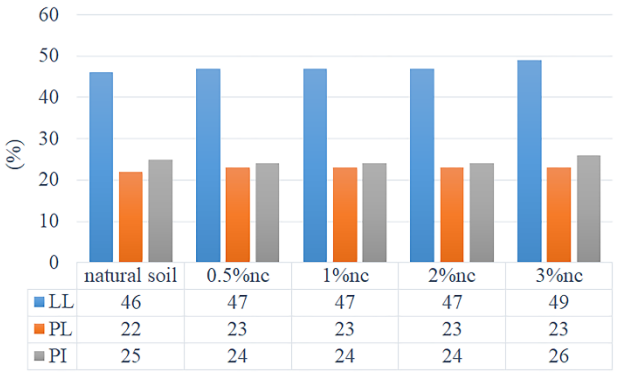


(ب)

شکل ۵: منحنی تغییرات رطوبت بهینه نسبت به مقادیر مختلف (الف) نانورس و(ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

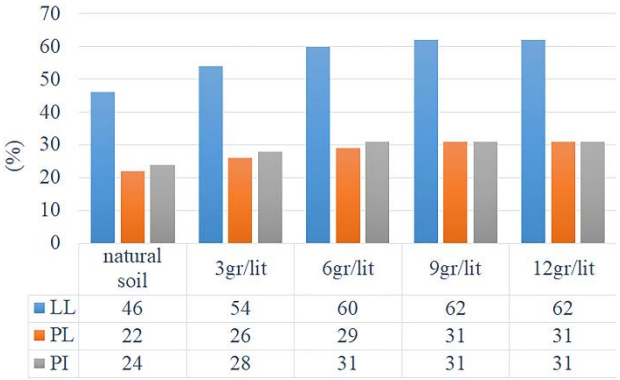
۴-۲- حدود اتربرگ

مطابق (شکل ۶) با افزایش مقدار نانورس حد روانی و حد خمیری خاک هر دو افزایش می‌یابند. با این وجود نرخ افزایش حد روانی نسبت به حد خمیری بیشتر بوده و در نتیجه شاخص خمیری خاک که حاصل تفاضل حد روانی و حد خمیری است به مقدار ناچیزی افزایش پیدا می‌کند که قابل چشم‌پوشی است. مطابق نتایج مطالعات مشابه، با افزایش درصد نانورس تا ۸٪ افزایش شاخص خمیری بیشتر است[۲۴].



شکل ۶ : نمودار مقادیر حدود اتربرگ خاک به ازای درصدهای مختلف نانورس.

از سوی دیگر، مطابق (شکل ۷) با افزایش PAM به خاک، حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد. این افزایش تا ۶ گرم بر لیتر با شیب زیاد و از ۶ تا ۱۲ گرم بر لیتر با شیب کم اتفاق می‌افتد؛ طوری که می‌توان گفت از ۶ گرم بر لیتر به بعد حدود اتربرگ ثابت است. شاخص خمیری نیز روندی مشابه داشته و به ازای ۳ و ۶ گرم بر لیتر، افزایش نشان می‌دهد، اما با افزایش غلظت محلول، به دلیل ثابت شدن مقدار حد روانی و حد خمیری، شاخص خمیری نیز ثابت می‌ماند. خاصیت آبدوستی پلی‌الکترولیت کاتیونی دلیل اصلی افزایش حدود اتربرگ است[۲۵].



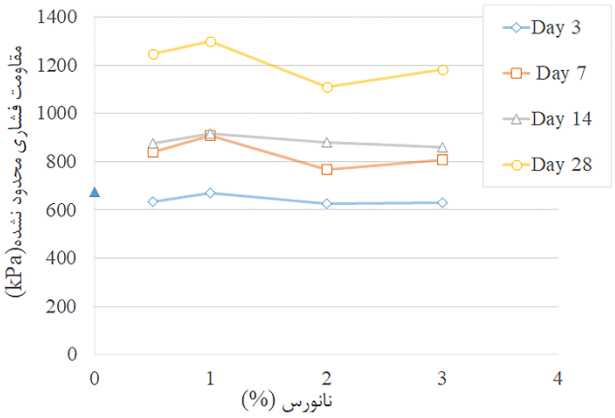
شکل ۷ : نمودار مقادیر حدود اتربرگ خاک به ازای مقادیر مختلف پلی‌الکترولیت کاتیونی.

با مقایسه دو ماده نیز شاهد تأثیر بیشتر پلیمر محلول، بر هر سه پارامتر مورد بررسی در این آزمایش هستیم.

