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

احمدرضا مظاهری*؛
دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی(ره)، دانشکدهٔ فنی و مهندسی
علی نورزاد؛
دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ مهندسی عمران، آب و محیطزیست

تاریخ: دریافت ۹۵/۱۰/۱۷ پذیرش ۹۶/۰۲/۰۳

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 دانسیتهٔ 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 زاویهٔ اصطکاک تأثیر چشم‌گیری ندارد این درحالی است که نانو مواد علاوه بر اینکه چسبندگی را افزایش می‌دهد، سبب افزایش زاویهٔ 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 ۲٤ ساعت از ایجاد صفحه گسیختگی در خاک، مصالح قادر هستند حدود ۸۰ درصد مقاومت اولیهٔ خود (زمانی که هیچ افزودنی ندارد) را به‌دست آورند.

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

*نویسنده مسئول a.mazaheri@abru.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

مقدمه

استفاده از افزودنی‌های مختلف به‌منظور بهبود خواص خاک‌ها از سالیان گذشته به‌وسیلهٔ 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 دامنهٔ خمیری خاک، افزایش کارآیی، مقاومت و حد انقباض خاک می‌شود [۹]، [۱۰]. تحقیقات گسترده در زمینهٔ پایداری خاک رس با استفاده از آهک [۱۱]–[۱٤] 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[1] مجتمع شدن[2]، کربناسیون[3] 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 [۱٤].

در سال‌های اخیر استفاده به نانو ذرات در تحقیقات مهندسان عمران توجه شده است [۱٦]–[۱۸]. در تحقیقات انجام شده، نشان داده شده است که استفاده از نانو مواد هیداتاسیون سیمان را به‌دلیل انرژی سطحی بالا افزایش می‌دهد. هم‌چنین باعث بهبود دانسیته به‌دلیل پر شدن بین ذرات می‌شود [۱۸]، [۱۹]. تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانورس مونت موریلونیت[4] سبب مهار تورم در خاک‌ها و هم‌چنین کاهش پتانسیل خرابی در خاک‌ها می‌شود

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

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

در همهٔ تحقیقاتی که در زمینهٔ 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 خصوصیاتی 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 ٤ 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 نمونهٔ 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 ٥٤ درصد آن کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر است بنابراین در گروه خاک‌های رسی طبقه‌بندی می‌شود که دارای رطوبت طبیعی ۷ درصد است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایش شده

مشخصات	مقادیر
درصد عبور از الک نمره ۲۰۰	%٥٤
درصد ذرات ریزتر از ۲ میکرومتر	%۲۲
حد روانی (LL)	%٤٥
حد خمیری (PL)	%۲٥
نشانه خمیری(PI)	%۲۰
رطوبت طبیعی	%۷
وزن مخصوص	۱٦/۷ $(\frac{kN}{m^3})$
چسبندگی	۱٥ $\frac{kN}{m^2}$
زاویهٔ اصطکاک	18°
چگالی ویژه	۲/٦1

نانورس‌ها، نانو ذرات سیلیکاتی هستند که به‌صورت صفحه‌ای است و حداقل یک بعد آن در حدود ۱ تا ۱۰۰ nm است. نانورس‌ها دارای سطح ویژه‌ای بزرگی در حدود ۷٥۰ متر مربع بر گرم دارند. این سطح ویژه بزرگ باعث می‌شود، همواره اندرکنش شدیدی بین نانورس و محیط اطرافش وجود داشته باشد [۲٦]. 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- الدریچ[1] کشور آمریکا، شامل Na_2O، MgO، Al_2O_3، SiO_2، KO_2، 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 ٥ تا ۱٥ نانو متر، ظرفیت تبادل یونی(CEC)[2] $(\frac{meq}{100g})$ ٤۸ و رطوبت ۱-۲ درصد است (جدول ۳).

