

# بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رسی با استفاده از نانوذرات کائولینیت

محرم مجدی<sup>۱</sup>، علی ارومیه‌ای<sup>۲</sup> و محمدرضا نیکودل<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>۲</sup>استاد، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>۳</sup>دانشیار، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۳

## چکیده

در این مطالعه به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات کائولینیت بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رسی پرداخته شده است. جهت تهیه نانو کائولینیت از روش مکانیکی آسیاب گلوله‌ای استفاده شده است و پودر اولیه 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 مؤید این مطلب است. سپس نانوذرات به دست آمده با نسبت‌های متفاوتی از وزن خاک با خاک رسی (CL) ترکیب شده و میزان تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک قبل و بعد از اضافه کردن نانوذرات توسط آزمایش‌های تراکم، برش مستقیم و کاساگرانده 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 آنجایی که آهنگ افزایش حد خمیری نسبت به حد روانی بیشتر است؛ شاخص خمیری کاهش می‌یابد که نتیجه‌ای مطلوب در مهندسی ژئوتکنیک جهت اجرای پروژه‌های عمرانی است. همچنین با توجه به نتایج آزمایش تراکم، وزن واحد حجم خاک رسی تا حد خاصی از افزودن نانو کائولینیت 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 آزمایش‌های XRD و XRF نشان دادند که ترکیب شیمیایی نانوذرات حاصل از روش آسیاب گلوله‌ای مشابه ترکیب شیمیایی پودر مادر است و تغییری نمی‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** نانو کائولینیت، بهسازی خاک، آسیاب گلوله‌ای، ژئوتکنیک.

\*نویسنده مسئول: محرم مجدی

E-mail: moharram\_majdi@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

و کاملاً مطلوب نیست و باید با اعمال تغییراتی بر آن، جهت فعالیت‌های عمرانی آماده شود. یکی از راهکارهای مناسب در مواجهه با خاک‌های نامناسب در مهندسی ژئوتکنیک، تغییر خصوصیات خاک محل پروژه است که به بهسازی یا اصلاح خاک موسوم است. اصلاح خاک به مجموعه عملیاتی اطلاق می‌شود که باعث حذف برخی رفتارهای نامناسب خاک و یا تحمیل رفتارهای مناسب به آن خواهد شد. یکی از این روش‌ها افزودن سیمان و یا ماده شیمیایی افزودنی به ترکیب خاک است. از جمله افزودنی‌هایی که در گذشته استفاده شده است و امروزه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ می‌توان به سیمان، قیر، آهک، خاکستر آتشفشانی و ... اشاره کرد. اضافه کردن این مواد به خاک باعث کاهش پلاستیسیته، بهبود تراکم، کاهش تورم، انقباض، بهبود مقاومت و پایداری خاک پس از تثبیت می‌شود. اغلب این مواد برای تثبیت خاک‌های ریزدانه رسی و لای به کار می‌رود و اگر برای خاک‌های دانه‌ای به کار رود باعث کاهش نفوذپذیری، کاهش فرسایش و افزایش دوام می‌شود (Lin et al., 2007). یکی از مشکلات استفاده از این قبیل افزودنی‌ها به خاک، آلودگی زیست‌محیطی است؛ ولی استفاده از نانوذرات سبب کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی خواهد شد. همچنین استفاده از آن در بهسازی خاک، سبب کنترل خواص مقاومتی، کاهش سیمان مصرفی و متعاقباً صرفه اقتصادی خواهد شد (Lambe and Whitman, 2007). در این تحقیق به بررسی تأثیر افزودن نانو کائولینیت (که طی روش مکانیکی آسیاب گلوله‌ای 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 و برش مستقیم بهره گرفته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱. مصالح مورد استفاده

– **خاک رسی:** خاک مورد استفاده در این مطالعه از خاک رسی در محل ایستگاه متروی پرند تهیه شده است. نمودار دانه‌بندی حاصل از انجام آزمایش هیدرومتری بر روی این خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.

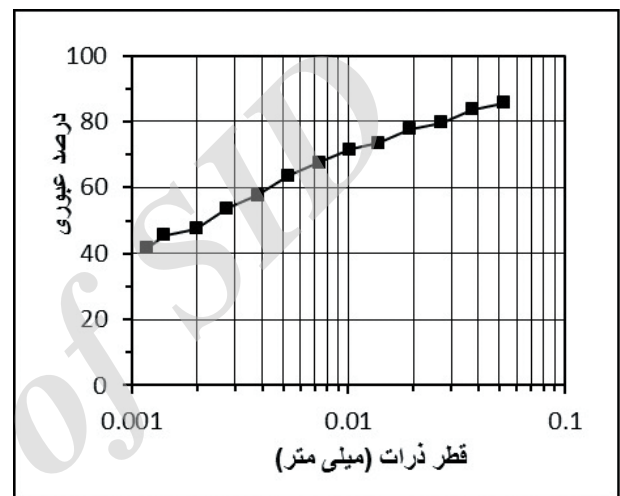
نانوتکنولوژی شامل تولید و کاربرد فیزیکی، شیمیایی و زیستی سیستم‌ها در مقیاس محدودی از تک‌اتم یا مولکول تا سطح زیر میکرون مانند جمع‌شدگی نانو ساختارها با سیستم‌های بزرگ‌تر است. نانو مواد به میکروساختارهایی هستند که حداقل یک بعد آنها در مقیاس نانومتر است. در مقیاس نانو، خصوصیات الکترونیکی، مغناطیسی، اپتیکی و شیمیایی تغییر می‌یابد که این امر نمی‌تواند در مقیاس ماکرو وجود داشته باشد (Zhang, 2007). مشخصه اصلی نانوذرات، اندازه کوچک، توزیع دانه‌بندی با یک سطح پایین آگلومراته شدن و قابلیت پخش بالاست. این ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات سبب شده است که فناوری نانو در عمده علوم وارد شود و بسیاری از مشکلات مربوطه (علوم مهندسی، پزشکی، پایه، فیزیک و غیره) را حل کند. خوشبختانه علم مهندسی ژئوتکنیک نیز از این قاعده‌مثنی نمانده و در سال‌های اخیر جهت کاربرد این فناوری نوین در شاخه‌های مختلف ژئوتکنیک، تلاش‌های زیادی انجام شده است. اغلب نانو موادی که برای تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها استفاده شده نانوذرات سیلیس است که بر روی خصوصیات تحکیم، شاخص نفوذپذیری و پارامترهای مقاومتی خاک تأثیر می‌گذارد. (Gallagher et al. 2007) از نانوذرات سیلیس برای افزایش چسبندگی خاک‌ها و کاهش ویسکوزیته آنها استفاده کردند؛ رفتار ماسه بهبود یافته با نانومتریال را در شرایط بارگذاری چرخه‌ای مورد تحلیل قرار دادند و به عنوان یک نتیجه، مشخص شد که چسبندگی وابسته به درصد افزایش نانوذرات است. (Patricia et al. 2007) در ایالات متحده نانوذرات را در خاک مخصوصی که شامل ماسه با ویسکوزیته بالا بود؛ استفاده و گزارش کردند که بعد از اعمال زلزله مصنوعی و ارزیابی نشست خاک، ۴۰٪ بهبود در میزان نشست خاک اتفاق افتاده است. برای مطالعه تأثیر نانوذرات سیلیس در طیف ابعاد ۵ تا ۱۰۰ نانومتر، (Burton 2009) از آزمایشات ادمتر، سه‌محوری و آزمایش فشاری استفاده کرد و نشان داد که مقاومت خاک با زمان افزایش می‌یابد؛ همچنان که خاک محتوی نانوذرات در مراحل ابتدایی شکل‌پذیر است و بعداً رفتار الاستوپلاستیک می‌شود. (Zhang et al. 2004) بیان کردند که وجود نانو ساختارها در خاک موجب افزایش حدود اتربرگ می‌شود. عموماً خاک موجود در سایت از دیدگاه مهندسی برای ساخت و ساز، ایده‌آل

