[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

بررسی اثر و نحوهٔ اختلاط نانورس بر شدت واگرایی روی نمونه‌هایی از خاک‌های لسی استان گلستان

حامد رضایی؛ دانشگاه گلستان، گروه زمین‌شناسی، گرگان

تاریخ: دریافت ۹٦/۱۱/۰۸ پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

چکیده

از خاک‌های لسی در سه منطقهٔ شرق و شمال شرق استان گلستان نمونه‌برداری شد و آزمایش پین‌هول روی نمونه‌های با وزن واحد حجم طبیعی (γ_n) و حداکثر (γ_{dmax}) انجام شد و میزان واگرایی آن تعیین شد. پیشنیهٔ تحقیق، شواهد صحرایی و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی حکایت از واگرا بودن خاکِ مناطقِ نمونه‌برداری دارد. نتایج نشان می‌دهد، تراکم خاک باعث کاهش شدت واگرایی می‌شود و نرخ جریان را کم می‌کند، به‌طوری‌که نرخ جریان در نمونه مراوه‌تپه به میزان ۳۸ درصد، در نمونهٔ چشمه‌لی به‌میزان ۱۳ درصد و در نمونه بق‌قجه‌بالا به‌میزان ٤۳ درصد کاهش یافته است. تراکم نمی‌تواند واگرایی خاک را از بین ببرد. افزودن نانورس باعث کاهش شدت واگرایی خاک شده و در غالب موارد خاصیت واگرایی آن را از بین می‌برد. به‌منظور بررسی اثر نانورس روی شدت و کاهش خاصیت واگرایی خاک با نسبت‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ٤ و ۵ درصد وزنی نانورس مونت‌موریونیت افزوده شد. میزان واگرایی نمونه‌های دارای نانورس در دستگاه آزمون پین‌هول اندازه‌گیری شد. هم‌چنین روش اختلاط نانورس با خاک واگرا رفتارهای گوناگونی را در شدت واگرایی و کاهش آن نشان می‌دهد. نانورس به چهار روش با خاک‌های مناطق نمونه‌برداری مخلوط شدند. در روش A ، با تهیهٔ گل همگن از خاک و نانورس با هم‌زن برقی کاملاً مخلوط شدند. در روش B، اختلاط خاک لس با نانورس در رطوبت بهینه انجام شد. در روش C. اختلاط خاک لس با نانورس به‌صورت خمیر به‌وسیلهٔ هم‌زن دستی انجام شد. در روش D. اختلاط خاک لس با نانورس به‌صورت خشکِ ارتعاشی به‌وسیلهٔ لرزاننده الک دانه‌بندی انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که، نسبت وزنی یک درصد نانورس از نظر فنی و اقتصادی

*نویسنده مسئول rezaiy.hamed@gmail.com

مناسب‌ترین نسبت اختلاط است. با این نسبت وزنی، روش تهیه گل همگن با هم‌زن برقی (روش A) کم‌ترین نرخ جریان را به‌وجود می‌آورد؛ به‌طوری‌که نرخ جریان از ۱/۳ میلی‌لیتر در ثانیه در خاک خالص به ۰/۳ میلی‌لیتر در ثانیه در خاک حاوی نانورس در هد ۵۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. از این‌رو، می‌توان گفت این روش مناسب‌تر است ولی از لحاظ اجرایی کارایی ندارد و روش B مناسب‌تر است. در روش B نرخ جریان از ۱/۳ به ۰/۵۵ میلی‌لیتر در ثانیه در همین حد می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: نانورس، خاک واگرا، لس، استان گلستان، مواد افزودنی

مقدمه

پدیدهٔ واگرایی به‌علت انحلال برخی از یون‌ها در خاک‌های رسی و یا غلبه تنش برشی جریان عادی آب در خاک‌های غیرچسبنده به‌وجود می‌آید [۱]، [۲]، [۳]. جریان‌های سطحی آب در شیب‌های کم باعث فرسایش سطحی خاک‌های واگرا می‌شوند. واگرایی در خاک از یک نقطه شروع شده و به‌تدریج گسترش می‌یابد، نقطهٔ شروع می‌تواند حفره‌های حاصل از فعالیت جانوران، ترک‌های موجود و یا مسیر رشد ریشه گیاهان باشد [۳].

شواهد صحرایی فراوانی برای شناخت واگرایی خاک‌های لسی وجود دارد [۳]، [٤]، [۵]. عامل اصلی ایجاد فرسایش در لس‌ها، آب است که برای رسیدن به آستانه فرسایش باید سرعت لازم را داشته باشد. سرعت آستانه فرسایش آب در لس‌ها بین ۰/٦۵ تا ۰/۷۵ متر بر ثانیه است. به‌ازای هر مترمربع در هر سال ۲/۵ کیلوگرم از ذرات لس دچار فرسایش می‌شوند و حتی این مقدار ممکن است به ۱۰ کیلوگرم برسد [٦]. در بررسی‌های صحرایی با توجه به پارامترهای زیر می‌توان واگرابودن خاک را تشخیص داد: منشأ زمین‌شناسی خاک لس، ترکیب کانی‌شناسی، دانه‌بندی، الگوی زهکشی، شکفتگی کلوخه‌ها، مورفولوژی خاص، نفوذپذیری زیاد، محدودهٔ جغرافیایی (طول و عرض نسبت به منشأ)، رنگ خاک، رابطهٔ شیب دامنه و فرسایش خاک، بارش، فرسایش‌پذیری ترک‌های ستونی، پاشنه‌شویی، گل‌آلودی رواناب و وجود بلورهای نمک در خاک‌های لسی [۳]، [٤].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

نخستین بار میدلتون[1] (۱۹۲۰) پدیدهٔ واگرایی را یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک‌های ریزدانه معرفی‌کرد. او زیاد بودن درصد یون سدیم در این خاک‌ها را یکی از مهمترین ویژگی‌های آنها دانست. پس از آن پژوهش‌های زیادی در خصوص روش تعیین واگرایی خاک در آزمایشگاه انجام شد.

لس یک نهشتهٔ بادی در اندازهٔ لای (۲۰ تا ۵۰ میکرون) است که ساختاری متخلخل دارد و پیوند نسبتاً ضعیفی بین دانه‌های آن از جنس رس یا کربنات کلسیم برقرار است. لس از لحاظ دانه‌بندی، همگن است و عموماً به‌رنگ زرد نخودی دیده می‌شود [۷]. کانی‌شناسی و اندازهٔ دانه‌های تشکیل‌دهندهٔ لس‌ها، ترکیب آن‌ها را معین می‌کند. ترکیب کانی‌شناسی لس‌ها بر حسب نوع منشأ و فرآیندهای ثانویه متغیر است؛ ولی ترکیب اصلی لس واقعی به‌طور عمده کوارتز، فلدسپات، میکا، کلسیت و کانی‌های رسی است. اغلب بیش از ۵۰ درصد ترکیب کانی‌شناسی لس‌ها را کوارتز تشکیل می‌دهد. لس‌ها به‌علت داشتن تخلخل زیاد، دارای درجهٔ اشباع‌شدگی اندک هستند. پیوند بین دانه‌ها و اسکلت آن‌ها در برابر آب ناپایدار است [۸]. به‌طورکلی خاک‌های لسی خاصیت خمیری کمی دارند [۹]. مقدار چسبندگی به‌شدت تابع میزان رس موجود در لس است [۷]،[۸]. لس‌های گلستان از نظر ویژگی‌های رسوب شناسی و خواص زمین‌شناسی مهندسی در سه ناحیهٔ ۱، ۲ و ۳ پراکنده شده‌اند و به‌ترتیب با لس‌های تیپ رسی، سیلتی و ماسه‌ای همخوانی دارند [۱۰].

امروزه موادی مانند سیمان، آهک، خاکستر پوسته برنج، آلومینیم نیترات و از جمله نانورس مواد افزودنی هستند که به‌فراوانی در مهندسی ژئوتکنیک به‌کار می‌روند [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]، [۱۵]، [۱٦]. در اغلب موارد این مواد خواص مهندسی خاک را بهبود می‌بخشند و برخی از آن‌ها روش‌های رایج در به‌سازی زمین شمرده می‌شوند.

