



## بررسی و مقایسه‌ی تأثیر پلیمرهای محلول در آب و نانوذرات بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و تورم‌پذیری خاک رس

غلام مرادی<sup>۱\*</sup>، سجاد عباسی<sup>۲</sup>، علیرضا عباس‌نژاد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

**خلاصه:** بدون تردید یکی از مقدماتی‌ترین و مهم‌ترین اصول در اجرای طرح‌های عمرانی، داشتن زمینی مقاوم برای احداث بناست و لازمه‌ی آن وجود خاکی مناسب، با ویژگی‌های ژئوتکنیکی مطلوب در محل است. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در خصوص استفاده از مواد شیمیایی نوین از جمله پلیمرهای شیمیایی و نانو ذرات 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. در این مقاله از دو ماده نانوسیلیکا و پلی‌الکترولیت کاتیونی برای بهسازی و تثبیت خاک استفاده شده است، این مواد با درصد‌های مختلف به خاک اضافه شده و تأثیر آن‌ها بر مشخصات خاک در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش هر دو ماده به خاک درصد رطوبت بهینه، حد روانی، مقاومت فشاری محدود نشده و پتانسیل حفظ رطوبت خاک افزایش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد تورم آزاد نمونه‌های خاک کاهش نشان داده است، از سویی با توجه به تغییرات ناچیز حد خمیری، شاهد افزایش شاخص خمیری خاک نیز هستیم.

**تاریخچه داوری:**  
دریافت:  
بازنگری:  
پذیرش:  
ارائه آنلاین:

**کلمات کلیدی:**  
خاک رس  
پلی‌الکترولیت کاتیونی  
نانوسیلیکا  
مشخصات فیزیکی و مکانیکی  
تورم و pH

### ۱- مقدمه

یک سازه مهندسی را به خوبی تأمین نماید [۱]. تثبیت ممکن است با مخلوط کردن خاک طبیعی و مواد تثبیت‌کننده به منظور ایجاد یک مخلوط همگن یا با اضافه کردن یک ماده تثبیت‌کننده به یک توده خاک طبیعی و اجازه دادن به آن نفوذ در حفره‌های خاک تحصیل شود [۲]. و تثبیت شیمیایی عبارت است از اختلاط خاک با یک یا ترکیبی از مواد افزودنی به شکل پودر، محلول یا مایع، برای اهداف کلی بهبود یا کنترل حجم، مقاومت و رفتار تنش-کرنش، نفوذپذیری و دوام خاک [۳]. امروزه تثبیت‌کننده‌های شیمیایی را به دو دسته کلی تقسیم می‌کنند:

الف) تثبیت‌کننده‌های شیمیایی سنتی

ب) تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نوین

تثبیت‌کننده‌های شیمیایی سنتی عبارتند از ترکیبات مختلف

بسیاری از طرح‌های اجرایی مانند جاده‌سازی، احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی و سد‌های خاکی ممکن است با کمبود مصالح خاکی مناسب مواجه شوند و لذا ضرورت دارد که مصالح موجود اصلاح شوند. خاک رس به دلیل مقاومت و ظرفیت باربری کم و رفتار نامناسب و قابلیت تورم در حضور آب، یکی از خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌ها به خصوص راهسازی و سدسازی می‌باشد. یکی از راهکارهای کاهش مشکلات مربوط به خاک رس، تثبیت خاک است. تثبیت خاک یک اصطلاح رایج برای هر نوع روش فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی، یا هر ترکیبی از این روش‌ها برای بهبود خصوصیات معینی از یک خاک طبیعی است تا اهداف مهندسی پیش‌بینی شده برای دوره عمر \*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gmoradi@tabrizu.ac.ir

خاک پرداخت. نتایج تحقیقات او نشان داد که با افزودن نانوذرات به خاک، ثابت تحکیم در نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۱۰]. در سال ۲۰۱۱ یینگ<sup>۵</sup> و طاها تأثیر نانو لوله‌های کربنی را روی رفتار ژئوتکنیکی خاک کائولینیت بررسی کردند. آزمایش حدود اتربرگ را برای محدوده ۰ تا ۰/۵ درصد نانو و آزمایش تحکیم را برای محدوده ۰ تا ۱ درصد نانو انجام دادند. افزایش نانو لوله‌های کربنی در مخلوط، حدود خمیری و روانی و دامنه خمیری را افزایش داد. همچنین با افزودن نانوذرات مقاومت فشاری محدود نشده نیز افزایش پیدا کرد [۱۱]. در سال ۲۰۱۴ زائد<sup>۶</sup> و همکاران اثر افزودن سه ماده نانو مس اکسید، نانو منیزیم اکسید و نانو رس بر خواص زمین‌شناسی خاک نرم را مورد بررسی قرار دادند. براساس این مطالعات هر سه ماده، حد روانی، حد خمیری، شاخص پلاستیسیته و انقباض خطی خاک را کاهش داد. وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش درصد نانو مواد افزایش یافته و رطوبت بهینه کاهش یافت. همین‌طور با عبور از مقدار بهینه نانو مواد، افزایش مقدار نانو مواد باعث تأثیر منفی بر مشخصات ژئوتکنیکی مخلوط خاک و نانو می‌شود [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر 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 [۱۳]. آقای جانعلیزاده و سلیمانی در سال ۲۰۱۷ در یک برنامه آزمایشی تأثیر نانوسیلیکا بر ساختار میکروسکوپی و ویژگی‌های مکانیکی ماسه تثبیت‌شده با سیمان را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که وقتی محتوای نانوسیلیکا به مقدار بهینه ۰/۸٪ وزن سیمان افزایش می‌یابد، UCS نمونه‌ها بهبود یافته و پس از آن با افزایش مقدار نانوسیلیکا از ۰/۸٪ به ۱/۲٪ مقدار UCS کاهش می‌یابد. همچنین نتایج SEM نشان داد که اضافه کردن نانوذرات باعث ایجاد مخلوط ماسه-سیمان با میکروساختار فشرده‌تر می‌شود [۱۴]. آقای زمردیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ تأثیر نانو رس و نانو سیلیکا بر افزایش مقاومت خاک رس CL در دو حالت تمیز و آلوده به مواد نفتی را بررسی کردند. در این آزمایشات کاهشی اساسی و فزاینده در مقاومت به ازای مقادیر بیش از ۸ درصد ماده‌ی نفتی اتفاق افتاد. که پس از تثبیت، خاک CL تمیز

