نشریه زمین شناسی ژئوتکنیک
سال ۱۰ (۱۳۹۳)، شماره ۳: ۲۴۳-۲۳۱
WWW.appliedgeology.ir

# بهسازی خصوصیات مهندسی خاک رسی CL با استفاده از نانو ذرات سیلیس و کائولینیت

مهرم مجدی[۱]، علی ارومیه ای[۱]، محمدرضا نیکودل[۱]
۱) گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

دریافت: ۹۳/۳/۲۳؛ دریافت اصلاح شده: ۹۴/۵/۳۱؛پذیرش: ۹۴/۶/۲۲؛ قابل دسترس در تارنما:۹۴/۹/۱۵

**چکیده:**
**در این مطالعه به بررسی تاثیر افزودن نانوذرات سیلیس و کائولینیت بر روی ویژگیهای ژئوتکنیکی خاک رسی با خاصیت خمیری کم (CL) پرداخته شده است. جهت تهیه نانوذرات از روش مکانیکی آسیاب گلوله ای استفاده شده و پودر اولیه سیلیس و کائولینیت به مدت ۱۰ ساعت در دستگاه Planetary Ball Mill خرد شده و به مقیاس نانومتر (کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) در آمده است که تصاویر تهیه شده توسط FESEM از نانوذرات موید این مطلب می‌باشد. سپس نانوذرات به دست آمده با نسبت‌های متفاوتی از وزن خاک با خاک رسی (CL) ترکیب شده و میزان تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی قبل و بعد از اضافه کردن نانو ذرات، توسط آزمایشهای تراکم، کاساگرانده، برش مستقیم و مقاومت فشاری تک محوری مورد تحقیق قرار گرفت و میزان بهینه افزودن نانوذرات به دست آمد. نتایج نشان داد که حدود روانی و خمیری خاک رسی با افزایش میزان نانوذرات به ترکیب خاک افزایش می‌یابد ولی از آنجائیکه آهنگ افزایش حد خمیری نسبت به حد روانی بیشتر است، شاخص خمیری کاهش می‌یابد که نتیجه‌ای مطلوب در مهندسی ژئوتکنیک جهت اجرای پروژه های عمرانی است. همچنین با توجه به نتایج آزمایش تراکم، وزن واحد حجم خاک رسی تا حد خاصی از افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد و بعد از آن حد دچار کاهش می‌شود. میزان چسبندگی خاک رسی نیز با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش برش مستقیم تا افزودن حد مشخصی از نانوذرات افزایش یافته و بعد از آن حد تغییر چندانی نمی‌کند. نتایج آزمایش مقاومت تک محوری نشان داد که با افزودن نانوذرات سیلیس و کائولینیت به ترکیب خاک، مقاومت تک محوری خاک تا حدود سه برابر نسبت به حالت بدون حضور نانوذرات افزایش می یابد .آزمایشهای XRD و XRF نشان دادند که ترکیب شیمیایی نانوذرات حاصل از روش آسیاب گلوله‌ای مشابه ترکیب شیمیایی پودر مادر است و تغییری نمی‌یابد.**

**واژه‌های کلیدی:** نانوذرات، بهسازی خاک، آسیاب گلوله‌ای، ژئوتکنیک

## ۱-مقدمه

نانوذرات میکرو ساختارهایی هستند که حداقل یک بعد آنها در مقیاس نانومتر است (NSTC 2007 & TRS 2004). در مقیاس نانو، خصوصیات الکترونیکی، مغناطیسی، اپتیکی و شیمیایی تغییر می‌یابد که این امر در مقیاس ماکرو نمی تواند وجود داشته باشد (Zhang 2007 & Zhang et al. 2004 a,b). مشخصه اصلی نانو ذرات، اندازه کوچک، توزیع دانه بندی با یک سطح پایین آگلومراته شدن و قابلیت پخش بالاست (Thomas et al. 2007). این ویژگی های منحصر به فرد نانوذرات سب شده است که فناوری نانو در عمده علوم وارد شده و بسیاری از مشکلات مربوطه را حل

نماید. خوشبختانه علم مهندسی ژئوتکنیک نیز از این قاعده مثتثنی نمانده و در سال های اخیر تلاش های فراوانی جهت کاربرد این فن آوری نوین در شاخه های مختلف ژئوتکنیک شده است. اغلب نانومواد ی که برای تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ها استفاده شده است نانو ذرات سیلیس است که بر روی خصوصیان تحکیم، شاخص نفوذپذیری و پارامترهای مقاومتی خاک تاثیر می گذارد. یونکورا و میوا، ۱۹۹۲، مقاومت فشاری خاک ماسه ای را با استفاده از نانوسیلیس افزایش دادند (Yonekura & Miwa 1992). نول و همکاران در سال ۱۹۹۲ از نانو سیلیس جهت بهبود مقاومت تحکیمی و کاهش نفوذپذیری خاک استفاده کردند (Noll et al. 1992). در سال ۲۰۰۵، نانو ذرات سیلیس توسط گالاگر برای افزایش چسبندگی خاکها و کاهش ویسکوزیته آنها استفاده شد و رفتار ماسه بهبود یافته با نانومتریال در شرایط بارگذاری چرخه ای تحلیل شد. به عنوان یک نتیجه، مشخص شد که چسبندگی وابسته به درصد افزایش نانو ذرات است (Gallagher et al. 2007 & Gallagher & Lin 2005). در سال ۲۰۰۷، پاتریسیا و همکاران در ایالات متحده نانوذرات را در خاک مخصوصی که شامل ماسه با ویسکوزیته بالا بود استفاده کردند و گزارش کردند که بعد از اعمال زلزله مصنوعی و ارزیابی نشست خاک، ۴۰٪ بهبود در میزان نشست خاک اتفاق افتاده است (Gallagher & Lin 2005). برای مطالعه تاثیر نانو ذرات سیلیس در طیف ابعاد ۵ تا ۱۰۰ نانومتر، بارتون از آزمایشات ادومتر، سه محوری و آزمایش فشاری استفاده کرد و نشان داد که مقاومت خاک با زمان افزایش می یابد همچنانکه خاک محتوی نانو ذرات در مراحل ابتدایی شکل پذیر است و بعدا رفتارش الاستو پلاستیک می شود (Burton 2009) . در سال ۲۰۰۴، ژانگ بیان کرد که وجود نانو ساختار ها در خاک موجب افزایش حدود اتربرگ می شود (Zhang 2007) .

عموما خاک موجود در سایت از دیدگاه مهندسی برای ساخت و ساز، ایده آل و کاملا مطلوب نیست و باید با اعمال تغییراتی بر آن، جهت فعالیتهای عمرانی آماده گردد. یکی از راهکارهای مناسب در مواجهه با خاکهای نامناسب در مهندسی ژئوتکنیک، تغییر خصوصیات خاک سایت است که به بهسازی یا اصلاح خاک موسوم است. اصلاح خاک به مجموعه عملیاتی اطلاق می شود که به حذف برخی رفتارهای نامناسب خاک و یا تحمیل رفتارهای مناسب به آن، خواهد شد (Das 2010). یکی از این روش ها افزودن سیمان و یا ماده شیمیایی افزودنی به ترکیب خاک می باشد. از جمله افزودنی هایی که درگذشته استفاده شده و امروزه نیز مورد استفاده قرار می گیرد می توان به سیمان، قیر، آهک، خاکستر آتشفشانی و ... اشاره نمود. اضافه کردن این مواد به خاک باعث کاهش پلاستیسیته، بهبود تراکم، کاهش تورم انقباض، بهبود مقاومت و پایداری خاک پس از تثبیت می شود. اغلب این مواد برای تثبیت خاکهای ریزدانه رسی و لای بکار میرود و اگر برای خاکهای دانه ای بکار رود باعث کاهش نفوذپذیری، کاهش فرسایش و افزایش دوام می شود (Kadivar et al. 2011). یکی از مشکلات استفاده از این قبیل افزودنی ها به خاک، آلودگی زیست محیطی می باشد ولی استفاده از نانوذرات سبب کاهش تخریب زیست خواهد شد (Majeed & Taha 2011 & Taha 2009) . همچنین استفاده از آن در بهسازی خاک، کنترل خواص مقاومتی و کم کردن سیمان مصرفی و متعاقبا صرفه اقتصادی را نتیجه خواهد داد (Michael & Hochella 2002). در این تحقیق به بررسی تاثیر افزودن نانوسیلیس و نانوکائولینیت (که طی روش مکانیکی آسیاب گلوله ای تهیه شده است) بر روی خواص مهندسی خاکهای رسی با خاصیت خمیری کم (CL) پرداخته شده است و به منظور مطالعه آن از نتایج آزمایشهای تراکم، کاساگرانده، برش مستقیم و مقاومت تک محوری بهره گرفته شده است.