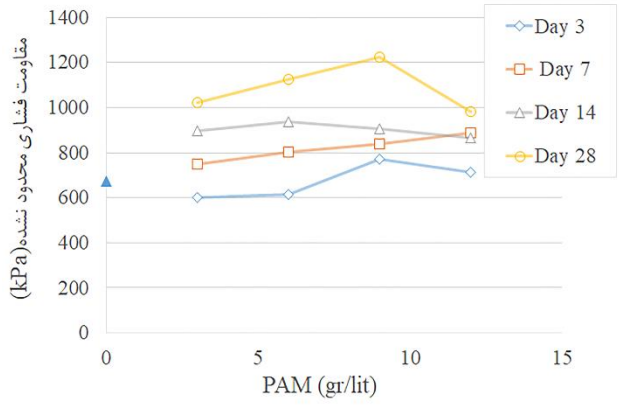
۴-۳-مقاومت فشاری محصورنشده

۴-۳-۱- تأثیر مقدار پلیمر و نانوذرات بر مقاومت فشاری محصورنشده و سختی نمونه‌ها

مقدار مقاومت فشاری محصورنشده نمونه کنترل (اصلاح نشده) برابر ۶۷۴/۵ کیلوپاسکال به دست آمد که بر روی نمودارهای (شکل ۸) و (شکل ۱۰) با مثلثی روی محور قائم مشخص است. مطابق (شکل ۸-الف) با افزایش درصد نانورس در خاک مقاومت نمونه‌ها به ازای مقدار بهینه ۱٪ حداکثر بوده و به ازای مقدار ۲٪ و ۳٪ دوباره کاهش می‌یابد. برای مقادیر کمتر از ۱٪، ذرات نانورس به دو روش مقاومت خاک را افزایش می‌دهند: از یک سو فعالیت نیروهای بین‌ذره‌ای مابین ذرات خاک و ذرات نانورس چسبندگی خاک را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر به دلیل ابعاد بسیار ریز ذرات نانورس این ذرات به عنوان فیلر عمل نموده و حفرات ریز موجود در ریزساختار خاک را پر می‌نمایند که منجر به کاهش فاصله بین ذرات خاک شده و خاک را در ابعاد نانو مسلح می‌نماید[۳,۲] پس از مقدار بهینه ۱٪ با افزایش بیش از حد نانوذرات، آنها شروع به تجمع در کنار هم و تشکیل توده‌هایی در خاک می‌کنند که این امر به علت کم وزن بودن نانوذرات نسبت به دانه‌های خاک، سبب کاهش چگالی حجمی خاک می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به (شکل ۸-ب)مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پلیمر، با افزایش غلظت محلول، تا مقدار بهینه ۹ گرم بر لیتر روند افزایشی داشته و پس از آن دچار وقفه و کاهش می‌شود. این امر مخصوصا درمورد نمونه‌های ۲۸ روزه به وضوح قابل مشاهده است.



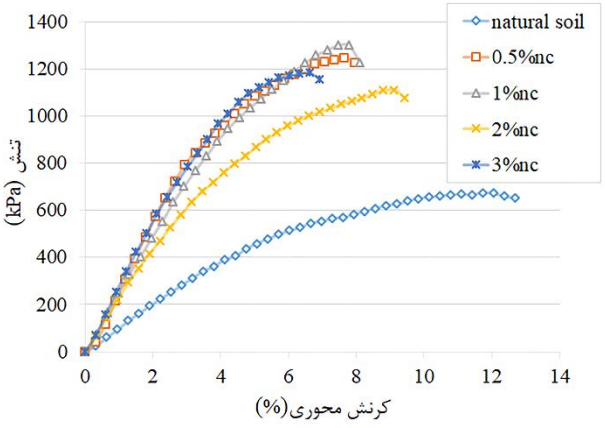
(الف)



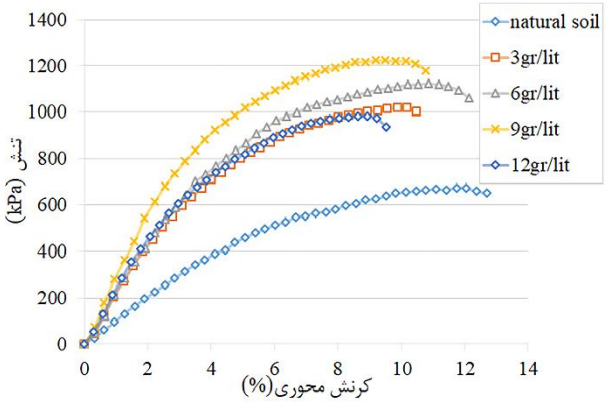
(ب)

شکل ۸ : نمودار تغییرات مقاومت فشاری با تغییر مقادیر (الف) نانورس و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

به منظور بررسی تأثیر افزایش مقدار نانوذرات و پلیمر بر سختی نمونه‌ها، منحنی تنش-کرنش تمامی نمونه‌ها رسم شد. مشاهده شد که در تمامی نمونه‌های ۳، ۷، ۱۴، و ۲۸ روزه، با افزودن نانورس و PAM به خاک، سختی نمونه‌ها نسبت به خاک طبیعی، افزایش می‌یابد. مطابق (شکل ۹-الف) افزایش نانورس، ضمن افزایش مقاومت نمونه‌ها سبب کاهش کرنش گسیختگی نیز می‌شود. در (شکل ۹-ب) نیز پلیمر با اینکه تأثیر چندانی بر کرنش گسیختگی ندارد، با افزایش تنش نهایی تسلیم، شیب منحنی تنش-کرنش و در نتیجه سختی نمونه را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، نمونه‌های تیمار شده مقاومت بیشتری را به ازای کرنش مشابه و یا کمتر، از خود نشان می‌دهند. البته روند تغییرات سختی به ازای مقادیر مختلف مواد، با روند تغییرات مقاومت خاک رابطه مستقیم دارد.