آهک، سیمان، خاکستر بادی و انواع مواد قیری. تحقیقات گسترده‌ای در مورد استفاده از این مواد به منظور تثبیت و بهسازی خاک صورت پذیرفته است و اثربخشی این تثبیت‌کننده‌های سنتی در بسیاری از کاربردها آشکار شده است. با این وجود، تکنیک‌های تثبیت سنتی اغلب به زمان طولانی عمل‌آوری و مقدار نسبتاً زیاد از مواد افزودنی برای بهبود قابل‌توجه مقاومت نیاز دارند. از این رو دانشمندان به دنبال استفاده از مواد و روش‌های جدید برای تثبیت و بهبود مشخصات مختلف خاک هستند. تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نوین را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: ۱. تثبیت‌کننده‌های یونی ۲. تثبیت‌کننده‌های آنزیمی و ۳. تثبیت‌کننده‌های پلیمری [۴]. البته با توجه به مطالعاتی که در سال‌های اخیر بر روی کاربرد نانوذرات در تثبیت خاک صورت پذیرفته و نیز امید به گسترش روش‌های تولید نانوذرات و دسترسی آسان‌تر به این مواد، می‌توان نانوذرات را به عنوان دسته چهارم تثبیت‌کننده‌های نوین معرفی نمود. 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 [۵]. این در حالی است که 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 [۶]. بیشتر مطالعات به منظور بررسی کاربرد نانومواد در تثبیت خاک به موادی چون نانوسیلیکا، نانو کلئید سیلیکا و نانورس، به دلیل عملکرد بهتر این مواد در تثبیت خاک برمی‌گردد. یونکورا<sup>۱</sup> و میوا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۲ مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای را با استفاده از نانوسیلیس افزایش دادند [۷]. در همین سال نول<sup>۳</sup> و همکاران از کلئید سیلیکا جهت بهبود مقاومت تحکیمی و کاهش نفوذپذیری خاک استفاده کردند [۸]. در سال ۲۰۰۴، آزمایشات ژانگ<sup>۴</sup> نشان داد که وجود نانوساختارها در خاک موجب افزایش حدود اتربرگ می‌شود [۹]. در سال ۲۰۰۷ ژانگ به بررسی اثر تحکیمی نانوذرات در

- 1 Yone kura
- 2 Miwa
- 3 Noll
- 4 Zhang

5 Ying  
6 Zaid

خمیری مختلف با مقادیر مختلف از پلیمر (۲، ۳، ۴ و ۵٪) مخلوط شده و در درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر متراکم شدند. نمونه‌های تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری محدودنشده قرار گرفتند تا مقاومت آن‌ها برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف تعیین شود. نتایج آزمایشات نشان داد که پلیمر مایع رفتار مقاومتی خاک‌های رسی غیراشباع را به طور اساسی بهبود می‌بخشد. همچنین، افزایش شاخص خمیری باعث کاهش مقاومت فشاری محدودنشده می‌شود [۳]. نتایج مطالعه آقای میرزابابایی و همکارانشان بر روی نمونه‌های مقاومت فشاری محدود نشده نشان داد که پلیمر PVA می‌تواند مقاومت فشاری محدود نشده و شکل پذیری 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 [۲۰].

در این مقاله به بررسی و مقایسه تأثیر پلی‌الکترولیت کاتیونی و نانوسیلیکا به عنوان تثبیت‌کننده‌های خاک خواهیم پرداخت. نانوسیلیکا 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 شده‌اند. در ادامه تأثیر درصدهای مختلف این مواد بر تراکم‌پذیری، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده، سختی، تورم آزاد، pH و پتانسیل حفظ رطوبت خاک را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

## 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 به صورت مرطوب تهیه شده است. خاک رس استفاده شده، متعلق به منطقه آناختون تبریز می‌باشد. منحنی دانه‌بندی و مشخصات خاک، به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.

### ۲-۲- پلی‌الکترولیت کاتیونی یا پلی‌آکریلامید (PAM)

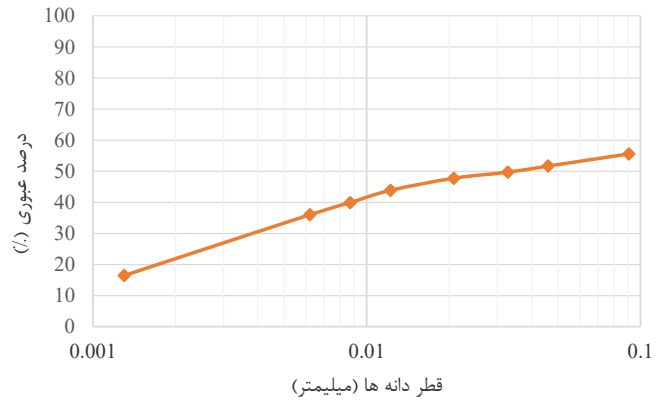
پلی‌الکترولیت کاتیونی یک منعقدکننده کاتیونی به شکل پودر

به ازای ۱٪ وزن خاک، نانورس و ۱/۵ درصد وزن خاک، نانوسیلیکا، بیشترین بهبود مقاومت را نشان داد. از سوی دیگر در مقایسه با نانوسیلیکا، نانورس تأثیر بیشتری در بهبود سختی و مقاومت فشاری تک محوری هر دو خاک آلوده و تمیز نشان داد [۱۵]. اما هم‌زمان با انجام مطالعات بر روی نانوذرات، جستجو برای یافتن پلیمرهای مؤثرتر و با زمان اثربخشی کمتر برای تثبیت خاک ادامه داشت. الدهام<sup>۱</sup> 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 محصولات است که دارای پتانسیل تثبیت‌کنندگی هستند. طبق گزارش آن‌ها رزین‌های پلیمری بیشترین افزایش را در مقاومت فشاری مصالح ماسه‌ای نشان دادند [۱۶]. زرنبرگ<sup>۲</sup> 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 [۱۷]. والسکوئز<sup>۳</sup> 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 [۱۸]. جین لیو<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۰، رفتار خاک رس تثبیت شده با پلیمر آلی STW را بررسی نمود. در این پژوهش مقاومت تک‌محوری 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 [۱۹]. در سال ۲۰۱۲، نائینی و همکاران آزمایش‌هایی را برای بررسی تأثیر شاخص خمیری و درصد پلیمر مایع بر مقاومت فشاری محدودنشده خاک رس انجام دادند. سه نمونه خاک رس با شاخص‌های

1 Oldham  
2 Zornberg  
3 Velasquez  
4 Jin Liu

جدول ۳: مشخصات فنی نانو سیلیکا

۹۹+	درصد خلوص (%)
۱۱-۱۳	اندازه ذرات (nm)
۲۰۰	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)
سفید	رنگ
<۰/۱	دانسیته ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )
۲/۴	دانسیته واقعی (gr/cm <sup>3</sup> )



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

جدول ۴: عناصر تشکیل دهنده پودر نانوسیلیکا

مقدار	ترکیب
>99%	SiO <sub>2</sub>
<120ppm	Ti
<70ppm	Ca
<50ppm	Na
<20ppm	Fe

جدول ۱: ویژگی‌های خاک

خاک رس	ویژگی خاک
۲/۷۵	توده ویژه (G <sub>s</sub> )
۴۶	حد روانی (LL) (%)
۲۲	حد خمیری (PL) (%)
۲۴	نشانه خمیری (PI) (%)
CL	طبقه‌بندی متحد
A-6	طبقه‌بندی آشتو
۱۷/۴۲	وزن مخصوص حداکثر (KN/m <sup>3</sup> )
۲۰	رطوبت بهینه (%)

ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی پلی الکترولیت کاتیونی

Characteristics	Off white, granular powder
Degree of charge	medium
pH (5% solution)	۳.۰ - ۵.۰ @ ۲۵°C/۷۷°F
Bulk density	۷۵۰ ± 50
Viscosity @ 25°C/77°F	
۰.۱۰ %	۱۸۰ cps
۰.۲۵ %	۴۰۰ cps
۰.۵۰ %	۸۰۰ cps
۱.۰۰ %	۲۰۰۰ cps

### ۳-۲- نانوسیلیکا

این ماده به شکل پودر سفید رنگ تهیه و به صورت جامد به خاک اضافه شده است. مشخصات فنی این ماده در جدول ۳ و جدول ۴ آمده است.