1. Sigma-aldrich
2. Cation Exchange Capacity

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

جدول ۲. تجزیهٔ شیمیایی نانورس مونت موریلونیت

مواد	٪
Na_2O	۰/۹۸
MgO	۳/۲۹
Al_2O_3	۱۹/٦
SiO_2	۵۰/۵۹
KO_2	۰/۸٦
CaO	۱/۹۷
TiO_2	۰/٦۲
Fe_2O_3	۵/٦۲
Li	۱۵/٤۵

جدول ۳. مشخصات نانورس مونت موریلونیت

پارامترها	مقدار
دانسیته ذرات (g/cm3)	۲/۳۵
سطح ویژه (m2/g)	۷۵۰
اندازه ذرات (μm)	۱۵-۵
رنگ	سفید

آهک مصرفی در این تحقیق هیدارته خالص حاوی ۸٦ درصد اکسید کلسیم[1]، حدود ۸ درصد اکسید سیلیسیم[2] و کم‌تر از ۲ درصد اکسید منیزیم است[3] که چگالی ویژه آن ۳/۱۸ است.

روش آزمایش

در این تحقیق به‌منظور تعیین رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه از آزمایش پروکتور استاندارد[4] استفاده شده است [۲۳]. در این آزمایش درصدهای افزودنی به‌صورت 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[5] تعیین شده است

[1] Cao
[2] Sio2
[3] mgo
[4] ASTM D698
5 ASTM D4318

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

[۲٤]. که حد روانی خاک بدون هیچ‌گونه افزودنی برابر با ٤٥ درصد و حد خمیری برابر ۲۵ درصد به‌دست آمده است. برای خاک با درصدهای مختلف افزودنی حدود اتربرگ اندازه‌گیری و گزارش آن در قسمت نتایج آورده شده است

تعیین مقاومت تک‌محوری خاک‌ها با استفاده از استاندارد[1] موجود انجام شده است [۲۵]. در این آزمایش نمونه‌ها به‌صورت خشک با یک‌دیگر مخلوط می‌شوند، سپس رطوبت بهینه به خاک مورد نظر اضافه شد و پس از مخلوط شدن و به‌دست 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 اندازه گیری می شود سپس نمونه‌ها، برای جلوگیری از کاهش رطوبت، در محفظه‌ای پلاستیکی قرار داده می‌شوند و در دمای ۲۰ درجه و رطوبت ۹۰ درصد اتاقک رطوبت[2] نگه‌داری می‌شوند. آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق در حضور درصدهای مختلف افزودنی انجام گرفته است که در جدول ٤ 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 ٤ 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 ٤ 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

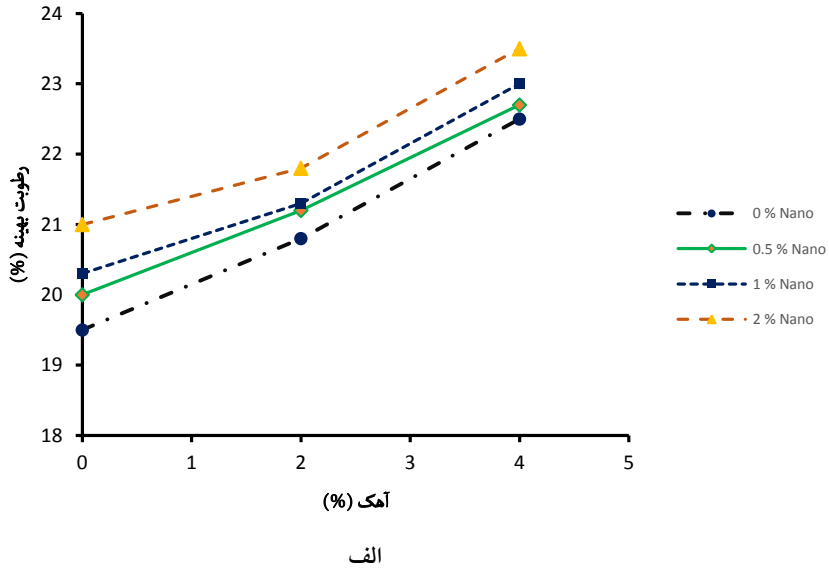
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