و نتایج آزمایشات فیزیکی در جدول ۲ آمده است. این خاک طبق طبقه‌بندی متحد جزو خاک‌های CL به حساب می‌آید. جهت تعیین خصوصیات مقاومتی خاک رسی، آزمایش برش مستقیم روی آن انجام شده که در این مطالعه، انجام آزمایش مذکور از نوع کند بوده و سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه منظور شده است و زهکشی نمونه به صورت ناقص انجام می‌شود. لذا میزان پارامترهای مقاومتی خاک را بایستی مابین حالت‌های CD (تحکیم یافته زهکشی شده) و CU (تحکیم یافته زهکشی نشده) در نظر گرفت. قابل ذکر است که آزمایش‌های XRD و XRF بر روی نمونه‌های مورد مطالعه، در آزمایشگاه پراش اشعه ایکس دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفته است.

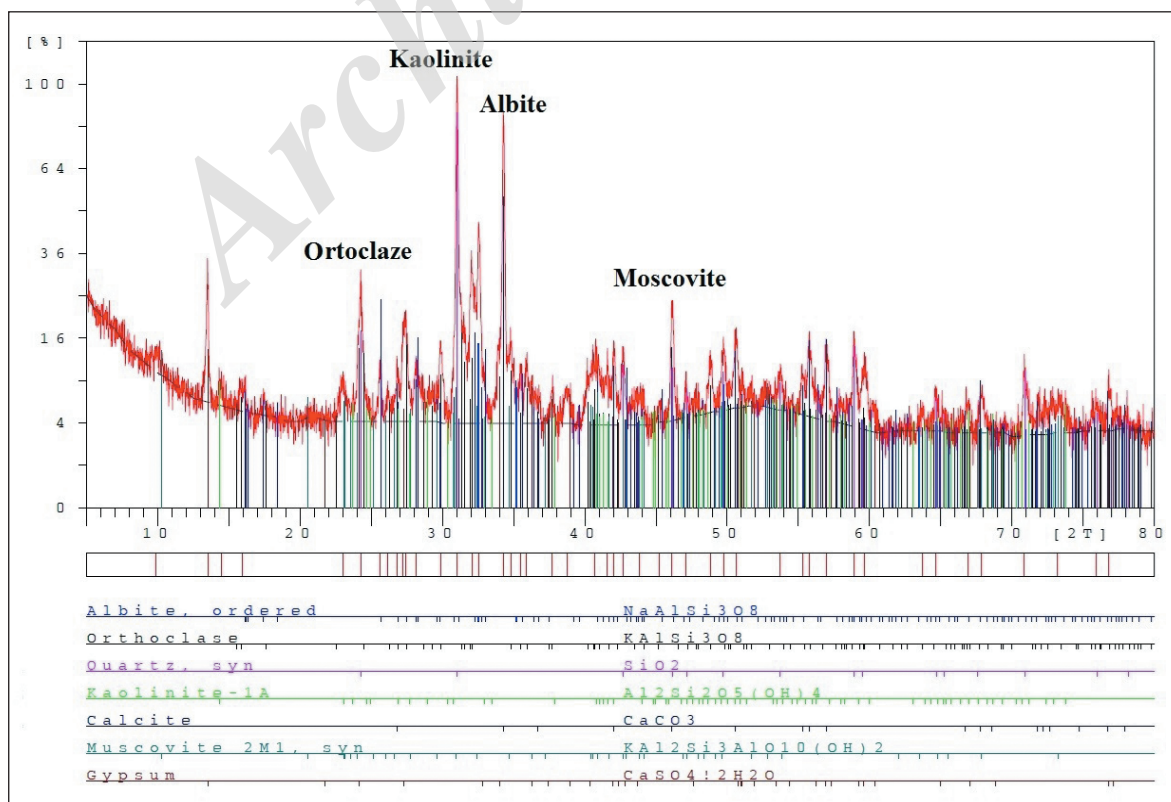
آزمایش XRD و XRF به ترتیب، ترکیب کانی‌شناسی و اکسیدی خاک‌ها را مشخص می‌کنند؛ با انجام این آزمایش می‌توان از ترکیب دقیق مصالح مورد آزمایش اطلاع یافت. جداول XRF نشان‌دهنده حداکثر درجه خلوص بالای ۹۵٪ پودر مورد آزمایش است. خروجی نتایج آزمایش XRD به صورت یک سری گراف است که هر کدام از منحنی‌های آن شاخص یک نوع کانی بوده و مجموعه‌ای از آنها نشان‌دهنده ترکیب کانی شناسی مصالح خاکی است. با وجود اینکه این آزمایش درصد کانی موجود در خاک را تعیین نمی‌کند؛ ولی کانی‌های موجود در خاک را با ضریب اطمینان مناسبی مشخص می‌کند. نتایج آزمایش XRD بر روی خاک مورد مطالعه در شکل ۲، نتایج آزمایش XRF در جدول ۱

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

ترکیب	درصد تشکیل‌دهنده
L.O.I	9.75
Na <sub>2</sub> O	1.547
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.548
SiO <sub>2</sub>	50.954
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.175
So <sub>3</sub>	4.078
K <sub>2</sub> O	4.221
CaO	9.627
TiO <sub>2</sub>	0.539
MnO	0.372
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.717



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.



شکل ۲- نتایج حاصل از آزمایش XRD روی خاک رسی مورد مطالعه.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه.