(الف)

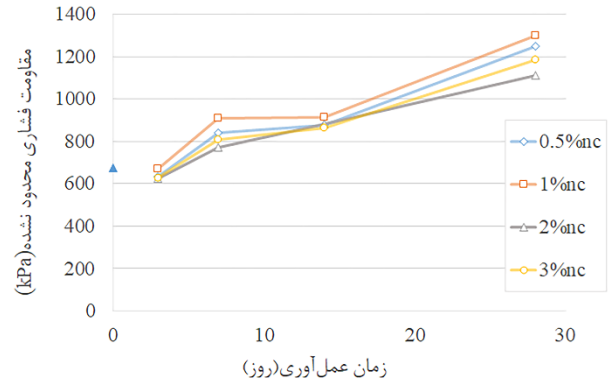


(ب)

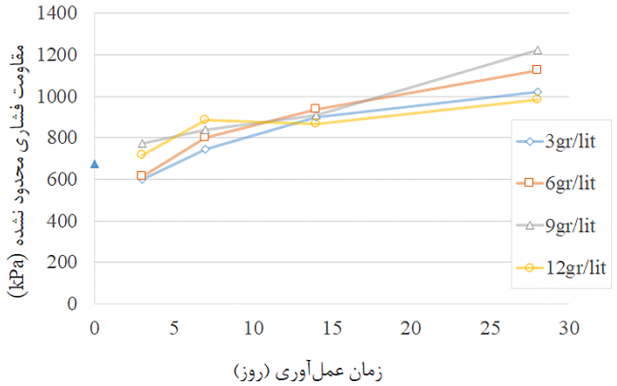
شکل ۹ : تأثیر مقدار (الف) نانورس و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی بر سختی نمونه‌های ۲۸ روزه.

۴-۳-۲- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و سختی نمونه‌ها

با بارگذاری نمونه‌های اصلاح شده با نانورس، مطابق (شکل ۱۰-الف) مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه‌های ۳ روزه کمی کاهش یافته است که دلیل آن را می‌توان در کاهش توانایی تراکم خاک و افزایش رطوبت بهینه نمونه‌ها و از سوی دیگر عدم انجام واکنش‌ها بین خاک و نانومواد در روزهای ابتدایی جستجو کرد، اما در ادامه افزایش مقاومت نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری قابل مشاهده است. با افزایش زمان عمل‌آوری به سبب انجام واکنش‌های تبادل کاتیونی و جابجایی نانوذرات در خاک و قرارگیری این نانوذرات در نانوحفرات، خاک در مقیاس نانو مسلح شده و رفته رفته بر مقاومت نمونه‌ها اضافه می‌شود[۱۱]. همچنین در (شکل ۱۰-ب) شاهد افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی پلی‌الکترولیت کاتیونی با افزایش زمان عمل‌آوری هستیم که ناشی از انجام واکنش بین پلیمر و ذرات خاک بوده و تأثیر مثبت پلیمر را که خاصیت لخته‌سازی و منعقدکنندگی دارد[۱۷]، بر خاک نشان می‌دهد.



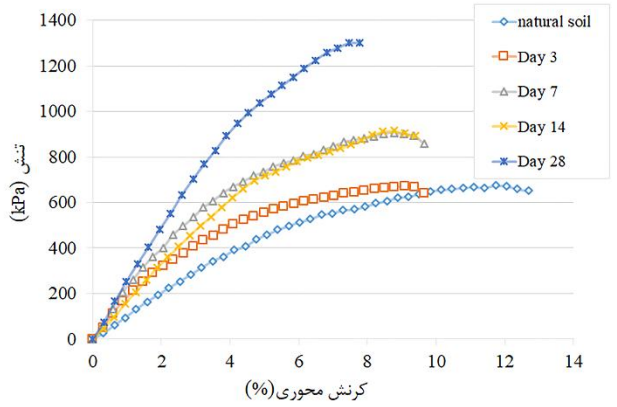
(الف)



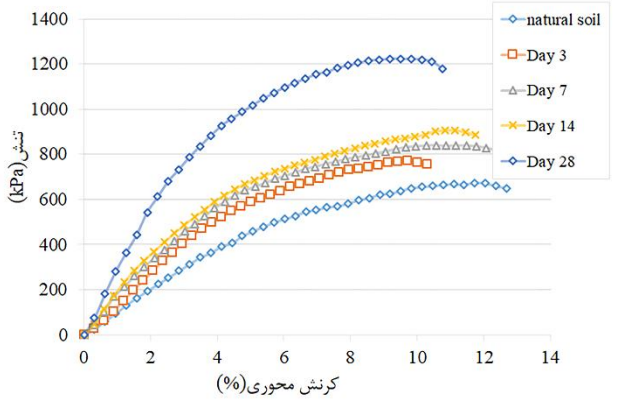
(ب)

شکل ۱۰ : تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های با درصدهای مختلف (الف) نانورس و (ب) PAM.