جدول ٤. 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	٤ درصد آهک و بدون نانو	**آزمایش ۹**	٤ درصد آهک و ۱ درصد نانورس
آزمایش ٤	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 ٦	٤ درصد آهک و ۰/۵ درصد نانورس	**آزمایش ۱۲**	٤ درصد آهک و ۲ درصد نانورس

تأثیر آهک و نانورس بر رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه

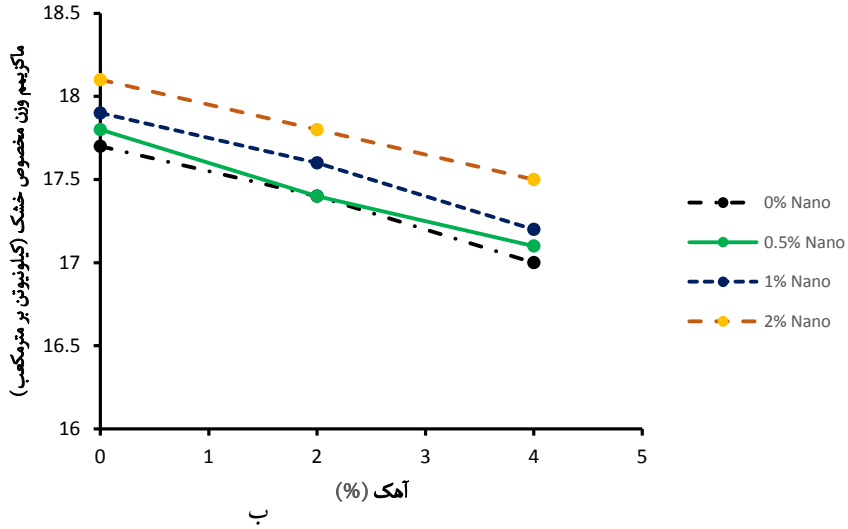
طی آزمایش پروکتور استاندارد مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای همهٔ نمونه‌هایی که در جدول ٤ بیان شد، تعیین شد. در همه این نمونه‌ها تأثیر درصدهای مختلف افزودنی بر بیشینه وزن مخصوص خشک خاک[1] و رطوبت بهینه[2] خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.



الف

1. Maximum dry density
2. Optimum moisture content

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]