### ۳-روش‌ها

#### ۳-۱- تراکم

تراکم عبارت است از کاهش حجم خاک از طریق خارج ساختن هوا با استفاده از اعمال نیروی مکانیکی، که به منظور افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک انجام می‌شود. 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) مختلف

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

[۲۱] تحت آزمایش تراکم قرار گرفت.

### ۲-۳- حدود اتربرگ

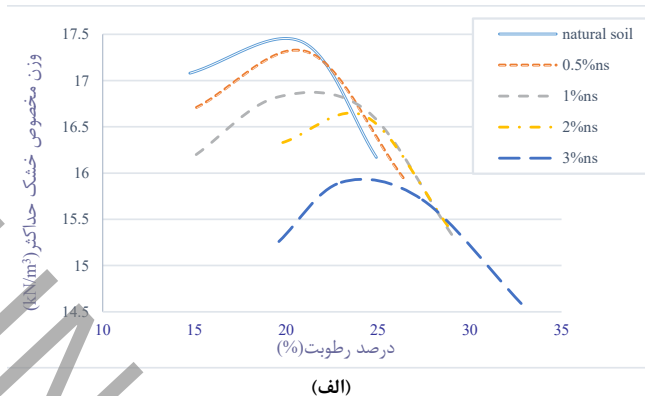
خاک عبوری از الک ۴۰ پس از مخلوط شدن با مقادیر مختلف مواد افزودنی و اضافه شدن رطوبت، به مدت ۲۴ ساعت در داخل نایلون قرار گرفت تا آب به خوبی و به صورت یکنواخت جذب ذرات خاک شود. پس از گذشت یک روز نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D4318 (2008) [۲۲]، تحت آزمایش قرار گرفته و مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیکا و پلی‌اکترولیت کاتیونی به دست آمد.

### ۳-۳- مقاومت فشاری محدود نشده و پتانسیل حفظ رطوبت

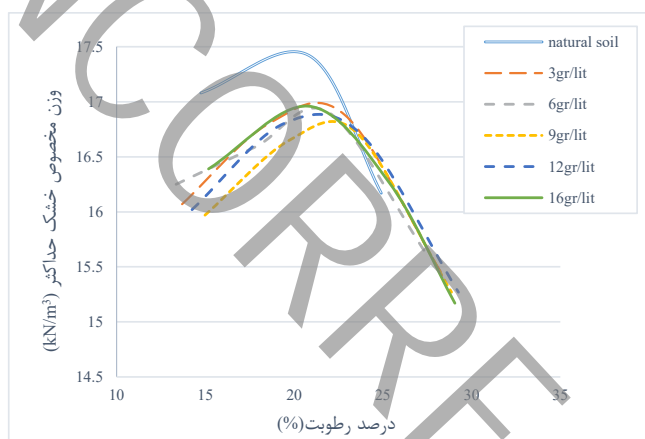
نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده پس از تهیه، به مدت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در داخل نایلون و در دمای آزمایشگاه عمل‌آوری شدند. پس از طی زمان عمل‌آوری، مطابق استاندارد ASTM D2166 (2006) [۲۳] نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته و مقادیر حداکثر مقاومت نمونه‌ها و منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمد. همچنین آزمایش تعیین درصد رطوبت برای تمامی نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده انجام گرفت و تغییرات رطوبت خاک در بازه‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای نمونه‌های حاوی هر دو ماده‌ی نانوسیلیکا و PAM 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

تورم در تعریف عبارت است از واکنش فیزیکی-شیمیایی خاک و محیط. 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 [۲۴]. از مشخص‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری درصد تورم و فشار تورم، روش استاندارد ASTM D4546-96 [۲۵] می‌باشد، بدین صورت که خاک باید به صورت جانبی محدود شده و تغییرات حجم به



(الف)



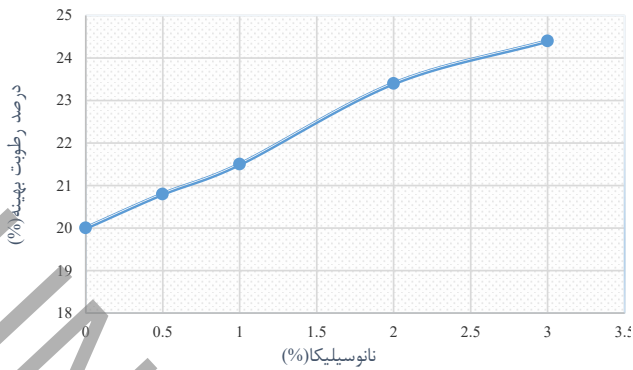
(ب)

شکل ۲: منحنی‌های تراکم خاک با درصدهای مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌اکترولیت کاتیونی.

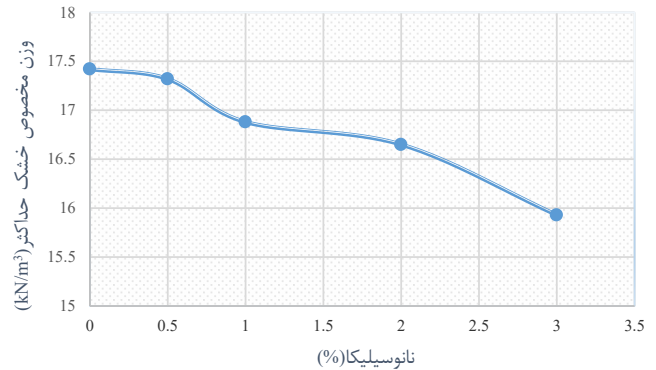
صورت محوری انجام می‌گیرد و نمونه باید به آب آزاد دسترسی داشته باشد. در این مطالعه، نمونه‌ها پس از تهیه تحت زمان عمل‌آوری ۳، ۱۴ و ۲۸ روز قرار گرفته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه تحکیم یک بعدی قرار گرفتند، تا تغییرات حجم خاک در فواصل زمانی مختلف ثبت گردد.

### ۳-۵- pH

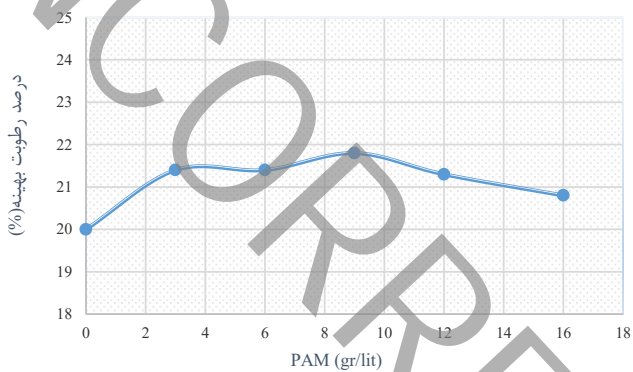
pH یا واکنش خاک اصطلاحی است که خاصیت اسیدی یا بازی خاک را نشان می‌دهد، pH خاک یکی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی برجسته محلول خاک بوده و در خواص فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی آن تأثیر وافر دارد. بسیاری از واکنش‌های شیمیایی و زیست‌شیمیایی خاک تنها در pH مشخصی از آن رخ می‌دهد. در این تحقیق، نمونه‌ها برای آزمایش pH مطابق با استاندارد ASTM D4972-95 [۲۶]، با نسبت‌های مشخص شده با مواد مضاف مخلوط