تلاش‌های زیادی به‌صورت مطالعات موردی در خصوص تثبیت خاک‌های واگرا با استفاده از مواد افزودنی انجام شده است [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]،[۲۰]، [۲۱]، [۲۲]. در این میان برای کنترل و یا از بین بردن خاصیت واگرایی خاک‌ها نیز از نانورس‌ها استفاده می‌شود. تأثیر این افزودنی‌ها روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بررسی شده‌اند که نشان از تأثیر آن‌ها بر

1. Middelton

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

غیرواگرا شدن خاک و تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک دارد [۲۳]، [۲٤]، [۲۵]؛ ولی مسلماً میزان تأثیر و درصد مواد افزودنی برای هر خاک منطقه متفاوت است.

نانورس، ذراتی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که دارای دو ویژگی اساسی سطح ویژه (SSA) و ظرفیت تبادل یونی (CEC) بالا هستند. چنان‌چه نانورس‌ها با خاک مخلوط شوند، بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مخلوط متأثر از عملکرد سطح ویژه نانورس قرار می‌گیرد. سطح ویژه (SSA) شدت اندرکنش نانورس را با خاک افزایش می‌دهد. نوع و مقدار نانورس در خاک نقش تعیین‌کننده دارد. اغلب خاک‌ها حاوی اکسید آهن، مواد آلی و ذرات رسی هستند که به‌عنوان نانومواد در تعاملات آلی-معدنی و تبادل یونی نقش زیادی ایفا می‌کنند [۲٦]. اگر بتوان با اختلاط مناسب از تمام ظرفیت سطح ویژه استفاده کرد، می‌توان شاهد اثرات چشم‌گیر این مواد بر رفتار فیزیکی، شیمیایی و خواص مهندسی خاک بود. در این زمینه، پژوهش‌های ماجد و طاها (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که تماس خیلی کوتاه از نانوذرات به خاک می‌تواند خواص آن را فوق‌العاده تغییر دهد و این ذرات بسیار فعالانه با سایر ذرات و محلول‌ها در ارتباط قرار می‌گیرند [۲۷].

حداد و همکاران (۱۳۹٦) در تحقیقاتشان با بیان این‌که درصد اختلاط هر ماده شیمیایی با هر خاک دارای مقدار مشخصی است و نرخ اصلاح واگرایی خاک با افزایش ماده افزودنی به یک حد ثابتی می‌رسد. آنان تأکید داشتند که با انجام یک نوع آزمایش واگرایی به تنهایی نمی‌توان با قاطعیت درباره میزان واگرایی خاک نتیجه‌گیری کرد [۲۸].

خاک انتخابی دارای خاصیت واگرایی است و در بسیاری از پروژه‌های مهندسی در استان گلستان مشکل ساز می‌شود [۳]. با توجه به این مسئله، هدف از انجام این پژوهش، دست‌یابی به‌شدت واگرایی خاک در آزمون پین‌هول و تعیین درصد و روش اختلاط بهینه نانورس در خاک طبیعی است.

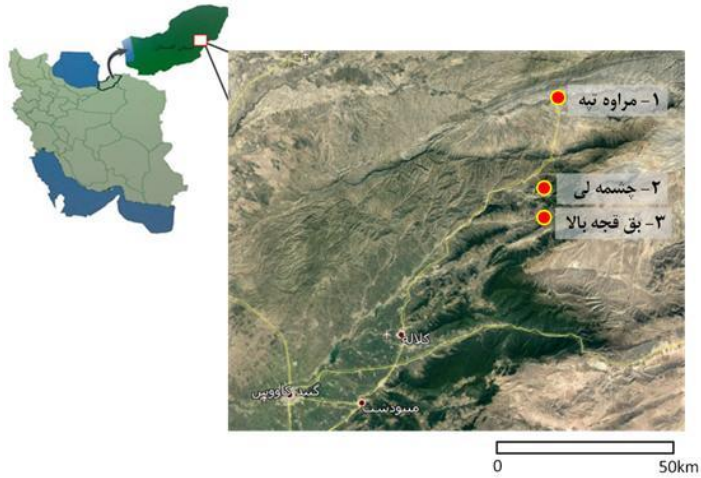
مواد و روش‌ها

نمونه‌های آزمایش شده از سه منطقه در شرق استان گلستان شامل سایت مسکن‌مهر شهر مراوه‌تپه، روستای چشمه‌لی و روستای بق‌قجه‌بالا گرفته شده است (شکل۱). در این مناطق

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

منازل مسکونی و خطوط انتقال آب و گاز به‌دلیل واگرایی خاک دچار خسارت شده‌اند. در منطقه آثار فراوانی مبنی برای واگرابودن خاک‌های منطقه وجود دارد (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت محل‌های نمونه‌برداری از خاک لس لای‌دار



شکل ۲. شواهد صحرایی واگرایی خاک لس لای‌دار در شرق استان گلستان

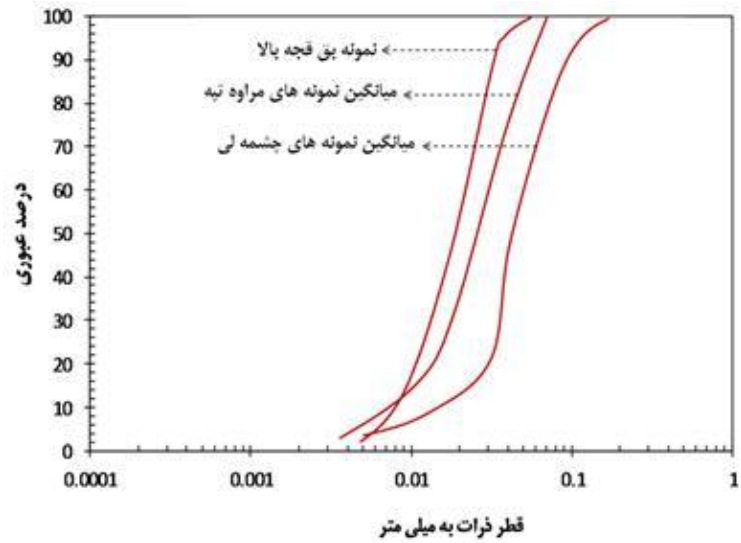
نمونه‌برداری به دو صورت کلوخه موم اندود و لوله‌های استوانه‌ای فلزی انجام شد. عمق نمونه‌برداری تابع پی ساختمان‌ها در سایت مسکن مهر و روستای چشمه‌لی است که از ۰/۵

تا دو متر متغیر است. در مسیر راه روستای بق‌قجه بالا از ترانشه راه نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه تحت آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود آتربرگ، تعیین وزن واحد حجم و چگالی قرار گرفت (جدول۱).

جدول۱. نوع و تعداد آزمایش‌های انجام شده روی خاک‌های مناطق نمونه‌برداری

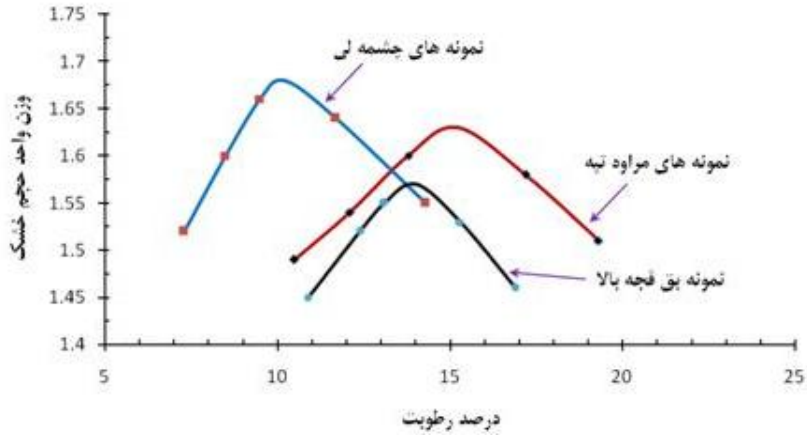
نام محل نمونه برداری	دانه‌بندی به‌روش هیدرومتری	تعیین وزن واحد حجم (γ_m)	چگالی ذرات خاک (G_s)	تراکم پروکتور معمولی	حدود آتربرگ	تعیین رطوبت خاک
مراوه‌تپه	۲	۲	۱	۱	۲	۲
چشمه‌لی	۳	۳	۱	۱	۳	۳
بق‌قجه‌بالا	۱	۲	۱	۱	۱	۱

آزمایش دانه‌بندی روی ٦ نمونه بررسی شده انجام شد (شکل ۲). در این تحقیق دانه‌بندی میانگین هر منطقه ارائه شد. بیش‌ترین توزیع نمونه‌ها در محدوده لای قرار دارند. متوسط اندازهٔ دانه‌های (D_{50}) نمونه‌های چشمه‌لی، مراوه‌تپه و بق‌قجه بالا به‌ترتیب ٤٢، ۲۵ و ۲۰ میکرون است. به‌منظور تعیین اثر تراکم بر شدت واگرایی، آزمایش تراکم استاندارد (T-99) انجام شد (شکل ۳).