به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر سختی نمونه‌های اصلاح شده، منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های حاوی مقادیر بهینه نانوذرات و پلیمر به ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف رسم شد. مطابق (شکل ۱۱) برای مقادیر بهینه نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی، با افزایش زمان عمل‌آوری، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.



(الف)

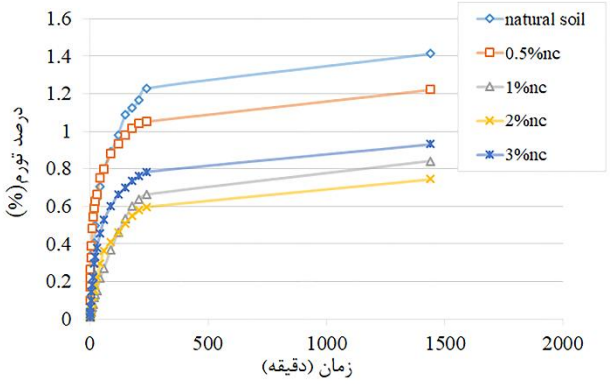


(ب)

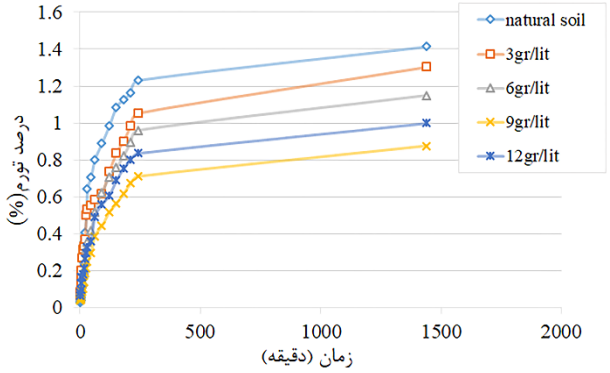
شکل ۱۱ : تأثیر زمان عمل‌آوری بر سختی نمونه‌های (الف) ۱٪ نانورس و (ب) ۹ گرم بر لیتر PAM.

۴-۴- تورم آزاد

نمونه‌های آزمایش تورم آزاد به ازای درصدهای مختلف نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی و مطابق استاندارد آزمایش تهیه شدند و به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر تورم خاک‌های اصلاح شده تحت عمل‌آوری‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روز قرار گرفتند. مطابق (شکل ۱۲) می‌توان گفت که اکثر تغییرات حجم خاک و بیشترین مقدار تورم در ۴ ساعت اولیه پس از غرقاب کردن نمونه که سرعت جذب رطوبت توسط نمونه‌های خاک بیشتر است اتفاق افتاده و در ادامه با اشباع شدن خاک تغییرات حجم با شیب ملایمی ادامه می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ : منحنی تورم آزاد نمونه‌های ۲۸ روزه (الف) نانورس و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی

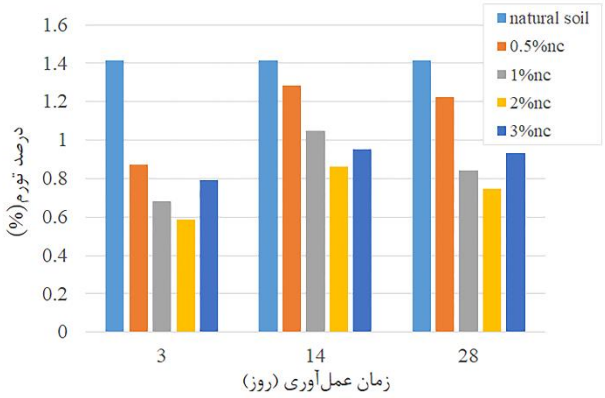
۴-۴-۱- تأثیر مقدار مواد افزودنی بر تورم آزاد نمونه‌ها

در (شکل ۱۳) و (شکل ۱۴) تأثیر درصدهای مختلف نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی و زمان عمل‌آوری بر تورم آزاد خاک رس مورد مطالعه، قابل مشاهده است. مطابق (شکل ۱۳) برای نمونه‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه نانورس، به ازای تغییرات درصد نانوذرات شاهد روند کاهشی تورم تا ۲٪ و افزایش دوباره این پارامتر به ازای ۳٪ هستیم که برای آزمایش تورم مقدار ۲٪ نانورس را به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌کند. این در حالی است که بیشترین مقاومت، به ازای ۱٪ نانورس حاصل شده است. همچنین در (شکل ۱۴) گرچه در نمونه‌های ۳ روزه به ازای ۶ گرم بر لیتر کمترین تورم مشاهده شد، با افزایش زمان عمل‌آوری، برای نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه، شاهد روند کاهشی تورم تا ۹ گرم بر لیتر و