رنگ ظاهری	زرد
رده خاک	CL
Gs	۲٫۷
LL	۳۲
PL	۱۹
PI	۱۳
$\gamma d_{max}$ (KN/m <sup>3</sup> )	۱۷/۲۶
W%	۱۶/۸۵
C (Kpa)	۱۳
$\phi^{\circ}$	۱۱

– **آب:** آب استفاده شده در این مطالعه برای تمامی آزمایشها آب مقطر است که از آزمایشگاه نانو فناوری دانشگاه تربیت مدرس تهیه شده است.

#### ۲-۲. انجام آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D: 698-78

جهت آماده‌سازی نمونه برای انجام آزمایش تراکم استاندارد، ابتدا درصد‌های متفاوتی از نانو کائولینیت (۱/۵، ۱/۱۰، ۱/۵۰ و ۲ درصد وزن خاک خشک) به ترکیب خاک اضافه شد. سپس برای همگن‌سازی نمونه‌ها، به مدت نیم ساعت در داخل دستگاه آسیاب گلوله‌ای با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه به هم زده می‌شوند و بعد از آن مقداری آب که خیلی کمتر از میزان رطوبت بهینه است، به ترکیب خاک و نانو کائولینیت اضافه می‌شود و به مدت ۲۴ ساعت داخل محفظه‌های پلاستیکی نگه داشته می‌شوند تا واکنش‌های شیمیایی بین نانوذرات و ترکیب خاک صورت گیرد و تأثیر آنها بررسی شود. با توجه به اینکه سطح ذرات خاک رس دارای بار الکتریکی منفی است؛ در مواجهه با آب مولکول‌های آن را هیدراته می‌کند و به صورت یونی در می‌آورد و با یون  $H^+$  آب وارد واکنش می‌شود و پیوندهای یونی با آن تشکیل می‌دهد. بنابراین هر چه مدت زمان حضور آب در خاک قبل از انجام آزمایش بیشتر باشد؛ یون‌های هیدراته زیادی به وجود می‌آید و پیوندهای یونی زیادتری مابین مولکول‌های آب و ذرات خاک تشکیل می‌شود. بعد از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها مطابق استاندارد آزمایش تراکم آماده و آزمایش بر روی آنها انجام شده است. جهت کنترل نتایج و بررسی تأثیر افزودن نانو کائولینیت به ترکیب خاک از نتایج آزمایش تراکم خاک رسی بدون افزودن نانو کائولینیت بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمایش تراکم روی ترکیب خاک با درصد‌های متفاوت نانو کائولینیت و تأثیر آن بر ویژگی‌های تراکم خاک (وزن واحد حجم و رطوبت اپتیمم) در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است.

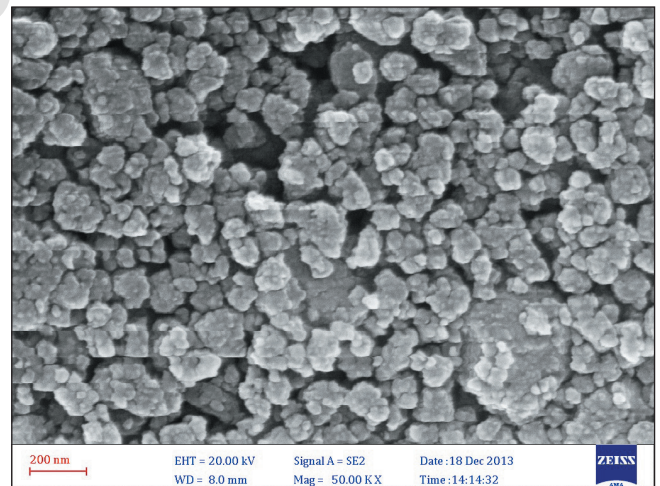
همانگونه که از شکل ۵ پیداست؛ افزودن نانو کائولینیت تا حد ۱٪ موجب افزایش چگالی خشک ذرات خاک رسی می‌شود (به خاطر جایگزینی نانو کائولینیت در نانو منافذ خاک به جای هوا) و افزایش بیش از آن موجب کاهش می‌شود که این امر به علت آگلومره شدن (تجمع و چسبیدن) نانوذرات کائولینیت بعد از حد بهینه ۱٪ است و سبب کاهش چگالی حجمی خاک می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۶ افزایش میزان نانو کائولینیت در خاک موجب افزایش میزان رطوبت اپتیمم خاک می‌شود که دلیل آن نیز به خاطر قرارگیری نانوذرات در نانو منافذ خاک و جذب آب بین دانه‌ای است که باعث می‌شود نانو منافذ موجود در خاک با نانو کائولینیت پر شود و این ذرات به علت بار یونی بالا، یون‌های هیدراته را جذب کنند و میزان رطوبت خاک را بالا ببرند. شکل ۷ نمودار زنگوله‌ای آزمایش تراکم رسی ترکیب شده با درصد‌های متفاوت نانو کائولینیت را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل نیز پیداست؛ با افزایش میزان نانو کائولینیت تا حد ۱٪ وزنی خاک، وزن واحد حجم خشک افزایش می‌یابد و بعد از آن حد کاهش می‌یابد. ضمن اینکه رطوبت بهینه تراکم خاک با افزایش میزان نانو کائولینیت به سمت راست نمودار (قسمت تر نمودار) میل می‌کند که نشان از جذب بیشتر یون‌های  $H^+$  آب با افزایش میزان نانوذرات دارد. با توجه به اینکه میانگین نسبت تغییرات چگالی به تغییرات درصد رطوبت در حالت افزودن نانوذرات بیشتر از حالت بدون افزودن به خاک رس است؛ بنابراین شیب‌های سمت راست و چپ نمودار زنگوله‌ای خاک‌های حاوی نانوذرات افزایش نسبی در مقایسه با خاک رسی بدون افزودن نشان می‌دهند.

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

جهت آماده‌سازی نمونه برای انجام این آزمایش نیز همانند آزمایش تراکم، خاک رسی بر اساس استاندارد موجود با درصد‌های مختلف نانو کائولینیت ترکیب و به منظور همگن بودن ترکیب توسط دستگاه آسیاب گلوله‌ای مخلوط شد. سپس مقداری آب به نمونه‌ها اسپری شد و به مدت ۲۴ ساعت جهت انجام آزمایش کاساگرانده در محفظه‌های عایق نگهداری شدند. آزمایش حد روانی و خمیری بر روی نمونه‌های حاکی با درصد‌های متفاوت نانو کائولینیت انجام شد و نتایجی مطابق شکل ۸ به دست آمد.