شکل۳. منحنی دانه‌بندی نمونه‌های بررسی شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]



شکل ٤. منحنی‌های تراکم پروکتور استاندارد (معمولی)

با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و خواص خمیری نمونه‌های بررسی شده (جدول۲)، همهٔ نمونه‌ها از نظر اندازه، در حد لای و برمبنای طبقه‌بندی متحد از نوع ML و CL-ML هستند.

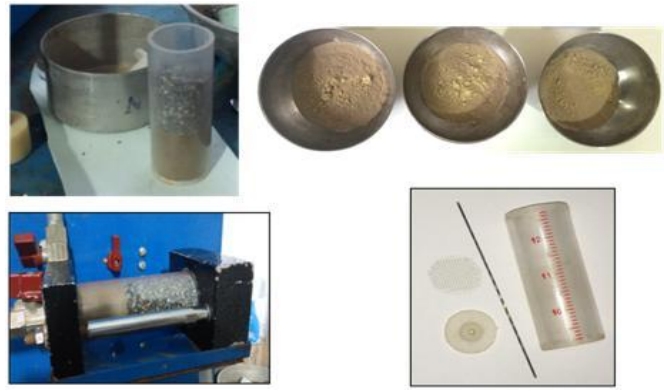
جدول۲. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های مناطق بررسی شده

نام محل نمونه برداری	دانسیته طبیعی(γ_n)	رطوبت بهینه (ω)	دانسیته حداکثر (γ_{dmax})	چگالی ذرات (G_s)	میزان تخلخل (n)	نشانه خمیری (PI)
	g/cm^3	٪	g/cm^3	–	٪	٪
مراوه‌تپه	۱/۳۳	۱۵/۲	۱/٦۳	۲/٦۳	۵۰/٦	۵
چشمه‌لی	۱/۳۹۱	۱۰/۲	۱/٦۸	۲/۵۷	۵٤	۳
بق‌قجه‌بالا	۱/۲٦	۱٤	۱/۵۷	۲/٦۸	٤٦/۹	٤

نمونه‌های سه منطقه در وزن واحد حجم طبیعی (γ_n) و وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) با دو درصد بیش‌تر از رطوبت بهینه، در قالب دستگاه پین‌هول بازسازی شدند (شکل۵). آزمایش پین‌هول به‌روش A استاندارد D٤٦٤٧-۹۳ انجام شد [۲۹]. در این روش نرخ جریان (Q) ، قطر نهایی سوراخ و تیرگی آب اندازه‌گیری شد و ارزیابی شد (شکل ٦). آزمایش‌ها در ارتفاع هیدرولیکی (هد) ۵۰، ۱۸۰ و ۳۸۰ میلی‌متر انجام شد (شکل‌های ۷، ۸ و ۹). در هد ۵۰ میلی‌متر هر سه نمونه در دو حالت با وزن واحد حجم طبیعی و وزن واحد حجم حداکثر دارای خاصیت واگرایی هستند (جدول ۳).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

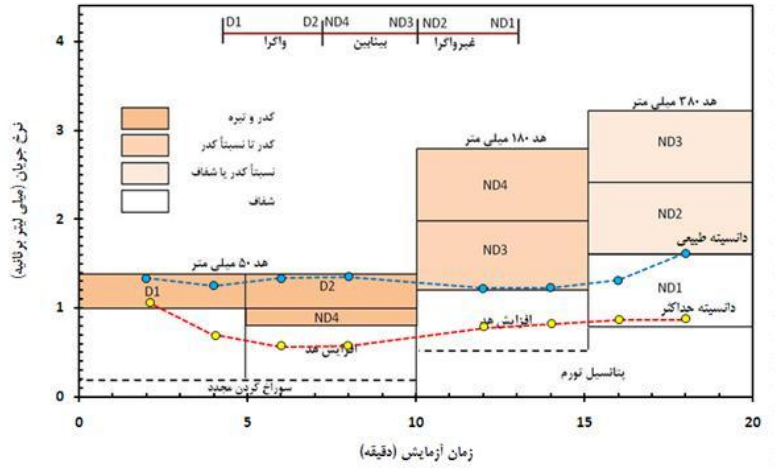
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]



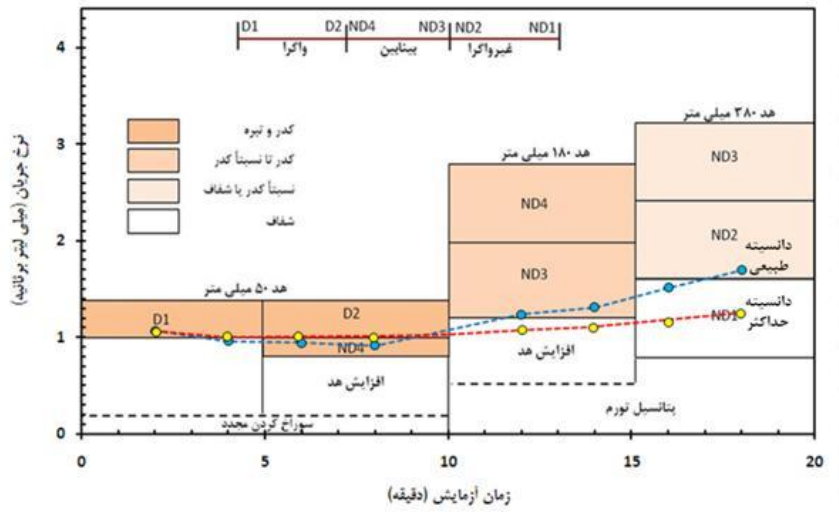
شکل۵ . مراحل آماده‌سازی و انجام آزمایش در دستگاه پین‌هول



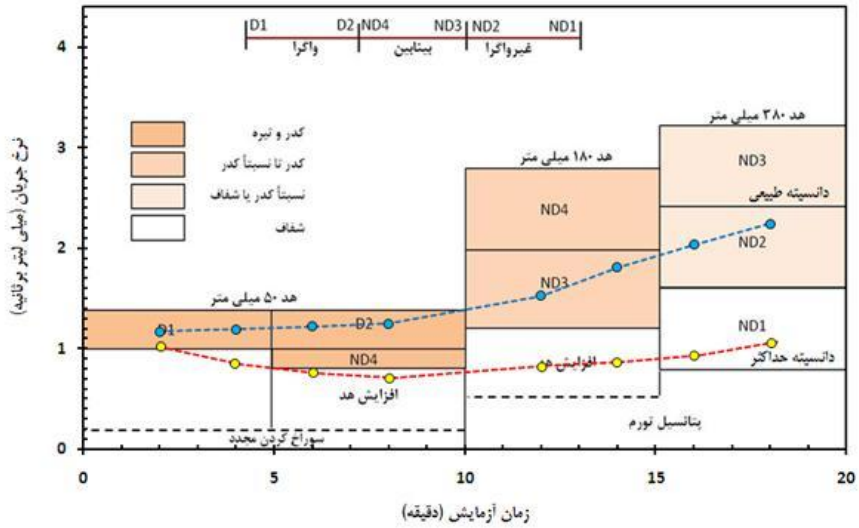
شکل ٦. تیرگی آب عبوری از نمونه و وضعیت سوراخ در انتهای آزمایش روی نمونه بق‌قجه بالا



شکل۷. نتایج نرخ جریان در زمان‌های مختلف آزمایش روی خاک منطقه مراوه‌تپه



شکل۸. نتایج نرخ جریان در زمان‌های مختلف آزمایش روی خاک منطقه چشمه‌لی



شکل۹. نتایج نرخ جریان در زمان‌های مختلف آزمایش روی خاک منطقه بق‌قجه‌بالا

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

جدول ۳. معیارهای تعیین واگرایی نمونه‌ها در وزن واحد حجم طبیعی (γ_n) و حداکثر (γ_{dmax})

