

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

حامد رضایی؛ دانشگاه گلستان، گروه زمین‌شناسی، گرگان

پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

تاریخ: دریافت ۹۶/۱۱/۰۸

### چکیده

از خاک‌های لسی در سه منطقه شرق و شمال شرق استان گلستان نمونه‌برداری شد و آزمایش پین‌هول روی نمونه‌های با وزن واحد حجم طبیعی ( $\gamma_n$ ) و حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ ) انجام شد و میزان واگرایی آن تعیین شد. پیشنهاد تحقیق، شواهد صحرایی و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی حکایت از واگرا بودن خاک مناطق نمونه‌برداری دارد. نتایج نشان می‌دهد، تراکم خاک باعث کاهش شدت واگرایی می‌شود و نرخ جریان را کم می‌کند، به طوری که نرخ جریان در نمونه مراوه‌تپه به میزان ۳۸ درصد، در نمونه چشمه‌لی به میزان ۱۳ درصد و در نمونه بق‌قجه‌بالا به میزان ۴۳ 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. به منظور بررسی اثر نانورس روی شدت و کاهش خاصیت واگرایی خاک با نسبت‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ 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 و اگر 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 تهیه 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 به صورت خمیر به وسیله هم‌زن دستی انجام شد. در روش D، اختلاط خاک لس با نانورس به صورت خشک ارتعاشی به وسیله لرزاننده الک دانه‌بندی انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که، نسبت وزنی یک درصد نانورس از نظر فنی و اقتصادی

مناسب‌ترین نسبت اختلاط است. با این نسبت وزنی، روش تهیه گل همگن با هم‌زن برقی (روش A) کم‌ترین نرخ جریان را به وجود می‌آورد؛ به طوری که نرخ جریان از  $1/3$  میلی‌لیتر در ثانیه در خاک خالص به  $0/3$  میلی‌لیتر در ثانیه در خاک حاوی نانورس در حد  $50$  میلی‌متر کاهش می‌یابد. از این رو، می‌توان گفت این روش مناسب‌تر است ولی از لحاظ اجرایی کارایی ندارد و روش B مناسب‌تر است. در روش B نرخ جریان از  $1/3$  به  $0/55$  میلی‌لیتر در ثانیه در همین حد می‌رسد.

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

### مقدمه

پدیده واگرایی به علت انحلال برخی از یون‌ها در خاک‌های رسی و یا غلبه تنش برشی جریان عادی آب در خاک‌های غیرچسبنده به وجود 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 به تدریج گسترش می‌یابد، نقطه شروع می‌تواند حفره‌های حاصل از فعالیت جانوران، ترک‌های موجود و یا مسیر رشد ریشه گیاهان باشد [۳].

شواهد صحرائی فراوانی برای شناخت واگرایی خاک‌های لسی وجود دارد [۳]، [۴]، [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  $0/65$  تا  $0/75$  متر بر ثانیه است. به ازای هر مترمربع در هر سال  $2/5$  کیلوگرم از ذرات لس دچار فرسایش می‌شوند و حتی این مقدار ممکن است به  $10$  کیلوگرم برسد [۶]. در بررسی‌های صحرائی با توجه به پارامترهای زیر می‌توان واگرابودن خاک را تشخیص داد: منشأ زمین‌شناسی خاک لس، ترکیب کانی‌شناسی، دانه‌بندی، الگوی زهکشی، شکستگی کلوخه‌ها، مورفولوژی خاص، نفوذپذیری زیاد، محدوده جغرافیایی (طول و عرض نسبت به منشأ)، رنگ خاک، رابطه شیب دامنه و فرسایش خاک، بارش، فرسایش‌پذیری ترک‌های ستونی، پاشنه‌شویی، گل‌آلودی رواناب و وجود بلورهای نمک در خاک‌های لسی [۳]، [۴].

نخستین بار میدلتون<sup>۱</sup> (۱۹۲۰) پدیده واگرایی را یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک‌های ریزدانه معرفی کرد. 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 نهشته بادی در اندازه 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 اندازه دانه‌های تشکیل‌دهنده 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 درجه 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 ناحیه 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]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. 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

غیرواگرا شدن خاک و تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک دارد [۲۳]، [۲۴]، [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 [۲۶]. 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].

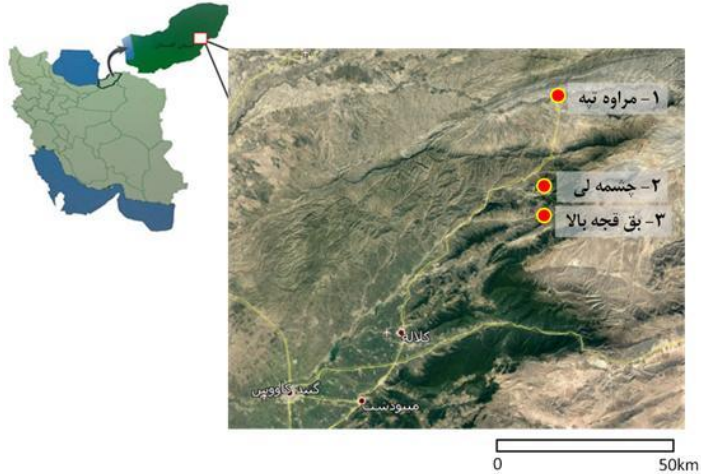
حداد و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقاتشان با بیان این‌که درصد اختلاط هر ماده شیمیایی با هر خاک دارای مقدار مشخصی است و نرخ اصلاح و آگرایی خاک با افزایش ماده افزودنی به یک حد ثابتی می‌رسد. آنان تأکید داشتند که با انجام یک نوع آزمایش و آگرایی به تنهایی نمی‌توان با قاطعیت درباره میزان و آگرایی خاک نتیجه‌گیری کرد [۲۸].