با توجه به شکل ۸، با افزایش میزان نانوذرات کائولینیت در ترکیب خاک، حدود روانی و خمیری خاک افزایش می‌یابد؛ که به خاطر نسبت بالای سطح به حجم نانو کائولینیت و واکنش‌پذیری بالای آن با آب و نیز به دلیل وجود نانو منافذها

– **نانو کائولینیت:** نانو کائولینیت مورد استفاده در این مطالعه توسط روش آسیاب گلوله‌ای (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 (شکل ۳). پودر کائولینیت اولیه از کارخانه کاشی تبریز تهیه شد که به خاطر فرآوری، درجه خلوص خیلی بالا (تقریباً ۹۹٪) داشت. نتایج آزمایش‌های XRF و XRD بر روی پودر کائولینیت اولیه و نانوذرات حاصل از آن نشان دادند که هیچ تغییری در ترکیب شیمیایی پودر مادر در اثر فرایند خردایش اتفاق نمی‌افتد که این یکی از مزیت‌های کاربرد روش مکانیکی آسیاب گلوله‌ای جهت تولید نانوذرات است. شکل ۴ و جدول ۳ به ترتیب نتایج آزمایش XRF و XRD را بر روی نانو کائولینیت و جدول ۴ کمیت پارامترهای مؤثر در تولید نانوذرات را توسط دستگاه آسیاب گلوله‌ای نشان می‌دهند.



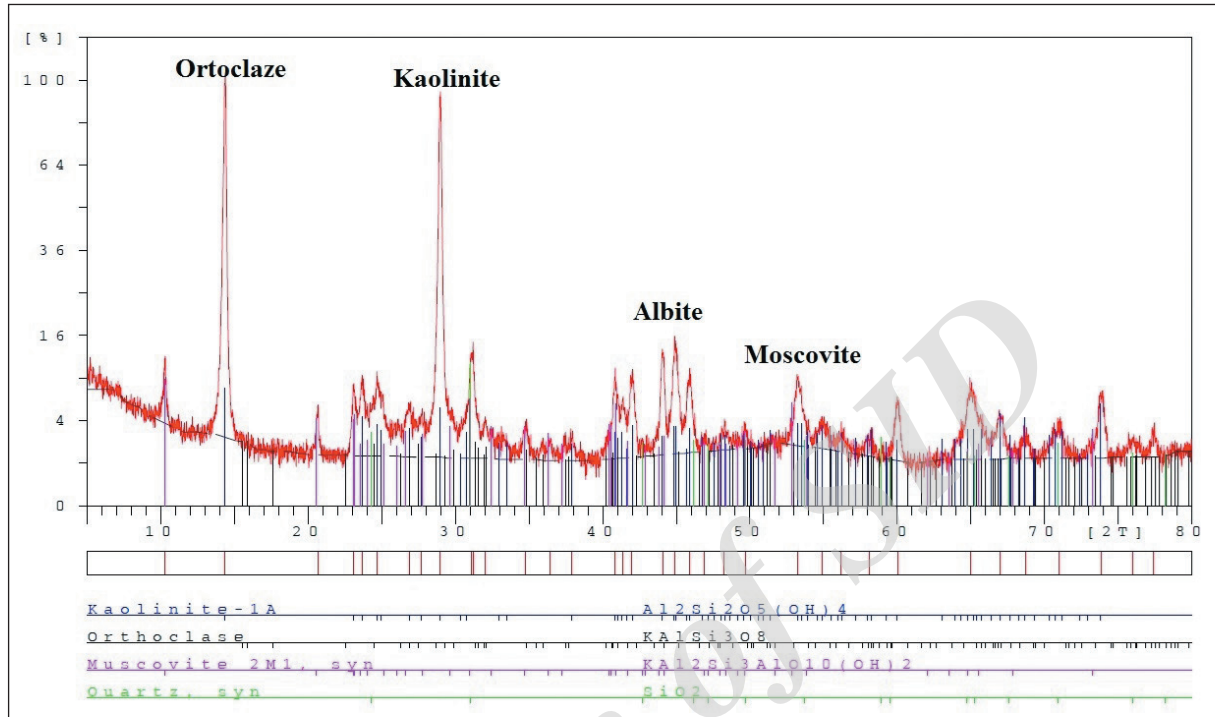
شکل ۳- تصویر FESEM نانو کائولینیت تهیه شده از روش آسیاب گلوله‌ای.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش XRF روی نانو کائولینیت.

ترکیب	درصد تشکیل دهنده
L.O.I	19.36
Mgo	0.343
Na <sub>2</sub> O	1.510
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.228
SiO <sub>2</sub>	40.158
CaO	1.054
K <sub>2</sub> O	2.361
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.802
Traces	F,Na,Ti,Mn,Ni

خاک رسی، شاخص خمیری کاهش می‌یابد که این نشانه مطلوبی برای مهندسی ژئوتکنیک جهت عملیات بهسازی خاک‌های سست پروژه‌های عمرانی است (Majeed and Taha, 2011).

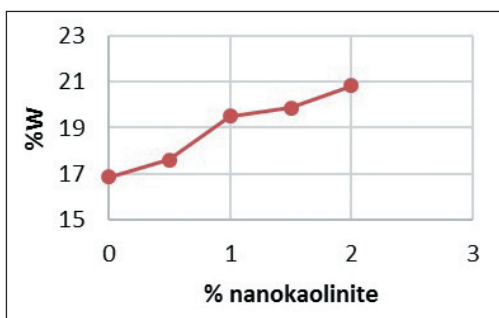
و جمع شدن آب در آنها و بنابراین افزایش ظرفیت آب موجود در خاک است. نتایج نشان دادند که آهنگ افزایش حد خمیری بیشتر از حد روانی است و بنابراین با توجه به رابطه  $PI=LL-PL$ ، با افزایش میزان نانوکائولینیت در ترکیب



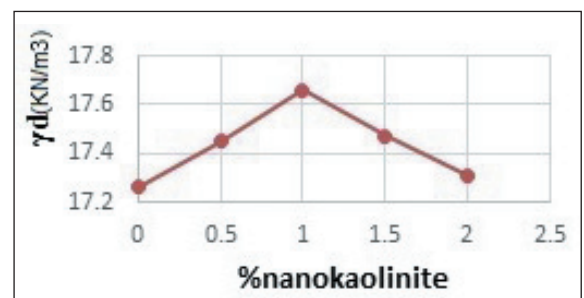
شکل ۴- نتایج حاصل از آزمایش XRD روی نانوکائولینیت.

جدول ۴- شرایط بهینه عملکرد دستگاه Planetary Ball Mill جهت تهیه پودر نانوکائولینیت.

