

## بررسی تأثیر افزودن نانورس و آهک بر خواص مکانیکی و خودترمیمی خاک‌های ریزدانه

احمدرضا مظاهری\*؛

دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی(ره)، دانشکده فنی و مهندسی

علی نورزاد؛

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست

پذیرش ۹۶/۰۲/۰۳

تاریخ: دریافت ۹۵/۱۰/۱۷

### چکیده

استفاده از افزودنی‌ها در تثبیت خاک همواره مورد توجه محققان بوده است. در این مقاله تأثیر نانورس به‌عنوان یک افزودنی جدید، در کنار آهک که یکی از افزودنی‌های قدیمی در تثبیت خاک به‌شمار می‌رود، بر رفتار خاک بررسی شده است. درصد‌های مختلف نانورس و آهک بر خاک رسی افزوده می‌شود و تأثیر آن بر درصد رطوبت بهینه، بیشینه دانسیته خشک، مقاومت تک‌محوری، حدود اتربرگ و خاصیت خود ترمیمی خاک‌ها بررسی می‌شود. پژوهش‌های انجام شده حاکی از آن است که اضافه کردن آهک باعث کاهش دانسیته خشک خاک می‌شود این در حالی است که افزودن نانورس سبب افزایش این پارامتر در خاک‌های رسی می‌شود. افزودن آهک تأثیر زیادی بر افزایش چسبندگی دارد و بر افزایش زاویه اصطکاک تأثیر چشم‌گیری ندارد این درحالی است که نانو مواد علاوه بر اینکه چسبندگی را افزایش می‌دهد، سبب افزایش زاویه اصطکاک خاک نیز می‌شود. نکته مهم و قابل تمرکز در این کار تأثیر چشم‌گیر نانو مواد بر خاصیت خود ترمیمی خاک رس است. با افزودن ۲ درصد نانورس به خاک با گذشت ۲۴ ساعت از ایجاد صفحه گسیختگی در خاک، مصالح قادر هستند حدود ۸۰ درصد مقاومت اولیه خود (زمانی که هیچ افزودنی ندارد) را به‌دست آورند.

واژه‌های کلیدی: نانو رس، خود ترمیمی، آهک، مقاومت تک‌محوری

### مقدمه

استفاده از افزودنی‌های مختلف به منظور بهبود خواص خاک‌ها از سالیان گذشته به‌وسیله محققان مختلف بررسی شده است. از جمله این افزودنی‌ها می‌توان استفاده از آهک و سیمان و خاکستر بادی و الیاف را در ترکیب با خاک نام برد [۱]-[۷].

آهک از قدیمی‌ترین افزودنی‌هایی است که از آن در خاک استفاده می‌شود [۸]. آهک تأثیر مثبتی بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها دارد و باعث تغییر بعضی از خواص خاک می‌شود. افزودن آهک باعث کاهش دامنه خمیری خاک، افزایش کارایی، مقاومت و حد انقباض خاک می‌شود [۹]، [۱۰]. تحقیقات گسترده در زمینه پایداری خاک رس با استفاده از آهک [۱۱]-[۱۴] نشان می‌دهد که درصد بهینه استفاده از آهک در اصلاح رفتار خاک بین ۱ تا ۳ درصد وزنی خاک است. ولی تعدادی از محققان تا ۸ درصد وزنی آهک را مؤثر تثبیت خاک می‌دانند [۱۵].

با حضور آهک در خاک رس واکنش‌های متعددی رخ می‌دهد که این واکنش‌ها می‌توانند در جهت بهبود خواص خاک باشند. واکنش‌هایی مانند تبادل کاتیونی<sup>۱</sup> مجتمع شدن<sup>۲</sup>، کربناسیون<sup>۳</sup> و واکنش‌های پوزولانی. تبادل کاتیونی بین کاتیون‌های سطح ذرات رس و کاتیون‌های کلسیم موجود در آهک رخ می‌دهد. تبادل کاتیونی سبب نزدیک شدن ذرات رس به یک‌دیگر و ایجاد ساختار مجتمع در خاک رس می‌شود و این تغییرات باعث اصلاح خواص مهندسی خاک رس می‌شود [۱۴].

در سال‌های اخیر استفاده به نانو ذرات در تحقیقات مهندسان عمران توجه شده است [۱۶]-[۱۸]. در تحقیقات انجام شده، نشان داده شده است که استفاده از نانو مواد هیدراتاسیون سیمان را به دلیل انرژی سطحی بالا افزایش می‌دهد. همچنین باعث بهبود دانسیته به دلیل پر شدن بین ذرات می‌شود [۱۸]، [۱۹]. تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانورس مونت موریلونیت<sup>۴</sup> سبب مهار تورم در خاک‌ها و همچنین کاهش پتانسیل خرابی در خاک‌ها می‌شود

- 
1. action exchange
  2. flocculation
  3. carbonation
  4. montmorillonite

[۲۰]. تعدادی از محققان استفاده از نانو ذرات را سبب کاهش هدایت هیدرولیکی در خاک بیان کردند [۲۱]، [۲۲].

در همه تحقیقاتی که در زمینه استفاده از نانو ذرات در مهندسی ژئوتکنیک انجام شده است استفاده از این افزودنی بر خصوصیات کلی و پارامترهای مقاومتی از قبیل تأثیر بر رطوبت بهینه و تورم خاک‌ها بحث شده است ولی در این مقاله سعی بر آن است تا علاوه بر بررسی تأثیر نانورس مونت موریلونیت بر خصوصیات از قبیل حدود اتربرگ، بیشینه وزن مخصوص خاک و مقاومت تک‌محوری به بررسی تأثیر نانورس بر خاصیت خود ترمیمی خاک، که می‌تواند در سازه‌های خاکی مستعد فرسایش داخلی بسیار با اهمیت و کاربردی باشد، نیز پرداخته شود و نتایج حاصل از با تأثیر افزودنی قدیمی آهک مقایسه شود. بدین‌منظور آهک در درصدهای ۲ و ۴ و نانورس در درصدهای ۰٫۵، ۱ و ۲ به خاک رس افزوده شده است و تأثیر آنها بر پارامترهایی نظیر رطوبت بهینه، حدود اتربرگ، مقاومت تک‌محوری و خاصیت خودترمیمی خاک ارزیابی شده است. خاصیت خودترمیمی خاک رس از خصوصیات مهمی است که در صورت ایجاد فرسایش داخلی در رس‌ها می‌توانند در ترمیم قسمت‌های آسیب دیده بسیار کارآمد و مهم باشد.