خاک انتخابی دارای خاصیت و آگرایی 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 به شدت و آگرایی 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 مسکن مهر شهر مراوه‌تپه، روستای چشمه‌لی و روستای بق‌قجه‌بالا گرفته شده است (شکل ۱). در این مناطق

منازل مسکونی و خطوط انتقال آب و گاز به دلیل 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 لای دار



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

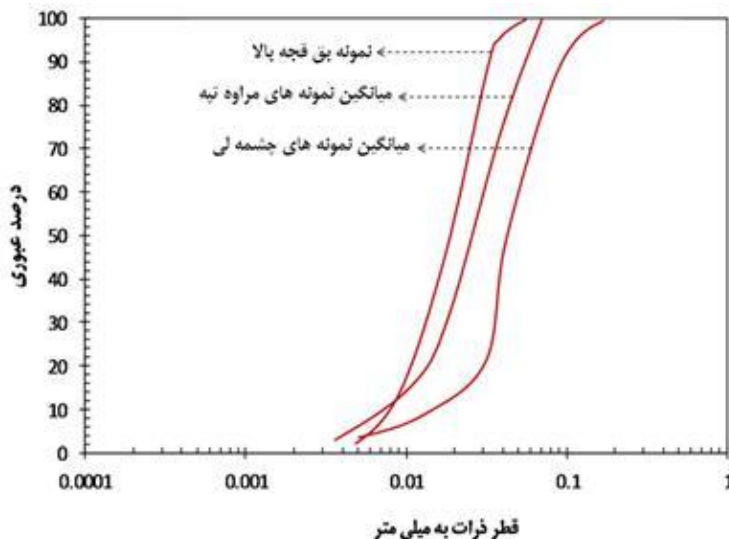
نمونه‌برداری به دو صورت کلوخه موم اندود و لوله‌های استوانه‌ای فلزی انجام شد. عمق نمونه‌برداری تابع پی ساختمان‌ها در سایت مسکن مهر و روستای چشمه‌لی است که از ۰/۵

تا دو متر متغیر است. در مسیر راه روستای بق قجه بالا از ترانشه راه نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه تحت آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود آتبرگ، تعیین وزن واحد حجم و چگالی قرار گرفت (جدول ۱).

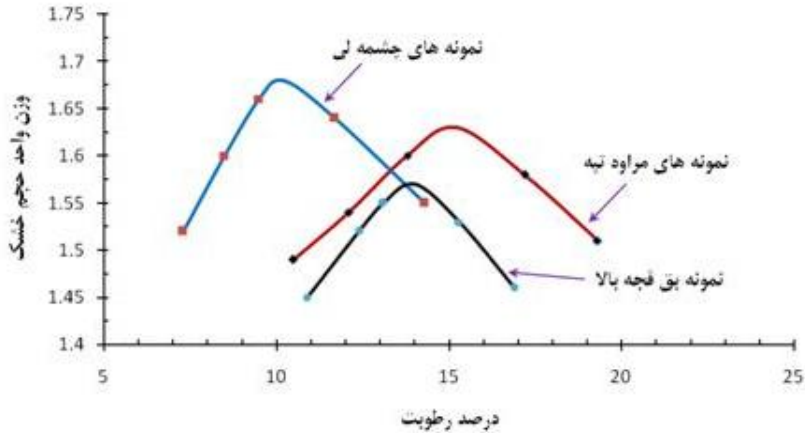
جدول ۱. نوع و تعداد آزمایش‌های انجام شده روی خاک‌های مناطق نمونه‌برداری

نام محل نمونه برداری	دانه‌بندی به روش هیدرومتری	تعیین وزن واحد حجم ( $\gamma_m$ )	چگالی ذرات خاک ( $G_s$ )	تراکم پروکتور معمولی	حدود آتبرگ	تعیین رطوبت خاک
مراوه‌تپه	۲	۲	۱	۱	۲	۲
چشمه‌لی	۳	۳	۱	۱	۳	۳
بق قجه‌بالا	۱	۲	۱	۱	۱	۱

آزمایش دانه‌بندی روی ۶ 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 اندازه دانه‌های ( $D_{50}$ ) نمونه‌های چشمه‌لی، مراوه‌تپه و بق قجه بالا به ترتیب ۴۲، ۲۵ و ۲۰ میکرون است. به منظور تعیین اثر تراکم بر شدت واگرایی، آزمایش تراکم استاندارد (T-99) انجام شد (شکل ۳).



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی نمونه‌های بررسی شده



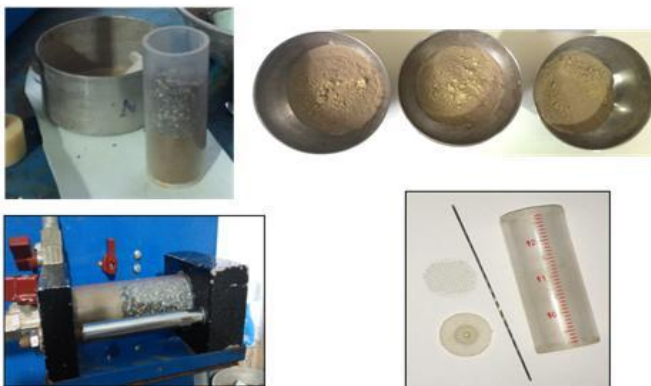
شکل ۴. منحنی‌های تراکم پروکتور استاندارد (معمولی)

با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و خواص خمیری نمونه‌های بررسی شده (جدول ۲)، همه نمونه‌ها از نظر اندازه، در حد لای و بر مبنای طبقه‌بندی متحد از نوع ML و CL-ML هستند.