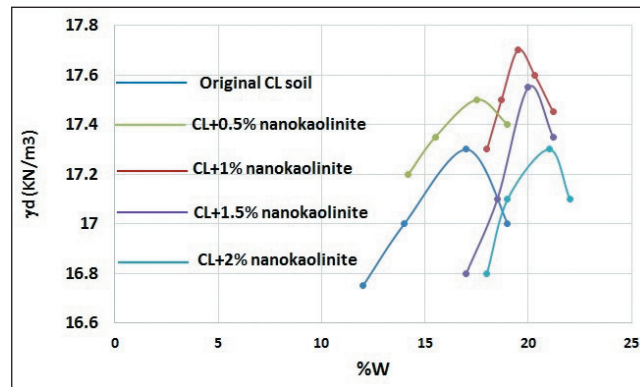
پارامتر	کمیت پارامتر
سرعت چرخش	۵۲۰ Rpm
مدت زمان آسیاب	۱۰ ساعت
اندازه گلوله‌ها	۱۰ عدد گلوله ۱۰ میکرومتری؛ ۱۰ عدد گلوله ۱۵ میکرومتری
جنس گلوله‌ها و کاپ	فولاد با سختی ۶۰ راکونسی



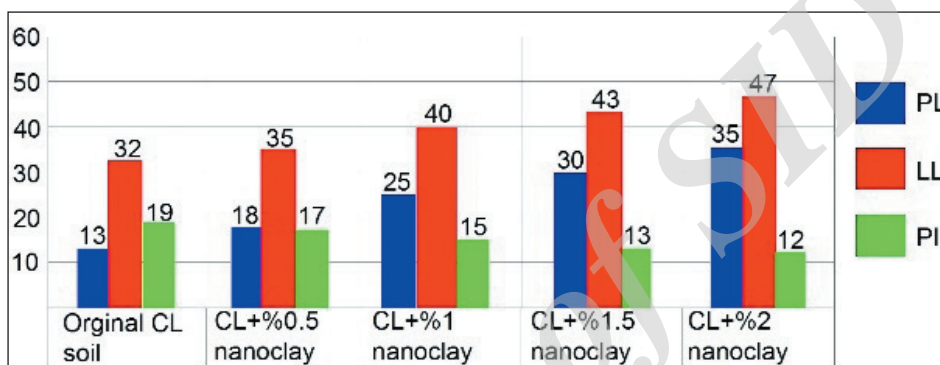
شکل ۶- تأثیر نانوکائولینیت بر رطوبت ایتیم خاک رسی.



شکل ۵- تأثیر نانوکائولینیت بر ماکزیمم چگالی خشک خاک رسی.



شکل ۷- نمودار زنگوله‌ای آزمایش تراکم خاک رسی ترکیب شده با درصد‌های مختلف نانو کائولینیت.

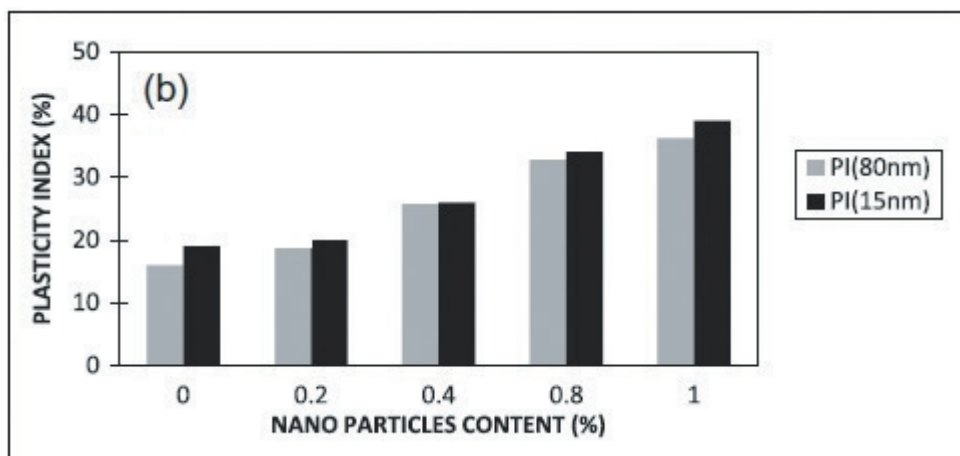


شکل ۸- تأثیر نانو کائولینیت بر حدود اتربرگ خاک رسی.

شود. سپس محلول به دست آمده به تمام حجم خاک اسپری می‌شود و به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه آسیاب گلوله‌ای مخلوط می‌شوند تا در پایان مخلوط همگن و عاری از کلوخه به دست آید. تهیه نمونه همگن مهم‌ترین و مؤثرترین بخش آزمایش است که میزان صحت نتایج به دست آمده از آزمایش بستگی بسیار زیادی به میزان همگن بودن نمونه دارد. نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌ای شکل استاندارد آزمایش تهیه شده و به منظور حفظ رطوبت در مدت زمان مورد نظر درون محفظه عایق قرار داده شده و آماده آزمایش می‌شوند.

Bahmani et al. (2014) نیز تحقیقی جهت بررسی تأثیر نانوذرات سیلیس با دو اندازه متفاوت (۱۵ نانومتر و ۸۰ نانومتر) بر روی حدود اتربرگ خاک رسی انجام دادند و به نتایج مشابه نتایج مقاله حاضر دست یافتند (شکل ۹).

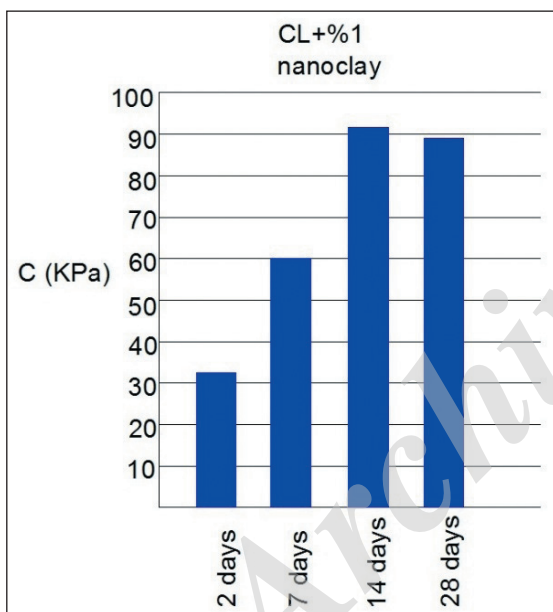
**۲-۴. انجام آزمایش برش مستقیم خاک بر اساس استاندارد ASTM D: 3080-90**  
برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا درصد وزنی مورد نظر نانو کائولینیت با مقدار آب متناظر با درصد رطوبت بهینه خاک مورد مطالعه درون بشر ریخته و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه التراسونیک قرار داده می‌شود تا نانو کائولینیت به‌طور همگن در آب حل



شکل ۹- تأثیر نانو سیلیس با دو اندازه متفاوت (۱۵ نانومتر و ۸۰ نانومتر) بر شاخص خمیری خاک رسی (Bahmani et al., 2014).