## مواد و روش آزمایش

### مواد آزمایش

در این مقاله تلاش می‌شود تا تأثیر هم‌زمان آهک و نانورس مونت موریلونیت بر مقاومت خاک‌ها و نیز خاصیت خود ترمیمی خاک‌ها، از جمله خاک‌های رسی که در هسته سدهای خاکی استفاده می‌شوند، ارزیابی شود. بدین‌منظور نمونه خاک رسی (CL) که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است استفاده شده است. چنان‌که مشخص است خاک استفاده شده این آزمایش ۵۴ درصد آن کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر است بنابراین در گروه خاک‌های رسی طبقه‌بندی می‌شود که دارای رطوبت طبیعی ۷ درصد است.

## جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایش شده

مقادیر	مشخصات
% ۵۴	درصد عبور از الک نمبر ۲۰۰
% ۲۲	درصد ذرات ریزتر از ۲ میکرومتر
% ۴۵	حد روانی (LL)
% ۲۵	حد خمیری (PL)
% ۲۰	نشانه خمیری (PI)
% ۷	رطوبت طبیعی
$۱۶۷ \left( \frac{kN}{m^3} \right)$	وزن مخصوص
$۱۵ \frac{kN}{m^2}$	چسبندگی
$۱۸^\circ$	زاویه اصطکاک
۲/۶۱	چگالی ویژه

نانورس‌ها، نانو ذرات سیلیکاتی هستند که به صورت صفحه‌ای است و حداقل یک بعد آن در حدود ۱ تا ۱۰۰ nm است. نانورس‌ها دارای سطح ویژه‌ای بزرگی در حدود ۷۵۰ متر مربع بر گرم دارند. این سطح ویژه بزرگ باعث می‌شود، همواره اندرکنش شدیدی بین نانورس و محیط اطرافش وجود داشته باشد [۲۶]. خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی، دو خصوصیت مهم برای نانورس‌ها به‌شمار می‌رود. از جمله این نانورس‌ها می‌توان به نانورس مونت موریلونیت اشاره کرد. در این تحقیق از نانورس مونت موریلونیت (که رایج‌ترین نوع نانورس برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها است) استفاده شده است. این ماده مطابق برگه اطلاعات شرکت سیگما-الدريج ۱ کشور آمریکا، شامل  $K_2O$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  و Li در ساختار خود است که خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۲ و مشخصات فیزیکی نانورس در جدول ۳ آورده شده است. این ذرات دارای ضخامتی بین ۵ تا ۱۵ نانو متر، ظرفیت تبادل یونی (CEC)  $\left( \frac{meq}{100g} \right)^2$  ۴۸ و رطوبت ۱-۲ درصد است (جدول ۳).

1. Sigma-aldrich
2. Cation Exchange Capacity

جدول ۲. تجزیه شیمیایی نانورس مونت موریلونیت

مواد	%
Na <sub>2</sub> O	۰/۹۸
MgO	۳/۲۹
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۹/۶
SiO <sub>2</sub>	۵۰/۵۹
KO <sub>2</sub>	۰/۸۶
CaO	۱/۹۷
TiO <sub>2</sub>	۰/۶۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۶۲
Li	۱۵/۴۵

جدول ۳. مشخصات نانورس مونت موریلونیت

پارامترها	مقدار
دانسیتته ذرات (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۳۵
سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	۷۵۰
اندازه ذرات (μm)	۱۵-۵
رنگ	سفید

آهک مصرفی در این تحقیق هیدراته خالص حاوی ۸۶ درصد اکسید کلسیم<sup>۱</sup>، حدود ۸ درصد اکسید سیلیسیم<sup>۲</sup> و کم‌تر از ۲ درصد اکسید منیزیم است<sup>۳</sup> که چگالی ویژه آن ۳/۱۸ است.

### روش آزمایش

در این تحقیق به منظور تعیین رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه از آزمایش پروکتور استاندارد<sup>۴</sup> استفاده شده است [۲۳]. در این آزمایش درصدهای افزودنی به صورت خشک با خاک مخلوط می‌شود و سپس درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه خاک با درصدهای مختلف افزودنی نانورس و آهک تعیین می‌شود. درصد رطوبت بهینه خاک بدون هیچ‌گونه افزودنی برابر ۱۹/۵ درصد و وزن مخصوص خشک بیشینه به میزان ۱۷/۷ کیلونیوتن بر مترمکعب است. حدود اتربرگ خاک بر اساس استاندارد<sup>۵</sup> تعیین شده است

<sup>1</sup> Cao

<sup>2</sup> SiO<sub>2</sub>

<sup>3</sup> mgo

<sup>4</sup> ASTM D698

<sup>5</sup> ASTM D4318

[۲۴]. که حد روانی خاک بدون هیچ‌گونه افزودنی برابر با ۴۵ درصد و حد خمیری برابر ۲۵ درصد به دست آمده است. برای خاک با درصد‌های مختلف افزودنی حدود اتریرگ اندازه‌گیری و گزارش آن در قسمت نتایج آورده شده است

تعیین مقاومت تک‌محوری خاک‌ها با استفاده از استاندارد<sup>۱</sup> موجود انجام شده است [۲۵]. در این آزمایش نمونه‌ها به صورت خشک با یک‌دیگر مخلوط می‌شوند، سپس رطوبت بهینه به خاک مورد نظر اضافه شد و پس از مخلوط شدن و به دست آمدن نمونه‌ای یک‌نواخت، خاک وزن شده مورد نیاز برای رسیدن به وزن مخصوص بیشینه در قالب سیلندری استیل به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر ریخته و کوبیده می‌شود. نمونه‌های آماده شده بلافاصله از قالب خارج می‌گردند و وزن و ابعاد آنها به دقت اندازه‌گیری می‌شود سپس نمونه‌ها، برای جلوگیری از کاهش رطوبت، در محفظه‌ای پلاستیکی قرار داده می‌شوند و در دمای ۲۰ درجه و رطوبت ۹۰ درصد اتاقک رطوبت<sup>۲</sup> نگه‌داری می‌شوند. آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق در حضور درصد‌های مختلف افزودنی انجام گرفته است که در جدول ۴ درصد این افزودنی‌ها که در هر آزمایش به خاک اضافه شده، نشان داده شده است. در هر قسمت برای تعیین تأثیر آهک و نانورس بر خصوصیات خاک رسی مورد نظر آزمایش‌های شرح داده شده در این جدول به انجام رسیده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