معیار	وزن واحدحجم	نمونه مراوه‌تپه	نمونه چشمه‌لی	نمونه بق‌قجه‌بالا
میانگین نرخ جریان ml/sec	طبیعی(γ_n)	۱/۳۳	۱/۲	۱/۵۵
	خشک حداکثر(γ_{dmax})	۰/۸۲	۱/۰۴	۰/۸۸
تیرگی آب خروجی	طبیعی(γ_n)	کدر و تیره	کدر و تیره	کدر و تیره
	خشک حداکثر(γ_{dmax})	کدر تا نسبتاً کدر	کدر تا نسبتاً کدر	نسبتاً کدر تا شفاف
قطر نهایی سوراخ mm	طبیعی(γ_n)	>۱/۵	>۱/۵	>۱/۵
	خشک حداکثر(γ_{dmax})	>۱/۵	>۱/۵	>۱/۵
درجه واگرایی در هد ۵۰ میلی‌متر		D_1	D_1	D_1

طبق استاندارد D۴۶۴۷–۹۳، این آزمایش روی خاک‌هایی صورت می‌گیرد که ذرات ریزتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر آن‌ها، باید کم‌تر از ۱۲ درصد باشد و یا دامنهٔ خمیری آن‌ها کم‌تر یا مساوی ٤ باشد [۲۹]. این نوع خاک‌ها اغلب مقاومت کمی در مقابل فرسایش دارند و دیواره سوراخ در اثر اشباع شدن به‌سرعت ریزش می‌کند و راه سوراخ بسته می‌شود. در نتیجه آزمایش ممکن است چند بار تکرار شود. برای حل این مشکل نمونه با دو درصد رطوبت بهینه بیش‌تر بازسازی شد و به‌مدت ۲٤ ساعت در ظرف دربسته نگه‌داری شد.

نانورس استفاده شده در این تحقیق از شرکت سیگما آلدریچ[1] آمریکا به‌نام نانورس مونت‌موریلونیت انتخاب شد و از نمایندهٔ داخلی آن، یعنی شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان خریداری شد. چگالی این محصول ۳۰۰ تا ۳۷۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و اندازهٔ ذرات آن بین ۱ تا ۲ نانومتر است. مساحت سطح ویژهٔ نانوذره حدود ۲۵۰ مترمربع در هر گرم است. رنگ آن در نور معمولی و رطوبت ۱ تا ۲ درصد، زرد تا زرد نخودی است (جدول ٤). ساختار ورقه‌ای واحدهای رسی آن در تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مشاهده می‌شود (شکل ۱۰).

اکسیدهای اصلی تشکیل‌دهندهٔ نانورس استفاده شده، سه اکسید سیلیسیم، آلومینیم و آهن هستند. ترکیب شیمیایی آن نزدیک به ترکیب شیمیایی لس‌های بررسی شده است، به‌همین دلیل هیچ واکنش شیمیایی در تیمارهای تهیه شده، انتظار نمی‌رود. هرگونه تغییر در رفتار نمونه‌های ساخته شده قاعدتاً فیزیکی است، فقط مقدار CaO لس‌های استان خیلی بیش‌تر از

1. Sigma Aldrich

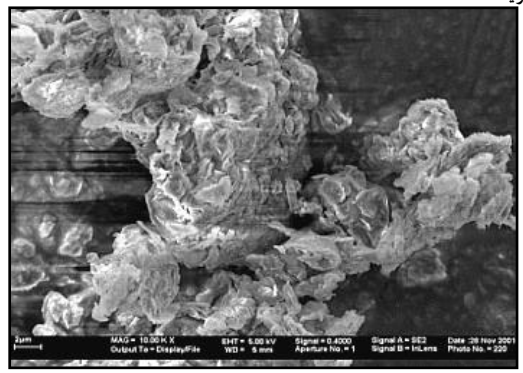
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

نانورس است (شکل ۱۱).

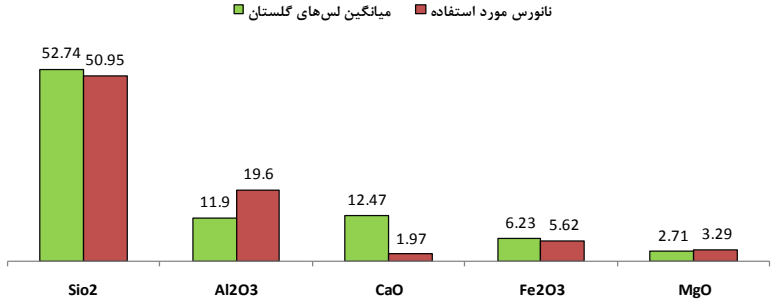
جدول ٤. مشخصات فیزیکی نانورس استفاده شده در تحقیق*

ویژگی‌ها	واحد سنجش	مقدار
نام علمی	کانی رسی	مونت‌موریلونیت
وزن واحد حجم	Kg/m3	۳۰۰ تا ۳۷۰
اندازهٔ ذرات	nm	۱ تا ۲
مساحت سطح ویژه	m2/gr	۲۷۰-۲۲۰
مقدار هدایت الکتریکی	MV	۲۵
ضریب تبادل یونی (CEC)	Meg/100gr	٤٨
فاصله خالی بین ذرات	A°	٦٠
رنگ	-	زرد
رطوبت	٪	۱ تا ۲

***تهیه شده از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان، نمایندگی محصولات شرکت سیگما آلدریچ آمریکا**



شکل ۱۰. تصویر پردازش میکروسکوپ الکترونی (SEM) از نانورس استفاده شده



شکل ۱۱. مقایسهٔ درصد اکسیدهای نانورس استفاده شده با میانگین ترکیب لس‌های استان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

با توجه به این‌که سطح ویژهٔ نانورس زیاد است و این خاصیت می‌تواند به‌عنوان پوششی چسبنده کل سطح دانه‌های خاک را فرا گیرد و چسبندگی خاک را افزایش دهد؛ در عمل روش اختلاط یکی از مهم‌ترین گام‌ها در بررسی اثر نانورس بر تثبیت خاک است. امروزه روش‌های گوناگونی برای اختلاط مواد وجود دارد. روش هم‌زن دستی و برقی، آسیاب گلوله‌ای و روش اشعهٔ مافوق صوت از روش‌های مرسوم است. در نسبت‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ٤ و ٥ درصد وزنی از نانورس به چهار روش زیر نانورس با خاک‌های مناطق نمونه‌برداری مخلوط شدند:

روش A. اختلاط خاک لس + نانورس با تهیه گل همگن و هم‌زدن به‌وسیلهٔ هم‌زن برقی

روش B. اختلاط خاک لس + نانورس در رطوبت بهینه به‌روش ورزدادن با دست

روش C. اختلاط خاک لس + نانورس به‌صورت خمیر و هم‌زدن به‌وسیلهٔ هم‌زن دستی

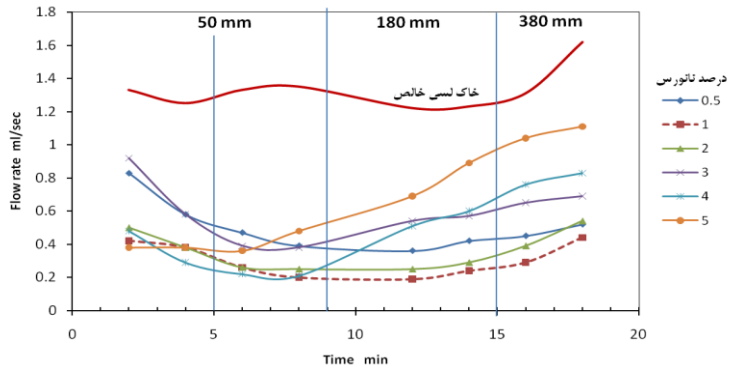
روش D. اختلاط خاک لس + نانورس به‌صورت پودر خشک و هم‌زدن به‌صورت ارتعاشی

نمونه‌ها پس از اختلاط با نانورس در روش مورد نظر (چهار روش A، B، C، D) ابتدا به‌مدت ٢٤ ساعت در ظروف پلاستیکی دربسته نگه‌داری شد. سپس نمونه‌های حاوی نانورس در قالب استوانه‌ای دستگاه پین‌هول با وزن واحد حجم خشک حداکثر و در رطوبت دو درصد بیش‌تر از رطوبت بهینه بازسازی شد و سوراخ در وسط آن ایجاد شد. این نمونه‌ها به‌مدت ٢٤ ساعت در همین وضعیت باقی ماند و سپس آزمایش انجام شد. آزمایش روی هر نمونه طبق استاندارد D٤٦٤٧-٩٣ انجام گرفت و در مدت زمان‌های دو دقیقه‌ای تا دقیقه ۱۸ قرائت دبی جریان انجام شد. در این مقاله فقط نمودارهای نرخ جریان نمونه‌های مراوه‌تپه برای مقایسه و تحلیل آورده شده است.