شکل ۱۰ تغییرات میزان چسبندگی را بر حسب درصد نانوکائولینیت برای نمونه‌های با حفظ رطوبت ۲ روز نشان می‌دهد که همان‌گونه که مشخص است، نمونه ۲ روزه با ۱ درصد نانوکائولینیت بیشترین چسبندگی را دارد و میزان ۱ درصد نانوکائولینیت به عنوان درصد افزودنی ایتیمم جهت انجام سایر آزمایش‌ها انتخاب شد. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزودن درصد‌های مختلف نانوکائولینیت تا مقدار ۱ درصد وزنی خاک خشک، میزان چسبندگی خاک افزایش و سپس چسبندگی نمونه‌های با حفظ رطوبت ۲ روزه کاهش می‌یابد؛ اما همواره خاک حاوی نانوکائولینیت چسبندگی بیشتری از خاک خالص دارد.

در شکل ۱۱ تأثیر زمان حفظ رطوبت بر روی تغییرات چسبندگی نمونه‌های خاکی حاوی ۱٪ نانوکائولینیت به ازای ۲، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز حفظ رطوبت مشاهده می‌شود. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت تا ۱۴ روز باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود و تعداد روزهای بیشتر از آن تغییر چندانی در میزان چسبندگی ایجاد نمی‌کند. این امر به علت افزایش تولید یون‌های هیدراته مولکول‌های آب با گذشت زمان است که با افزایش روزهای حفظ رطوبت تا ۱۴ روز، تقریباً تمام مولکول‌های آب موجود در ترکیب خاک هیدراته می‌شوند و بعد از آن یون  $H^+$  چنانی در سیستم آب و خاک ایجاد نمی‌شود تا تأثیر عمده‌ای روی چسبندگی خاک داشته باشد.

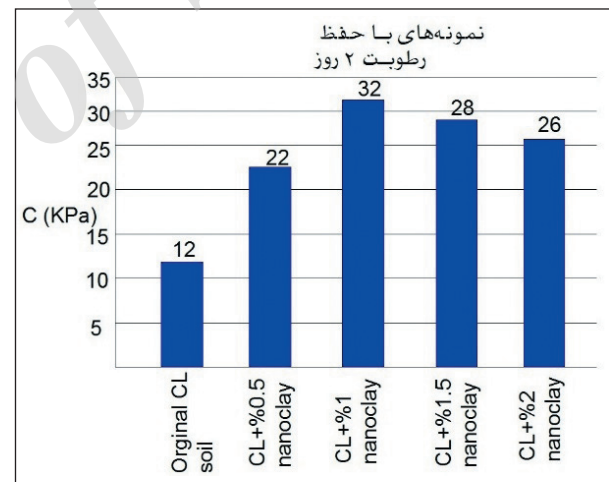


شکل ۱۱- تأثیر زمان حفظ رطوبت بر تغییرات چسبندگی نمونه‌های خاکی حاوی ۱٪ نانوکائولینیت.

عمودی در شکل شماره ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در تنش‌های عمودی برابر، خاک حاوی نانوذرات در مقایسه با خاک بدون افزودنی، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل یکسان از خود نشان می‌دهد. این امر به علت جایگزینی نانوذرات کانولینیت در میکرومنافذ خاک رسی است که با حضور در این منافذ علاوه بر افزایش چگالی نمونه، سبب ایجاد چسبندگی بیشتری بین دانه‌های خاک و افزایش سطح تماس دانه‌ها می‌شود. بالتبع ایجاد سطح برش در نمونه مذکور به نیروی برشی بیشتری نسبت به خاک رسی بدون افزودنی نیازمند است که سبب افزایش مقاومت برشی نمونه خاک حاوی نانوذرات کانولینیت می‌شود. به‌صورتی که در شکل ۱۳ نیز مشخص است؛ مقاومت برشی خاک رسی حاوی یک درصد نانوکائولینیت، افزایش حدود ۱۰۰٪ نسبت به خاک رسی بدون افزودنی نشان می‌دهد.

در ابتدا به منظور یافتن درصد بهینه اختلاط برای هر یک از درصد‌های وزنی نانوکائولینیت (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲٪ وزنی خاک خشک)، نمونه‌های با حفظ رطوبت ۲ روز ساخته شدند. پس از یافتن درصد بهینه افزودن نانوکائولینیت، به منظور بررسی تأثیر حفظ رطوبت، نمونه‌های با حفظ رطوبت ۷ روزه، ۱۴ روزه و ۲۸ روزه با میزان نانوکائولینیت بهینه تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

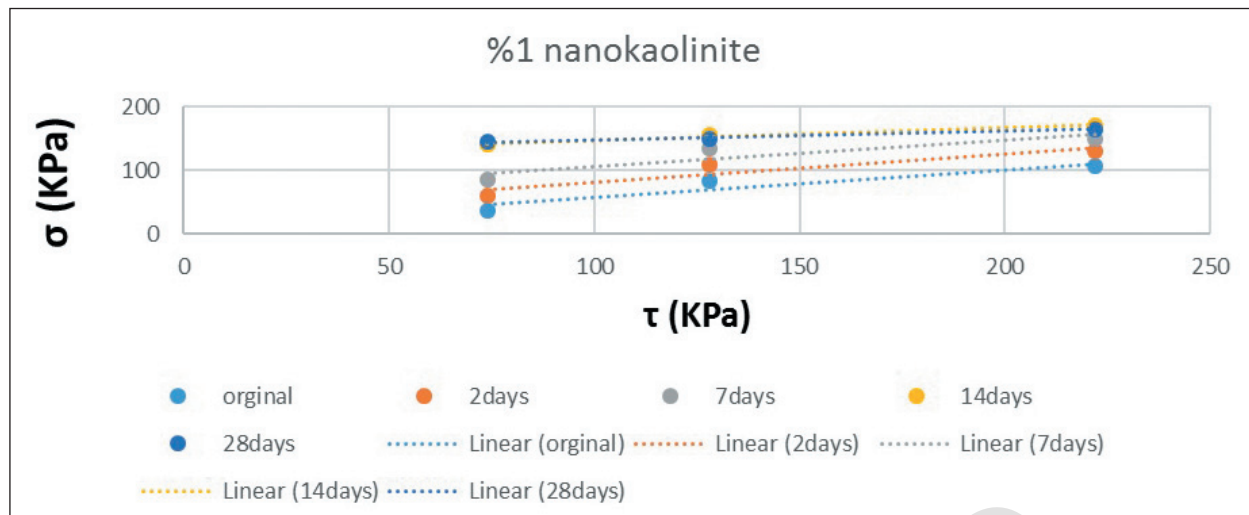
با توجه به اینکه در آزمایش تراکم برای مصالح خاکی و مخلوط نانوذرات و خاک با درصد‌های مختلف وزنی، وزن واحد حجم خشک مشخص شده است؛ در تهیه نمونه برای انجام آزمایش برش، مصالح آزمایشی با توجه به وزن واحد حجم اندازه‌گیری شده در آزمایش تراکم، آماده و در قالب برش جای داده شده است. برای این کار نخست حجم قالب محاسبه شد. سپس با توجه به این حجم و وزن واحد حجم، مقدار خاکی که باید در قالب جای داده شود؛ تعیین شد و در ادامه با توجه به درصد رطوبت بهینه، خاک در قالب متراکم می‌شود. نمونه آماده شده باید در قالب برش برابر با استاندارد جای داده شود. بعد از قرارگیری صحیح صفحات و نمونه در قالب برش، بر روی دستگاه مستقر شد و با تنظیمات مربوط به گیج‌ها و سرعت بارگذاری که ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه است؛ آزمایش‌ها انجام شده‌اند.