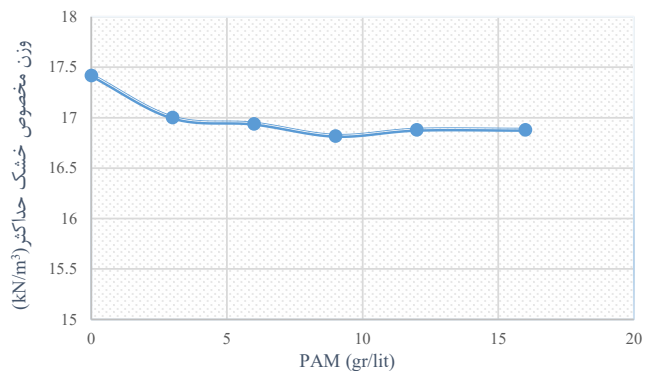
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۴: منحنی تغییرات رطوبت بهینه نسبت به مقادیر مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

شکل ۳: منحنی تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر نسبت به مقادیر مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

خاک نسبت به دانه‌های نانوسیلیکا 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 نانوسیلیکا 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.

همچنین با توجه به منحنی شکل ۴-ب نیز می‌توان دریافت که با افزایش نانوسیلیکا به خاک، رطوبت بهینه خاک افزایش پیدا می‌کند. با اضافه نمودن نانوسیلیکا به خاک رس، سطح ویژه مخلوط خاک و نانوسیلیکا افزایش یافته و رطوبت مورد نیاز برای روغن‌کاری ذرات افزایش پیدا می‌کند.

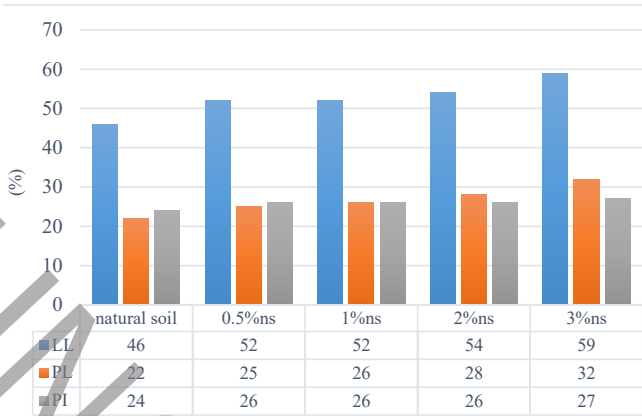
از سوی دیگر، مطابق شکل ۳-الف، با اضافه شدن پلی‌الکترولیت کاتیونی به خاک، به طور کلی وزن مخصوص خشک حداکثر خاک نسبت به خاک طبیعی، کاهش می‌یابد. با این وجود، در خاک‌های

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.

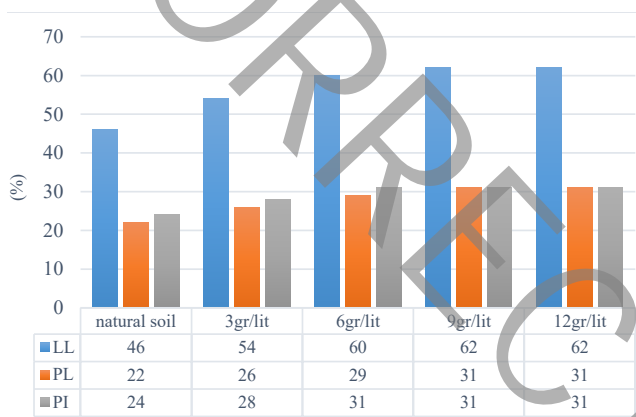
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- تراکم پذیری خاک

در شکل ۲، منحنی‌های تراکم خاک به ازای مقادیر مختلف افزودنی‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳-الف، با اضافه شدن نانوسیلیکا به خاک، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش می‌یابد. البته این کاهش از ۰/۵ به ۱ درصد و نیز از ۲ به ۳ درصد با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد. یکی از دلایل کاهش حداکثر دانسیته خشک در اثر افزودن نانوسیلیکا به خاک، بالا بودن چگالی دانه‌های



شکل ۵: نمودار مقادیر حدود اتربرگ خاک به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیکا.



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

می‌یابد. دلیل کاهش مقاومت نمونه‌ها پس از مقدار بهینه ۲٪ این است که 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 ۷-ب، مقاومت فشاری محدود نشده 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 مخصوصاً در مورد نمونه‌های ۲۸ روزه به وضوح قابل مشاهده است.

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، ۲۸ روزه، با افزودن نانوسیلیکا و

حاوی PAM، با افزایش غلظت محلول تغییرات وزن مخصوص خاک قابل ملاحظه نیست، طوری که به ازای ۱۶ گرم بر لیتر نیز تغییری اتفاق نمی‌افتد.

در شکل ۴-ب نیز مشاهده می‌شود که رطوبت بهینه خاک با افزایش مقدار محلول تا ۹ گرم بر لیتر روند افزایشی داشته و پس از آن دوباره روند کاهشی می‌یابد. با این وجود رطوبت بهینه نمونه‌های خاک حاوی PAM به ازای تمامی مقادیر محلول از خاک طبیعی بیشتر است.

#### ۴-۲- حدود اتربرگ

مطابق شکل ۵، با افزایش مقدار نانوسیلیکا 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.

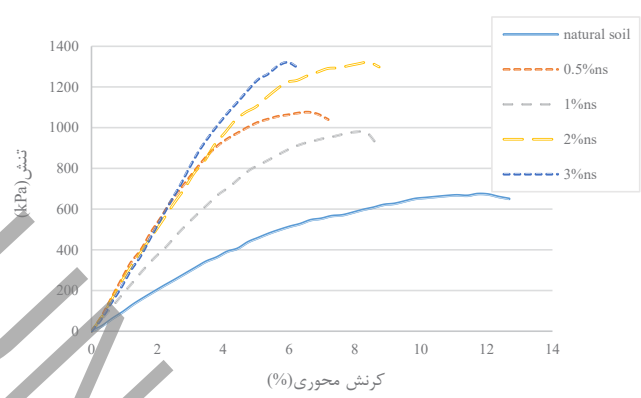
از سوی دیگر، مطابق شکل ۶، با افزایش PAM به خاک، حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد. این افزایش تا ۶ گرم بر لیتر با شیب زیاد و از ۶ تا ۱۲ گرم بر لیتر با شیب کم اتفاق می‌افتد؛ طوری که می‌توان گفت از ۶ گرم بر لیتر به بعد حدود اتربرگ ثابت است. شاخص خمیری نیز روندی مشابه داشته و به ازای ۳ و ۶ گرم بر لیتر،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