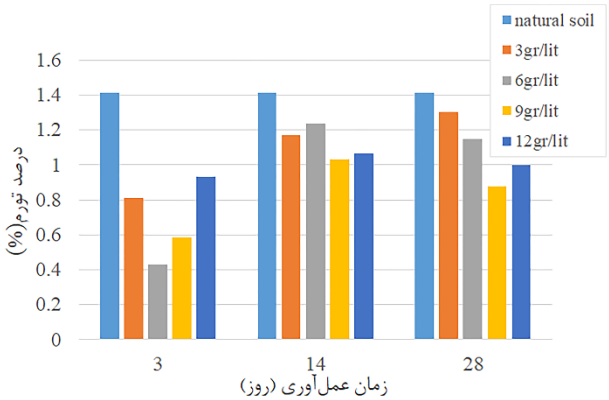
افزایش دوباره این پارامتر به ازای ۱۲ گرم بر لیتر هستیم که برای آزمایش تورم نیز مقدار ۹ گرم بر لیتر را به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌کند.

۴-۴-۲- تأثیر زمان عمل‌آوری بر تورم آزاد نمونه‌ها

مطابق (شکل ۱۳) و (شکل ۱۴) در صورت مقایسه کلی نمونه‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه می‌توان دریافت که تمامی نمونه‌های حاوی نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی پس از ۳ روز کاهش قابل توجهی در تورم نشان می‌دهند. در فاصله ۳ تا ۱۴روز جهشی منفی در مقادیر تورم به ازای درصدهای مختلف ماده روی داده و شاهد افزایش تورم نمونه‌ها هستیم. در نهایت مجددا برای نمونه‌های ۲۸ روزه تورم کاهش می‌یابد. دلیل این اتفاق را می‌توان در تغییرات رطوبت خاک در زمان عمل‌آوری جستجو کرد. در فاصله ۳ تا ۱۴ روز نمونه‌ها دچار کاهش رطوبت و مقداری انقباض می‌شوند؛ در نتیجه نمونه‌های ۱۴ روزه و ۲۸ روزه هنگام آزمایش در دو مرحله متورم می‌شوند، در مرحله اول انقباض ناشی از کاهش رطوبت جبران شده و در مرحله بعد تورم مازاد ناشی از غرقاب نمونه که مورد نظر ماست رخ می‌دهد. در فاصله ۱۴ تا ۲۸ روز به دلیل ثابت بودن حجم نمونه‌ها و عدم تغییرات زیاد رطوبت از یک سو و تداوم تأثیر مثبت نانوذرات و پلیمر از سوی دیگر، مجددا درصد تورم خاک کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳ : نمودار تغییرات تورم با تغییر زمان عمل‌آوری و تغییر درصد نانورس.



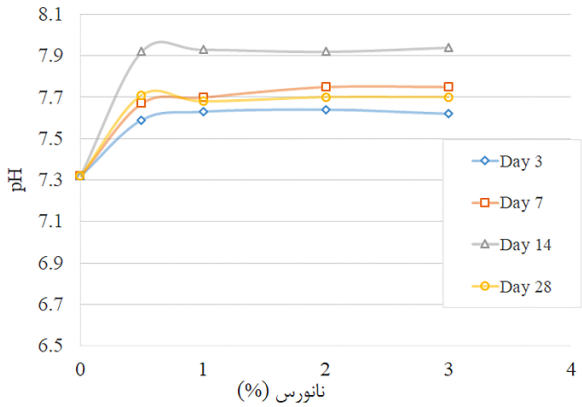
شکل ۱۴ : نمودار تغییرات تورم با تغییر زمان عمل‌آوری و تغییر غلظت پلی‌الکترولیت کاتیونی.

۴-۵- pH

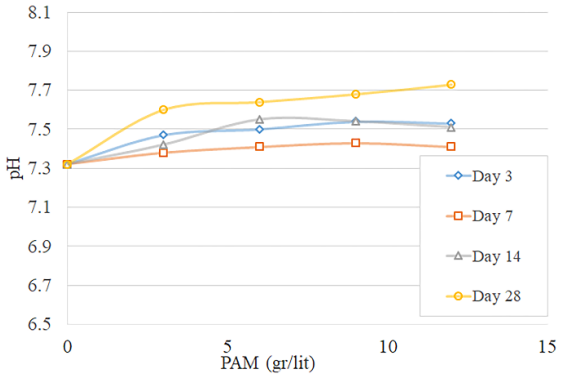
آزمایش pH برای تعیین میزان تأثیر شیمیایی درصدهای مختلف نانوذرات و غلظت‌های مختلف پلیمر و نیز تأثیر زمان‌های عمل‌آوری بر خاک مورد آزمایش، و تغییرات میزان اسیدی و یا قلیایی خاک انجام گرفت. مقدار pH خاک طبیعی برابر ۷/۳۲ به دست آمد. نمونه‌ها پس از اضافه شدن مواد افزودنی تحت عمل‌آوری قرار گرفته و به‌سیله دستگاه pHمتر مقادیر pH محاسبه شد.