شکل ۱۰- تأثیر افزودن میزان نانوکائولینیت بر چسبندگی خاک به منظور یافتن درصد افزودنی ایتیمم.

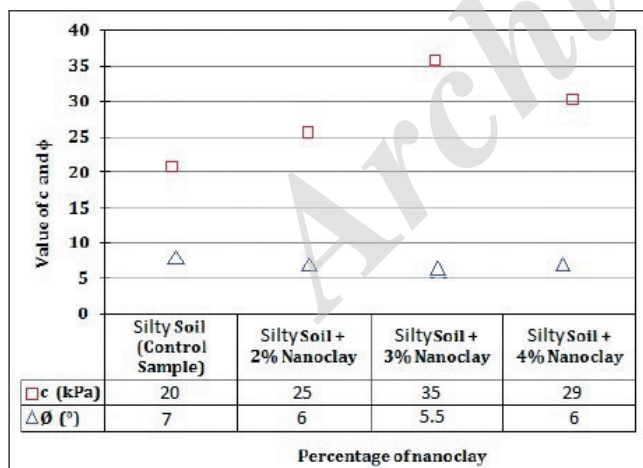
با توجه به اینکه آزمایش برش مستقیم با وزنه‌های ۲، ۴ و ۶ کیلوگرمی به ترتیب معادل ۷۴، ۱۲۸ و ۲۲۲ کیلوپاسکال انجام می‌شود؛ نتایج حاصل نشان داد که مقاومت برشی خاک تحت بارهای وارده مذکور با افزودن نانوکائولینیت به ترکیب خاک و همچنین افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت افزایش می‌یابد که به علت افزایش چسبندگی بین دانه‌های خاک است. لازم به ذکر است که طبق شکل ۱۲، میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک رسی با افزودن نانوکائولینیت دچار تغییرات قابل توجهی نمی‌شود.

جهت بررسی تغییر شکل‌های برشی و تغییر مقاومت برشی خاک رسی در صورت بهسازی با نانوذرات، نمودارهای تنش برشی- تغییر شکل برشی خاک رسی در دو حالت بدون افزودن نانوکائولینیت و حالت بهینه افزایش نانوکائولینیت (نمونه حاوی یک درصد نانوکائولینیت و حفظ رطوبت ۱۴ روزه) در گام‌های افزایش تنش



شکل ۱۲- افزایش مقاومت برشی خاک رسی با افزودن نانوکائولینیت و افزایش تعداد روزهای حفظ رطوبت.

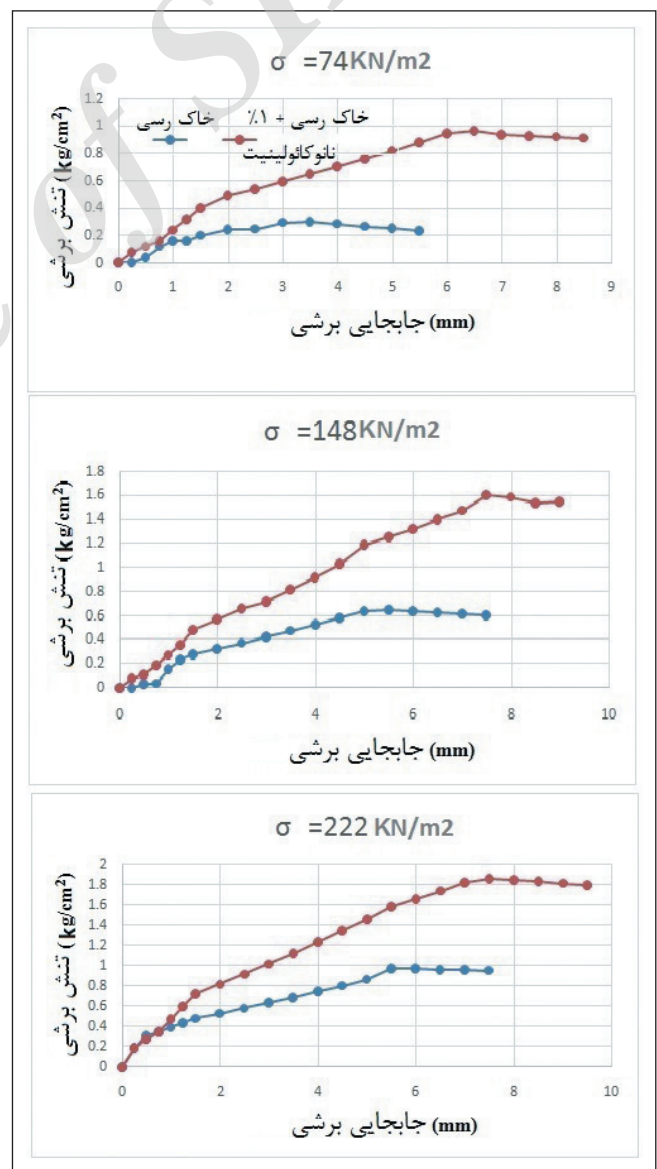
از نانوذرات رس جهت افزایش مقاومت برشی خاک سیلتی MH استفاده کردند. نتایج آزمایشات برش مستقیم آنها نشان داد که با افزودن نانوذرات رس تا حد سه درصد وزن خاک خشک سبب افزایش چسبندگی خاک می شود و افزایش بیش از حد بهینه سبب کاهش آن می شود. همچنین افزودن نانوذرات رس تغییر چندانی در میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک سیلتی ایجاد نمی کند (شکل ۱۴). نتایج به دست آمده مشابه نتایج حاصل از آزمایشات برش مستقیم مقاله حاضر است. تنها تفاوت مربوط به میزان افزایش چسبندگی خاک پایه و میزان بهینه افزودن نانوذرات است که آن نیز برگرفته از تفاوت جنس و ترکیب شیمیایی خاک های مورد مطالعه و همچنین نانوذرات استفاده شده است.