روش A: ابتدا مقدار مناسب خاک و نانورس با نسبت‌های مشخص باهم مخلوط شده و سپس با افزودن آب، نمونه به‌صورت یک گل روان درآمد تا بتوان با هم‌زن برقی آن‌ها را به‌طور کامل و به‌مدت ٥ تا ۱۰ دقیقه مخلوط کرد. سپس نمونه‌ها در داخل گرم‌خانه گذاشته شده تا کاملاً خشک شوند. پس از خشک شدن، نمونه پودر شد و با رطوبت و دانسیته مورد نظر برای قرارگیری در قالب دستگاه پین‌هول آماده شد و آزمایش انجام شد (شکل ۱۲). در این روش فرض بر این است که نانورس در محیط سیالی مثل آب به‌راحتی می‌تواند حرکت

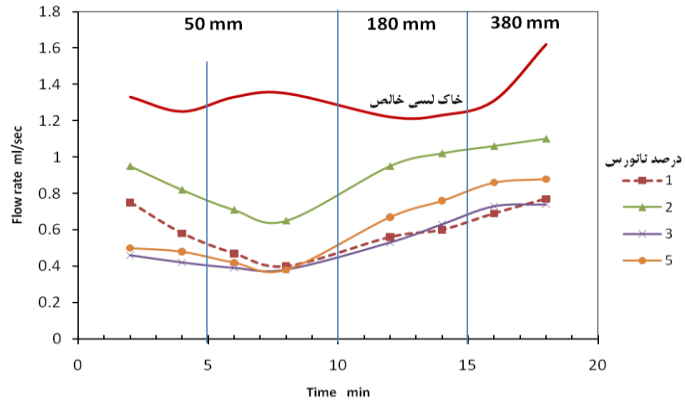
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

کند و در اثر نیروی گریز از مرکز (هم‌زن برقی) از هم جدا شده و به سطح ذرات خاک بچسبد.



شکل۱۲ . نتایج تغییرات نرخ جریان در آزمایش پین‌هول بر روی اختلاط خاک لس مراوه تپه با نانورس به‌روش تهیه گل همگن به‌وسیلهٔ هم‌زن برقی (روش A)

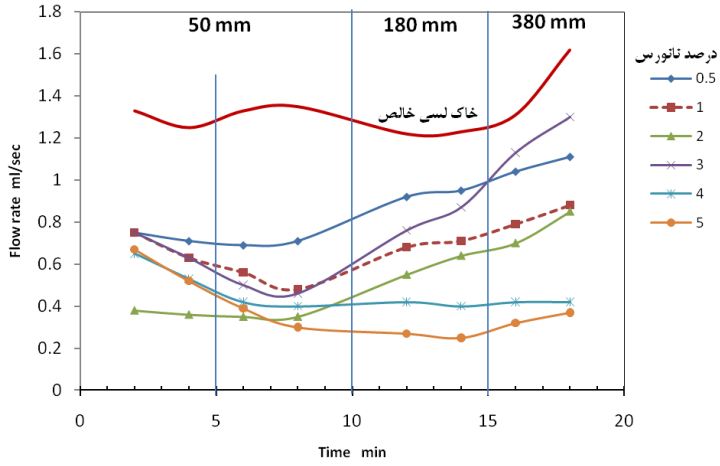
روش B: خاک با نانورس در رطوبت بهینه‌ای که از طریق آزمایش تراکم پروکتور استاندارد به‌دست آمده بود، کاملاً مخلوط شد و یک ترکیب همگن با ورزدادن به‌وجود آمد. سپس تحت آزمون پین هول قرار گرفت (شکل ۱۳). در این روش اختلاط، خاک تا بیش از ۲ درصد رطوبت بهینه مرطوب شد و پس از همگن شدن رطوبت، پودر نانورس به‌مقدار وزنی مورد نظر به آن اضافه شد، حین اضافه شدن نانورس، با دست به‌طور کامل ورز داده شد تا به‌صورت همگن درآید.



شکل ۱۳. نتایج تغییرات نرخ جریان در آزمایش پین‌هول روی اختلاط خاک لسی مراوه‌تپه با نانورس در رطوبت بهینه به‌وسیلهٔ ورزدادن با دست (روش B)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

روش C: برای تهیهٔ خمیری از خاک ابتدا آب به‌مقدار کافی به خاک اضافه شد و با کاردک و به‌صورت دستی مخلوط شد و به‌مدت ٢٤ ساعت درون پلاستیک دوجداره قرار گرفت تا رطوبت آن همگن شود. سپس به خمیر تهیه شده، نانورس اضافه شد و با کاردک کاملاً مخلوط شد تا نانورس با خمیر کاملاً ترکیب شود. این عمل حدود ۱۰ تا ۱۵ دقیقه به طول انجامید. سپس نمونه داخل گرمخانه گذاشته شد تا خشک شود. بعد از آن خاک به پودر تبدیل شد و با دانسیته مورد نظر داخل قالب دستگاه پین‌هول بازسازی شد و آزمایش در هدهای مختلف انجام شد (شکل ١٤).

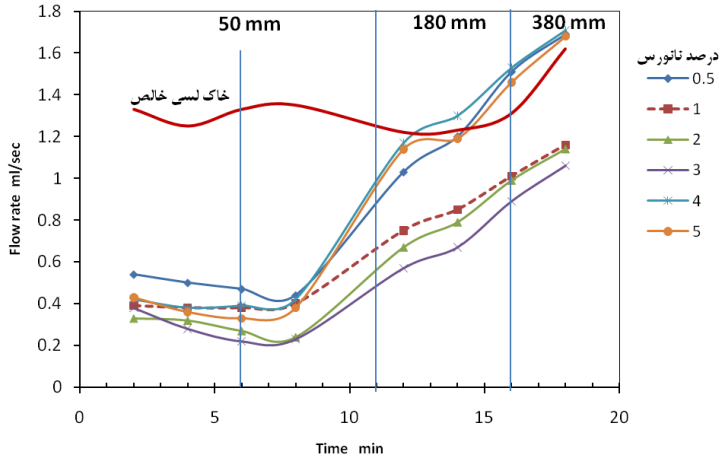


شکل١٤. نتایج تغییرات نرخ جریان در آزمایش پین‌هول روی اختلاط خاک لسی مراوه تپه با نانورس به‌صورت خمیر به‌وسیلهٔ هم‌زن دستی (روش C)

روش D: خاک و نانورس به‌همراه ساچمه‌ها در قوطی‌های دربسته قرار گرفتند. برای این‌که ذرات خاک به‌هم نچسبند از تعدادی ساچمه فلزی استفاده شد. سپس درون دستگاه لرزاننده (شیکر) به‌مدت ۱۰ دقیقه، تحت ارتعاش قرار گرفته و کاملاً مخلوط شدند. پس از ٢٤ ساعت، خاک مخلوط با دانسیته مورد نظر داخل قالب دستگاه پین‌هول بازسازی شد و آزمایش در هدهای مختلف انجام شد (شکل ۱۵). مشابه همین روش خالید و همکاران (۲۰۱۵)، نمونه‌ای از خاک رس را در فرآیند آسیاب گلوله‌ای با انرژی بالا به ذرات در حد نانومتر در آوردند و سپس به خاک مورد نظر با درصد کم (۲ تا ٤ درصد) این نانوذرات را

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

اضافه کردند و نتایج ارزیابی ژئوتکنیکی آن‌ها نشان داد که مقاومت برشی خاک تقویت شد [۳۰]. این بدان معنی است که افزایش سطح ویژه به‌تنهایی باعث تغییر در ساختار خاک و بهبود خواص مهندسی آن می‌شود.



شکل ۱۵. نتایج تغییرات نرخ جریان در آزمایش پین‌هول روی اختلاط خاک لسی مراوه‌تپه با نانورس به‌صورت خشک ارتعاشی (روش D)

بحث و نتیجه‌گیری

شواهد صحرایی و نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی محققان نشان می‌دهد که خاک‌های مناطق نمونه‌برداری شده دارای خاصیت واگرایی هستند [۳]، [٤]، [٥]، [٦]، [٨]، [١٧] و [۳۱]. این تحقیق نیز واگرا بودن نمونه خاک‌ها را تایید کرده است. تراکم خاک باعث کاهش شدت واگرایی می‌شود و نرخ جریان را کم می‌کند، ولی تراکم نمی‌تواند واگرایی خاک را از بین ببرد. به‌طوری‌که میانگین کاهش نرخ جریان در نمونه‌های مراوه‌تپه، چشمه‌لی و بق‌قجه بالا به‌ترتیب ۳۹/٦، ۱۱ و ٤۱ درصد است (جدول ٥).