جدول ۲. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های مناطق بررسی شده

نام محل نمونه برداری	دانسیتة طبیعی ( $\gamma_n$ )	رطوبت بهینه ( $\omega$ )	دانسیتة حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )	چگالی ذرات ( $G_s$ )	میزان تخلخل ( $n$ )	نشانه خمیری (PI)
	$g/cm^3$	%	$g/cm^3$	-	%	%
مراوده تپه	۱/۳۳	۱۵/۲	۱/۶۳	۲/۶۳	۵۰/۶	۵
چشمه لی	۱/۳۹۱	۱۰/۲	۱/۶۸	۲/۵۷	۵۴	۳
بق قجه بالا	۱/۲۶	۱۴	۱/۵۷	۲/۶۸	۴۶/۹	۴

نمونه‌های سه منطقه در وزن واحد حجم طبیعی ( $\gamma_n$ ) و وزن واحد حجم حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ ) با دو درصد بیش‌تر از رطوبت بهینه، در قالب دستگاه پین‌هول بازسازی شدند (شکل ۵). آزمایش پین‌هول به روش A استاندارد ۹۳-۶۴۷ D انجام شد [۲۹]. در این روش نرخ جریان (Q)، قطر نهایی سوراخ و تیرگی آب اندازه‌گیری شد و ارزیابی شد (شکل ۶). 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).



شکل ۵. مراحل آماده‌سازی و انجام آزمایش در دستگاه بین‌هول

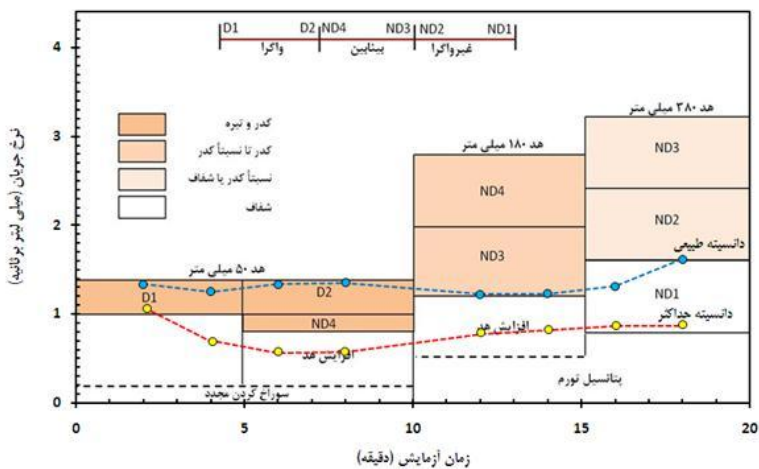


تغییر قطر سوراخ در پایان آزمایش در نمونه خاک منطقه بق قجه بالا یا دانسته حداکثر

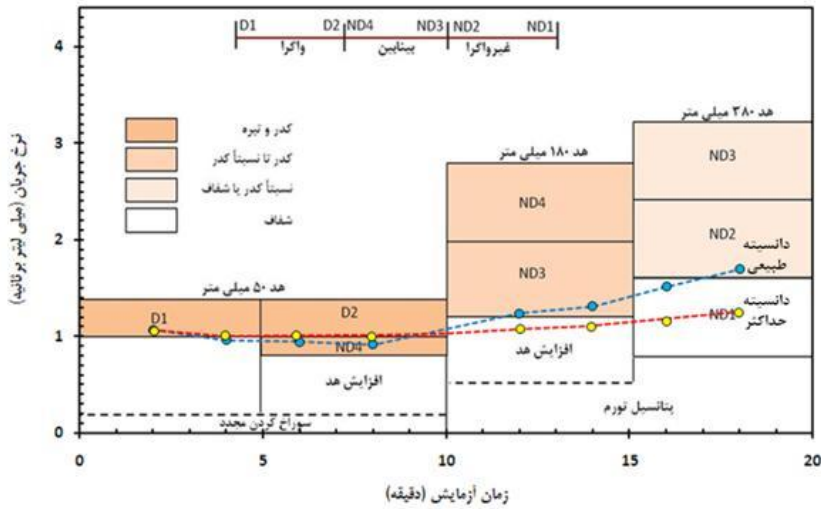


دبی خروجی خاک منطقه بق قجه بالا یا دانسته حداکثر (راست) و دانسته طبیعی (چپ)