در راستای اهداف تعیین شده در این تحقیق خاک رس مورد نظر با آهک و نانورس مانند آنچه در جدول ۴ آورده شده است مخلوط می‌شود و تأثیر این افزودنی‌ها بر پارامترهای مختلف مقاومتی خاک و از جمله خاصیت خودترمیمی خاک ارزیابی می‌شود. درصد آهک بر مبنای درصد‌های بهینه که در تحقیقات گذشته در مورد تثبیت خاکها بیان شده است، تا حداکثر ۴ درصد انتخاب شده است. برای افزودن درصد نانورس به خاک استاندارد مشخصی وجود ندارد ولی با توجه به قیمت زیاد این محصول درصد‌های ۰/۵، ۱ و ۲ درصد برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است.

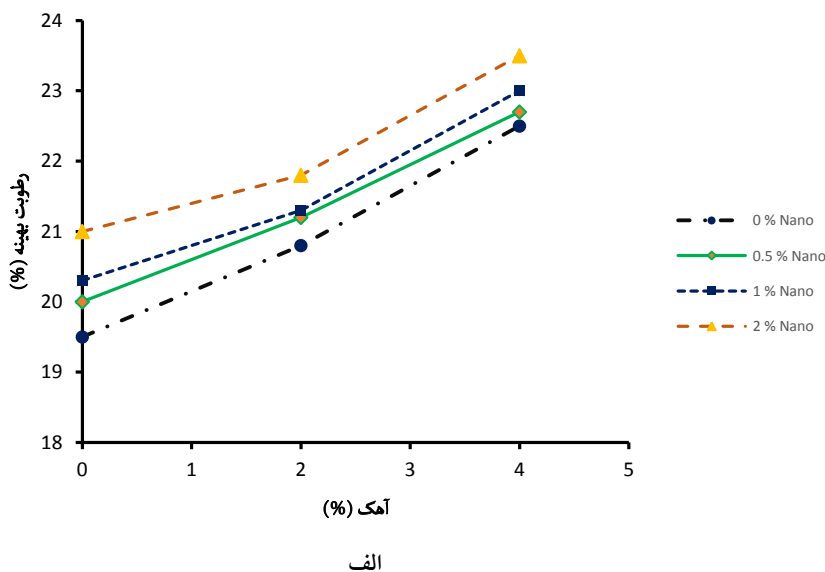
1. ASTM D5102-09  
2. Curing room

جدول ۴. آزمایش‌های انجام شده روی خاک رس با درصد‌های مختلف افزودنی در هر قسمت

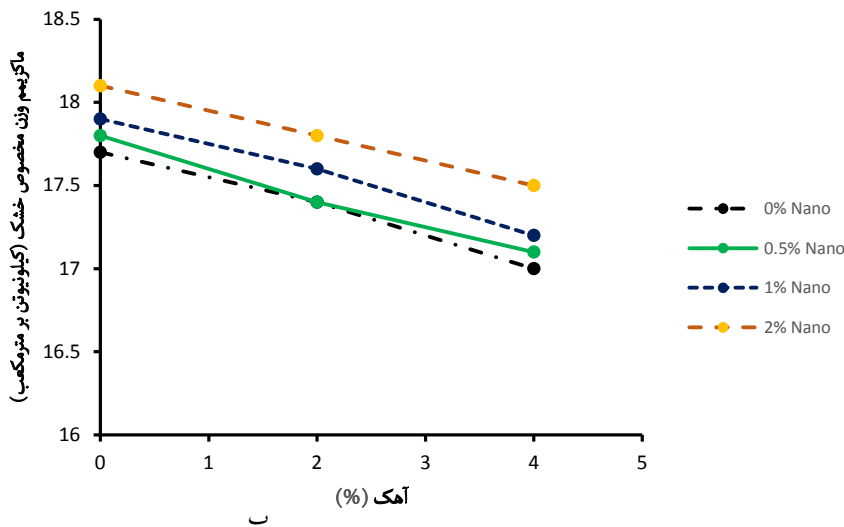
شماره آزمایش	درصد افزودنی در آزمایش	شماره آزمایش	درصد افزودنی در آزمایش
آزمایش ۱	بدون آهک و بدون نانورس	آزمایش ۷	بدون آهک و ۱ درصد نانورس
آزمایش ۲	۲ درصد آهک و بدون نانو	آزمایش ۸	۲ درصد آهک و ۱ درصد نانورس
آزمایش ۳	۴ درصد آهک و بدون نانو	آزمایش ۹	۴ درصد آهک و ۱ درصد نانورس
آزمایش ۴	بدون آهک و ۰/۵ درصد نانورس	آزمایش ۱۰	بدون آهک و ۲ درصد نانورس
آزمایش ۵	۲ درصد آهک و ۰/۵ درصد نانورس	آزمایش ۱۱	۲ درصد آهک و ۲ درصد نانورس
آزمایش ۶	۴ درصد آهک و ۰/۵ درصد نانورس	آزمایش ۱۲	۴ درصد آهک و ۲ درصد نانورس

### تأثیر آهک و نانورس بر رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه

طی آزمایش پروکتور استاندارد مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای همه نمونه‌هایی که در جدول ۴ بیان شد، تعیین شد. در همه این نمونه‌ها تأثیر درصد‌های مختلف افزودنی بر بیشینه وزن مخصوص خشک خاک<sup>۱</sup> و رطوبت بهینه<sup>۲</sup> خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.