با افزودن نانورس نرخ جریان در آزمایش پین‌هول کاهش یافته و خاصیت واگرایی خاک از بین می‌رود. سه نمونه منتخب در تیمارهای مختلف، رفتارهای مشابهی در برابر جریان آب نشان دادند. در این تحقیق فقط نتایج اختلاط خاک لس مراوه‌تپه در نسبت‌های وزنی مختلف از نانورس مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد (جدول ٦).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

جدول ۵. اثر تراکم بر میزان و شدت واگرایی نمونه خاک‌های بررسی شده

نمونه‌های بررسی شده	وزن واحد حجم خاک	هد ۵۰ میلی‌متر		هد ۱۸۰ میلی‌متر	هد ۳۸۰ میلی‌متر	میانگین درصد کاهش نرخ جریان
		۰ تا ۵ میلی‌متر	۵ تا ۱۰ میلی‌متر	۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر	۱۵ تا ۲۰ میلی‌متر	
مراوه‌تپه	طبیعی	D_1	D_2	ND_3	ND_2	۳۹/۶
	حداکثر	D_1	افزایش هد	افزایش هد	ND_1	
چشمه‌لی	طبیعی	D_1	D_2	ND_3	ND_2	۱۱
	حداکثر	D_1	ND_4	افزایش هد	ND_1	
بق‌قجه بالا	طبیعی	D_1	D_2	ND_3	ND_2	٤١
	حداکثر	افزایش هد	افزایش هد	افزایش هد	ND_1	

در اغلب نمونه‌ها، نرخ جریان تا حدود ۸ دقیقه در هد ۵۰ میلی‌متر روند کاهشی نشان می‌دهد و سپس روند آن افزایشی است. علت آن می‌تواند ریزش دیواره سوراخ باشد که منجر به مسدود شدن سوراخ می‌شود. در دقایق اولیه نمونه کامل اشباع نبوده، ولی به‌مرور که اشباع‌شدگی کل نمونه را فرا می‌گیرد، ریزش دیوارها بیش‌تر می‌شود. در هدهای ۱۸۰ و ۳۸۰ میلی‌متر، به‌دلیل این‌که مدت زمان پنج دقیقه بوده است نمونه کامل اشباع نمی‌شود و هم‌چنین هد بالاتر، سرعت آب را در سوراخ بیش‌تر کرده و اجازه مسدود شدن نمی‌دهد. بنابراین روند نرخ جریان افزایشی است.

جدول٦. درجه واگرایی تیمارهای آزمایشی در نسبت‌های مختلف از نانورس و روش‌های اختلاط نانورس با خاک لسی مراوه‌تپه

روش اختلاط نانورس / درصد نانورس		۰/۵	۱	۲	۳	٤	۵
مخلوط گل توسط همزن برقی	A	S	S	S	S	ND_1	ND_1
مخلوط با رطوبت بهینه	B	-	ND_1	D_1	S	-	ND_1
مخلوط خمیر توسط همزن برقی	C	ND_1	ND_1	ND_1	ND_1	S	S
مخلوط خاک خشک ارتعاشی	D	ND_3	ND_1	ND_1	ND_1	ND_3	ND_3

توضیح نشانه‌ها: S= دارای پتانسیل تورمی، ND_1= غیرواگرا، ND_3= بینابین و تا متوسط واگرا

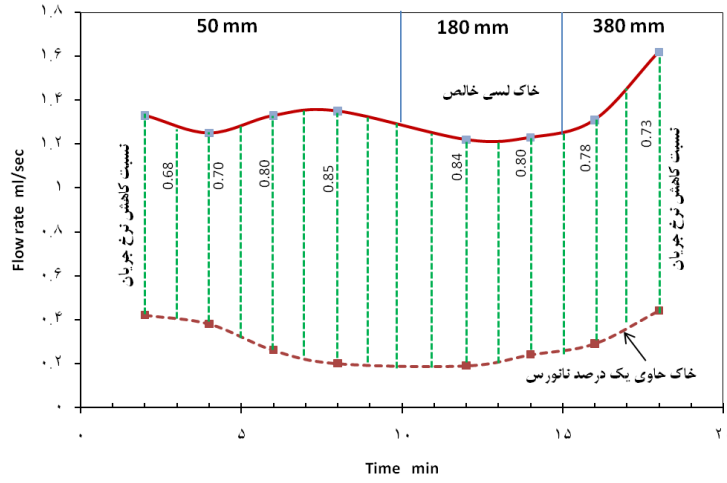
نتیجه انجام آزمایش روش A، نشان می‌دهد که در تمام نسبت‌های وزنی نانورس افزودنی، نرخ جریان نسبت به خاک لس خالص (فاقد نانورس) کاهش چشم‌گیری داشته و خاصیت واگرایی را از بین برده است. در نسبت ۱ درصد نانورس، کم‌ترین نرخ جریان به

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

وجود می‌آید، ولی در نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد نمودار جریان واگرایی در محدودهٔ پتانسیل تورم (S) قرار گرفته است و در درصدهای ٤ و ٥ خاک مخلوط شده با نانورس در رده ND_1 قرار گرفته و غیرواگرا است.

روش هم‌زدن دستی و یا برقی یکی از روش‌های رایج در اختلاط مواد است. طبرسا (۱۳۹٦) با افزودن نانورس با روش اختلاط به‌وسیلهٔ هم‌زن برقی و دستی اثر نانورس را بر رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم بررسی کرد و مشاهده کرد که نانورس تأثیر زیادی بر خواص خمیری، مقاومتی، تغییرشکل‌پذیری خاک نشان داده است [۳۱].

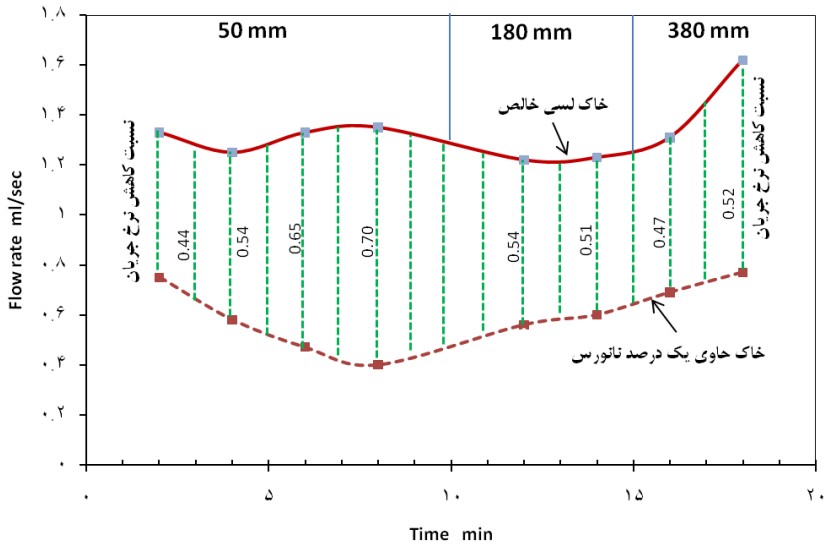
پتانسیل تورم نشان‌دهندهٔ بسته شدن سوراخ است و می‌تواند دلیلی بر تورم‌پذیری خاک مخلوط با کسب رطوبت باشد. قدرت تورمی نانورس به‌عنوان ماده چسباننده سطح دانه‌های لای تا نسبت ۳٪ باعث بسته شدن سوراخ شده، اما در درصدهای بیش‌تر از ۳، خاک در رده ND_1 (غیرواگرا) قرار گرفته و نشان‌دهندهٔ آن است که وقتی درصد نانورس در ترکیب زیاد می‌شود، نانورس به‌عنوان مادهٔ زمینه باقی می‌ماند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن ۱ درصد نانورس و اختلاط گل به‌روش هم‌زن برقی (روش A) می‌توان واگرایی خاک را به‌طور کامل از بین برد. اثر یک درصد نانورس، به‌طور میانگین باعث کاهش ۷۷ درصدی از نرخ جریان شد (شکل ١٦).