ب

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

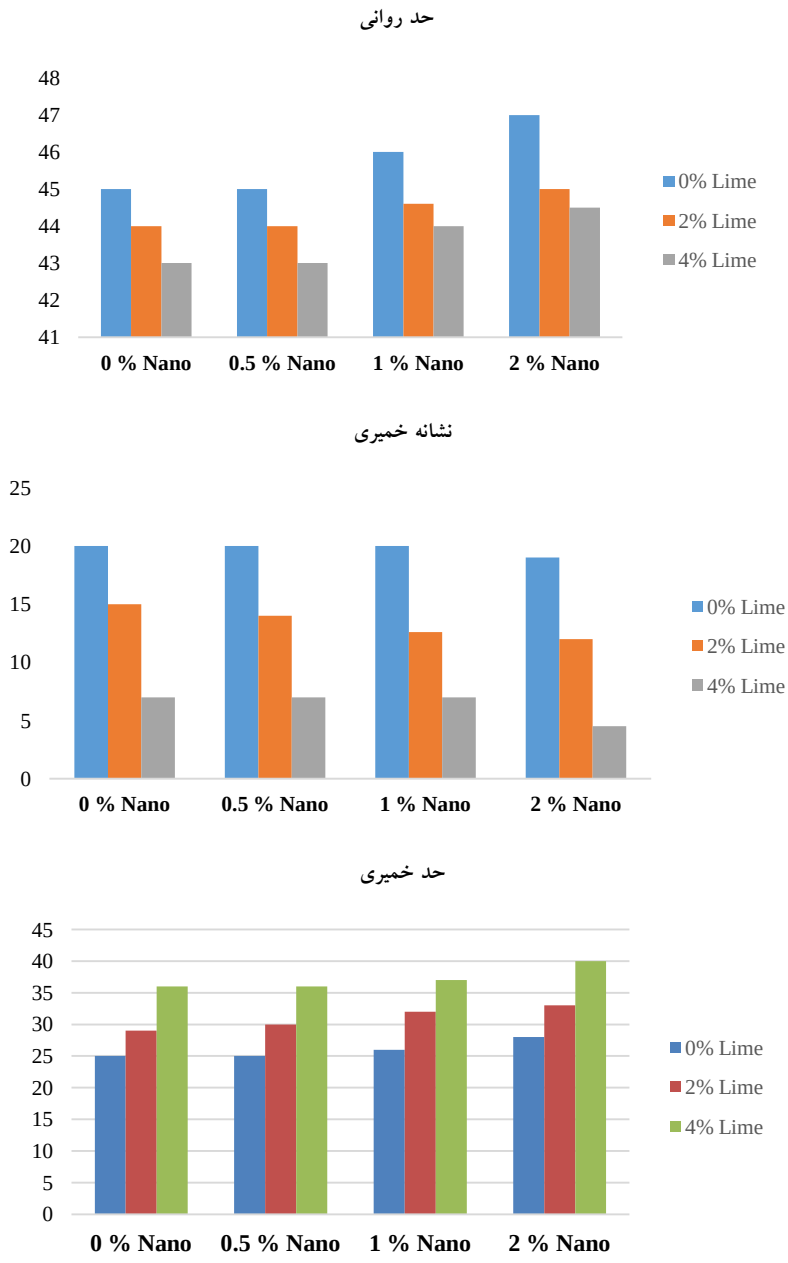
چنان‌که در شکل ۱ مشخص است افزایش درصد آهک و نانورس باعث افـزایش درصـد رطوبت بهینه خاک می‌شود. نمونه بدون هیچ‌گونه افزودنی درصد رطوبت بهینه‌ای برابـر۱۹/۵ درصد دارد که این مقدار زمانی که نمونه حاوی ۲ درصد نانو مواد و ٤ درصد آهک است بـه ۲۳/۵ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی حضور آهک باعـث کـاهش وزن مخصـوص خشـک بیشینه خاک می‌شود درحالی که اضافه کردن نانورس باعث افزایش ایـن مقـدار مـی‌شـود. در نمونه با ۲ درصد آهک و بدون نانورس وزن مخصوص خشک بیشینه برابر ۱۷/٤ کیلونیـوتن برمتر مکعب است ولی در نمونه با ۲ درصد نانورس و بدون حضور آهک این مقدار به ۱۸/۱ کیلونیوتن برمتر مکعب افزایش می‌یابد. به‌دلیل ریز بودن ذرات نانورس این ذرات مـی‌تواننـد به‌خوبی خلل و فرج بین دانه‌ها را پر کرده و سبب افزایش وزن مخصوص خاک شودند.

تأثیر آهک و نانورس بر حدود اتربرگ

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]