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

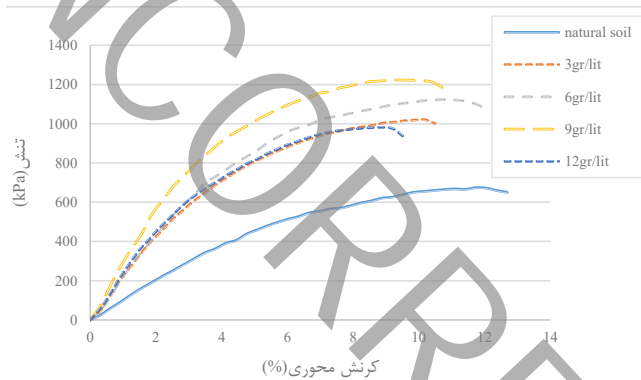
#### ۴-۳- مقاومت فشاری محدود نشده

#### ۴-۳-۱- تأثیر مقدار پلیمر و نانوذرات بر مقاومت فشاری محدود نشده و سختی نمونه‌ها

مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونه کنترل (اصلاح نشده) برابر ۶۷۴/۵ کیلوپاسکال به دست آمد که بر روی نمودارهای شکل ۷ و شکل ۹ با مثلث آبی روی محور قائم مشخص است. مطابق شکل ۷-الف، با افزایش درصد نانوسیلیکا در خاک مقاومت نمونه‌ها تا مقدار بهینه ۲٪ روند افزایشی داشته و به ازای مقدار ۳٪ دوباره کاهش

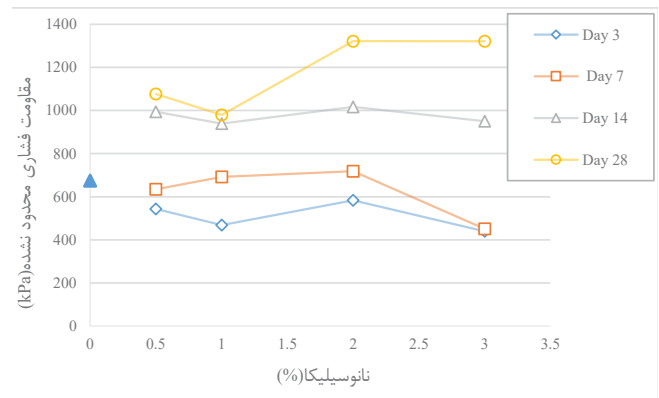


(الف)

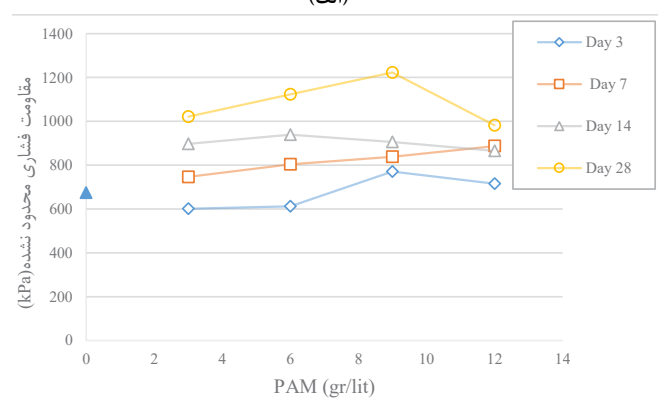


(ب)

شکل ۸: تأثیر مقدار (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM بر سختی نمونه‌های ۲۸ روزه.



(الف)



(ب)

شکل ۷: نمودار تغییرات مقاومت فشاری با تغییر مقادیر (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

افزایش رطوبت بهینه نمونه‌ها و از سوی دیگر عدم انجام واکنش‌ها بین خاک و نانومواد در روزهای ابتدایی جستجو کرد، اما در ادامه شاهد افزایش مقاومت نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری هستیم. با افزایش زمان عمل‌آوری به سبب انجام واکنش‌های تبادل کاتیونی و جابجایی نانوذرات در خاک و قرارگیری این نانو ذرات در نانو حفرات، خاک در مقیاس نانو مسلح شده و رفته رفته بر مقاومت نمونه‌ها اضافه می‌شود. همچنین در شکل ۹-ب، شاهد افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی PAM 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، بر خاک نشان می‌دهد.

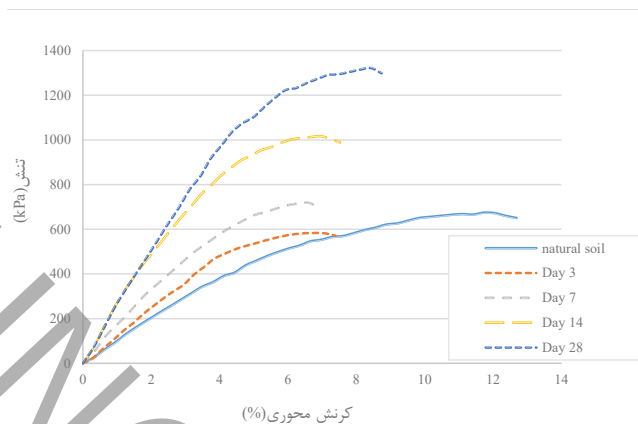
به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر سختی نمونه‌های اصلاح شده، منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های حاوی مقادیر بهینه نانوذرات و پلیمر به ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف رسم شد. مطابق شکل ۱۰ هم به ازای نانوسیلیکا و هم به ازای PAM، با افزایش زمان

PAM به خاک، سختی نمونه‌ها، افزایش می‌یابد. افزایش نانوسیلیکا، ضمن افزایش مقاومت نمونه‌ها سبب کاهش کرنش گسیختگی نیز می‌شود. پلیمر نیز 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.

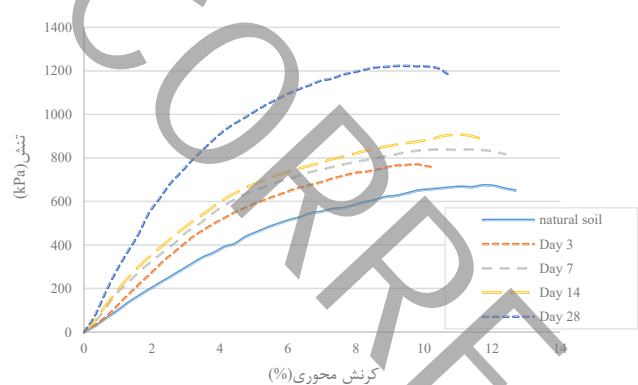
۲-۳-۴- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و سختی نمونه‌ها

با بارگذاری نمونه‌های اصلاح شده با نانوسیلیکا، مطابق شکل ۹-الف، مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه‌های ۳ روزه کمی کاهش یافته است که دلیل آن را می‌توان در کاهش توانایی تراکم خاک و



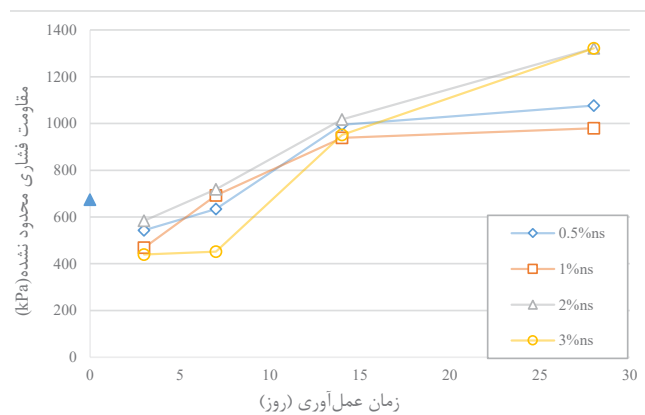


(الف)