## ۲-مواد و روش ها

### ۲-۱-مصالح مورد استفاده

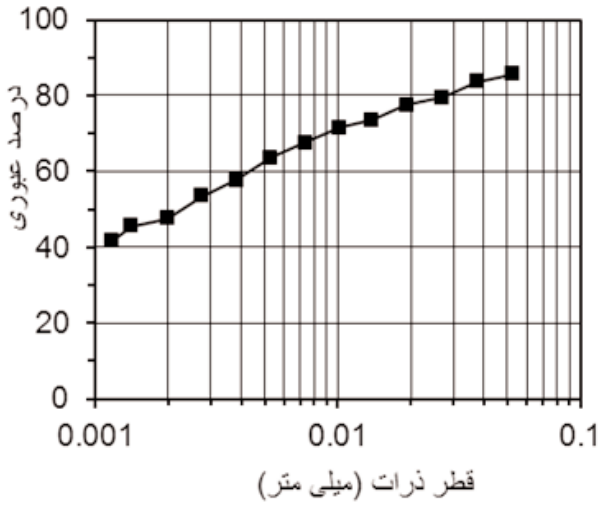
### ۲-۲-خاک رسی

خاک مورد استفاده در این مطالعه از محل ایستگاه متروی پرند که خاک رسی است، تهیه شده است. نمودار دانه بندی حاصل از انجام آزمایش هیدرومتری بر روی این خاک در تصویر شماره (۱) نشان داده شده است. همچنین نتایج آزمایش XRD بر روی این خاک در تصویر شماره (۲)، آزمایش XRF در جدول شماره (۱) و نتایج آزمایشات فیزیکی در جدول شماره (۲) آمده است. این خاک در طبقه بندی متحد جزء خاک CL به حساب می آید.

### ۲-۳-نانوذرات سیلیس و کائولینیت

نانوذرات مورد استفاده در این مطالعه توسط روش آسیاب گلوله ای (Planetary Ball Mill) و طی مکانیسم خردایش تهیه شد که

تصویر میکروسکوپی FESEM حاکی از این است که طی این مکانیسم ذرات به مقیاس نانومتر رسیده‌اند (تصویر شماره ۳). پودر سیلیس و کائولینیت اولیه از کارخانه کاشی تبریز تهیه شد که به خاطر فرآوری شدن، درجه خلوص خیلی بالا (تقریبا ۹۹٪) داشت. نتایج آزمایش های XRD و XRF بر روی پودر سیلیس و کائولینیت اولیه و نانوذرات حاصل از آن نشان دادند که هیچ تغییری در ترکیب شیمیایی پودر مادر در اثر فرایند خردایش اتفاق نمی افتد که این یکی از مزیتهای کاربرد روش مکانیکی آسیاب گلوله‌ای جهت تولید نانو ذرات است. تصویر شماره (۴) و جدول شماره (۳) به ترتیب نتایج آزمایش XRD و XRF را بر روی نانو ذرات و جدول شماره (۴) کمیت پارامترهای موثر در تولید نانوذرات توسط دستگاه آسیاب گلوله‌ای را نشان می دهد.



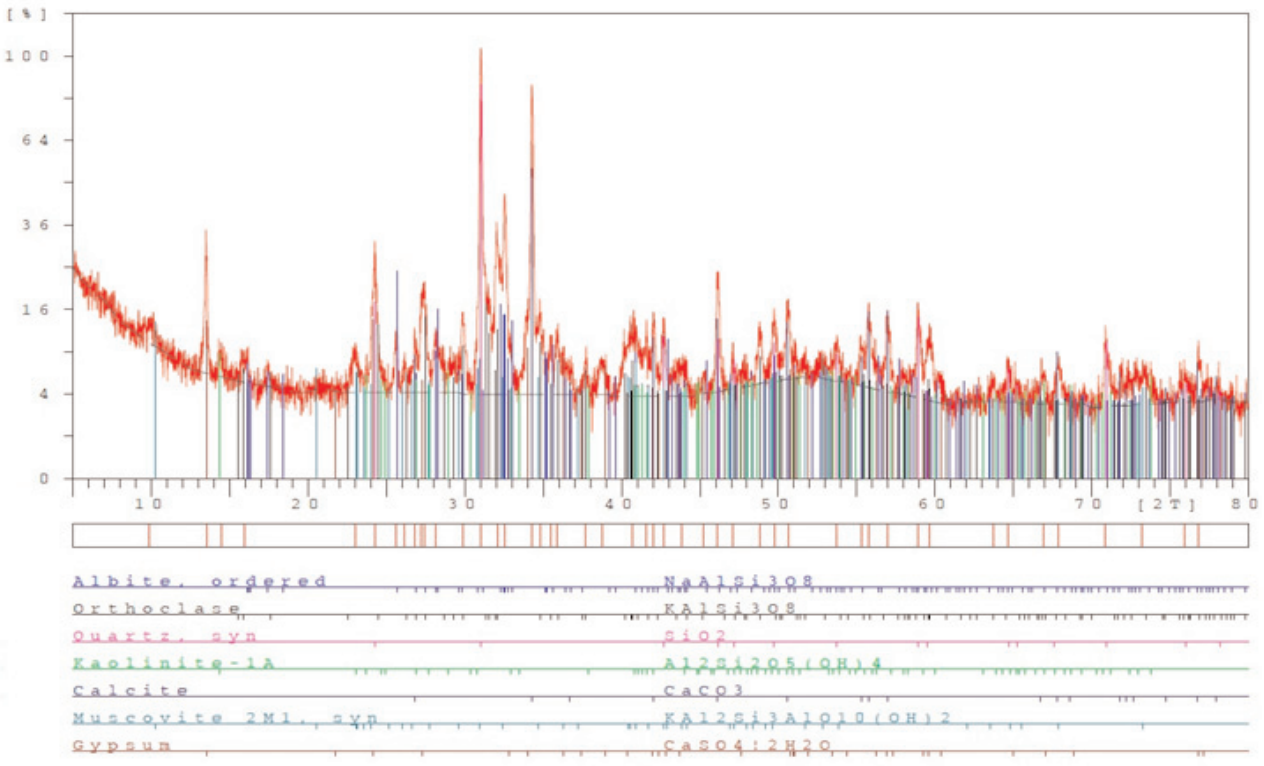

تصویر ۱- نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

جدول ۱- نتایج آزمایش XRF بر روی نمونه خاک رسی مورد مطالعه

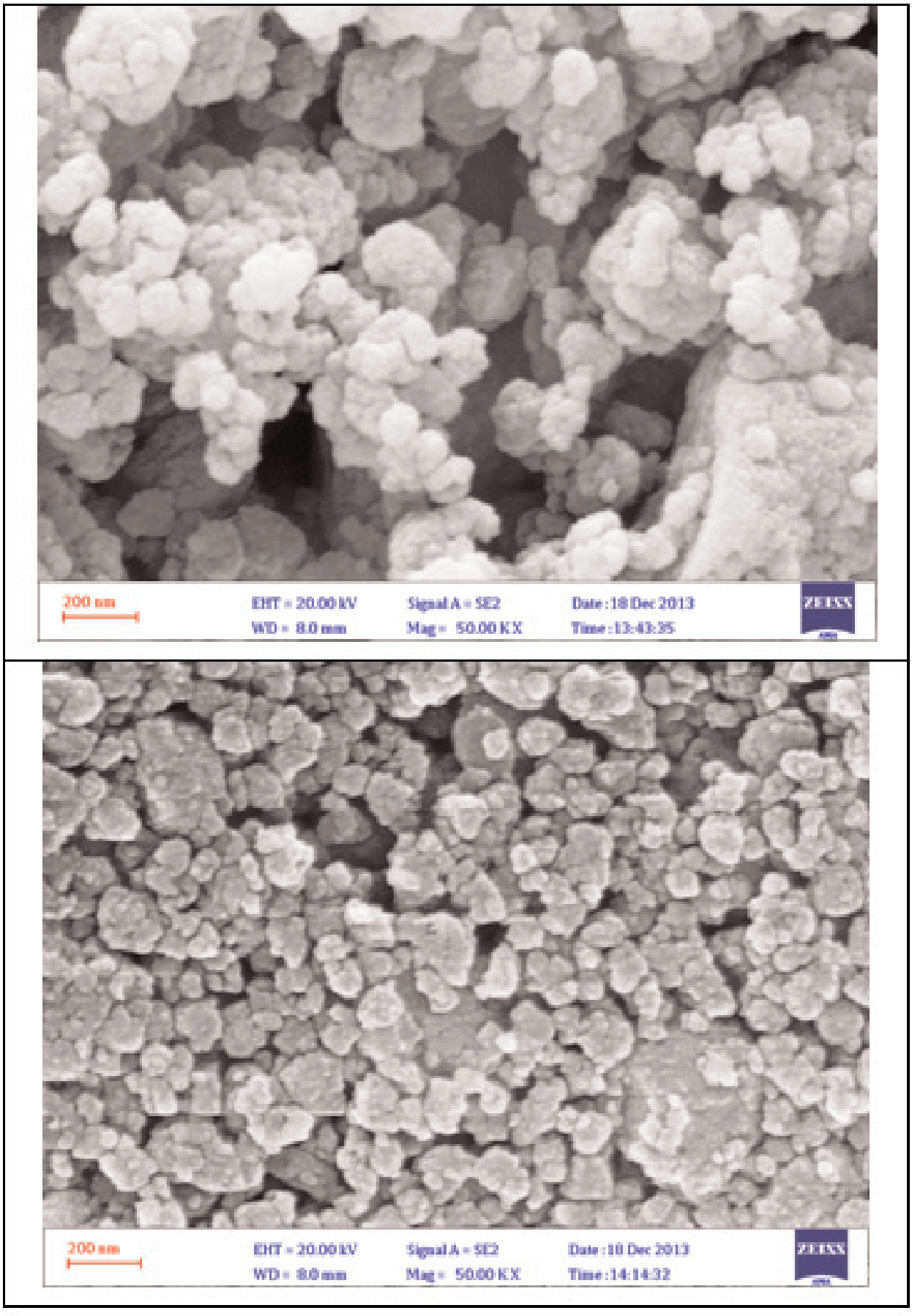
| ترکیب | L.O.I | Na2o | Al2o3 | Sio2 | P2o5 | So3 | K20 | Cao | Tio2 | Mno | Fe203 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | 9.75 | 1.547 | 13.548 | 50.954 | 0.175 | 4.078 | 4.221 | 9.627 | 0.539 | 0.372 | 4.717 |