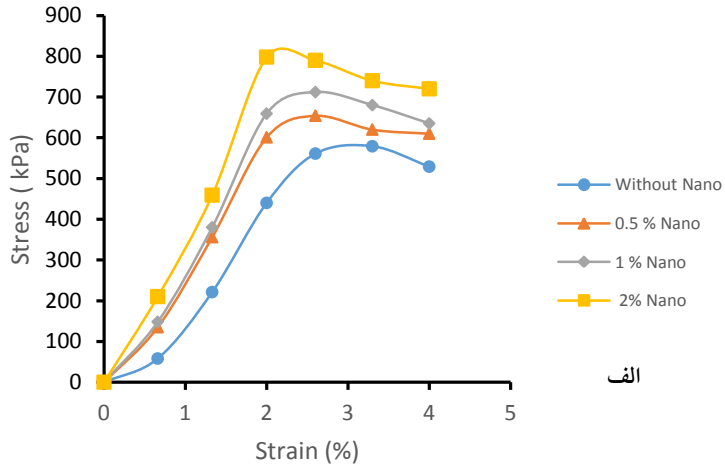
شکل ۲. تأثیر آهک و نانورس بر حد روانی (LL) و نشانه خمیری (PI) و حد خمیری (PL) خاک‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

چنان‌که در شکل ۲ مشخص است افزایش آهک باعث کاهش حد روانی (LL) و افزایش حد خمیری (PL) خاک می‌شود. به‌عبارت 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 به‌وضوح 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

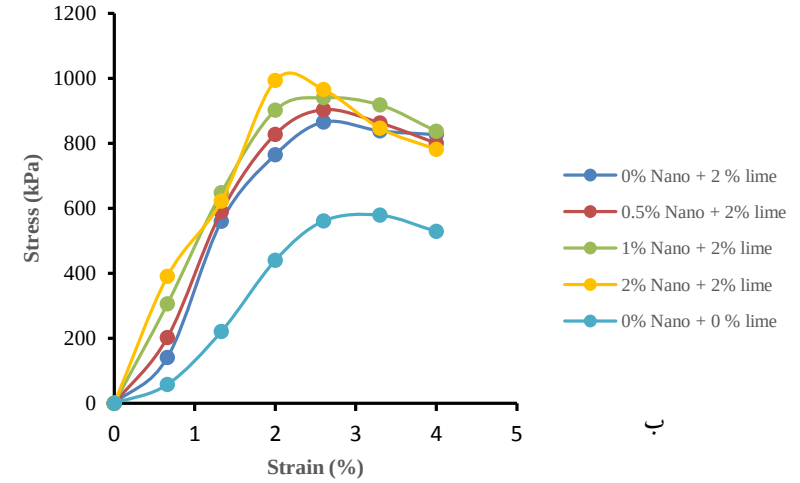
در این قسمت تأثیر نانورس و آهک بر مقاومت تک‌محوری ۷ روزه خاک‌ها بررسی شده است. برای تهیه نمونه‌ها مراحل زیر انجام شده است ابتدا با مشخص بودن حجم نمونه‌گیر و وزن مخصوصی که باید نمونه‌ها در آن وزن مخصوص تهیه شود حجم وزن خاک به‌دست آورده می‌شود سپس خاک توزین شده با استفاده از کوبه مخصوص و به‌صورت یک‌نواخت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



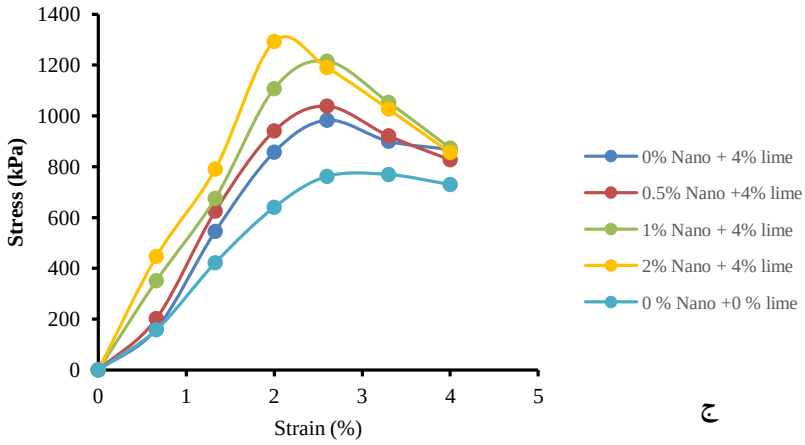
الف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]