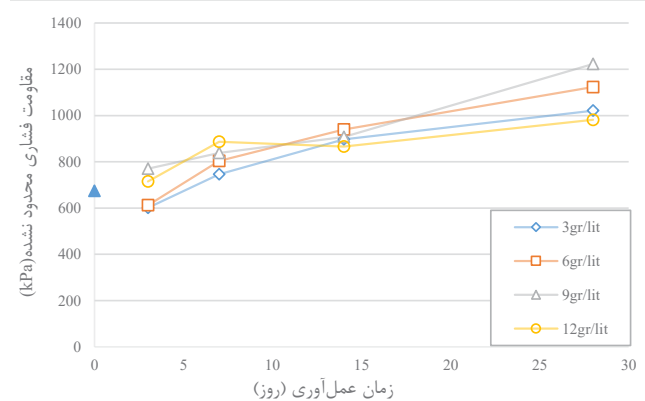


(ب)

شکل ۱۰: تأثیر زمان عمل آوری بر سختی نمونه‌های حاوی (الف) ۲٪ نانوسیلیکا و (ب) ۹ گرم بر لیتر PAM



(الف)



(ب)

شکل ۹: تأثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های با درصدهای مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM.

مطالعه، قابل مشاهده است. مطابق شکل ۱۲، برای نمونه‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه نانوسیلیکا، به ازای تغییرات درصد نانوذرات، شاهد روند کاهشی تورم تا ۲٪ و افزایش دوباره این پارامتر به ازای ۳٪ هستیم که برای آزمایش تورم نیز مقدار ۲٪ نانوسیلیکا را به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌کند. همچنین در شکل ۱۳، گرچه در نمونه‌های ۳ روزه به ازای ۶ گرم بر لیتر کمترین تورم مشاهده شد، با افزایش زمان عمل آوری، 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 عمل آوری بر تورم آزاد نمونه‌ها

مطابق شکل ۱۲ و ۱۳، در صورت مقایسه کلی نمونه‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه می‌توان دریافت که تمامی نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا و

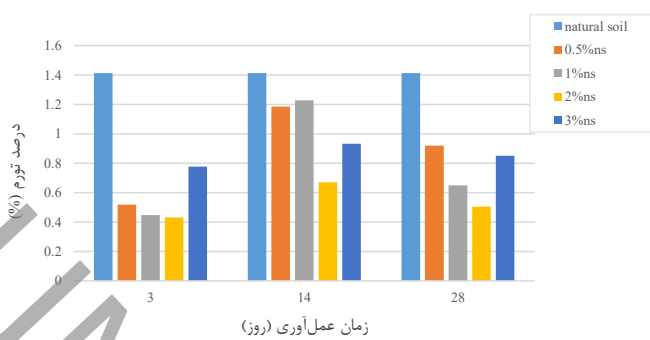
عمل آوری، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

#### ۴-۴-۴- تورم آزاد

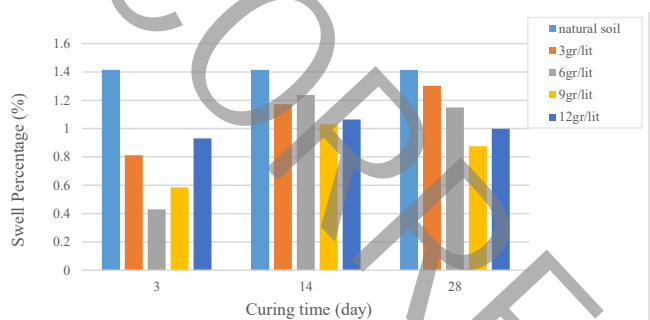
نمونه‌های آزمایش تورم آزاد به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیکا و پلی‌الکترولیت کاتیونی و مطابق استاندارد آزمایش تهیه، و به منظور بررسی تأثیر زمان عمل آوری بر تورم خاک‌های اصلاح شده، تحت عمل آوری‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روز قرار گرفتند. مطابق شکل (۱۱)، می‌توان گفت که اکثر تغییرات حجم خاک و بیشترین مقدار تورم در ۴ ساعت اولیه که نمونه غرقاب شده است، اتفاق افتاده و در ادامه تغییرات حجم با شیب ملایمی ادامه می‌یابد.

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

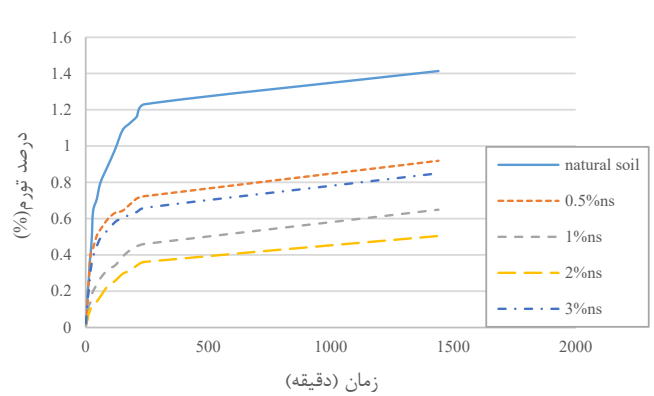
در شکل ۱۲ و ۱۳، تأثیر درصدهای مختلف نانوسیلیکا و پلی‌الکترولیت کاتیونی و زمان عمل آوری بر تورم آزاد خاک رس مورد



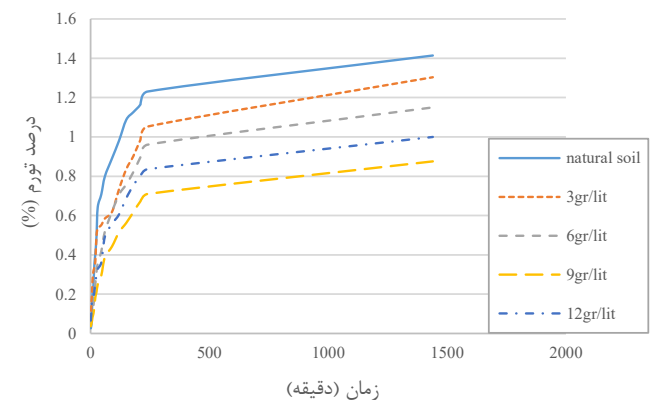
شکل ۱۲: نمودار تغییرات تورم با تغییر زمان عمل‌آوری و تغییر درصد نانوسیلیکا.



شکل ۱۳: نمودار تغییرات تورم با تغییر زمان عمل‌آوری و تغییر غلظت PAM.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: منحنی تورم آزاد نمونه‌های ۲۸ روزه (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM.

