

# تأثیر افزودن نانورس در خاک رسی نازلو و ماسه‌ی فیروزکوه به منظور استفاده در آستر رسی

کاظم بدو\* (استاد)

سعید حسین‌زاده (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانورس در بهبود خصوصیات خاک رسی نازلو ارومیه و ماسه‌ی فیروزکوه بررسی شده است. نانورس باعث افزایش شاخص خمیری و رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی رس نازلو شده است. در ماسه، نانورس موجب افزایش اندک وزن مخصوص خشک بیشینه شده و نانورس نیز باعث کاهش ضریب نفوذپذیری هر دو خاک شده است. به طوری که در رس، ضریب نفوذپذیری خاک تا حد استاندارد برای آستر رسی کاهش یافته است. لیکن در ماسه، کاهش مذکور به حد استاندارد نرسیده است. نانورس تأثیر چندانی در ضریب انتشار مولکولی رس نازلو نگذاشته و این ضریب در حد استاندارد باقی مانده است. نتیجه‌ی پژوهش حاضر نشان داده است که افزودن نانورس اثر مثبت در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی رس نازلو می‌گذارد، به طوری که بتوان از آن برای ساخت آستر رسی مدفن زباله استفاده کرد. لیکن خصوصیات ماسه‌ی فیروزکوه را آن چنان تغییر نمی‌دهد که بتوان از آن به عنوان جایگزین خاک رسی در ساخت آستر استفاده کرد.

واژگان کلیدی: رس نازلو، ماسه‌ی فیروزکوه، نانورس، آستر رسی، تراکم، نفوذپذیری، انتشار مولکولی.

## ۱. مقدمه

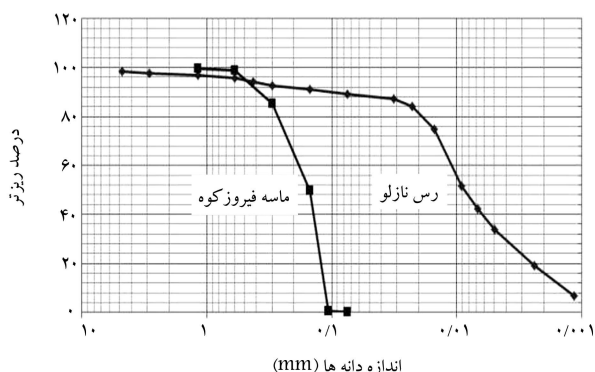
در کف مدفن‌های زباله که با اصول بهداشتی - مهندسی ساخته می‌شوند، از خاک رسی متراکم شده به عنوان آستر کم نفوذپذیر و مانع انتقال آلودگی استفاده می‌شود. [۱-۴] مطابق استانداردهای رایج، آستر رسی متراکم شده باید ضریب نفوذپذیری کمتر از  $1 \times 10^{-9} m/s$  با دست کم ۱۵٪ دانه‌های عبوری از الک شماره ۲۰ (کوچک تر از  $0.75 \text{ mm}$  میلی‌متر) و شاخص خمیری بیشتر از ۷٪ داشته باشد. [۳، ۲۳] در مناطقی ممکن است خاک‌های رسی فاقد استانداردهای ذکر شده باشند، لیکن می‌توان آن‌ها را با افزودن مصالح دیگر اصلاح کرد. [۷-۱۶] در مناطقی نیز ممکن است اصلاح خاک‌های رسی مقرون به صرفه نباشد و یا رس مناسب در دسترس نباشد؛ در چنین شرایطی می‌توان از اختلاط ماسه با مصالح ریزدانه‌ی دیگر مانند بنتونیت<sup>۱</sup> مصالحی با خصوصیات ژئوتکنیکی مشابه با رس تهیه کرد. [۱۷-۱۹] در پژوهشی در سال ۱۹۹۳، از نانوذرات سیلیکا<sup>۲</sup> برای افزایش مقاومت فشاری ماسه استفاده شده است. [۲۰] همچنین در برخی مطالعات از نانوذرات سیلیکا برای افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری خاک رسی، [۲۱] و نیز برای افزایش چسبندگی و کاهش پتانسیل روان‌گرایی ماسه استفاده شده است. [۲۲] عبور دادن کلئید سیلیکا از میان ستون‌های ماسه‌ی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۵/۱/۲۴.