ب



ج

شکل ۳. مقاومت تک‌محوری خاک همراه با درصدهای مختلف افزودنی آهک و نانورس الف) نمونه‌ها بدون افزودنی آهک ب) نمونه‌ها با ۲ درصد آهک ج) نمونه‌ها با ٤ درصد آهک

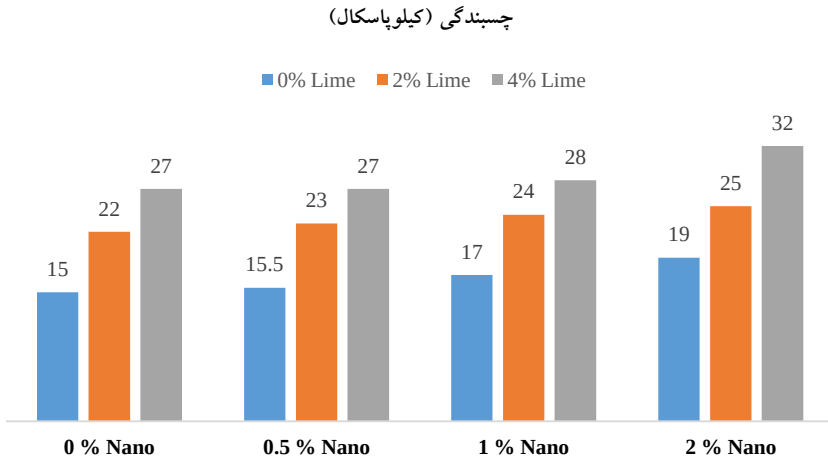
چنان‌که در شکل ۳ ب و ۳ ج مشخص است افزودن آهک بدون حضور نانورس به تنهایی مقاومت خاک را افزایش می‌دهد. این افزایش زمانی که ۲ درصد آهک اضافه می‌کنیم به حدود ۳۹ درصد می‌رسد. اضافه کردن نانورس نیز باعث افزایش مقاومت مقاومت می‌شود

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

به‌طوری‌که با افزایش ۲ درصد نانورس بدون حضور آهک مقاومت حدود ٤٠ درصد افـزایش می‌یابد. پس می‌توان بیان کرد تأثیر آهک و نانورس بر افـزایش مقاومـت تـک‌محـوره تقریبـاً یک‌سان است. یعنی با افزودن ۲ درصد آهک و یـا نـانورس مقاومـت در حـدود ٤٠ درصـد افزایش می‌یابد. زمانی که از هر دو افزودنی آهک و نانورس به‌صورت هم‌زمان و از هر کـدام به‌میزان ۲ درصد استفاده شود افزایش مقاومت چشم‌گیری در حدود ۷۷ درصد رخ مـی‌دهـد. این موضوع نشان‌دهندهٔ کارایی مختلف آهک و نانورس در افزایش مقاومت است بـه‌صـورتی که آهک با ایجاد واکنش‌های شیمیایی باعث افزایش مقاومت می‌شود در خـالی کـه افزودنـی نانورس با خاصیت پرکنندگی و بالا بردن تراکم نمونه‌ها می‌تواند باعث افزایش مقاومت شود.

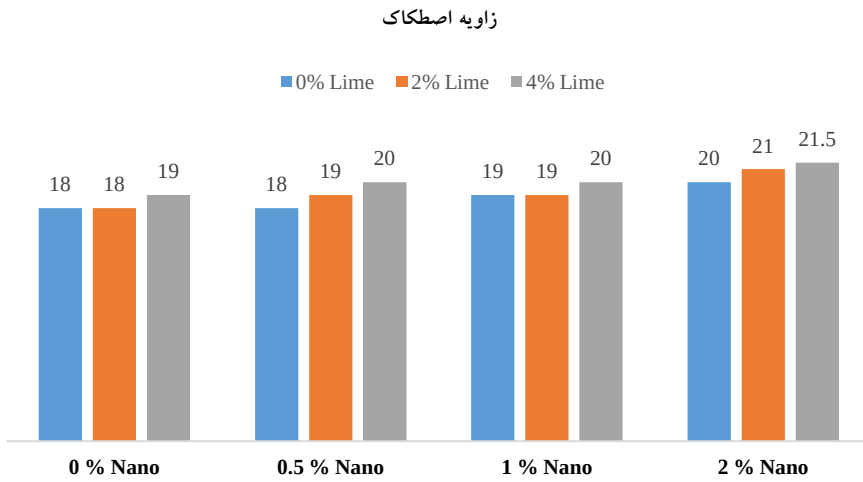
تأثیر آهک و نانورس بر زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی خاک