۴-۵-۱- تأثیر مقدار پلیمر و نانوذرات بر pH نمونه‌ها

با توجه به (شکل ۱۵-الف) می‌توان دریافت که با افزایش نانوذرات نانورس به خاک، pH به مقدار ناچیز در حد ۰/۳ الی ۰/۶ افزایش یافته و به ازای درصدهای مختلف نانورس، pH ثابت است. از سوی دیگر، مطابق (شکل ۱۵-ب) با افزایش غلظت پلیمر در محلول، درنمونه‌های ۳، ۷ و ۱۴ روزه تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. در نمونه‌های ۲۸ روزه نیز به مقدار ناچیزی شاهد افزایش pH خاک با افزایش غلظت پلیمر هستیم.



(الف)



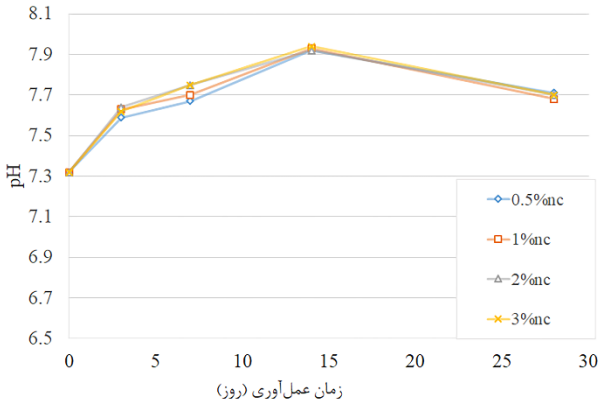
(ب)

شکل ۱۵ : منحنی تغییرات pH به ازای مقادیر مختلف (الف) نانورس و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

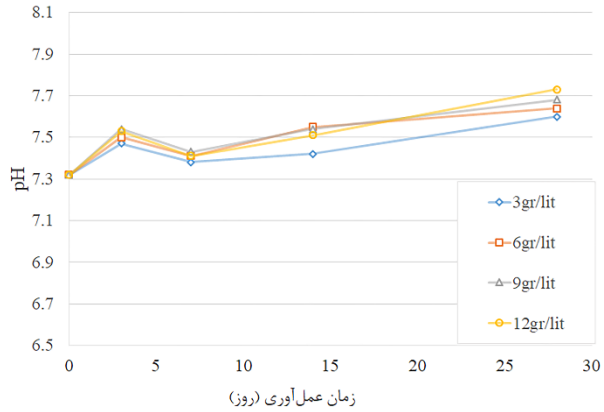
۴-۵-۲- تأثیر زمان عمل‌آوری بر pH نمونه‌ها

با توجه به (شکل ۱۶-الف) مقدار pH تا مدت ۱۴ روز که شدت واکنش‌های بین خاک و نانوذرات نانورس بیشتر است، روند افزایشی

داشته و با کاهش شدت واکنش‌ها روند نزولی به خود می‌گیرد. در (شکل ۱۶-ب) نیز مشاهده می‌شود که پس از تغییرات pH خاک در روزهای ابتدایی، با افزایش زمان عمل‌آوری، شاهد افزایش pH با شیبی ملایم و یکنواخت هستیم. تداوم افزایش یکنواخت pH در نمونه‌های حاوی PAM می‌تواند نشانه‌ای از تداوم واکنش‌ها در خاک باشد.



(الف)

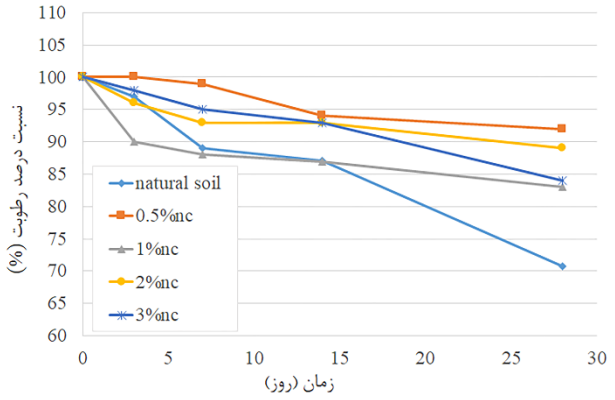


(ب)