1. Maximum dry density
2. Optimum moisture content



شکل ۱. الف) تأثیر نانو مواد و آهک بر درصد رطوبت بهینه، ب) تأثیر نانو مواد و آهک بر وزن مخصوص خشک بیشینه

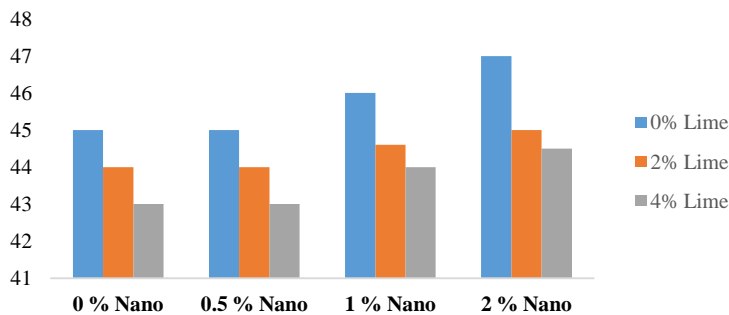
چنان‌که در شکل ۱ مشخص است افزایش درصد آهک و نانورس باعث افزایش درصد رطوبت بهینه خاک می‌شود. نمونه بدون هیچ‌گونه افزودنی درصد رطوبت بهینه‌ای برابر ۱۹/۵ درصد دارد که این مقدار زمانی که نمونه حاوی ۲ درصد نانو مواد و ۴ درصد آهک است به ۲۳/۵ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی حضور آهک باعث کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه خاک می‌شود درحالی‌که اضافه کردن نانورس باعث افزایش این مقدار می‌شود. در نمونه با ۲ درصد آهک و بدون نانورس وزن مخصوص خشک بیشینه برابر ۱۷/۴ کیلوگرم بر متر مکعب است ولی در نمونه با ۲ درصد نانورس و بدون حضور آهک این مقدار به ۱۸/۱ کیلوگرم بر متر مکعب افزایش می‌یابد. به دلیل ریز بودن ذرات نانورس این ذرات می‌توانند به خوبی خلل و فرج بین دانه‌ها را پر کرده و سبب افزایش وزن مخصوص خاک شوند.

### تأثیر آهک و نانورس بر حدود اتربرگ

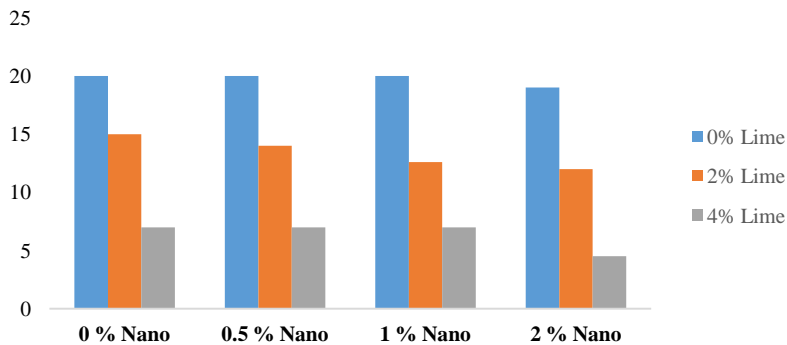
در ادامه آزمایش‌ها تأثیر افزودنی‌ها بر حدود اتربرگ نیز بررسی شده است. تأثیر نانو مواد و آهک بر حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و نشانه خمیری (PI) خاک در شکل ۲ نشان داده شده است.



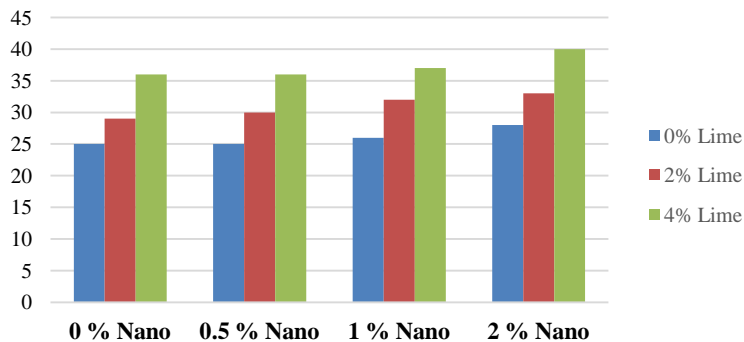
## حد روانی



## نشانه خمیری



## حد خمیری

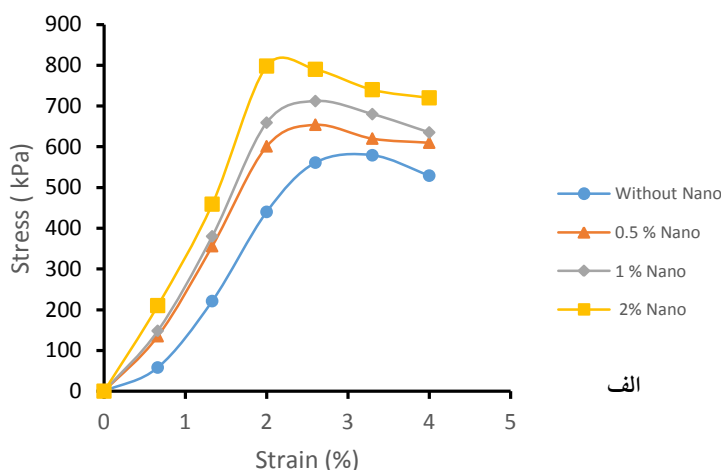


شکل ۲. تأثیر آهک و نانورس بر حد روانی (LL) و نشانه خمیری (PI) و حد خمیری (PL) خاک‌ها