شکل١٦. تغییرات نسبت کاهش نرخ جریان در اختلاط به‌روش A با افزودن ۱ درصد نانورس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

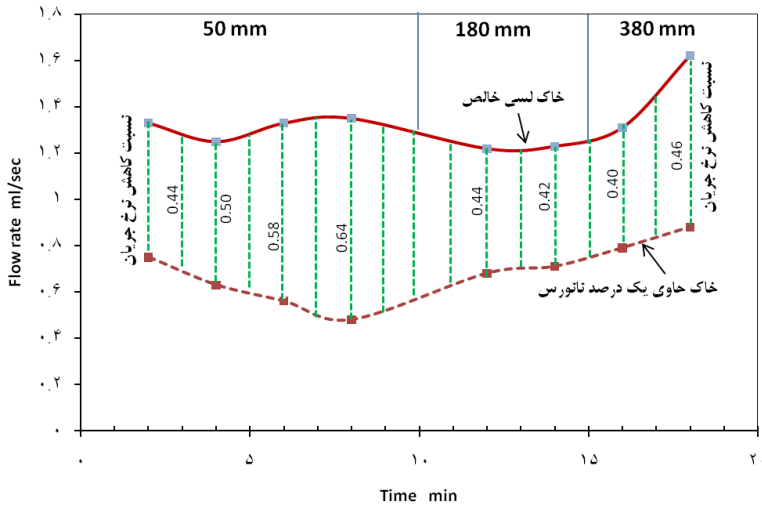
در روش B، در نسبت ۱٪ نانورس، خاک غیرواگرا (ND_1) تشخیص داده شد (جدول ٦). مقایسه نمودارهای تغییرات نرخ جریان روی لس خالص (فاقد نانورس) با تیمارهای دیگر نشان می‌دهد که در تمامی نسبت‌های وزنی شدت واگرایی کم شده و در اغلب حالت‌ها پتانسیل واگرایی از بین رفته است. در نسبت وزنی یک درصد، نانورس توانسته تا حداکثر ۷۰ درصد نرخ جریان را کاهش دهد و به‌طور میانگین ۵۵ درصد کاهش در نرخ جریان را نشان می‌دهد (شکل ۱۷).



شکل۱۷. تغییرات نسبت کاهش نرخ جریان در اختلاط به روش B با افزودن ۱ درصد نانورس

در روش C، تیمارهای تهیه شده از ۰/۵ تا ۳ درصد، غیرواگرا (ND_1) معرفی شدند و درصدهای ٤ و ٥ در محدودهٔ پتانسیل تورم قرار گرفتند (جدول ٦). احتمالاً نانورس باعث تورم سوراخ شده است. کم‌ترین نرخ جریان در نسبت‌های ٤ و ٥ بود، ولی در درصدهای ۱، ۲ و ۳ روند آزمایش مطلوب است. بنابراین اختلاط بهینه در این روش نیز ۱ درصد است. این درصد نانورس به‌طور میانگین باعث کاهش ٤٨ درصدی از نرخ جریان شد و حداکثر ٦٤ درصد نرخ جریان را کاهش داده است (شکل ۱۸).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]



شکل ۱۸. تغییرات نسبت کاهش نرخ جریان در اختلاط به روش C با افزودن ۱ درصد نانورس

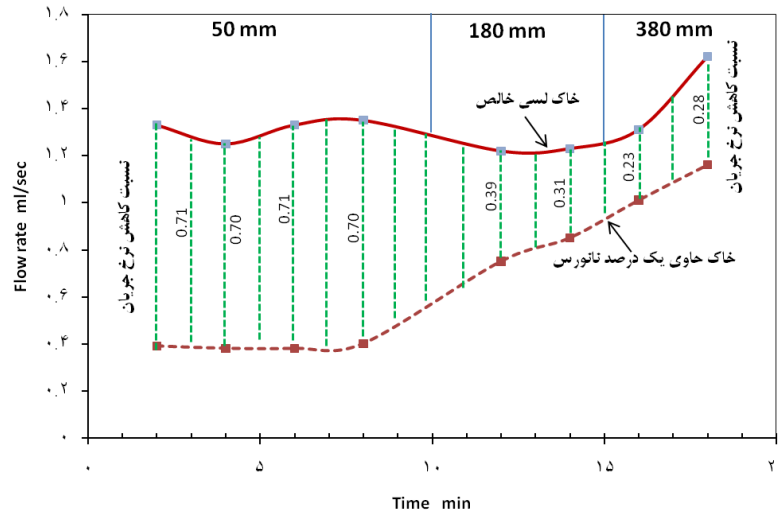
روش D، تیمارهای ۱، ۲ و ۳ درصد، غیرواگرا (ND_1) هستند. در تیمار ۰/۵ درصد، بینابین واگرا (ND_3) معرفی شد (جدول ٦). روند تغییرات نرخ جریان در تیمارهای ۱، ۲ و ۳ بهترین حالت را طی کرده و اختلاط بهینه در این روش نیز با ملاحظات اقتصادی ۱ درصد است. اما در تیمارهای ۰/۵، ٤ و ۵ درصد نانورس، واگرایی کاهش کم‌تری داشته و حتی در هدهای ۱۸۰ و ۳۸۰ میلی‌متر نرخ جریان بیش‌تری را نشان می‌دهد. اثر یک درصد نانورس، به‌طور میانگین باعث کاهش ۵۰ درصدی از نرخ جریان شد (شکل ۱۹).

حسینی و طبرسا (۲۰۱۵) با تأکید بر اهمیت ویژهٔ فرآیند اختلاط، در تحقیق خود، خاک مورد نظر را در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد خشک و سپس نمونه را پودر کرده و با فیبرهای پلی‌پروپیلن یک ترکیب همگن ساختند و سپس در طوبت بهینه نمونه را برای آزمایش بازسازی کردند [۳۲]. زیرا خاک خشک وقتی به پودر تبدیل شود نانوذرات سطح تماس بیش‌تری را دارد.

عباسی و فرجاد (۱۳۹٦) با استفاده از نانورس به کنترل واگرایی خاک پرداختند و اعلام کردند که با در نظر گرفتن سایر شرایط فنی و اقتصادی پروژه‌ها می‌توان از این مواد برای کنترل واگرایی خاک استفاده کرد. مدت زمان عمل‌آوری و حفظ شرایط تراکم تأثیر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

چشم گیری در نتایج آزمایش دارد. مدت زمان لازم برای تثبیت خاک بسته به‌میزان نانورس متفاوت است و برای مقدار نانورس کم‌تر از یک درصد، یک روز و برای مقادیر بیش‌تر از یک درصد حدود سه روز است. آنان در تحقیقات خود با ۰/۵ و ۱ درصد وزنی از نانورس، پتانسیل واگرایی را از شدیداً واگرا به نسبتاً واگرا کاهش دادند [۳۳].



شکل ۱۹. تغییرات نسبت کاهش نرخ جریان در اختلاط به‌روش D با افزودن ۱ درصد نانورس

فخری و همکاران (۱۳۹٤) با بیان این‌که نحوهٔ انجام و زمان اختلاط دارای اهمیت است ولی در آزمایشگاه شرایط اجرا در کارگاه را انتخاب کرده و ترکیب آب + خاک + نانورس را به‌مدت ٤٥ دقیقه با هم‌زن برقی در سرعت پایین مخلوط کرده و به‌مدت ١٦ ساعت آن را در ظرف دربسته نگه‌داری کرده و سپس آزمایش واگرایی را انجام دادند [۳٤]. بنابراین روش اختلاط و مدت عمل‌آوری ترکیب قبل از آزمایش در نتایج شدت واگرایی نقش مهمی دارد.