جدول ۲- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

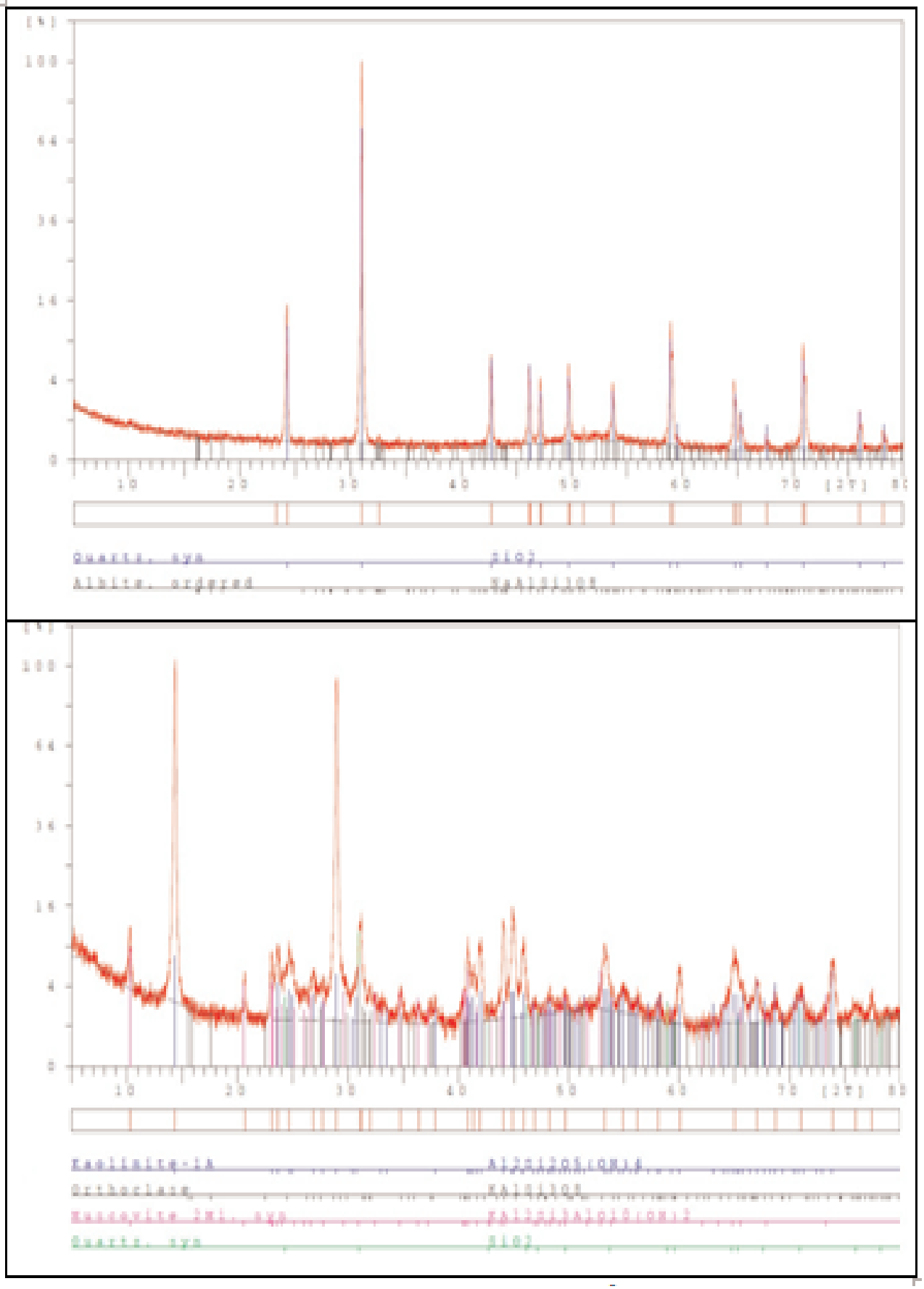
| رنگ ظاهری | رده خاک | Gs | LL | PL | PI | $\gamma d_{max}$ (KN/m3) | %W | C(Kpa) | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| زرد | CL | ۲/۷ | ۳۲ | ۱۹ | ۱۳ | ۱۷/۲۶ | ۱۶/۸۵ | ۱۳ | ۱۱ |




تصویر ۲- نتایج حاصل از آزمایش XRD بر روی خاک رسی مورد مطالعه




تصویر ۳- تصویر FESEM نانوسیلیس (شکل بالا) و نانوکائولینیت (شکل پایین) تهیه شده از روش آسیاب گلوله‌ای



تصویر ۴- نتایج حاصل از آزمایش XRD بر روی نانوسیلیس (شکل بالا) و نانوکائولینیت (شکل پایین)

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش XRF بر روی نانوسیلیس و نانوکائولینیت

| Chemical composition | nanopowders | |
|---|---|---|
| | nanosilica | nanokaolinite |
| L.O.I | 0.1 | 20.87 |
| Mgo | 1.076 | 0.343 |
| Al2o3 | 0.422 | 31.228 |
| Sio2 | 96.243 | 41.158 |
| Cao | 1.094 | 1.054 |
| K2o | - | 3.446 |
| Traces | Na,P,S,Cl,Cu | F,Na,Ti,Mn,Ni |

جدول ۴- شرایز بهینه عملکرد دستگاه Planetary Ball Mill جهت تهیه پودر نانوذرات

| پارامتر | سرعت چرخش | مدت زمان آسیاب | اندازه گلوله‌ها | جنس گلوله‌ها و کاپ |
|---|---|---|---|---|
| کمیت پارامتر | 500Rpm | ۱۰ ساعت | ۱۰ عدد گلوله ۱۰mm<br>۱۰ عدد گلوله ۱۵mm | فولاد با سختی ۶۰ راکون سی |

### ۲-۴-آب

آب استفاده شده در این مطالعه برای تمامی آزمایشها آب مقطر می باشد از آزمایشگاه نانو فناوری دانشگاه تربیت مدرس تهیه گردیده است.