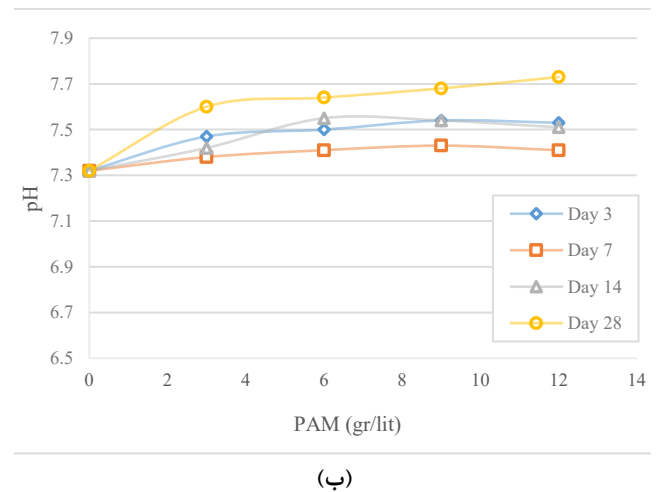
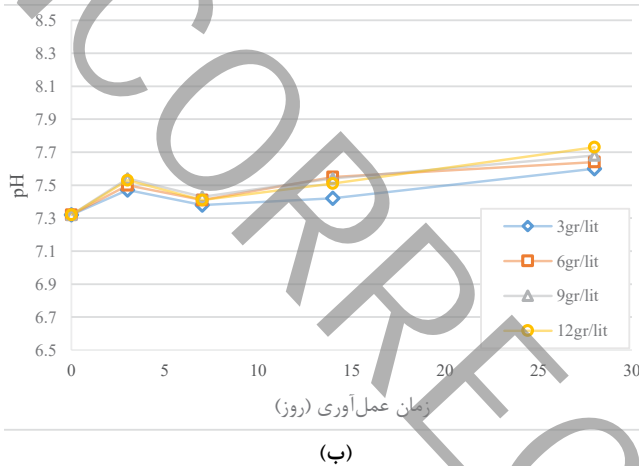
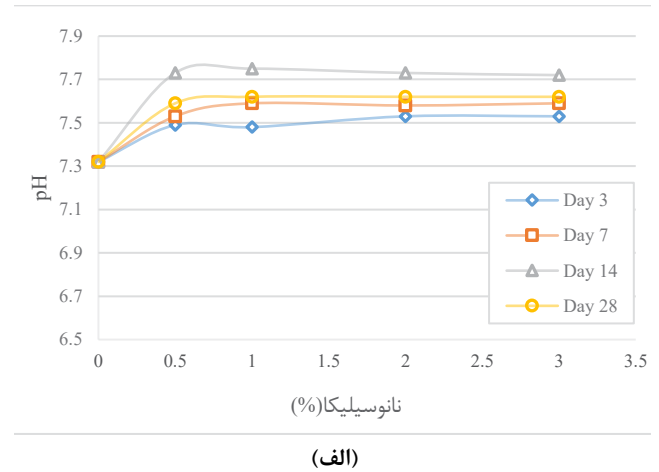
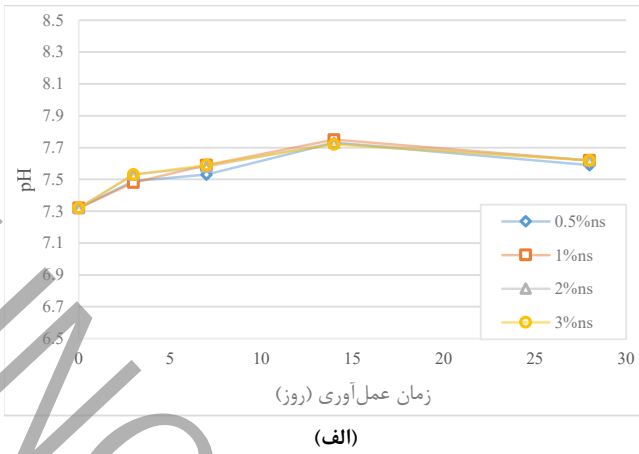
#### ۴-۵-۴-۱

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 به‌وسیله دستگاه pH متر مقادیر pH محاسبه شد.

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

با توجه به شکل ۱۴-الف، می‌توان دریافت که با افزایش نانوذرات نانوسیلیکا به خاک، pH به مقدار ناچیز در حد ۰/۱ الی ۰/۴ افزایش یافته و به ازای درصد‌های مختلف نانوسیلیکا، pH ثابت است. از سوی دیگر، مطابق شکل ۱۴-ب، با افزایش غلظت پلیمر در محلول، در نمونه‌های ۳، ۷ و ۱۴ روزه تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. در نمونه‌های ۲۸ روزه نیز به مقدار ناچیزی شاهد افزایش pH خاک با

PAM پس از ۳ روز کاهش قابل توجهی در تورم نشان می‌دهند. در فاصله ۳ تا ۱۴ روز جهشی منفی در مقادیر تورم به ازای درصد‌های مختلف ماده روی داده و شاهد افزایش تورم نمونه‌ها هستیم. در نهایت مجدداً 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، مجدداً درصد تورم خاک کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵: تأثیر زمان عمل آوری بر pH نمونه‌های حاوی (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌اکترولیت کاتیونی.

شکل ۱۴: منحنی تغییرات pH به ازای مقادیر مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM.

در ایران و همچنین ضرورت توسعه پوشش گیاهی و درخت کاری، استفاده از روش‌هایی که بتوان به واسطه‌ی آن از تلفات آب در محیط ریشه جلوگیری کرد و آب قابل دسترس گیاه را افزایش داد، به طوری که بتوان از حداقل آب موجود حداکثر جذب و رشد را برای گیاه به وجود آورد، بسیار مفید و کارآمد خواهد بود. از سوی دیگر در مهندسی عمران، تغییرات گسترده در مقادیر رطوبت خاک‌هایی چون رس، باعث مشکلاتی برای سازه‌ها می‌شود. خاک رس در اثر تغییرات رطوبت دچار تورم و انقباض شده و تغییر شکل‌هایی در سازه ایجاد می‌کند که در کوتاه‌مدت و بلندمدت سبب ناپایداری سازه می‌شود. 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 از دست داد. با اضافه شدن نانوذرات

افزایش غلظت پلیمر هستیم.

#### ۴-۵-۲- تأثیر زمان عمل آوری بر pH نمونه‌ها

با توجه به شکل ۱۵-الف، مقدار pH تا مدت ۱۴ روز که شدت واکنش‌های بین خاک و نانوذرات نانوسیلیکا بیشتر است، روند افزایشی داشته و با کاهش شدت واکنش‌ها روند نزولی به خود می‌گیرد. در شکل ۱۵-ب نیز مشاهده می‌شود که پس از تغییرات pH خاک در روزهای ابتدایی، با افزایش زمان عمل آوری، 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.

#### ۴-۶- پتانسیل حفظ رطوبت

در مهندسی کشاورزی، با توجه به گستردگی اراضی خشک

خاک رس مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. نتایج آزمایش را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

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

۲. هر دو ماده‌ی نانوسیلیکا و PAM سبب افزایش حد روانی و حد خمیری خاک شدند. نانوسیلیکا با افزایش قابل توجه حد خمیری و حد روانی در نهایت شاخص خمیری خاک را نیز افزایش داد. محلول پلی‌الکترولیت کاتیونی 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.