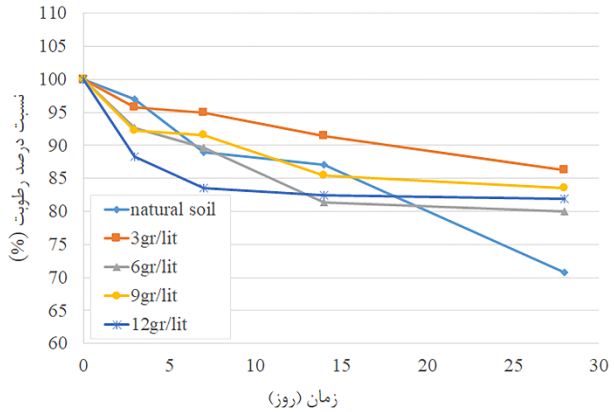
شکل ۱۶ : تأثیر زمان عمل‌آوری بر pH نمونه‌های حاوی (الف) نانورس و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

۴-۶- پتانسیل حفظ رطوبت

به منظور بررسی تأثیر مواد افزودنی بر روند تغییرات رطوبت خاک، درصد رطوبت تمامی نمونه‌های آزمایش تک محوری، هم در هنگام تهیه و هم در هنگام آزمایش محاسبه شد. خاک طبیعی بعد از ۲۸ روز ۲۹/۲٪ از رطوبت خود را ازدست داد. با اضافه شدن نانوذرات و پلیمر به خاک تغییرات رطوبت خاک کاهش یافت، طوری که مطابق (شکل ۱۷-الف) نمونه‌های حاوی نانورس پس از ۲۸ روز تنها ۸ الی ۱۶٪ از رطوبت خود را از دست دادند. نانوذرات با قرارگیری در ساختار خاک فاصله ذرات خاک را کاهش داده و آب جذب شده توسط خاک را در نانوحفرات خاک به دام می‌اندازند. از سوی دیگر مطابق (شکل ۱۷-ب) نمونه‌های حاوی پلی‌الکترولیت کاتیونی پس از ۲۸ روز، ۱۳ الی ۱۸درصد از رطوبت خود را از دست دادند. این پلیمر به دلیل خاصیت آبدوستی به مانند یک جاذب در خاک عمل کرده و مدت بیشتری رطوبت را در خاک حفظ می‌کند. بر خلاف نانوذرات، مقادیر مختلف پلیمر در ۱۴ روز ابتدایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته، اما در بلند مدت سبب کاهش تغییرات رطوبت می‌شوند. همچنین تأثیر تغییر درصد نانوذرات و غلظت پلیمر بر حفظ رطوبت خاک قابل‌ملاحظه نیست.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷ : تأثیر زمان عمل‌آوری بر توانایی حفظ رطوبت نمونه‌های حاوی (الف) نانورس و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

۵-نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر دو ماده نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی بر مجموعه‌ای از خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک رس مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج آزمایش را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱. در این آزمایش، با افزایش مقادیر نانورس و پلی‌الکترولیت کاتیونی در خاک، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک به تدریج کاهش یافته و رطوبت بهینه خاک افزایش نشان داد.

۲. با افزایش مقدار نانورس، حد خمیری و حد روانی خاک تقریبا ثابت بوده و فقط به ازای مقدار ۳٪ نانورس افزایش حد روانی و به دنبال آن شاخص خمیری خاک مشاهده شد. محلول پلی‌الکترولیت‌کاتیونی نیز تا غلظت ۶ گرم بر لیتر، مقادیر حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری خاک را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد، اما به ازای غلظت‌های بالاتر، این پارامترها تغییر چندانی از خود نشان ندادند.

۳. هر دو ماده تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری تک محوری خاک داشته و به ازای مقادیر بهینه، تقریبا ۱۰۰٪ مقاومت خاک را افزایش دادند. با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌ها، نانورس با وجود افزایش مقاومت خاک، سبب کاهش شکل‌پذیری خاک و افزایش سختی آن شد. پلیمر نیز با اینکه تأثیر چندانی بر کرنش گسیختگی ندارد، با افزایش مقاومت نمونه‌ها سختی خاک را افزایش داد.

۴. هر دو ماده به ازای تمامی مقادیر، تأثیر مثبت بر تورم پذیری خاک رس داشته و درصد تورم خاک را کاهش دادند.

۵. برای نمونه‌های نانورس، مقدار pH در ۱۴ روز اول روند افزایشی داشته و برای نمونه‌های ۲۸ روزه، کاهش نشان می‌دهد. تغییر درصد ذرات تأثیری بر مقدار pH ندارد. همچنین pH نمونه‌های پلی‌الکترولیت کاتیونی، با افزایش غلظت محلول و افزایش زمان عمل‌آوری با شیبی ملایم به مقدار ناچیز افزایش می‌یابد.

۶. نمونه‌های خاک طبیعی بعد از ۲۸ روز ۳۰٪ از رطوبت خود را از دست دادند، در حالی که نمونه‌های حاوی نانورس، ۸ الی ۱۶ درصد و نمونه‌های حاوی پلی الکترولیت کاتیونی، ۱۳ الی ۱۸ درصد از رطوبت خود را پس از ۲۸ روز از دست دادند.