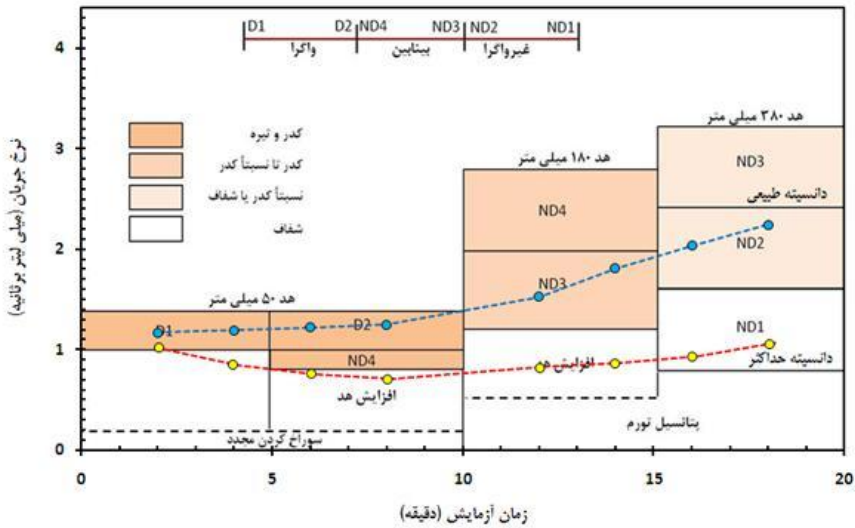
شکل ۶. تیرگی آب عبوری از نمونه و وضعیت سوراخ در انتهای آزمایش روی نمونه بق قجه بالا



شکل ۷. نتایج نرخ جریان در زمان‌های مختلف آزمایش روی خاک منطقه مراوه‌تپه



شکل ۸. نتایج جریان در زمان‌های مختلف آزمایش روی خاک منطقه چشمه‌لی



شکل ۹. نتایج جریان در زمان‌های مختلف آزمایش روی خاک منطقه بق قجه بالا

جدول ۳. معیارهای تعیین واگرایی نمونه‌ها در وزن واحد حجم طبیعی ( $\gamma_n$ ) و حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )

معیار	وزن واحد حجم طبیعی ( $\gamma_n$ )	نمونه مراوه‌تپه	نمونه چشمه‌لی	نمونه بق‌قجه‌بالا
میانگین نرخ جریان ml/sec	طبیعی ( $\gamma_n$ ) خشک حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )	۱/۳۳ ۰/۸۲	۱/۲ ۱/۰۴	۱/۵۵ ۰/۸۸
تیرگی آب خروجی	طبیعی ( $\gamma_n$ ) خشک حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )	کدر و تیره کدر تا نسبتاً کدر	کدر و تیره کدر تا نسبتاً کدر	کدر و تیره نسبتاً کدر تا شفاف
قطر نهایی سوراخ mm	طبیعی ( $\gamma_n$ ) خشک حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )	>۱/۵ >۱/۵	>۱/۵ >۱/۵	>۱/۵ >۱/۵
درجه واگرایی در هد ۵۰ میلی‌متر		D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>

طبق استاندارد ۹۳-۶۴۷D۴، این آزمایش روی خاک‌هایی صورت می‌گیرد که ذرات ریزتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر آن‌ها، باید کم‌تر از ۱۲ درصد باشد و یا دامنه خمیری آن‌ها کم‌تر یا مساوی ۴ باشد [۲۹]. این نوع خاک‌ها اغلب مقاومت کمی در مقابل فرسایش دارند و دیواره سوراخ در اثر اشباع شدن به سرعت 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 به مدت ۲۴ ساعت در ظرف دربسته نگاه‌داری شد.

نانورس استفاده شده در این تحقیق از شرکت سیگما آلدریج<sup>۱</sup> آمریکا به نام نانورس مونت‌موریلونیت انتخاب شد و از نماینده داخلی آن، یعنی شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان خریداری شد. چگالی این محصول ۳۰۰ تا ۳۷۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و اندازه ذرات آن بین ۱ تا ۲ نانومتر است. مساحت سطح ویژه 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 ۴). ساختار ورقه‌ای واحدهای رسی آن در تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مشاهده می‌شود (شکل ۱۰).

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

1. Sigma Aldrich

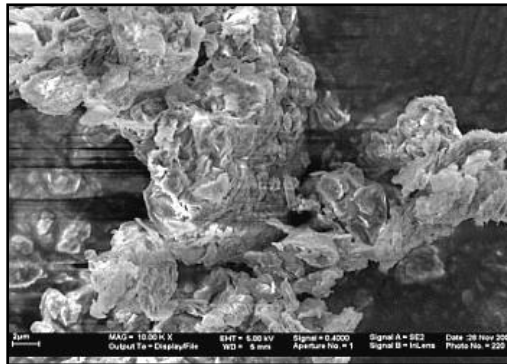
نانورس است (شکل ۱۱).

جدول ۴. مشخصات فیزیکی نانورس استفاده شده در تحقیق\*

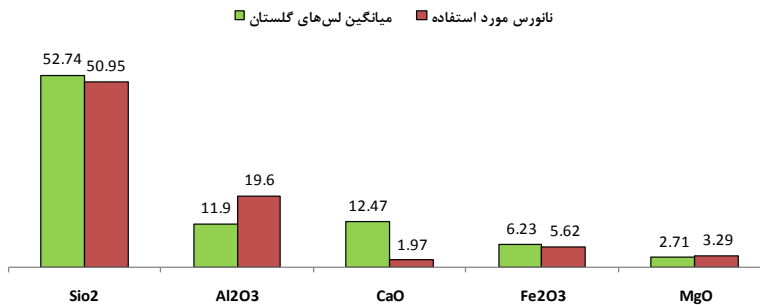
مقدار	واحد سنجش	ویژگی‌ها
مونت‌موریلونیت	کانی رسی	نام علمی
۳۷۰ تا ۳۰۰	Kg/m <sup>3</sup>	وزن واحد حجم
۲ تا ۱	nm	اندازه ذرات
۲۷۰-۲۲۰	m <sup>2</sup> /gr	مساحت سطح ویژه
۲۵	MV	مقدار هدایت الکتریکی
۴۸	Meg/100gr	ضریب تبادل یونی (CEC)
۶۰	A°	فاصله خالی بین ذرات
زرد	-	رنگ
۲ تا ۱	%	رطوبت