## ۳-روش تحقیق

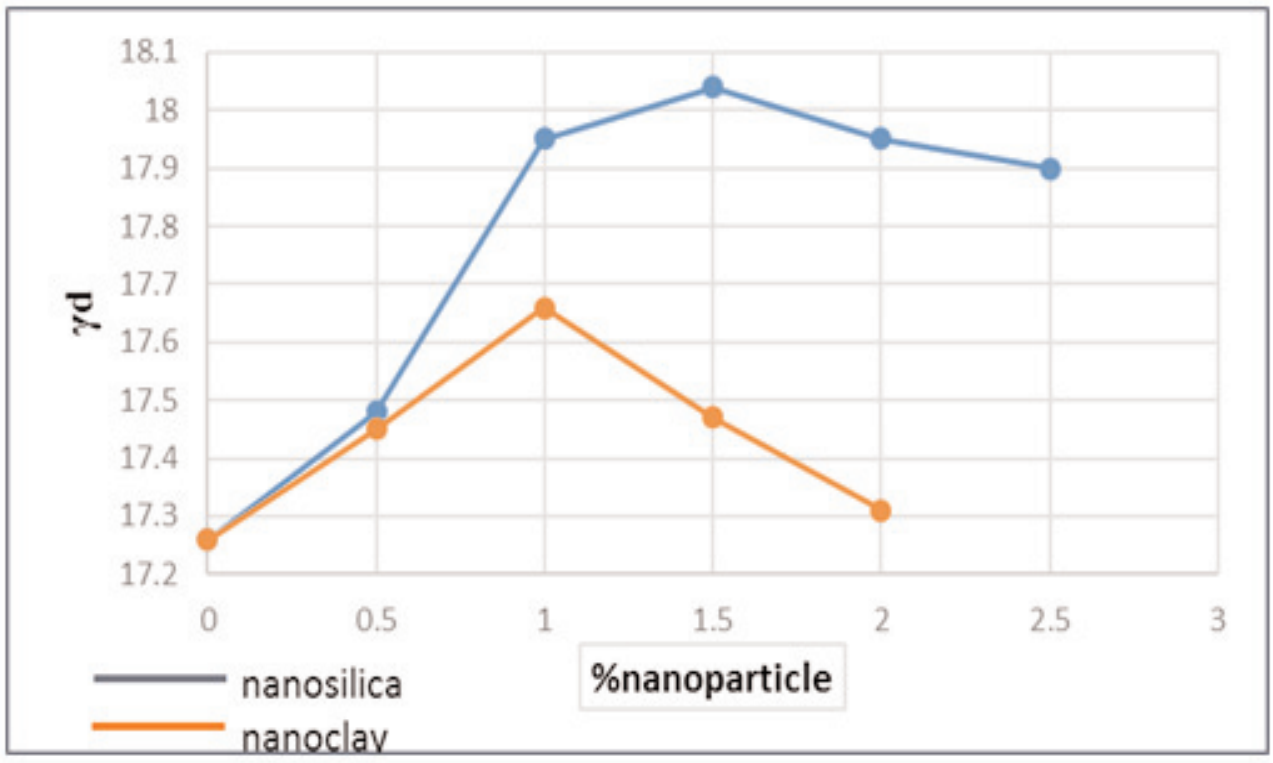
### ۳-۱-انجام آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D: 698-78

جهت آماده سازی نمونه برای انجام آزمایش تراکم استاندارد، ابتدا درصدهای متفاوتی از نانوکائولینیت و نانوسیلیس (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن خاک خشک) را با آب مقطر ترکیب کرده و به مدت نیم ساعت داخل حمام التراسونیک قرار می دهیم تا این دستگاه با وارد آوردن ضربات امواج فراصوتی بر روی نانو ذرات، آنها را از همدیگر جدا کرده و مولکولهای آب را مابین آنها قرار دهد و مانع از به هم چسبیدن و آگلومره شدن آنها و تشکیل آگرگات شود. سپس محلول به دست آمده را به تمام حجم خاک اسپری کرده و جهت همگن سازی ترکیب خاک با نانوذرات، آنها را به مدت سی دقیقه در دستگاه توربومیکسر مخلوط می کنیم تا در پایان مخلوط همگن و عاری از کلوخه به دست آید. تهیه نمونه همگن مهمترین و موثرترین بخش آزمایش است که میزان صحت نتایج به دست آمده از آزمایش بستگی بسیار زیادی به میزان همگن بودن نمونه دارد. دستگاه توربو میکسر با چرخش اوربیتالی در سه جهت فضایی و با سرعت ۶۰ دور در دقیقه سبب ترکیب همگن خاک با نانوذرات می شود. نمونه ترکیب شده را به مدت ۲۴ ساعت داخل محفظه های پلاستیکی نگه می داریم تا واکنش های شیمیایی بین نانوذرات و ترکیب خاک صورت گرفته و تاثیر آنها بررسی شود. بعد از ۲۴ ساعت، نمونه ها مطابق استاندارد آزمایش تراکم آماده شده و آزمایش بر روی آنها انجام شده است. جهت کنترل نتایج و بررسی تاثیر افزودن نانوذرات به ترکیب خاک از نتایج آزمایش تراکم خاک رسی بدون افزودن نانو ذرات بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمایش تراکم بر روی ترکیب خاک با درصدهای متفاوت نانوکائولینیت و نانوسیلیس و تاثیر آن بر ویژگیهای تراکم خاک (وزن واحد حجم و رطوبت اپتیمم) در تصاویر شماره (۵ و ۶) آمده است.

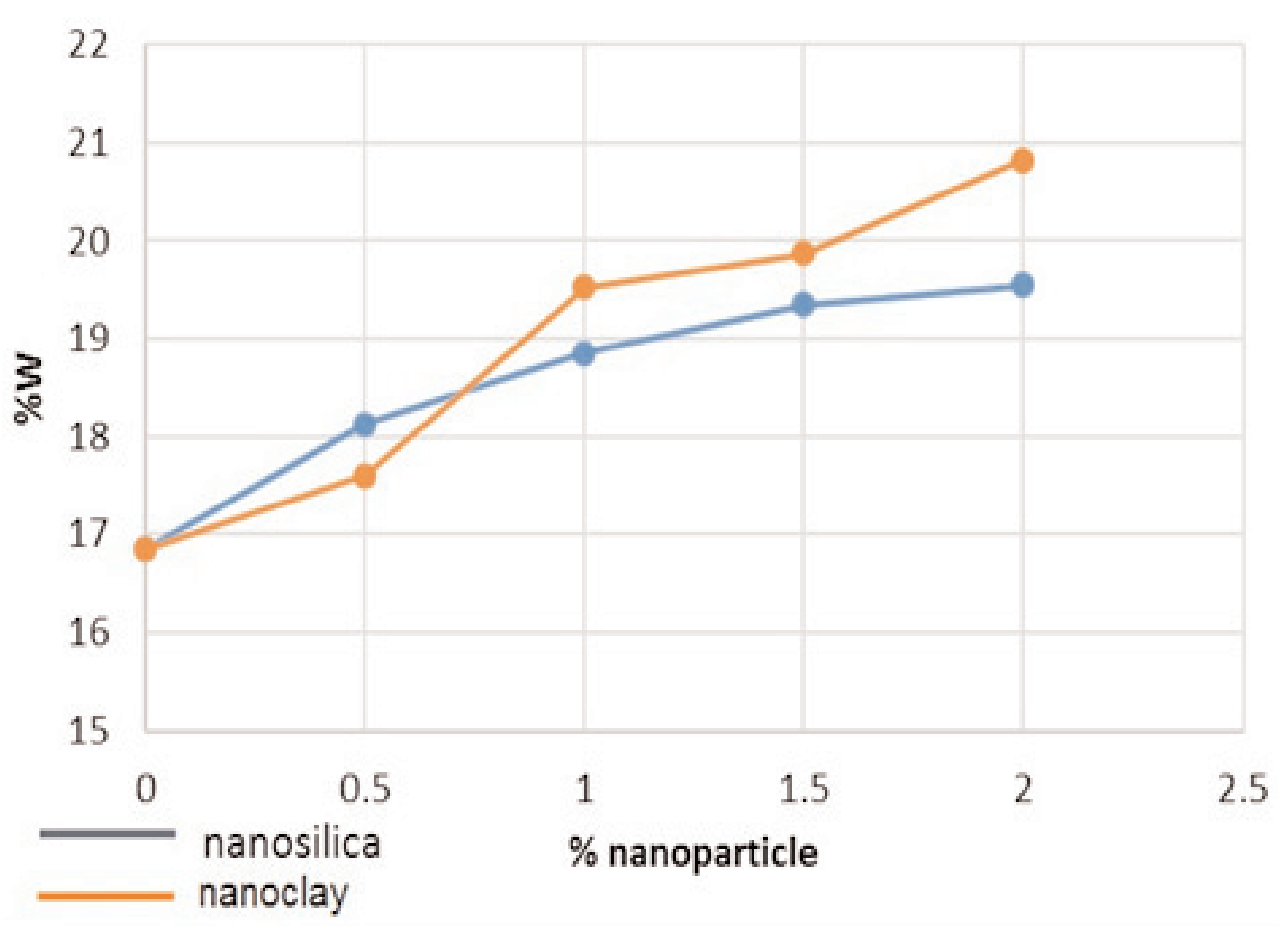
همانگونه که از تصویر شماره (۵) پیداست افزودن نانوکائولینیت تا حد ۱ ٪ و نانوسیلیس تا حد ۱/۵٪ موجب افزایش چگالی خشک ذرات خاک رسی می شود (به خاطر جایگزینی نانوذرات در نانو منافذ خاک به جای هوا) و افزایش بیش از آن موجب کاهش می گردد که این امر به علت تجمع و آگلومره شدن نانوذرات بعد از حد بهینه ۱٪ برای نانوکائولینیت و ۱/۵٪ برای نانوسیلیس بوده و سبب کاهش چگالی حجمی خاک می شود. همچنین با توجه به تصویر شماره (۶) افزایش میزان نانوذرات سیلیس و کائولینیت در خاک موجب افزایش میزان رطوبت اپتیمم خاک می شود که آن نیز به خاطر قرارگیری نانوذرات در نانو منافذ خاک و جذب آب بین دانه ای بوده که باعث می شود نانومنافذ موجود در خاک با نانوذرات پر شده و این ذرات به علت بار یونی بالا یونهای هیدراته را جذب کرده و میزان رطوبت خاک را بالا ببرند.