۷. با هدف کاهش تورم و افزایش مقاومت خاک، ۹ گرم بر لیتر پلی‌الکترولیت کاتیونی به عنوان مقدار بهینه، به دست آمد. همچنین به ازای ۱٪ نانورس بیشترین مقاومت و به ازای ۲٪ نانورس کمترین تورم آزاد، برای نمونه‌های حاوی این ماده به دست آمد.

۸. پلی‌الکترولیت‌ها به عنوان کمک‌منعقدکننده به طور گسترده‌ای در تصفیه آب صنایع، فاضلاب شهری، پساب کارخانه‌های شیمیایی و معدنی و دیگر صنایع کاربرد دارند. این مواد با انعقاد ذرات کلوئیدی باعث رسوب آن‌ها و خروج از محیط به صورت لجن می شوند. لذا به طور گسترده و با قیمت مناسب در دسترس هستند. از سوی دیگر، روش‌های تولید نانوذرات با توجه به کاربرد گسترده آن‌ها در صنایع گوناگون به سرعت در حال پیشرفت بوده و در آینده‌ای نزدیک می‌توان از این مواد دوستار طبیعت به نحوی به صرفه و مؤثر در تثبیت خاک‌های رسی استفاده نمود.

۷-منابع و مراجع

[۱] Seybold, C. A. (1994). "Polyacrylamide review: Soil conditioning and environmental fate." Communications in Soil Science and Plant Analysis 25 (12): 2171-2185

[۲] Behnood, A. (2018). "Soil and clay stabilization with calcium and non-calcium based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques." Transportation Geotechnics.

[۳] Correia, A. A. S. and M. G. Rasteiro (2016). "Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization." Procedia Engineering 143: 1252-1259.

[۴] Yone kura, R., Miwa, M., 1992. Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout.

[۵] Gallagher, P. M. and J. K. Mitchell (2002). "Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22(9-12): 1017-1026.

[۶] Zhang, G., Germaine, J. T., Whittle, A. J., & Ladd, C. C., 2004a. Soil structure of a highly weathered old alluvium. Geotechnique 54, No.7, 453-466.

[۷] Zhang G. Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils, GSP 173 Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, New Peaks in Geotechnics, ASCE. (2007).

[۸] Bahmani, S. H., et al. (2014). "Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement." Construction and Building Materials 64: 350-359.

[۹] Hughes, D., et al. (2018). "Metal removal from soil leachates using DTPA-functionalised maghemite nanoparticles, a potential soil washing technology." Chemosphere 209: 480-488.

[۱۰] ASTM D422-63, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[۱۱] Ahmadi, H. & Shafiee, O. Eur. Phys. J. Plus (2019) 134: 459. https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12918-1

[۱۲] Shahidi, M., Farrokhi, F., & Asemi, F. (2019). Changes in Physical and Mechanical Properties of Gas Oil–Contaminated Clayey Sand after Addition of Clay Nanoparticles. Journal of Environmental Engineering, 145(4), 04019004.

[۱۳] Oldham J, C, Eaves R.C, and White D.W. "Materials evaluated as potential soil stabilizers". Miscelloneaus paper S-77-15-15, U.S. Army engineer waterways experiment station, Vicksburg, MS, September (1977).

[۱۴] Zornberg. J, Gabrel. A. R, Virat Jandr. C., "Baehavior of tire shred-sand mixtures", Geotech. J., Vol.41, No.2, PP.227-241., (2004).

[۱۵] Velasquez. R. A, "Investigation of the effectiveness and mechanisms of enzyme products for subgrade stabilization", International tournal pavement engineering, Vol.7, No.3, PP. 213-220, (2006).

[۱۶] Jin Liu, Bin Shi, “Research on the stabilization on traetment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer”, Engineering geology, Vol.117, No.1, PP. 114-120, (2011).

[۱۷] Mirzababaei, M., et al. (2017). "Polymers for Stabilization of Soft Clay Soils." Procedia Engineering 189: 25-32.

[۱۸] ASTM D698. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2010.

[۱۹] ASTM (2008). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils- D 4318-00. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 11 p.

[۲۰] ASTM D2166 (2006). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

[۲۱] Nelson, J. D. and Miller, D. J. 1992, Expansive soils, Problems and practice in foundation and pavement engineering, John wiley and sons, 259p

[۲۲] ASTM, “One Dimensional Swell or Settlement of Cohesive Soils”, Designation: D4546-96.

[۲۳] ASTM D4972-95a, Standard Test Method for pH of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, www.astm.org

[۲۴] M.H. Baziar, H. Ghazi, S.M. Mirkazemi, Effect of nanoclay additives on the properties of engineering–geotechnical soil ,in: Proc. of 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, 2–3 November 2010 ,2010 (in Persian).

[۲۵] Kim, S., Palomino, A.M., Colina, C.M., 2012. Responsive polymer conformation and resulting permeability of clay–polymer nanocomposites. Mol. Simul. 38 ,8-9, (723–734).