\*تهیه شده از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان، نمایندگی محصولات

شرکت سیگما آلد ریچ آمریکا



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



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

با توجه به این که سطح ویژه 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 اشعه مافوق صوت از روش‌های مرسوم است. در نسبت‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ 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 به‌وسیله هم‌زن برقی

**روش B.** اختلاط خاک لس + نانورس در رطوبت بهینه به‌روش ورز دادن با دست

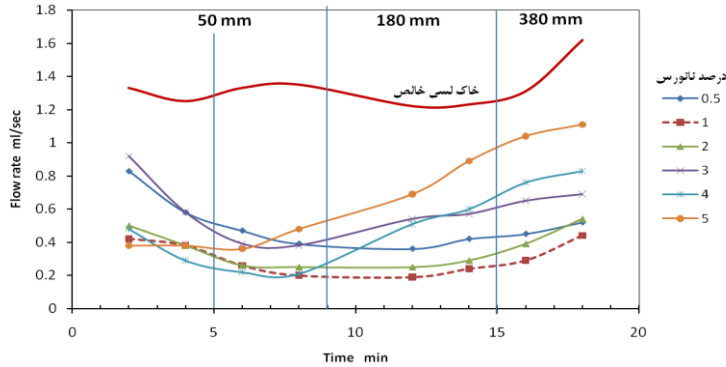
**روش C.** اختلاط خاک لس + نانورس به‌صورت خمیر و هم‌زدن به‌وسیله هم‌زن دستی

**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 ۲۴ ساعت در ظروف پلاستیکی در بسته 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 ۲۴ ساعت در همین وضعیت باقی ماند و سپس آزمایش انجام شد. آزمایش روی هر نمونه طبق استاندارد ۹۳-۶۴۷D 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.

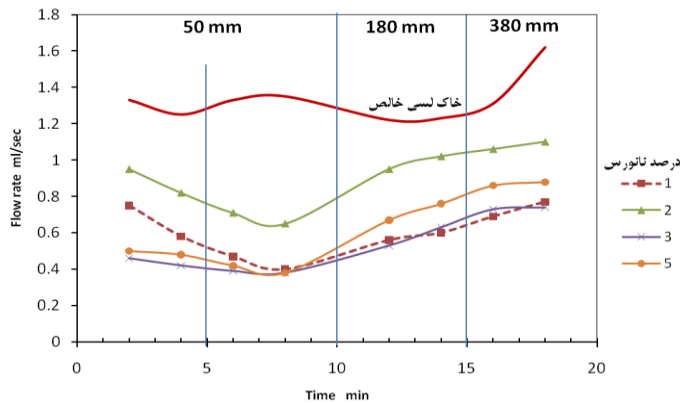
**روش A:** ابتدا مقدار مناسب خاک و نانورس با نسبت‌های مشخص باهم مخلوط شده و سپس با افزودن آب، نمونه به‌صورت یک گل روان درآمد تا بتوان با هم‌زن برقی آن‌ها را به‌طور کامل و به‌مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه مخلوط کرد. سپس نمونه‌ها در داخل گرم‌خانه گذاشته شده تا کاملاً خشک شوند. پس از خشک شدن، نمونه پودر شد و با رطوبت 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

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



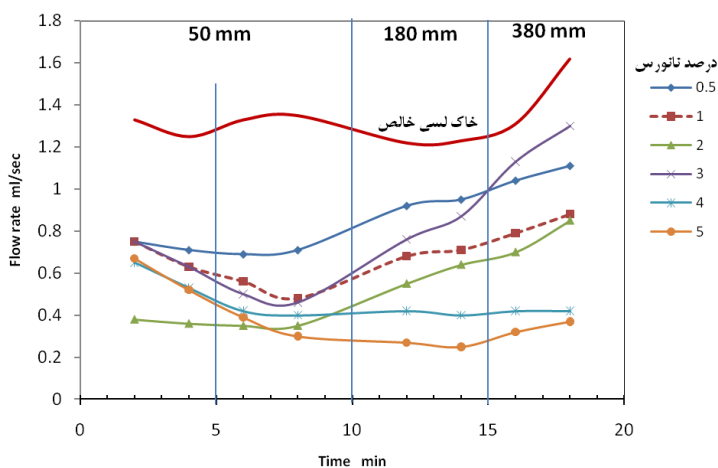
شکل ۱۲. نتایج تغییرات نرخ جریان در آزمایش پین هول بر روی اختلاط خاک لس مراوه تپه با نانورس به روش تهیه گل همگن به وسیله هم‌زن برقی (روش A)

روش B: خاک با نانورس در رطوبت بهینه‌ای که از طریق آزمایش تراکم پروکتور استاندارد به دست آمده بود، کاملاً مخلوط شد و یک ترکیب همگن با ورزدادن به وجود 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 به مقدار وزنی مورد نظر به آن اضافه شد، حین اضافه شدن نانورس، با دست به طور کامل ورز داده شد تا به صورت همگن درآید.