### ۳-۲-انجام آزمایش کاساگرانده بر اساس استاندارد ASTM D: 4318-87

جهت آماده سازی نمونه برای انجام این آزمایش نیز همانند آزمایش تراکم، خاک رسی بر اساس استاندارد موجود با درصدهای مختلف نانوذرات سیلیس و کائولینیت ترکیب شده و به منظور همگن بودن




تصویر ۵- تاثیر نانوذرات سیلیس و کائولینیت بر روی ماکزیمم چگالی خشک خاک رسی



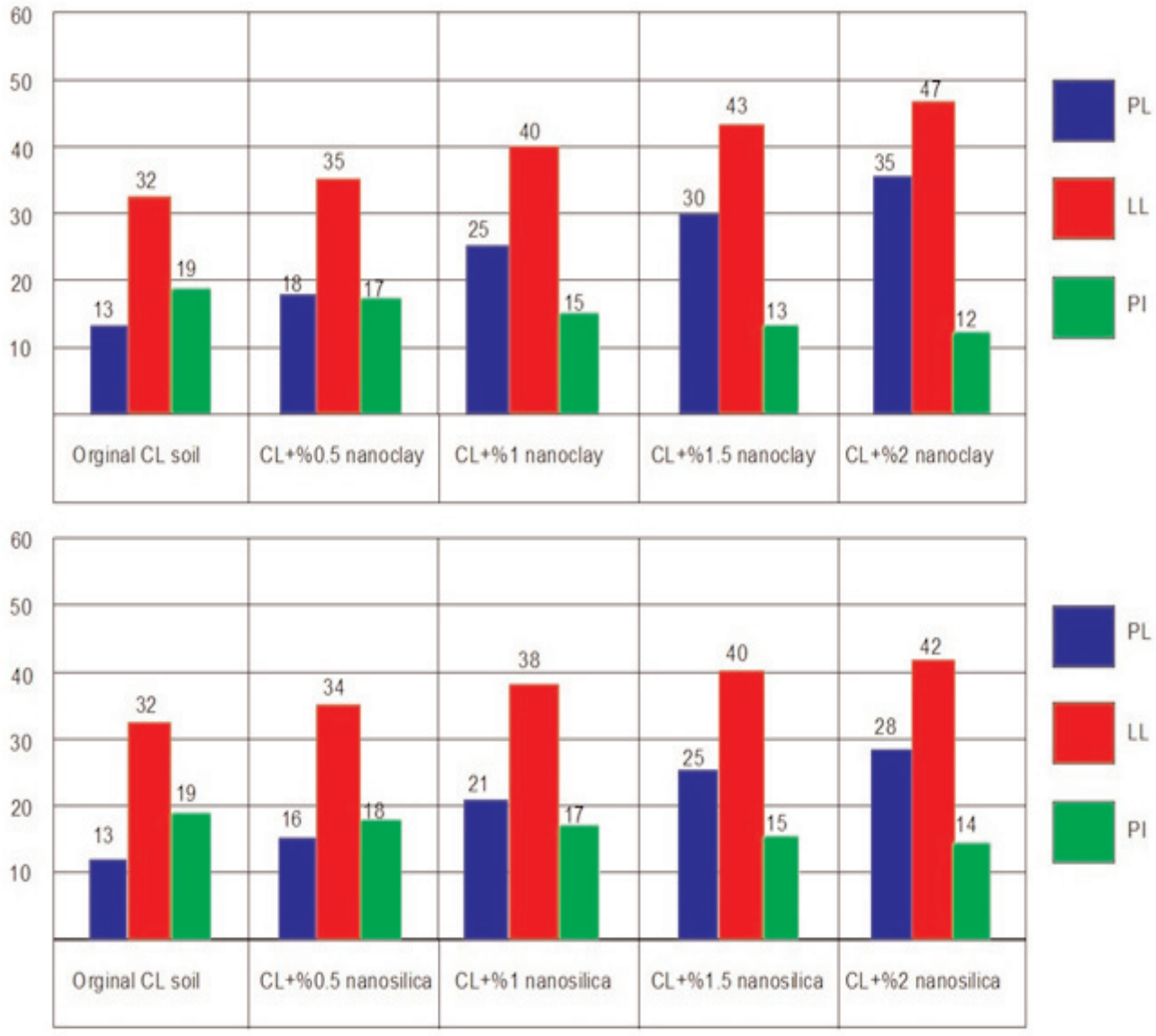

تصویر ۶- تاثیر نانوذرات سیلیس وکائولینیت بر روی رطوبت اپتیمم خاک رسی

ترکیب توسط دستگاه توربومیکسر مخلوط شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت جهت انجام آزمایش کاساگرانده در محفظه‌های عایق نگهداری شدند. آزمایش حد روانی و خمیری بر روی نمونه های خاکی با درصدهای متفاوت نانوکائولینیت انجام شد و نتایج آن مطابق تصویر شماره (۷) به دست آمد.

با توجه به تصویر شماره (۷)، با افزایش میزان نانوذرات سیلیس و کائولینیت در ترکیب خاک، حدود روانی و خمیری خاک افزایش می یابند که به خاطر نسبت بالای سطح به حجم نانوذرات و واکنش پذیری بالای آنها با آب بوده و هم اینکه به خاطر وجود نانو منافذ، آب در این منافذ جمع می شود و بنابراین ظرفیت آب موجود در خاک افزایش می یابد. نتایج نشان دادند که آهنگ افزایش حد خمیری بیشتر از حد روانی بوده و بنابر این با توجه به رابطه (PI=LL-PL)، با افزایش میزان نانوذرات در ترکیب خاک رسی شاخص خمیری کاهش می یابد که این نشانه مطلوبی برای مهندسین ژئوتکنیک جهت عملیات بهسازی خاکهای سست پروژه‌های عمرانی می باشد.

### ۳-۳- انجام آزمایش برش مستقیم خاک بر اساس استاندارد ASTM D: 3080-90

روش آماده سازی نمونه‌ها مشابه روشی است که برای انجام آزمایش تراکم ذکر شد. مقدار آب ترکیب شده با نانوذرات متناظر با درصد رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم می‌باشد. نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌ای شکل استاندارد آزمایش تهیه شده و به منظور




تصویر ۷- تاثیر نانوکائولینیت (تصویر بالا) و نانوسیلیس (تصویر پایین) بر روی حدود اتربرگ خاک رسی

حفظ رطوبت در مدت زمان مورد نظر درون محفظه عایق قرار داده شده و آماده آزمایش شدند.

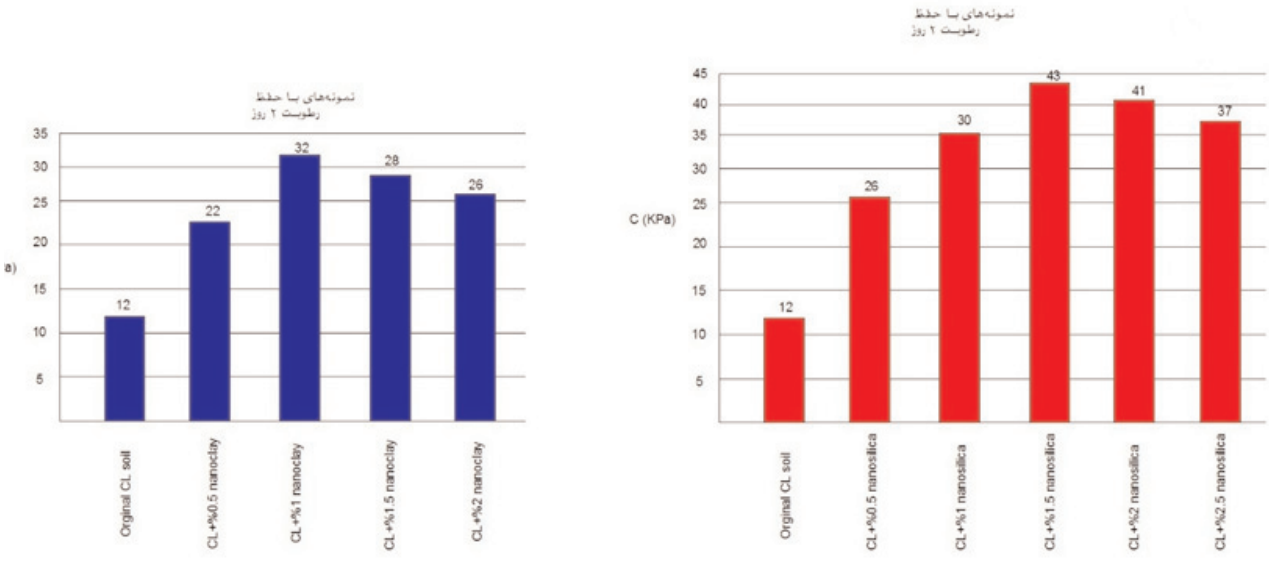
در ابتدا به منظور یافتن درصد بهینه اختلاط برای هر یک از درصدهای وزنی نانوذرات (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ ٪وزنی خاک خشک) نمونه های با حفظ رطوبت ۲ روز ساخته شدند. پس از یافتن درصد بهینه افزودن نانوذرات، به منظور بررسی تاثیر حفظ رطوبت، نمونه های با حفظ رطوبت ۷ روزه، ۱۴ روزه و ۲۸ روزه با میزان نانوذره بهینه تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