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



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]



شکل ٤. تأثیر نانورس و آهک بر چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک خاک

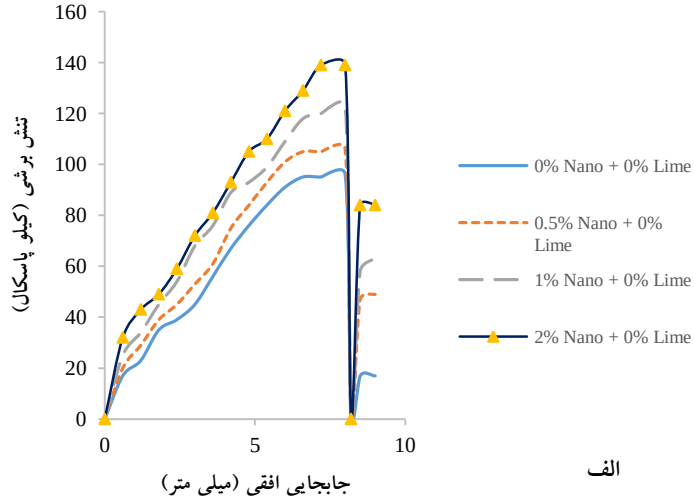
چنان‌که در شکل ٤ مشخص است افزودن ۲ درصد نانورس بدون حضور آهک چسبندگی خاک را از ۱۵ به ۱۹ کیلو پاسکال می‌رساند و زاویهٔ اصطکاک را از ۱۸ درجه به ۲۰ درجه افزایش می‌دهد. این افزایش را می‌توان به ریز بودن ذرات نانورس نسبت داد که با قرار گرفتن در بین ذرات درشت‌تر علاوه بر افزایش چسبندگی زاویهٔ اصطکاک را نیز افزایش می‌دهد. افزودن آهک بدون حضور نانورس باعث افزایش چسبندگی از ۱۵ کیلوپاسکال به ۲۲ کیلو پاسکال با افزودن ۲ درصد و ۲۷ کیلوپاسکال با افزودن ٤ درصد آهک می‌شود اما افزودن آهک بدون حضور نانورس تأثیری بر زاویهٔ اصطکاک خاک ندارد و این موضوع در شکل ٤ به‌وضوح 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 زاویهٔ 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