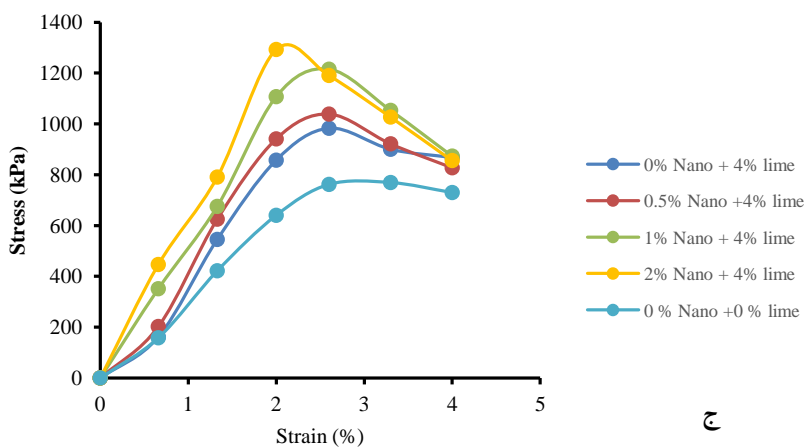
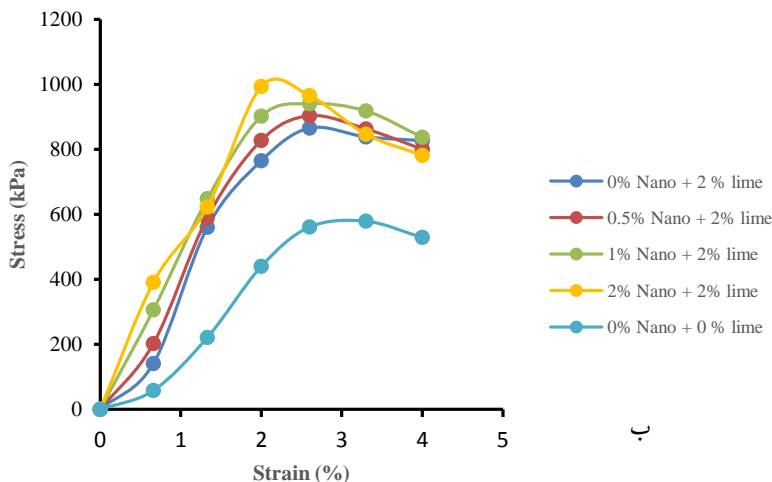
چنان‌که در شکل ۲ مشخص است افزایش آهک باعث کاهش حد روانی (LL) و افزایش حد خمیری (PL) خاک می‌شود. به عبارت دیگر افزودن آهک به نشانه خمیری خاک را کاهش می‌دهد. ولی افزودن نانورس به خاک سبب افزایش حد روانی و حد خمیری خاک‌ها می‌شود. بنابراین نمی‌توان به وضوح تأثیر نانورس بر نشانه خمیری خاک‌ها را بیان کرد. نکته قابل ذکر در این خصوص می‌توان به تأثیر ناچیز نانو ذرات به حدود اتربرگ خاک رسی اشاره کرد.

### تأثیر نانورس و آهک بر مقاومت تک‌محوری خاک‌ها

در این قسمت تأثیر نانورس و آهک بر مقاومت تک‌محوری ۷ روزه خاک‌ها بررسی شده است. برای تهیه نمونه‌ها مراحل زیر انجام شده است ابتدا با مشخص بودن حجم نمونه‌گیر و وزن مخصوصی که باید نمونه‌ها در آن وزن مخصوص تهیه شود حجم وزن خاک به دست آورده می‌شود سپس خاک توزین شده با استفاده از کوبه مخصوص و به صورت یک‌نواخت درون نمونه‌گیر کوبیده می‌شود. به منظور خارج شدن آسانتر نمونه‌ها، جداره داخلی نمونه‌گیر با استفاده از روغن به صورتی اندک چرب می‌شود. نتایج مقاومت تک‌محوره نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانورس و آهک در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف



شکل ۳. مقاومت تک‌محوری خاک همراه با درصد‌های مختلف افزودنی آهک و نانورس (الف) نمونه‌ها بدون افزودنی آهک با ۲ درصد (ب) نمونه‌ها با ۲ درصد آهک (ج) نمونه‌ها با ۴ درصد آهک

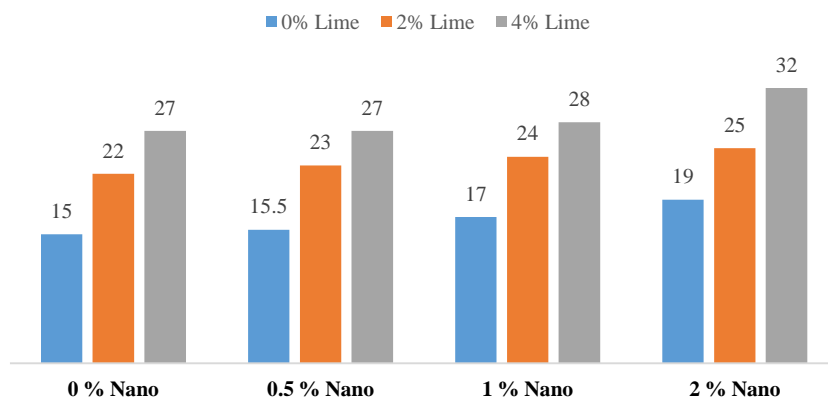
چنان‌که در شکل ۳ ب و ۳ ج مشخص است افزودن آهک بدون حضور نانورس به تنهایی مقاومت خاک را افزایش می‌دهد. این افزایش زمانی که ۲ درصد آهک اضافه می‌کنیم به حدود ۳۹ درصد می‌رسد. اضافه کردن نانورس نیز باعث افزایش مقاومت می‌شود

به طوری که با افزایش ۲ درصد نانورس بدون حضور آهک مقاومت حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. پس می‌توان بیان کرد تأثیر آهک و نانورس بر افزایش مقاومت تک‌محوره تقریباً یکسان است. یعنی با افزودن ۲ درصد آهک و یا نانورس مقاومت در حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. زمانی که از هر دو افزودنی آهک و نانورس به صورت هم‌زمان و از هر کدام به میزان ۲ درصد استفاده شود افزایش مقاومت چشم‌گیری در حدود ۷۷ درصد رخ می‌دهد. این موضوع نشان‌دهنده کارایی مختلف آهک و نانورس در افزایش مقاومت است به صورتی که آهک با ایجاد واکنش‌های شیمیایی باعث افزایش مقاومت می‌شود در حالی که افزودنی نانورس با خاصیت پرکنندگی و بالا بردن تراکم نمونه‌ها می‌تواند باعث افزایش مقاومت شود.