تصویر شماره (۸) تغییرات میزان چسبندگی را بر حسب درصد نانوذرات سیلیس و کائولینیت برای نمونه های با حفظ رطوبت ۲ روز نشان می دهد که همانگونه که مشخص است نمونه ۲ روزه با یک درصد نانوکائولینیت و نمونه ۲ روزه با ۱/۵٪ نانوسیلیس بیشترین چسبندگی را داراست و میزان یک درصد نانوکائولینیت و یک ونیم درصد نانوسیلیس به عنوان درصد افزودنی اپتیمم جهت انجام سایر آزمایش ها انتخاب شد. همانگونه که از تصویر شماره (۸) مشخص است میزان چسبندگی خاک رسی حاوی ۱٪ نانو کائولینیت (۳۲ کیلو پاسکال) نسبت به خاک بدون افزودنی (چسبندگی برابر ۱۲ کیلو پاسکال) حدود ۳ برابر افزایش نشان می دهد. همچنین نمونه های خاکی حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس افزایش حدود ۴ برابر چسبندگی نسبت به نمونه های بدون افزودنی (از ۱۲ کیلو پاسکال به ۴۳ کیلو پاسکال) نشان می دهند.

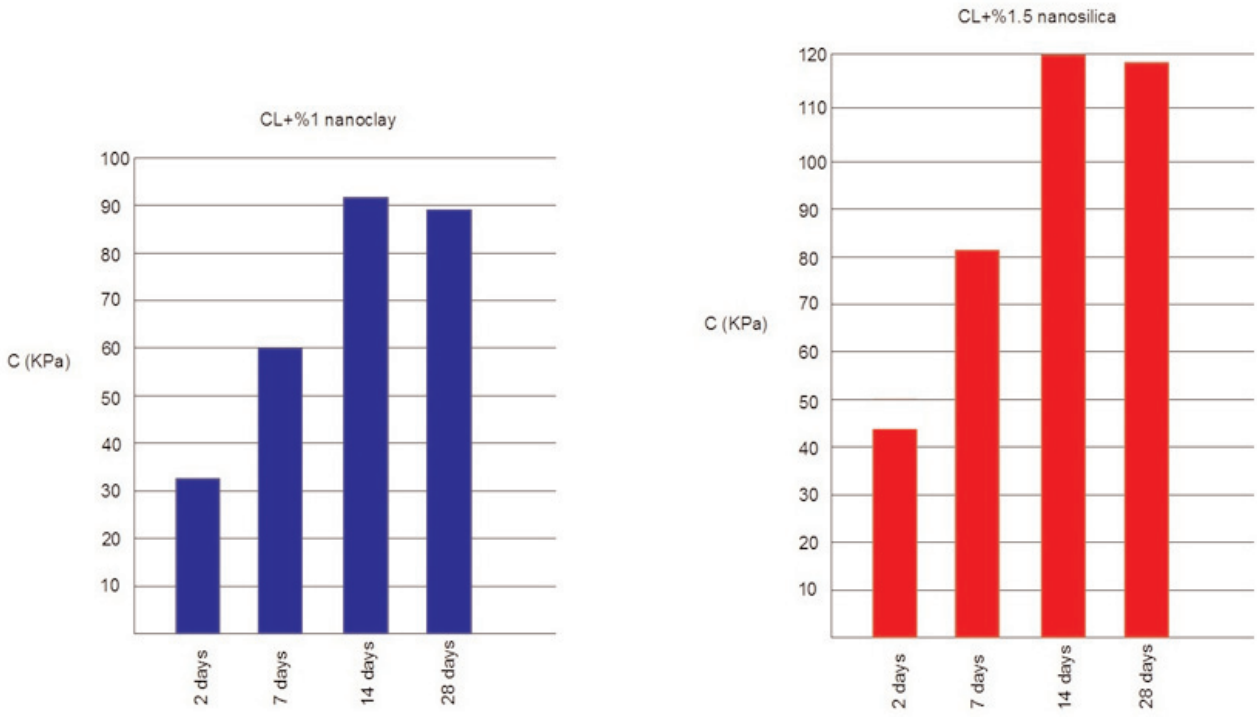
در تصویر شماره (۸) مشاهده می شود که با افزودن درصدهای مختلف نانوکائولینیت تا مقدار ۱ درصد وزنی و نانوسیلیس تا مقدار ۱/۵٪ درصد وزنی خاک خشک، افزایش میزان چسبندگی خاک و سپس کاهش چسبندگی نمونه های با حفظ رطوبت ۲ روزه می شود. اما همواره خاک حاوی نانوذرات چسبندگی بیشتری از خاک خالص دارا می باشد.

در تصویر شماره (۹) تاثیر زمان حفظ رطوبت بر روی تغییرات چسبندگی نمونه های خاکی حاوی ۱٪ نانوکائولینیت و ۱/۵٪ نانوسیلیس به ازای ۲، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز حفظ رطوبت مشاهده می شود. تصویر شماره (۹) نشان می دهد که افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت تا ۱۴ روز باعث افزایش چسبندگی خاک (از ۳۲ کیلو پاسکال تا ۹۲ کیلو پاسکال در حالت افزودن ۱٪ نانو کائولینیت و از ۴۳ کیلو پاسکال تا ۱۲۰ کیلو پاسکال در حالت افزودن ۱/۵٪ نانوسیلیس) می شود و تعداد روزهای بیشتر از آن تغییر چندانی در میزان چسبندگی ایجاد نمی کند.

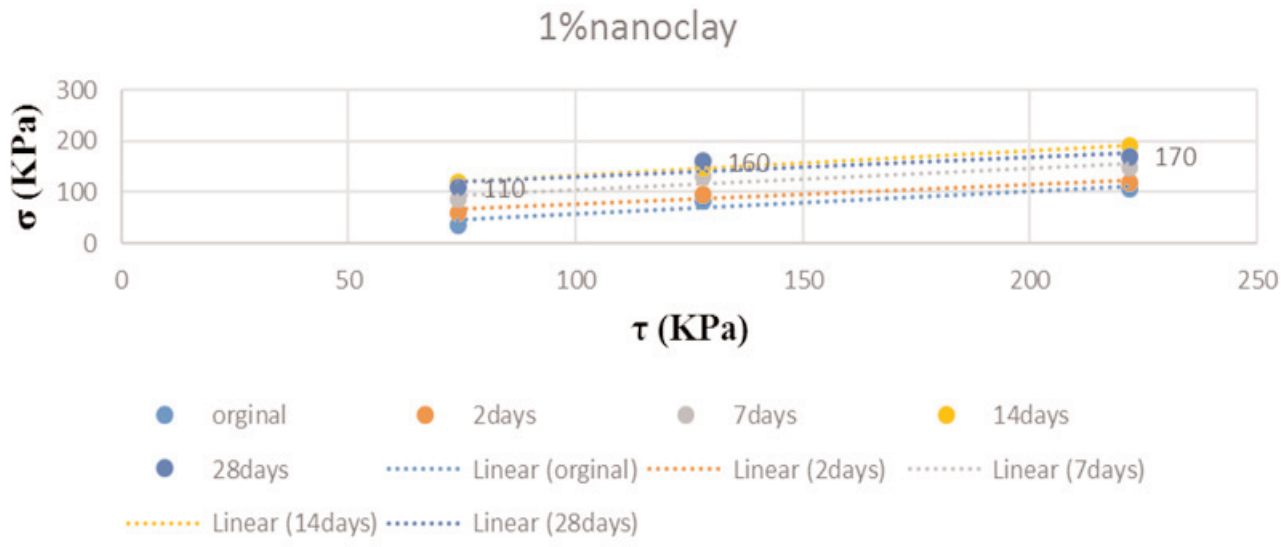
با توجه به اینکه آزمایش برش مستقیم با وزنه های دو، چهار و شش کیلوگرمی به ترتیب معادل ۷۴، ۱۲۸ و ۲۲۲ کیلوپاسکال انجام می شد، نتایج حاصله نشان داد که مقاومت برشی خاک تحت بارهای وارده مذکور با افزودن نانوذرات به ترکیب خاک و همچنین افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت افزایش می یابد که به علت افزایش چسبندگی بین دانه های خاک می باشد. لازم به ذکر است که طبق تصاویر شماره (۱۰ و ۱۱)، میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک رسی با افزودن نانوذرات دچار تغییرات قابل توجهی نمی شود.