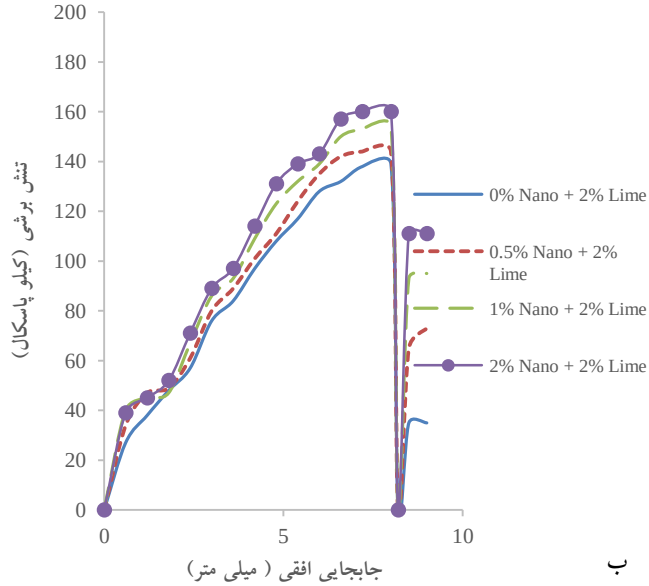
خاکی شود. یکی از عواملی که ممکن است باعث بهبود شرایط خاک و ترمیم لایه‌های آسیب دیده شود خاصیت خودترمیمی ذاتی است که درون خاک‌های رسی وجود دارد. این خاصیت ذاتی ممکن است با اضافه کردن مواد افزودنی به خاک تغییر کند. در این قسمت تأثیر نانورس و آهک بر خاصیت خود ترمیمی خاک‌ها بررسی شده است و نتایج این بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. این آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم خاک انجام گرفته است. روال آزمایش بدین‌صورت است که ابتدا نمونه آزمایش در قالب دستگاه برش ساخته می‌شود. سپس نمونه غرق آب می‌شود و به‌مدت ۲٤ ساعت در این حالت رها می‌شود تا اشباع شود. بعد از ۲٤ 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 ۲٤ 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.



الف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]



ب

شکل ۵. تأثیر درصدهای آهک و نانورس بر خاصیت خود ترمیمی خاک‌ها. الف) تأثیر نانورس بر خاصیت خودترمیم، 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. مثلا 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 زمینهٔ 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

برشی ثانویه ای ایجاد می‌شود که این مقاومت به‌دلیل 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 ۸٤ کیلوپاسکال ایجاد می‌شود این درحالی است که نمونه بدون هیچ‌گونه افزودنی مقاومت برشی برابر ۹٦ کیلو پاسکال دارد. یعنی با افزودن ۲ درصد نانورس به خاک، پس از ایجاد گسیختگی در نمونه‌ها پس از گذشت ۲٤ ساعت نمونه بیش‌تر از ۸۵ درصد مقاومت خود را دوباره به‌دست 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 ٤/۵ 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 ۲درصد 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 عناوین 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 به‌وسیلهٔ Etim و همکاران در سال ۲۰۱۷ نیز انجام شده است. علاوه بر آن در تحقیق صورت گرفته این نتیجه به‌دست آمد که افزودن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

آهک سبب کاهش وزن مخصوص بیشینه خشک خاک می‌شود. این موضوع با تحقیقات انجام شده Garzon و همکاران در سال ۲۰۱٦ هم‌خوانی مناسبی دارد.

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

پارمترها	تحقیق حاضر		Garzon et al 2016[27]		Etim et al 2017[28]	
	۲درصد آهک	٤درصد آهک	۲درصد آهک	٤درصد آهک	۲درصد آهک	٤درصد آهک
مقاومت تک‌محوری	٤٨٪ افزایش	٦٣٪ افزایش	–	–	٦٠٪ افزایش	١١٠٪ افزایش
نشانه خمیری خاک	١٦٪ افزایش	٤١٪ افزایش	٣٤٪ افزایش	٤٧٪ افزایش	–	–
وزن مخصوص خشک بیشینه خاک	٤٪ کاهش	٨٪ کاهش	٢٪ کاهش	٦٪ کاهش	–	–

نتیجه‌گیری

- استفاده از آهک و نانورس باعث بهبود پارامترهای مقاومتی خاک می‌شود. ولی از لحاظ اقتصادی آهک نسبت به نانورس مقرون به‌صرفه‌تر 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 ٢٤ ساعت می تواند 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 زمینهٔ 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 جزیی توصیه می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

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 soilof 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 ofexpansive 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 cementpaste", J Indust EngChem-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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]

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 SiO2 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 conductivityof 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 Master, (1995) 2144-2150.
27. Garzón E. Cano M., Kelly B., "Effect of lime on stabilization of hyllite 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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.1.1]