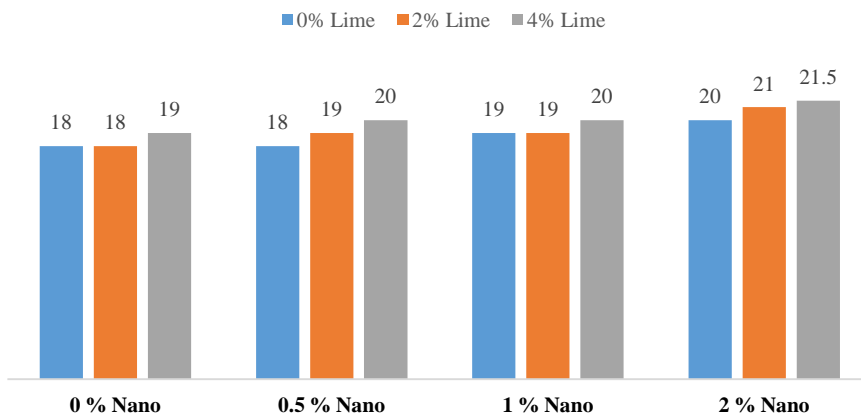
### تأثیر آهک و نانورس بر زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک

در ادامه آزمایش‌های صورت گرفته تأثیر افزودنی‌های نانورس و آهک بر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک رسی بررسی شده است. برای این منظور از آزمایش برش مستقیم کوچک استفاده شده است که نتایج این بررسی‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

چسبندگی (کیلوپاسکال)



## زاویه اصطکاک



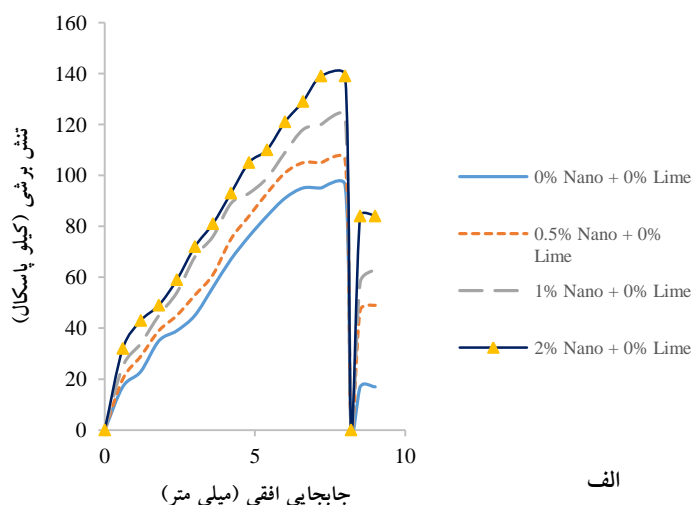
## شکل ۴. تأثیر نانورس و آهک بر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک

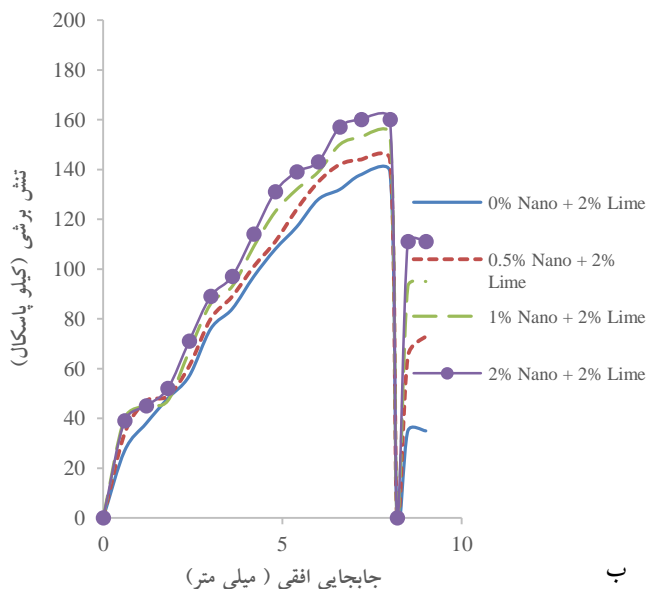
چنان‌که در شکل ۴ مشخص است افزودن ۲ درصد نانورس بدون حضور آهک چسبندگی خاک را از ۱۵ به ۱۹ کیلو پاسکال می‌رساند و زاویه اصطکاک را از ۱۸ درجه به ۲۰ درجه افزایش می‌دهد. این افزایش را می‌توان به ریز بودن ذرات نانورس نسبت داد که با قرار گرفتن در بین ذرات درشت‌تر علاوه بر افزایش چسبندگی زاویه اصطکاک را نیز افزایش می‌دهد. افزودن آهک بدون حضور نانورس باعث افزایش چسبندگی از ۱۵ کیلو پاسکال به ۲۲ کیلو پاسکال با افزودن ۲ درصد و ۲۷ کیلو پاسکال با افزودن ۴ درصد آهک می‌شود اما افزودن آهک بدون حضور نانورس تأثیری بر زاویه اصطکاک خاک ندارد و این موضوع در شکل ۴ به وضوح مشخص است. بنابراین می‌توان گفت درصد بهینه افزودنی به خاک ۲ درصد آهک در حضور یک درصد نانورس است این ترکیب افزودنی هم باعث افزایش زاویه اصطکاک و هم باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود.

## بررسی تأثیر آهک و نانورس بر خاصیت خود ترمیمی خاک

یکی از مشکلاتی اساسی که سازه‌های خاکی با آن روبه‌رو هستند آب‌شستگی و فرسایش داخلی است که در بین ذرات آن رخ می‌دهد. این پدیده ممکن است به باعث آسیب به سازه