شکل ۱۴- نتایج آزمایشات مقاومت برشی روی خاک سیلتی بهسازی شده با درصد های متنوع نانوذرات (Khalid et al., 2015).

### ۳- نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر افزودن نانوکائولینیت 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 تا حد ۱٪ وزن خاک خشک به ترکیب خاک رسی، وزن واحد حجم خاک افزایش می یابد و بعد از ۱٪ شروع به کاهش می کند؛ ولی در هر حال وزن واحد حجم خاک



شکل ۱۳- مقایسه نمودارهای تنش برشی - تغییر شکل برشی نمونه خاک رسی در دو حالت بدون افزودنی و افزودن نانوکائولینیت تا حد یک درصد و در تنش های عمودی مختلف.

برشی (تا حد ۱۰۰٪) خاک می‌شود و افزایش بیش از این حد نانوکائولینیت، تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند.

در طول آزمایش برش مستقیم مشاهده شد که زمان حفظ رطوبت خاک رسی قبل از شروع آزمایش یکی از پارامترهای مهم جهت تأثیر در میزان مقاومت برشی خاک‌هاست و نتایج آزمایشات نشان دادند که نمونه‌های با حفظ رطوبت ۱۴ روز، بیشترین میزان چسبندگی و مقاومت برشی را نسبت به سایر نمونه‌ها دارند.

رسی ترکیب شده با نانوکائولینیت بیشتر از حالت بدون حضور نانوکائولینیت است. میزان رطوبت ایتیمم خاک رسی با افزایش درصد نانوکائولینیت افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های کاساگرانده نشان داد که با افزایش میزان نانوکائولینیت در ترکیب خاک حدود روانی و خمیری افزایش؛ ولی شاخص خمیری کاهش می‌یابد که امری مطلوب در مهندسی ژئوتکنیک جهت بهسازی خاک‌هاست. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان داد که افزودن نانوکائولینیت تا حد ۱٪ وزنی خاک خشک سبب افزایش چسبندگی دانه‌های خاک و بالتبع افزایش مقاومت

## References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005- Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier
- ASTM D 698-78- standard test method for compaction test in laboratory.
- ASTM D 3080-90- standard test method for direct shear test of soils.
- ASTM D 4318-87- standard test method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils.
- Bahmani, S. H., Haut, B., Asadi, A. and Farzadnia, N., 2014- Stabilization of residual soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and cement, *Construction and Building Materials Journal*, Vol. 64, pp. 350-359.
- Burton, C., 2009- Silica sol for rock grouting, Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity, *Tunneling and Underground Space Technology*, Pages 603- 607.
- Gallagher, P. M., Conlee, C. T. and Rollins, K. M., 2007- Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk, *ASCE\_1090-0241*, 133:2\_186
- Khalid, N., Arshad, M. M. Mukri, M., Mohamad, K. and Kamrudin, F., 2015- Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 20, pp. 731-738.
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V., 2007- *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. in measurement and modeling of soil behavior, ASCE.
- Lin, D. F., Lin, K. L., Hungc, M. J. and Luoa, H. L., 2007- Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil, *Jour. Of Hazardous Mater.* 145, p 58-64
- Majeed, Z. H. and Taha, M. R., 2011- Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a penang soil, *Journal of Asian Scientific Research*, pp 587-592.
- Patricia, M., Yuanzhi, L. and Gallagher, P., 2007- Meter Column Testing of Colloidal Silica Transport through Porous Medium, , *Innovations in Grouting and Soil Improvement (GSP 136)*, Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers, Austin, Texas, USA.
- Zhang, G., 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. and Ladd, C., 2004- Index properties of a highly weathered old alluvium, *Geotechnique* 54, No. 7, 441-451.



# Investigation on the genesis of the iron oxide- apatite $\pm$ REE deposits of the Bafgh-Saghand district (Central Iran), based on oxygen isotope studies

S. A. Majidi<sup>1\*</sup>, M. Lotfi<sup>2</sup>, M. H. Emami<sup>3</sup> and N. Nezafati<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Department of Geology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Received: 2015 May 05

Accepted: 2015 October 06

## Abstract

The metallogenic zone of Bafgh-Saghand in central Iran hosts huge low-titanium iron oxide-apatite (IOA) deposits (also called Kiruna type iron deposits) with more than 1500 Million tons grading 55% iron. The genesis of these deposits including Chadormalu, Choghart, She-Chahun, and Esfordi has long been a subject of debate. In this regard, several hypotheses such as magmatic, hydrothermal, carbonatitic, BIF, and sedimentary-exhalative have been proposed so far. In this study, 20 samples of the magnetite ore from the deposits of Chadormalu, Choghart, She-Chahun, and Esfordi were selected and analyzed for their oxygen isotope values. Based on the analyses results, the variations of  $\delta^{18}\text{O}$  values in the deposits are meaningful and result from the characteristics of the ore forming processes involved. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of the analyzed magnetite samples range from -0.1 to +2.2‰ and indicate the role of both orthomagmatic (>0.9‰) and hydrothermal (<0.9‰) processes in the formation of these deposits. On the other hand, the values lower than +0.3‰ can be attributed to secondary oxidation or hydrothermal processes and/or a combination of both. The oxygen isotope data of the investigated samples are identical to the deposits such as El Laco of Chile, Kiruna and Grängesberg of Sweden, and Zhibo and Changanuoer of China with a magmatic-hydrothermal genesis. According to the geological and analytical evidence obtained from the iron oxide-apatite deposits of the Bafgh-Saghand area, first a tonalite-trondhjemite-granodiorite, diorite, and granite magmatism related to a continental margin subduction at 533 to 525Ma has caused a magmatic mineralization of iron in the area, while a later hydrothermal process related to an alkaline intrusion (syenite and monzosyenite) has caused a hydrothermal mineralization. Therefore a magmatic-hydrothermal source can be suggested for the formation of the low-titanium iron oxide-apatite deposits of the Bafgh-Saghand area.

**Keywords:** Kiruna type deposit,  $^{18}\text{O}$  isotope, Rare Earth Elements, Magmatic-Hydrothermal, Bafgh-Saghand, Central Iran

For Persian Version see pages 237 to 244

\*Corresponding author: S. A. Majidi; E-mail: afshinmajidi@yahoo.com