شکل ۱۳. نتایج تغییرات نرخ جریان در آزمایش پین هول روی اختلاط خاک لسی مراوه تپه با نانورس در رطوبت بهینه به وسیله ورزدادن با دست (روش B)

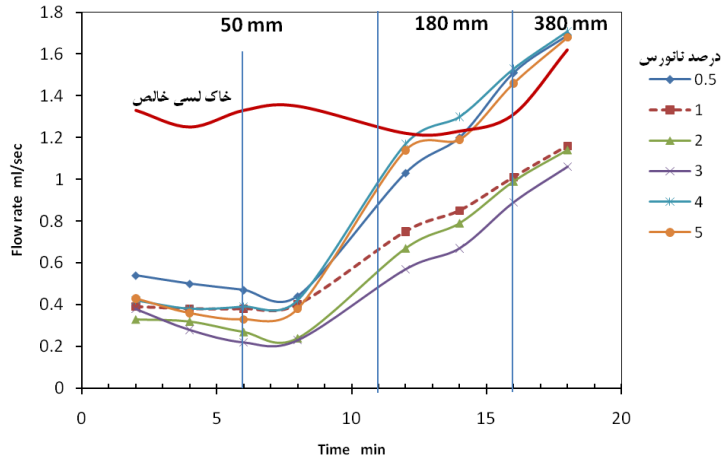
**روش C:** برای تهیه خمیری از خاک ابتدا آب به مقدار کافی به خاک اضافه شد و با کاردک و به صورت دستی مخلوط شد و به مدت ۲۴ ساعت درون پلاستیک دوجداره قرار گرفت تا رطوبت آن همگن شود. سپس به خمیر تهیه شده، نانورس اضافه شد و با کاردک کاملاً مخلوط شد تا نانورس با خمیر کاملاً ترکیب شود. این عمل حدود ۱۰ تا ۱۵ 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 ۱۴).



شکل ۱۴. نتایج تغییرات نرخ جریان در آزمایش پین‌هول روی اختلاط خاک لسی مراوه تپه با نانورس به صورت خمیر به وسیله هم‌زن دستی (روش C)

**روش D:** خاک و نانورس به همراه ساچمه‌ها در قوطی‌های دربسته قرار گرفتند. برای این‌که ذرات خاک به هم نچسبند از تعدادی ساچمه فلزی استفاده شد. سپس درون دستگاه لرزاننده (شیکر) به مدت ۱۰ دقیقه، تحت ارتعاش قرار گرفته و کاملاً مخلوط شدند. پس از ۲۴ 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 خالد 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 ۴ درصد) این نانوذرات را

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 بین‌هول روی اختلاط خاک لسی مراوه‌تپه با نانورس به‌صورت خشک ارتعاشی (روش D)

### بحث و نتیجه‌گیری

شواهد صحرائی و نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی محققان نشان می‌دهد که خاک‌های مناطق نمونه‌برداری شده دارای خاصیت واگرایی هستند [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۸]، [۱۷] 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 ۳۹/۶، ۱۱ و ۴۱ درصد است (جدول ۵).

با افزودن نانورس نرخ جریان در آزمایش بین‌هول 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 ۶).

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

میانگین درصد کاهش نرخ جریان	۳۸۰ هد میلی‌متر		۱۸۰ هد میلی‌متر		۵۰ هد میلی‌متر		وزن واحد حجم خاک	نمونه‌های بررسی شده
	۱۵ تا ۲۰	میلی‌متر	۱۰ تا ۱۵	میلی‌متر	۵ تا ۱۰	میلی‌متر		
۳۹/۶	ND <sub>2</sub>	ND <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	طبیعی	مراوه‌تپه		
	ND <sub>1</sub>	افزایش هد	افزایش هد	D <sub>1</sub>	حداکثر			
۱۱	ND <sub>2</sub>	ND <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	طبیعی	چشمه‌لی		
	ND <sub>1</sub>	افزایش هد	ND <sub>4</sub>	D <sub>1</sub>	حداکثر			
۴۱	ND <sub>2</sub>	ND <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	طبیعی	بق‌قجه بالا		
	ND <sub>1</sub>	افزایش هد	افزایش هد	افزایش هد	حداکثر			

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 هد های 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.

جدول ۶. درجه واگرایی تیمارهای آزمایشی در نسبت‌های مختلف از نانورس و روش‌های اختلاط نانورس با خاک لسی مراوه‌تپه

۵	۴	۳	۲	۱	۰/۵	درصد نانورس	
						روش اختلاط نانورس	درصد نانورس
ND <sub>1</sub>	ND <sub>1</sub>	S	S	S	S	A	مخلوط گل توسط همزن برقی
ND <sub>1</sub>	-	S	D <sub>1</sub>	ND <sub>1</sub>	-	B	مخلوط با رطوبت بهینه
S	S	ND <sub>1</sub>	ND <sub>1</sub>	ND <sub>1</sub>	ND <sub>1</sub>	C	مخلوط خمیر توسط همزن برقی
ND <sub>3</sub>	ND <sub>3</sub>	ND <sub>1</sub>	ND <sub>1</sub>	ND <sub>1</sub>	ND <sub>3</sub>	D	مخلوط خاک خشک ارتعاشی