خاکی شود. یکی از عواملی که ممکن است باعث بهبود شرایط خاک و ترمیم لایه‌های آسیب دیده شود خاصیت خودترمیمی ذاتی است که درون خاک‌های رسی وجود دارد. این خاصیت ذاتی ممکن است با اضافه کردن مواد افزودنی به خاک تغییر کند. در این قسمت تأثیر نانورس و آهک بر خاصیت خود ترمیمی خاک‌ها بررسی شده است و نتایج این بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. این آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم خاک انجام گرفته است. روال آزمایش بدین صورت است که ابتدا نمونه آزمایش در قالب دستگاه برش ساخته می‌شود. سپس نمونه غرق آب می‌شود و به مدت ۲۴ ساعت در این حالت رها می‌شود تا اشباع شود. بعد از ۲۴ ساعت آزمایش برش آغاز می‌شود و تا جایی که صفحه گسیختگی کاملاً تشکیل شود و نمونه به گسیختگی برسد ادامه می‌یابد. پس از ایجاد صفحه گسیختگی، نمونه به همین حالت رها می‌شود تا تأثیر افزودنی‌های موجود بر نمونه بر خاصیت خودترمیمی خاک گسیخته شده محک زده شود. پس از ۲۴ ساعت دوباره حرکت دستگاه برش آغاز می‌شود و مقاومت ایجاد شده در خاک ثبت می‌شود. در این آزمایش سرعت دستگاه برش برابر ۰/۰۱۸ میلی‌متر در دقیقه انتخاب شده و همه نمونه‌ها در رطوبتی نزدیک به رطوبت بهینه ساخته شده‌اند. در شکل ۵ تأثیر درصدهای مختلف نانورس و آهک را بر ایجاد مقاومت دوباره خاک برش خورده نشان داده شده است.





شکل ۵. تأثیر درصد‌های آهک و نانورس بر خاصیت خود ترمیمی خاک‌ها. الف) تأثیر نانورس بر خاصیت خود ترمیم، ب) تأثیر آهک بر خاصیت خود ترمیمی

چنان‌که در شکل ۵ مشخص است آهک و نانورس بر افزایش تنش برشی اولیه تأثیرگذار هستند ولی تأثیر آهک بر افزایش تنش برشی اولیه بیش‌تر از نانورس است. مثلاً افزودن ۲ درصد آهک در نمونه بدون نانورس مقاومت برشی را از ۹۵ به ۱۳۹ کیلوپاسکال می‌رساند ولی برای نمونه بدون آهک با افزودن ۲ درصد نانورس مقاومت از ۹۵ به ۱۴۲ کیلوپاسکال میرسد. یعنی به‌ازای افزودن هر یک درصد آهک ۲۳ درصد مقاومت برشی افزایش می‌یابد این درحالی است که به‌ازای افزودن ۱ درصد نانورس ۱۶ درصد مقاومت برشی افزوده می‌شود.

اما در زمینه مقاومت برشی ثانویه یا مقاومتی که در نمونه بعد از گسیختگی اولیه و ترمیم شدگی در نمونه ایجاد می‌شود به‌وضوح می‌توان تأثیر وجود نانورس را مشاهده کرد. در شکل ۵ الف تأثیر نانورس بر خاصیت خودترمیمی خاک برای درصد‌های مختلف نانورس و در شکل ۵ ب تأثیر آهک بر خاصیت خودترمیمی و ایجاد مقاومت برشی ثانویه در حضور درصد‌های مختلف آهک آورده شده است. علاوه بر آن در نمونه‌های بدون افزودنی مقاومت

برشی ثانویه ای ایجاد می‌شود که این مقاومت به دلیل خاصیت خودترمیمی ذاتی رس است ولی در نمونه‌های با افزودنی نانورس مقاومت ثانویه چشم‌گیری در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. در نمونه‌ای با ۲ درصد نانورس بدون آهک با تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال تنش برشی ثانویه‌ای در حدود ۸۴ کیلوپاسکال ایجاد می‌شود این درحالی است که نمونه بدون هیچ‌گونه افزودنی مقاومت برشی برابر ۹۶ کیلو پاسکال دارد. یعنی با افزودن ۲ درصد نانورس به خاک، پس از ایجاد گسیختگی در نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه بیش‌تر از ۸۵ درصد مقاومت خود را دوباره به دست می‌آورد. این درحالی است که در بدون هیچ‌گونه افزودنی و بر مبنای خاصیت خودترمیمی ذاتی رس مقاومت ثانویه به حدود ۲۰ درصد مقاومت برشی اولیه است یعنی افزودن ۲ درصد نانورس خاصیت خودترمیمی خاک را در حدود ۴/۵ برابر افزایش می‌یابد.

آهک نیز می‌تواند سبب ایجاد خودترمیمی در نمونه‌ها شود ولی این افزایش مقاومت ثانویه در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانورس کم‌تر است. چنان‌که در شکل ۵ ب مشخص است در نمونه حاوی ۲ درصد آهک مقاومت برشی ثانویه ایجاد شده در نمونه حدود ۳۰ درصد مقاومت برشی اولیه نمونه بدون هیچ افزودنی است. بنابراین می‌توان بیان کرد آهک در مقایسه با نانو رسی تأثیر زیادی بر افزایش مقاومت مقاومت ثانویه ایجاد شده در خاک ناشی از خاصیت خودترمیمی ندارد.

### مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات دیگر محققان

در این تحقیق نتایج از افزودنی نانورس که به عنوان یک افزودنی جدید در خاک کاربرد یافته است و آهک که از افزودنی‌های سنتی در تثبیت خاک‌ها به‌شمار می‌رود استفاده شده است. نتایج بررسی‌های انجام گرفته در این تحقیق با نتایج تعدادی از محققانی که از آهک به‌عنوان یک تثبیت کننده استفاده کرده‌اند مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۵ آورده شده است

چنان‌که در جدول ۵ مشخص است افزودن آهک سبب افزایش مقاومت تک‌محوره شده است که این موضوع در تحقیق انجام شده است به‌وسیله Etim و همکاران در سال ۲۰۱۷ نیز انجام شده است. علاوه بر آن در تحقیق صورت گرفته این نتیجه به‌دست آمد که افزودن



آهک سبب کاهش وزن مخصوص بیشینه خشک خاک می‌شود. این موضوع با تحقیقات انجام شده Garzon و همکاران در سال ۲۰۱۶ هم‌خوانی مناسبی دارد.