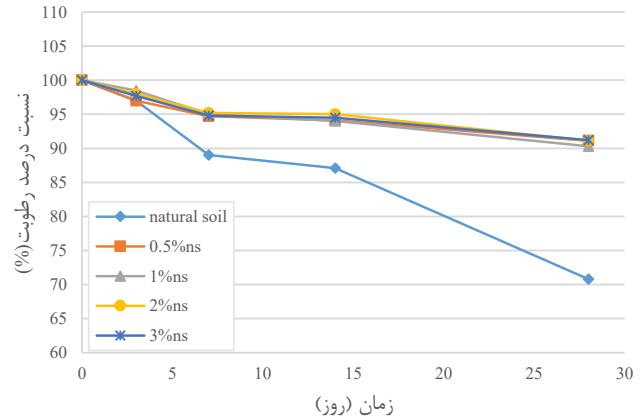
۳. هر دو ماده تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری تک محوری خاک داشته و به ازای مقادیر بهینه، تقریباً ۱۰۰٪ مقاومت خاک را افزایش دادند. با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌ها، نانوسیلیکا با وجود افزایش مقاومت خاک، سبب کاهش شکل‌پذیری خاک و افزایش سختی آن شد. PAM نیز با اینکه تأثیر چندانی بر کرنش گسیختگی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

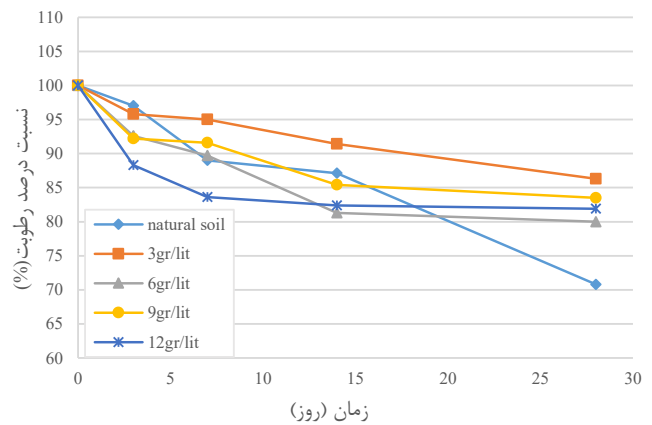
۵. برای نمونه‌های نانوسیلیکا، مقدار pH در ۱۴ روز اول روند افزایشی داشته و برای نمونه‌های ۲۸ روزه، کاهش نشان می‌دهد. تغییر درصد ذرات تأثیری بر مقدار pH ندارد. همچنین pH نمونه‌های پلی‌الکترولیت کاتیونی، با افزایش غلظت محلول و افزایش زمان عمل‌آوری با شیبی ملایم به مقدار ناچیز افزایش می‌یابد.

۶. نمونه‌های خاک طبیعی بعد از ۲۸ روز ۳۰٪ از رطوبت خود را از دست دادند، در حالی که نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا، ۸ الی ۱۰ درصد و نمونه‌های حاوی پلی‌الکترولیت 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، مقادیر ۲٪ نانو سیلیکا و ۹ گرم بر لیتر PAM به عنوان مقدار بهینه، به دست آمد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: تأثیر زمان عمل‌آوری بر توانایی حفظ رطوبت نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا و (الف) PAM و (ب)

پلیمر به خاک تغییرات رطوبت خاک کاهش یافت، طوری که مطابق شکل ۱۶-الف، نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا پس از ۲۸ روز تنها ۸ الی ۱۰ درصد از رطوبت خود را از دست دادند. از سوی دیگر مطابق شکل ۱۶-ب، نمونه‌های حاوی PAM پس از ۲۸ روز، ۱۳ الی ۱۸ درصد از رطوبت خود را از دست دادند. بر خلاف نانوذرات، مقادیر مختلف PAM در ۱۴ روز ابتدایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته، اما در بلند مدت سبب کاهش تغییرات رطوبت می‌شوند. همچنین تأثیر افزایش درصد نانوذرات و غلظت پلیمر بر حفظ رطوبت خاک قابل ملاحظه نیست.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شد تا تأثیر دو ماده نانوسیلیکا و پلی‌الکترولیت کاتیونی بر مجموعه‌ای از خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

مقاومت فشاری محدود نشده، kPa	UCS
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM
پلی وینیل الکل	PVA

منابع

- construction, Prague, Czech Republic, pp: 377-382, 2012.
- [12]zaid, H, M. Mohd, R, T. Ibtehaj, T, J. 2014, "Stabilization of Soft Soil Using Nanomaterials", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8(4): 503-509, 2014.
- [13]Bahmani, S. H., et al. (2014). "Stabilization of residual soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and cement." Construction and Building Materials 64: 350-359.
- [14]Choobbasti, A. J. and S. S. Kutanaei (2017). "Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 9(5): 981-988.
- [15]Zomorodian, S. A., et al. (2017). "Strength enhancement of clean and kerosene contaminated sandy lean clay using Nano clay and nanosilica as additives." Applied Clay Science 140: 140-1.
- [16]Oldham J, C, Eaves R.C, and White D.W. "Materials evaluated as potential soil stabilizers". Miscellaneous paper S-77-15-15, U.S. Army engineer waterways experiment station, Vicksburg, MS, September (1977).
- [17]Zornberg, J, Gabrel. A. R, Virat Jandr. C., "Baehavior of tire shred-sand mixtures", Geotech. J., Vol.41, No.2, PP.227-241., (2004).
- [18]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).
- [19]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).
- [20]Mirzababaei, M., et al. (2017). "Polymers for Stabilization of Soft Clay Soils." Procedia Engineering 189: 25-32.
- [21]ASTM D698. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2010.
- [22]ASTM (2008). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils- D 4318-00. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania,
- [1]Fang H. Y. (1991). Foundation engineering handbook, Chapman & Hall, New York, NY10119
- [2]Perloff, W. H. (1976). Soil mechanics, principal and applications, John Wiley & Sons. New York
- [3]Naeini, S. A., et al. (2012). "Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer." KSCE Journal of Civil Engineering 16(6): 943-949.
- [4]Rauch, A. F., et al. (2003). Evaluation of nontraditional soil and aggregate stabilizers: A summary, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin.
- [5]Correia, A. A. S. and M. G. Rasteiro (2016). "Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization." Procedia Engineering 143: 1252-1259.
- [6]Seybold, C. A. (1994). "Polyacrylamide review: Soil conditioning and environmental fate." Communications in Soil Science and Plant Analysis 25 (12): 2171-2185.
- [7]Yonekura, R., Miwa, M., 1992. Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout.
- [8]Noll, M. R, Bartlett, C. & Dochat, T. M., 1992. In Situ Permeability Reduction and Chemical Fixation Using Colloidal silica. National Outdoor Action Conference, Las Vegas, NV, p. 443-457.
- [9]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.
- [10]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).
- [11]Taha M. R. and Ying, T. "Effects of carbon nanotube on kaolinite: Basic geotechnical behaviour", Proc. of the 5rd international symposium on nanotechnology in

engineering, John wiley and sons, 259p  
[25]ASTM, "One Dimensional Swell or Settlement of Cohesive Soils", Designation: D4546-96.  
[26]ASTM D4972-95a, Standard Test Method for pH of Soils, ASTM International, West Conshohochen, PA, 2001, www.astm.org

USA, 11 p.  
[23]ASTMD2166(2006).Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.  
[24]Nelson, J. D. and Miller, D. J. 1992, Expansive soils, Problems and practice in foundation and pavement

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Moradi GH., Abbasi S., Abbasnejad A. (2021). Effect of Water-Soluble Polymers and Nanoparticles on Physical, Mechanical, and Inflationary Properties of Clay.. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11): 1-14.

DOI: [10.22060/ceej](https://doi.org/10.22060/ceej)\*\*\*