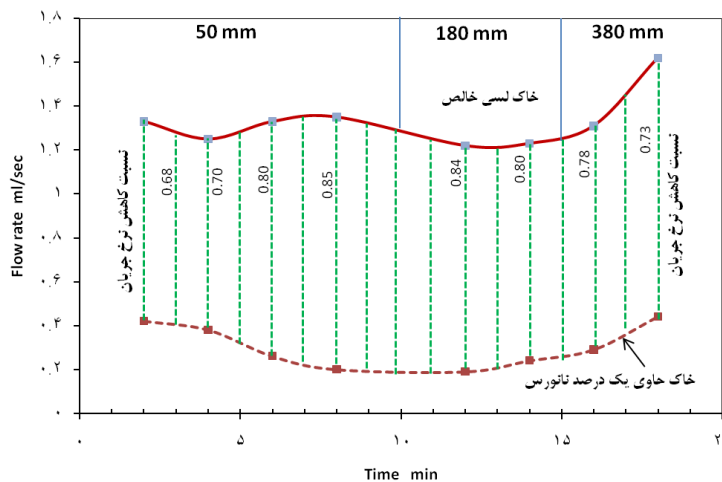
توضیح نشانه‌ها: S= دارای پتانسیل تورمی، ND<sub>1</sub>= غیرواگرا، ND<sub>3</sub>= بینابین و تا متوسط واگرا

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

وجود می‌آید، ولی در نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد نمودار جریان واگرایی در محدوده پتانسیل تورم (S) قرار گرفته است و در درصدهای ۴ و ۵ خاک مخلوط شده با نانورس در رده ND<sub>1</sub> قرار گرفته و غیرواگرا است.

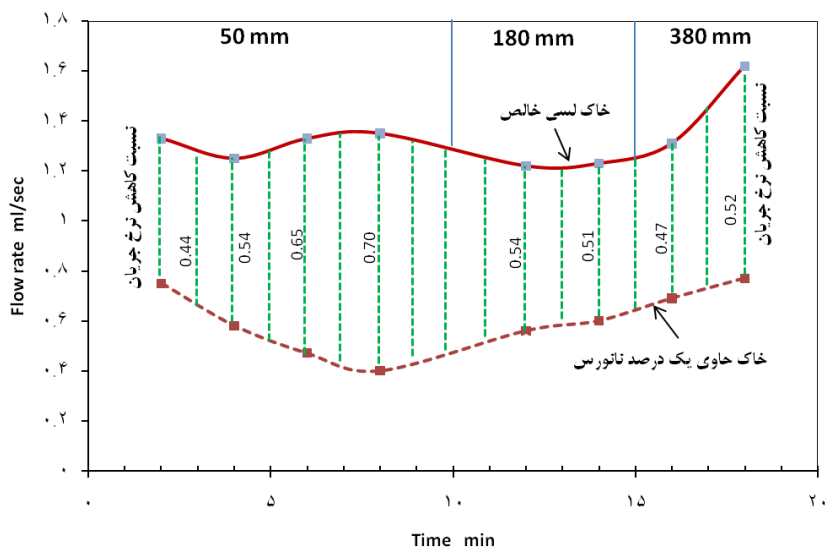
روش هم‌زدن دستی و یا برقی یکی از روش‌های رایج در اختلاط مواد است. طبرسا (۱۳۹۶) با افزودن نانورس با روش اختلاط به‌وسیله هم‌زن برقی و دستی اثر نانورس را بر رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم بررسی کرد و مشاهده کرد که نانورس تأثیر زیادی بر خواص خمیری، مقاومتی، تغییرشکل‌پذیری خاک نشان داده است [۳۱].

پتانسیل تورم نشان‌دهنده 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<sub>1</sub> (غیرواگرا) قرار گرفته و نشان‌دهنده آن است که وقتی درصد نانورس در ترکیب زیاد می‌شود، نانورس به‌عنوان ماده 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 ۱۶).

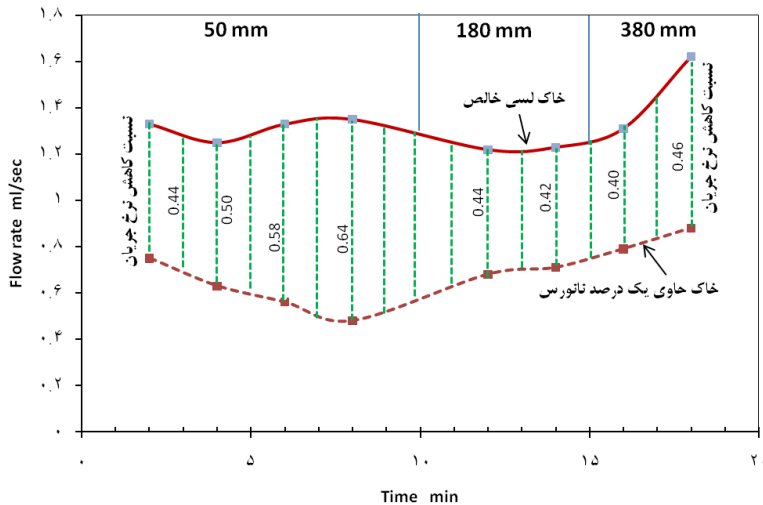


شکل ۱۶. تغییرات نسبت کاهش نرخ جریان در اختلاط به‌روش A با افزودن ۱ درصد نانورس

در روش B، در نسبت ۱٪ نانورس، خاک غیرواگرا ( $ND_1$ ) تشخیص داده شد (جدول ۶). 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).



شکل ۱۷. 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 ۴ و ۵ در محدوده پتانسیل تورم قرار گرفتند (جدول ۶). احتمالاً نانورس باعث تورم سوراخ شده است. کم‌ترین نرخ جریان در نسبت‌های ۴ و ۵ 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 ۴۸ درصدی از نرخ جریان شد و حداکثر ۶۴ درصد نرخ جریان را کاهش داده است (شکل ۱۸).