امروزه استفاده از نانومواد به‌ویژه نانورس در مهندسی ژئوتکنیک بسیار رایج شده است [۳٤]، [۱۱ تا ۲۲]، [۲۷]، [۳۰ تا ۳٤]. هدف از افزودن نانورس بهبود مشخصات مقاومتی خاک و به‌سازی زمین است. سطح ویژهٔ زیاد نانومواد و اثرگذاری مستقیم روی چسبندگی خاک باعث شده تا استفاده از آن در تثبیت خاک مرسوم شود ولی نحوهٔ اختلاط یکی از از مهم‌ترین گام‌ها است که بتواند بیش‌ترین تأثیر را روی نتایج اختلاط بگذارد. از سوی دیگر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

ملاحظات اقتصادی مصرف آن (به‌دلیل مقرون به صرفه نبودن) باعث شده تا کم‌تر در پروژه‌های تثبیت از آن استفاده شود؛ با این حال با درصد کم اختلاط (۰/۵ تا ۱ درصد) در بسیاری موارد استفاده از آن دارای توجیه اقتصادی می‌شود.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سه نمونه لسی اخذ شده، پتانسیل واگرایی داشته و در وزن واحد حجم حداکثر که در آزمایش تراکم پروکتور به‌دست آمد، نرخ جریان کم می‌شود ولی پتانسیل واگرایی از بین نمی‌رود. افزودن نانورس با هر نسبت وزنی باعث کاهش نرخ جریان و از بین بردن پتانسیل واگرایی خاک می‌شود، اما نسبت وزنی یک درصد نانورس از نظر فنی و اقتصادی مناسب‌تر است. با این نسبت وزنی، روش تهیه گل همگن به‌وسیلهٔ هم‌زن برقی (روش A) کم‌ترین نرخ جریان را به‌وجود می‌آورد از این‌رو، می‌توان گفت این روش مناسب‌تر است، ولی از لحاظ اجرایی کارایی ندارد و روش B (اختلاط خاک لس + نانورس در رطوبت بهینه به‌روش ورزدادن با دست) مناسب‌تر است.

تشکر و قدردانی

این مقاله قسمتی از پروژه تحقیقاتی است که با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه گلستان به شمارهٔ گزارش طرح ۹٤۱۲۷۲ و با عنوان «استفاده از دستگاه آزمون پین‌هول برای بررسی کاهش شدت واگرایی خاک‌های سیلتی با افزودن نانورس» در ۱۵۳امین جلسه مورخ ۱۳۹٦/۸/۱ شورای پژوهش و فناوری دانشگاه به‌تصویب رسید. از زحمات مدیران و کارکنان معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه گلستان و بخش‌های دیگر که به‌نحوی در انجام این طرح همکاری کردند، تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

۱. فاخر ع.، عسگری ف.، "تورم و واگرائی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک"، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۷۲).

۲. رحیمی ح.، داورزنی ح.، عباسی، ن.، "پدیدهٔ واگرائی فیزیکی در خاک‌های غیرچسبنده و معیارهای ارزیابی آن"، مجلهٔ علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۵، شمارهٔ ۳ (۱۳۸۳).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

۳. رضایی ح.،"شناسایی مخاطرات زمین در نهشته‌های لسی و روش‌های مقابله با آن"، دانشگاه گلستان (۱۳۹٤).

٤. لشکربلوکی س.، "مطالعهٔ تأثیر مواد افزودنی بر اصلاح خاک‌های واگرا با استفاده از آزمون پین‌هول (مطالعه موردی: خاک‌های لسی شرق استان گلستان)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی لقمان حکیم گلستان (۱۳۹۵).

5. Umesh T. S. Dinesh S. V, Sivapullaiah P. V., "Characterization of dispersive soils", Mater. Sci. Appl., vol. 2 (2011) 629.

٦. احمدی ح.،"ژئومورفولوژی کاربردی"، جلد۱ (چاپ سوم): فرسایش آبی، انتشارات دانشگاه تهران، تهران (۱۳۷۸).

7. Bell F. G., "Engineering Geology", Butterworth Heinemann, Oxford, UK,(2007) 581.

۸. رضایی ح.،"بررسی اثر تراکم دینامیکی و بارهای استاتیکی بر مقاومت برشی لس‌های استان گلستان"، رسالهٔ دکتری رشته زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۲).

9. Karstunen M., Leoni M., "Geotechnics of soft soils (Focus on ground improvement)", CRC Press, Taylor & Francis Group, (2009) 458.

۱۰. رضایی ح.، لشکری‌پور غ.ر.، رهنماراد ج.، پیرانداخ ر.،"ارزیابی لس‌های استان گلستان بر اساس معیارهای زمین‌شناسی مهندسی"، فصل‌نامهٔ زمین‌شناسی کاربردی ۷، شمارهٔ ۲۹(۱۳۹۳).

11. Taipodia J., Dutta J., Dey A. K., "Effect of nanoparticles on properties of soil", Proc of Indian Geotechnical Conference (2011).

12. Khalid N., Mukri M., Kamarudin F.,"Effect of nanoclay in soft soil stabilization", Springer Science Business Media Singapore, (2015) 905-914.

13. 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 Vol.39 (7) (2011) 605-611.

14. Iranpour B., Haddad A., "The influence nanomaterials on collapsible soil treatment", Engineering Geology Vol. 205 (2016) 40-53.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

۱۵. بهاری م.، شاه‌نظری ع.،"بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس"، مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی - علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شمارهٔ هفتاد و دوم (۱۳۹٤).

16. Baziar M. H., Ghazi H., Mirkazemi S. M.,"Effect of nanoclay on engineering properties of soil", Forth International Congress of Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, Iran (2010).

۱۷. طبرسا ع.ر.، رضایی ح.، نورزاد ع.، مازندرانی م.، کاوه ف.، حسینی س.ج.، "بررسی و امکان‌سنجی تثبیت خاک با استفاده از نانوتکنولوژی و ارائه راهکارهای کاربردی در اراضی زه‌دار گلستان"، شرکت آب منطقه‌ای گلستان (۱۳۹۵).

18. Arabani M., Haghani A. K., Mohammadzade sani A., Kamboozia N., "Use of Nanoclay for Improvement the Microstructure and Mechanical Properties of Soil Stabilized by Cement", Proceedings of the 4th International Conference on Nanostructures (2012).
19. Khalid N., Mukri M., Kamarudin F., "Effect of nanoclay in soft soil stabilization", Springer Science Business Media Singapore, (2015) 905-914.
20. Majeed Z. H., Taha M. R., Jawad I. T., "Stabilization of soft soil using nanomaterils", Research Journal of Appiled Science, Engineering and Technology, 8 (4) (2014) 503-509.
21. Taha M. R., Taha O. M. E., "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior", Journal of Nanoparticle Research 14 (10) (2012) 1-13.
22. Taipodia J., Dutta J., Dey A. K., "Effect of nanoparticles on properties of soil", Proc, of Indian Geotechnical Conference, December (2011).
23. Vakili A. H, Selamat M. R., Abdul Aziz H., Mojiri A., Ahmad Z., Safarzadeh M., "Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC", Geoderma 285 (2017) 270-279.
24. Turkoz M., Savas H., Acaz A., Tosun H., "The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics", Applied Clay Science 101 (2014) 1-9.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.6.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.411]

25. Pourakbar S., Asadi A., Huat B. K., Mohammad Hamed Fasihnikoutalab, M.H., "Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement", Transportation Geotechnics 3 (2015) 24-35.
26. Regelink I. C., "Natural nanoparticles in soils and their role in organic-mineral interactions and colloid-facilitated transport", PhD thesis, Wageningen University, Wageningen (2014) 222.
27. Majeed Z. H., Taha M. R, "A Review of Stabilization of Soils by using Nanomaterials", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7 (2) (2013) 576-581.
۲۸. حداد ح.، جاودانیان ح.، ابراهیم‌پور ف.،"شناسایی و تثبیت خاک‌های واگرا، مطالعه موردی: کانال انتقال آب سیمین دشت- گرمسار"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۱، شماره۱(۱۳۹۶).
29. ASTM., "Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the Pinhole test", ASTM designation D 4647-93 (1998).
30. Khalid N., Arshad M. F. M., Mukri M., Mohamad K., Kamarudin F., "Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization", Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE), Vol. 20 (3) (2015) 731-738.
۳۱. طبرسا ع.،"تاثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۱، شمارهٔ ۲ (۱۳۹۶).
32. Hosseini S. J., Tabarsa A., "Effect of adding nanoclay on the mechanical behaviour of fine-grained soil reinforced with polypropylene fibers", Journal of Structural Engineering and Geotechnics, Vol.5 (2) (2015) 59-67.
۳۳. عباسی ن.، فرجاد، آ.، "بررسی امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی"، مجلهٔ تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ٤٨، شمارهٔ ۳ (۱۳۹٦).
۳٤. فخری ز.، پورحسینی اردکانی ر.، عبادی ت.، "بهبود خواص هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانو رس"، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر- مهندسی عمران و محیط زیست، دورهٔ ٤٧ ، شمارهٔ ۳ (۱۳۹٤).