تصویر ۸- تاثیر افزودن میزان نانوکائولینیت (سمت چپ) و نانوسیلیس (سمت راست) بر چسبندگی خاک به منظور یافتن درصد افزودنی اپتیمم




تصویر ۹- تاثیر زمان حفظ رطوبت بر روی تغییرات چسبندگی نمونه های خاکی حاوی ۱٪ نانوکائولینیت (تصویر سمت چپ) و ۱/۵٪ نانوسیلیس (تصویر سمت راست).

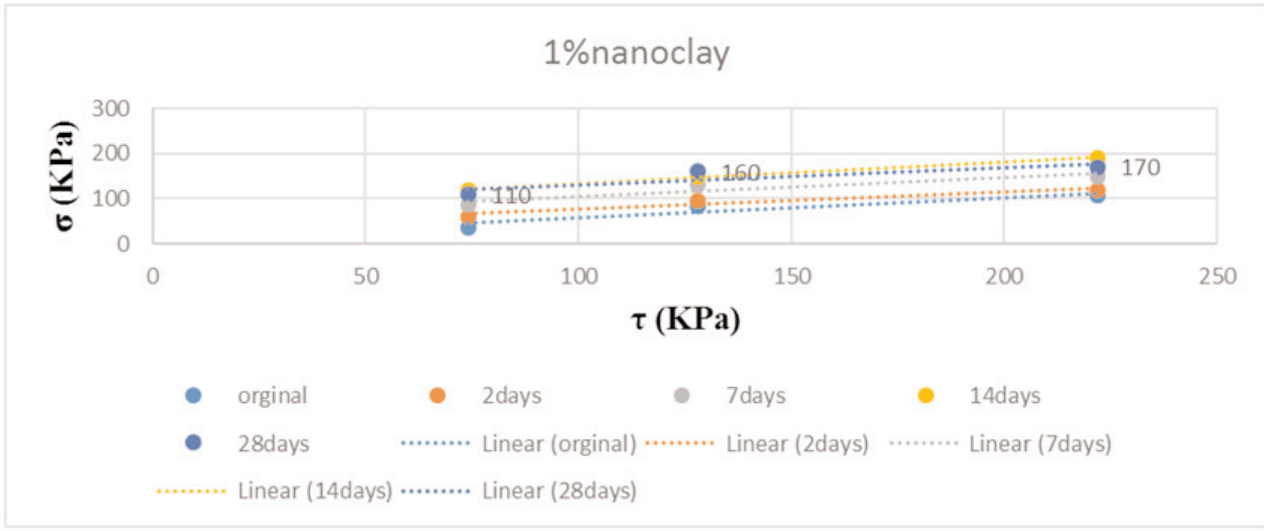



تصویر ۱۰- افزایش مقاومت برشی خاک رسی با افزودن نانوکائولینیت و افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت

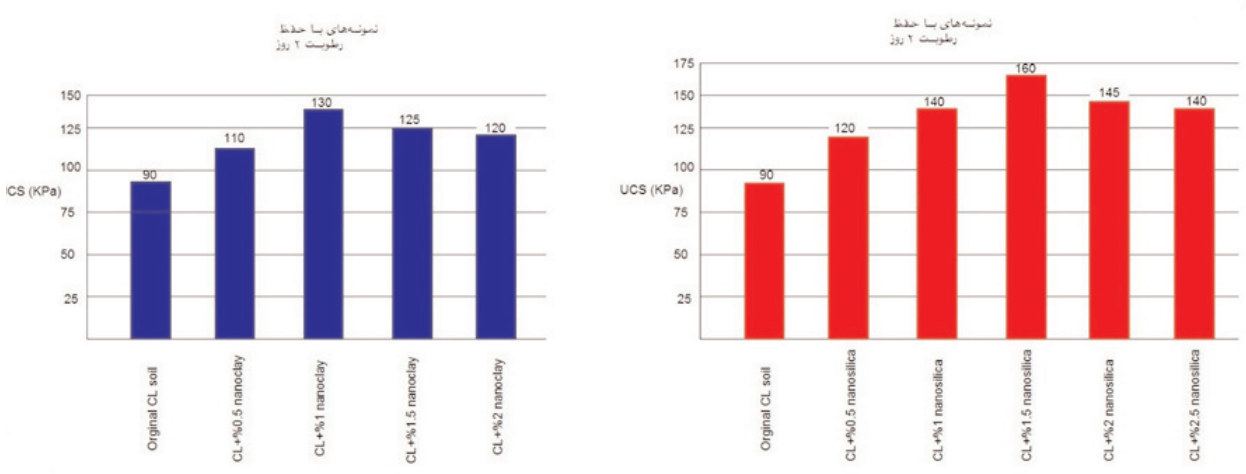
## ۳-۴- انجام آزمایش مقاومت تک محوری خاک بر اساس استاندارد ASTM D:2166-00

نحوه آماده سازی نمونه ها و طریقه همگن کردن نانوذرات با ترکیب خاک، عینا مشابه روش آماده سازی نمونه برای آزمایش برش مستقیم می باشد. تنها تفاوت در ابعاد قالب نمونه است. در این آزمایش نیز، در ابتدا به منظور یافتن درصد بهینه اختلاط برای هر یک از درصدهای وزنی نانوذرات (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ ٪وزنی خاک خشک) نمونه های با حفظ رطوبت ۲ روز ساخته شدند. پس از یافتن درصد بهینه افزودن نانوذرات، به منظور بررسی تاثیر حفظ رطوبت، نمونه های با حفظ رطوبت ۷ روزه، ۱۴ روزه و ۲۸ روزه با میزان نانوذره بهینه تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. لازم به ذکر است نمونه ها بعد از آماده سازی به مدت ۲ روز در معرض هوا قرار گرفتند تا بعد از خشک شدن مورد آزمایش قرار گیرند.

تصویر شماره (۱۲) تغییرات میزان مقاومت تک محوری خاک را بر




تصویر ۱۱- افزایش مقاومت برشی خاک رسی با افزودن نانوسیلیس و افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت

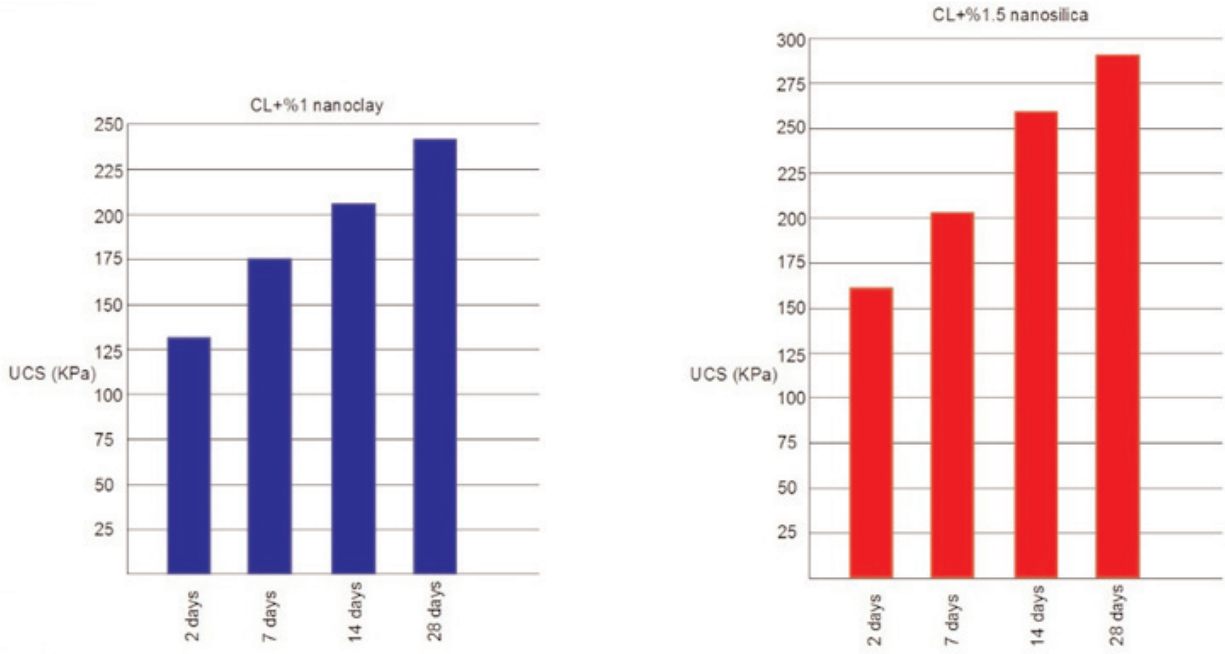



تصویر۱۲- تاثیر افزودن میزان نانوکائولینیت (سمت چپ) و نانوسیلیس (سمت راست) بر مقاومت تک محوری خاک به منظور یافتن درصد افزودنی اپتیمم