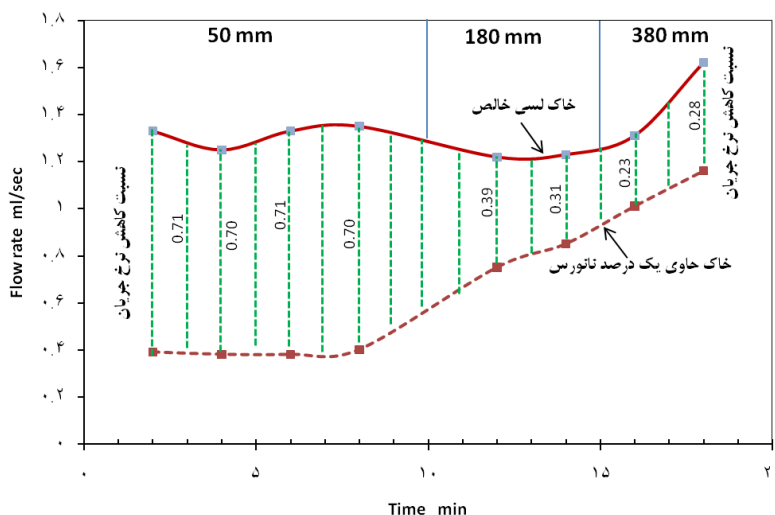


شکل ۱۸. تغییرات نسبت کاهش نرخ جریان در اختلاط به روش C با افزودن ۱ درصد نانورس روش D، تیمارهای ۱، ۲ و ۳ درصد، غیرواگرا (ND<sub>1</sub>) هستند. در تیمار ۰/۵ درصد، بینابین واگرا (ND<sub>3</sub>) معرفی شد (جدول ۶). روند تغییرات نرخ جریان در تیمارهای ۱، ۲ و ۳ بهترین حالت را طی کرده و اختلاط بهینه در این روش نیز با ملاحظات اقتصادی ۱ درصد است. اما در تیمارهای ۰/۵، ۴ 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 ویژه فرآیند اختلاط، در تحقیق خود، خاک مورد نظر را در دمای ۱۰۵ درجه 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 (۱۳۹۶) 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

چشم‌گیری در نتایج آزمایش دارد. مدت زمان لازم برای تثبیت خاک بسته به میزان 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 و اگر با نسبتاً و اگر کاهش دادند [۳۳].



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

فخری و همکاران (۱۳۹۴) با بیان این‌که نحوه انجام و زمان اختلاط دارای اهمیت است ولی در آزمایشگاه شرایط اجرا در کارگاه را انتخاب کرده و ترکیب آب + خاک + نانورس را به مدت ۴۵ دقیقه با هم‌زن برقی در سرعت پایین مخلوط کرده و به مدت ۱۶ ساعت آن را در ظرف دربسته نگهداری کرده و سپس آزمایش واگرایی را انجام دادند [۳۴]. 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 [۳۴]، [۱۱ تا ۲۲]، [۲۷]، [۳۰ تا ۳۴]. هدف از افزودن نانورس بهبود مشخصات مقاومتی خاک و به‌سازی زمین است. سطح ویژه زیاد نانومواد و اثرگذاری مستقیم روی چسبندگی خاک باعث شده تا استفاده از آن در تثبیت خاک مرسوم شود ولی نحوه اختلاط یکی از از مهم‌ترین گام‌ها است که بتواند بیش‌ترین تأثیر را روی نتایج اختلاط بگذارد. از سوی دیگر

ملاحظات اقتصادی مصرف آن (به دلیل 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 به دست 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 به وسیله هم‌زن برقی (روش A) کم‌ترین نرخ جریان را به وجود می‌آورد از این رو، می‌توان گفت این روش مناسب‌تر است، ولی از لحاظ اجرایی کارایی ندارد و روش B (اختلاط خاک لس + نانورس در رطوبت بهینه به روش 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 شماره گزارش طرح ۹۴۱۲۷۲ و با عنوان «استفاده از دستگاه آزمون پین‌هول برای بررسی کاهش شدت واگرایی خاک‌های سیلتی با افزودن نانورس» در ۱۵۳امین جلسه مورخ ۱۳۹۶/۸/۱ شورای پژوهش و فناوری دانشگاه به تصویب 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. فاخرع، عسگری ف.، "تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک"، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۷۲).
۲. رحیمی ح.، داورزنی ح.، عباسی، ن.، "پدیده واگرایی فیزیکی در خاک‌های غیرچسبنده و معیارهای ارزیابی آن"، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۵، شماره ۳ (۱۳۸۳).

۳. رضایی ح.، "شناسایی مخاطرات زمین در نهشته‌های لسی و روش‌های مقابله با آن"، دانشگاه گلستان (۱۳۹۴).
۴. لشکربلوکی س.، "مطالعه 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.
۶. احمدی ح.، "ژئومورفولوژی کاربردی"، جلد ۱ (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"، رساله 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.، لشکری پور غ. ر.، رهنما راد ج.، پیرانداخ ر.، "ارزیابی لس‌های استان گلستان بر اساس معیارهای زمین‌شناسی مهندسی"، فصل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی ۷، شماره 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.

۱۵. بهاری م.، شاه‌نظری ع.، "بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی - علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شماره هفتاد و دوم (۱۳۹۴).
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 nanomaterials", Research Journal of Applied 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.

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، شماره ۱ (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. طبرساع، "تاثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۱، شماره 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"، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، دوره ۴۸، شماره ۳ (۱۳۹۶).
۳۴. 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، دوره ۴۷، شماره ۳ (۱۳۹۴).