### جدول ۵. مقایسه نتایج تأثیر دو درصد مختلف آهک بر پارامترهای خاک با نتایج تعدادی از محققان

Etim et al 2017[28]		Garzon et al 2016[27]		تحقیق حاضر		پارمترها
۴درصد آهک	۲درصد آهک	۴درصد آهک	۲درصد آهک	۴درصد آهک	۲درصد آهک	
٪۱۱۰ افزایش	٪۶۰ افزایش	-	-	٪۶۳ افزایش	٪۴۸ افزایش	مقاومت تک‌محوری
-	-	٪۴۷ افزایش	٪۳۴ افزایش	٪۴۱ افزایش	٪۱۶ افزایش	نشانه خمیری خاک
-	-	٪۶ کاهش	٪۲ کاهش	٪۸ کاهش	٪۴ کاهش	وزن مخصوص خشک بیشینه خاک

### نتیجه‌گیری

- استفاده از آهک و نانورس باعث بهبود پارامترهای مقاومتی خاک می‌شود. ولی از لحاظ اقتصادی آهک نسبت به نانورس مقرون به صرفه‌تر است. بنابراین زمانی که نیاز به افزودنی برای افزایش مقاومت تک‌محوری می‌شود استفاده از نانورس پیشنهاد نمی‌شود.
- زمانی که موضوع خود ترمیمی در مورد خاک‌های رسی مطرح می‌شود وجود نانورس به‌خوبی خودنمایی می‌کند و مقاومت پس از گسیختگی خاک‌ها را می‌تواند تا حدودی بهبود بخشد. زمانی که از ۲ درصد نانورس به‌عنوان افزودنی در خاک استفاده می‌شود ترمیم مقاومت خاک پس از شکست و بعد از گذشته ۲۴ ساعت می‌تواند تا بیش از ۸۰ درصد مقاومت نهایی خاک بدون افزودنی برسد. از این خاصیت می‌توان در ترمیم نقاطی که در معرض فرسایش و آب‌شستگی هستند بهره برد.
- در زمینه درصد بهینه نانورس با توجه به این‌که علم جدیدی در ژئوتکنیک است و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام نشده است هنوز درصد بهینه‌ای معرفی نشده است. از طرفی تحقیقات اولیه نشان می‌دهد افزایش درصد نانورس تأثیر مثبت بر خاصیت خودترمیمی دارد ولی این موضوع با توجه به گران بودن قیمت محصول استفاده آن در درصدهای جزئی توصیه می‌شود.

## منابع

1. Nguyen L. D., Fatahi B., Khabbaz H., "A constitutive model for cemented clays capturing cementation degradation", *International Journal of Plasticity*, Vol. 56 (2014) 1-18.
2. Dang L., Hasan H., Fatahi B., Khabbaz H., "Influence of bagasse ash and hydrated lime on strength and mechanical behaviour of stabilised expansive soil", *GEOQuébec 2015*, eds J. Côté & M. Allard, Québec City, Canada (2015) 1-8.
3. Dang L., Hasan H., Fatahi B., Jones R., Khabbaz H., "Enhancing the engineering properties of expansive soil using bagasse ash and hydrated lime", *International journal of GEOMATE*, Vol. 11, no. 25 (2016) 2447-54.
4. Sharma R., Phanikumar B., Rao B., "Engineering behavior of a remolded expansive clay blended with lime, calcium chloride, and rice-husk ash", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 8 (2008) 509-15.
5. Jayasree P., Balan K., Peter L., Nisha K., "Volume change behavior of expansive soil stabilized with coir waste", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 6 (2015) 04014195.
6. Bilba K., Arsene M. A., Ouensanga A., "Sugar cane bagasse fibre reinforce cement composites", Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1 (2003) 91-6.
7. Cao Y., Shibata S., Fukumoto I., "Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 3 (2006) 423-9.

8. Mallela J., Harold Von Quintus P., Smith K. L., "Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design", Arlington, Virginia, USA: The National Lime Association (2004).
9. Rogers C., Glendinning S., "Modification of clay soils using lime. Ground Engineering", London, UK: Thomas Telford Limited (1996) 99-114.
10. Sakr M. A., Shahin M. A., Metwally Y. M., "Utilization of lime for stabilization soft clay soil of high organic content", Geotechnical and Geological Engineering, 27 (2009) 105e13.
11. Bell F. G., "Lime stabilization of clay minerals and soils", Engineering Geology, 42 (4) (1996) 223e37.
12. Kassim K. A., Chern K. K., "Lime stabilized Malaysian cohesive soils", Journal Kejuruteraan Awan, 16 (1) (2004) 13e23.
13. Rao S. M., Shivananda P., "Compressibility behavior of lime-stabilized clay", Geotechnical and Geological Engineering, 23 (2005) 309e19.
14. Ghobadi M. H., Abdilor Y., Babazadeh R., "Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73 (2) (2014) 611e9.
15. Basma A. A., Tuncer E. R., "Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays", Transportation Research Record, 1296 (1991) 54e61.
16. Kuo W., Lin K., Chang W., Luo H., "Effects of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste", J Indust Eng Chem-Seoul, 12 (5) (2006) 702.
17. Senff L., Labrincha J. A., Ferreira V. M., Hotza D., Repette W. L., "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars", Constr Build Mater, 23 (7) (2009) 2487-91.

18. Farzadnia N., Ali A. A. A., Demirboga R., "Development of nanotechnology in high performance concrete", *Adv Mater Res*, 364 (2012) 115-8.
19. Sobolev K., Flores I., Torres-Martinez L., Valdez P., Zarazua E., Cuellar E., "Engineering of SiO<sub>2</sub> nanoparticles for optimal performance in nanocementbased materials", *Nanotechnol Constr*, 3 (2009) Springer.139-48.
20. Iranpour B., Haddad A., "The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment", *Eng. Geol.*, 205 (2016) 40-53.
21. Kananizadeh N., Ebadi T., Khoshniat S. A., Mousavirizi S. E., "The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate", *Clean Soil, Air Water* 39 (7) (2011) 605-611.
22. Taha O. M. E., Taha M. R., "Soil-water characteristic curves and hydraulic conductivity of nanomaterial-soil-bentonite-mixtures", *Arab. J. Geosci*, 9 (2016) 12.
23. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort-ASTM D698.
24. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils-ASTM D4318.
25. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures-ASTM D5102-09.
26. Lan T., Kaviratna P. D., "Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay nanocomposites", *Chem Mater*, (1995) 2144-2150.
27. Garzón E. Cano M., Kelly B., "Effect of lime on stabilization of hylite clays", *Applied Clay Science* (2016).
28. Etim R., Eberemu B., Osinubi R., "Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture", *Transportation Geotechnics* (2017) 85-95.