حسب درصد نانوذرات سیلیس و کائولینیت برای نمونه های با حفظ رطوبت ۲ روز نشان می دهد که همانگونه که مشخص است نمونه ۲ روزه با یک درصد نانوکائولینیت و نمونه ۲ روزه با ۱/۵٪ نانوسیلیس بیشترین مقاومت را داراست و میزان یک درصد نانوکائولینیت و یک ونیم درصد نانوسیلیس به عنوان درصد افزودنی اپتیمم جهت انجام سایر آزمایش ها انتخاب شد. در حالت افزودن ۱٪ نانوکائولینیت به ترکیب خاک، مقاومت تک محوری خاک رسی با حفظ رطوبت ۲ روز از ۹۰ کیلوپاسکال به ۱۳۰ کیلو پاسکال و در حالت افزودن ۱/۵٪ نانو سیلیس از ۹۰ کیلوپاسکال به ۱۶۰ کیلو پاسکال افزایش می یابد. دلیل افزایش میزان مقاومت تک محوری خاک تا حد افزودن ۱٪ نانوکائولینیت و ۱/۵٪ نانوسیلیس و سپس کاهش آن با افزایش میزان نانوذرات اشاره شده به این خاطر است که بعد از حدود بهینه مقادیر نانو ذرات اضافه شده، نانوذرات شروع به تجمع در کنار هم و تشکیل آگرگات می دهند که این امر به علت کم وزن بودن نانوذرات نسبت به وزن دانه های خاک، سبب کاهش چگالی حجمی خاک می شود.

در تصویر شماره (۱۳) تاثیر زمان حفظ رطوبت بر روی تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه های خاکی حاوی ۱٪ نانوکائولینیت و ۱/۵٪ نانوسیلیس به ازای ۲، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز حفظ رطوبت مشاهده می شود.

تصویر شماره (۱۳) نشان می دهد که افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت باعث افزایش تقریبا دو برابری مقاومت فشاری تک محوری خاک با حضور نانوذرات می شود به صورتی که با افزایش تعداد




**تصویر ۱۳- تاثیر زمان حفظ رطوبت بر روی تغییرات مقاومت تک محوری نمونه های خاکی حاوی ۱٪ نانوکائولینیت (تصویر سمت چپ) و ۱/۵٪ نانوسیلیس (تصویر سمت راست).**

روزهای حفظ رطوبت، مقاومت تک محوری خاک بهسازی شده با نانو کائولینیت از ۱۳۰ کیلو پاسکال به ۲۴۰ کیلو پاسکال می رسد و در مورد خاکهای بهسازی شده با نانوسیلیس این مقادیر از ۱۶۰ کیلو پاسکال به ۲۸۵ کیلو پاسکال می رسد. همچنین مقاومت تک محوری نمونه های حاوی نانوذرات با حفظ رطوبت ۲۸ روز حدود حدود ۳ برابر بیشتر از مقاومت تک محوری نمونه های خاکی بهسازی نشده است.

## ۴-نتایج

در این مطالعه تاثیر افزودن نانوکائولینیت و نانوسیلیس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رسی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

-با توجه به نتایج آزمایش تراکم استاندارد مشخص شد که با افزودن نانوکائولینیت و نانوسیلیس به ترتیب تا حد ۱٪ و ۱/۵٪ وزن خاک خشک به ترکیب خاک رسی، وزن واحد حجم خاک افزایش یافته و بعد از این حدود اپتیمم شروع به کاهش می نماید ولی در هر حال وزن واحد حجم خاک رسی ترکیب شده با نانوذرات بیشتر از حالت بدون حضور نانوذرات است.

-میزان رطوبت اپتیمم خاک رسی با افزایش درصد نانوذرات افزایش می یابد.

-نتایج آزمایش های کاساگرانده نشان داد با افزایش میزان نانوذرات در ترکیب خاک حدود روانی و خمیری افزایش می یابند ولی شاخص خمیری کاهش می یابد که امری مطلوب در مهندسی ژئوتکنیک جهت بهسازی خاکهاست.

-نتایج آزمایش های برش مستقیم نشان داد که افزودن نانوسیلیس و نانوکائولینیت به ترتیب تا حد ۱٪ و ۱/۵٪ وزنی خاک خشک سبب افزایش چسبندگی دانه های خاک و بالتبع افزایش مقاومت برشی خاک می شود و افزایش بیش از این حد نانوذرات تغییر چندانی را موجب نمی شود. افزودن نانوذرات به ترکیب خاک رسی، تغییری در میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک ایجاد نمی کند.

-در طول آزمایش برش مستقیم مشاهده شد که زمان حفظ رطوبت خاک رسی قبل از شروع آزمایش یکی از پارامترهای مهم جهت تاثیر در میزان مقاومت برشی خاکهاست و نتایج آزمایشات نشان دادند که نمونه های با حفظ رطوبت ۱۴ روز بیشترین میزان چسبندگی و مقاومت برشی را نسبت به سایر نمونه ها دارا می باشند.

-نتایج آزمایشهای مقاومت تک محوری نشان داد که افزودن نانوسیلیس و نانوکائولینیت به ترتیب تا حد ۱٪ و ۱/۵٪ وزنی خاک خشک سبب افزایش مقاومت تک محوری خاک می شود و افزایش

بیش از این حد نانوذرات موجب کاهش مقاومت می شود. این کاهش به علت تجمع و آگلومره شده نانوذرات در صورت افزوده شدن بیش از میزان اپتیمم است که چگالی حجمی نمونه خاک را پایین می آورد. -میزان مقاومت تک محوری نمونه های بهسازی شده با نانو ذرات سیلیس و کائولینیت با افزایش میزان نانوذرات و همچنین تعداد روزهای حفظ رطوبت افزایش می یابد بطوریکه مقاومت نمونه های بهسازی شده حدود ۳ برابر بیشتر از نمونه های خاکی دست نخورده است.

## مراجع


ASTM D: 698-78. standard test method for compaction test in laboratory.

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

ASTM D: 3080-90. standard test method for direct shear test of soils.

ASTM D: 2166-00. standard test method for unconfined strength of soil.

**Braja, M. Das., 2010.** Principles of Geotechnical Engineering. 7th edtion. *Cengage Learning.*

**Burton, C., 2009.** Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity. *Tunneling and Underground Space Technology, Pages 603- 607.*

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

**Gallagher, P.M. & Lin, Y., 2005.** Column Testing to Determine Colloid Silica Transport Mechanisms. *Sessions of the Geo-Frontiers Congress.*

**Kadivar. M, Barkhordari. K & Kadivar.Me, 2011** Nanotechnology in Geotechnical engineering. *Advanced Materials Research Vols.261-263, pp 524-528.*

**Majeed. Z. H & Taha. M. R, 2011.** Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a penang soil. *Journal of Asian Scientific Research, pp 587-592.*

**Michael, F. & Hochella, Jr., 2002.** Nanoscience and technology. *the next revolution in the Earth sciences, Blacksburg.*

**NSTC, 2007.** the National Nanotechnology Initiative - Strategic Plan. *Executive Office of the President of the United States.*

**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.*

**Taha, M.R. 2009.** Geotechnical Properties of Soil-Ball Milled Soil Mixtures. *In Proceedings of third International Symposium on Nanotechnology in Construction Prague.*

**Thomas Paul, K., Satpathy, S., Manna, I.,**

**Chakraborty, K., & Nando, G., 2007.** Preparation and characterization of nanostructured materials from fly ash: a waste from thermal power stations by high enerdy ball milling.

**TRS - The Royal Society., 2004.** Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties. *RS Policy Document No. 19/04.*

**Yonekura, R., Miwa, M., 1992.** Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout.

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

**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.*

**Zhang, G., Germaine, J. T., A., Whittle, J., & Ladd, C., 2004b.** Index properties of a highly weathered old alluvium. *Geotechnique 54, No. 7, 441-451.*