و بررسی زمان‌های گیرش مختلف نشان داده است که با افزایش زمان عبور کلئید سیلیکا، مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. [۲۳، ۲۴] در پژوهش دیگری نیز با افزودن درصد‌های وزنی مختلف بنتونیت به ماسه، مصالح مخلوطی با خصوصیات شبیه خاک رسی تولید و خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح مخلوط را مطالعه کرده و نتایج آن نشان داده است که ترکیب ۲۰٪ بنتونیت و ۸۰٪ ماسه، بهینه‌ترین ترکیب برای جایگزین آستر عایق رسی در کف مدفن زباله است. [۲۵] همچنین در سال ۲۰۱۴، اثر میکروسیلیس<sup>۳</sup> در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس سیلتی بررسی شده و نتایج به دست آمده نشان داده است که افزودن ۵ تا ۳۰ درصد وزنی میکروسیلیس به خاک، موجب افزایش چسبندگی، شاخص خمیری، رطوبت بهینه، کاهش چگالی ویژه، وزن مخصوص خشک بیشینه، و ضریب نفوذپذیری می‌شود. [۲۶]

در گذشته چون توان تشخیص نانوذرات از ذرات رس وجود نداشته است، آن‌ها در خاک به صورت ذرات رس تعریف شده‌اند؛ لیکن امروزه با توجه به پیشرفت در علم نانو، امکان تفکیک ذرات ریزتر از ذرات رس فراهم شده است. در تعریف کلاسیک دانه‌های رس، ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرومتر، رس نامیده می‌شود. در سال ۲۰۰۷، محدوده‌ی جدیدی از اندازه‌ی ذرات ۲ تا ۰٫۱ میکرومتر (۲۰۰۰ تا ۱۰۰ نانومتر)



شکل ۱. منحنی‌های دانه‌بندی رس نازلو و ماسه‌ی فیروزکوه.

جدول ۱. مشخصات پایه‌ی مکانیک خاک رس نازلو و ماسه‌ی فیروزکوه.

پارامتر	رس نازلو	ماسه‌ی فیروزکوه
چگالی ویژه	۲٫۶۹	۲٫۶۵
حد روانی (%)	۳۹٫۳	-
حد خمیری (%)	۲۱٫۷	-
شاخص خمیری (%)	۱۷٫۶	-
درجه رطوبت بهینه (%)	۱۷٫۹	۱۲٫۲
وزن مخصوص خشک بهینه ( $kN/m^3$ )	۱۷٫۵	۱۶٫۳

جدول ۲. مشخصات فیزیکی - شیمیایی نانورس (برگرفته شده از داده‌های شرکت آنکای ترکیه).

نوع کانی	مونتوریلونایت
محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات (نانومتر)	۱-۲۰۰۰
سطح مخصوص ( $m^2/gr$ )	۷۵۰
محدوده‌ی وزن مخصوص ( $gr/cm^3$ )	۰٫۵-۰٫۷
ظرفیت تبادل کاتیونی ( $meq/100\ gr$ )	۴۸
رطوبت طبیعی (%)	۲-۴
هدایت الکتریکی (mv)	۲۵

در نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی فیروزکوه (شکل ۱) نیز خاک مذکور به صورت ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده نشان داده شده است. نانورس پودری به رنگ کرم متمایل به زرد است، که شرکت تولیدکننده، تصویر تهیه‌شده‌ی آن با میکروسکوپ الکترونی را در شکل ۲ ارائه کرده است.

## ۲.۲. روش‌ها

نانورس، وزن مخصوص پایینی دارد و با توجه به استفاده از درصد‌های وزنی پایین آن، امکان ایجاد یک محیط همگن به واسطه‌ی اختلاط نانورس با خاک به صورت اضافه کردن مستقیم پودر نانورس به خاک و هم زدن خاک وجود ندارد. همچنین به علت سطح واکنشی زیاد نانورس، حالت صفحه‌بی‌شکل و درهم پیچیدگی ذرات آن در حالت پودری، در هنگام استفاده باید یک نیروی اولیه‌ی خارجی، ذرات رس مذکور را که در کنار هم قرار گرفته‌اند و گاهی پیوندهای ضعیف واندروالسی<sup>۸</sup> تشکیل می‌دهند، از هم جدا و در محیط پخش کند؛ لیکن اختلاط مستقیم مواد پودری با خاک، نیروی اولیه‌ی عنوان شده را ایجاد نمی‌کند. لذا نانورس ابتدا با آبی که برای تراکم خاک در نظر گرفته شده بود، مخلوط شده و سوسپانسیون<sup>۹</sup> تهیه شده به تدریج

برای دانه‌های رس تعریف شده و ذرات با محدوده‌ی ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر، نانورس<sup>۴</sup> نامیده شده است.<sup>[۲۷]</sup> در پاره‌یی از متون علمی نیز از نانورس با عبارت نانوسول<sup>۵</sup> و نانوکور<sup>۶</sup> استفاده شده،<sup>[۲۸-۳۰]</sup> و نشان داده شده است که وجود نانو، ساختارهایی مثل نانوذرات آهن در خاک، حدود اتربرگ و خواص مقاومتی خاک‌ها را افزایش می‌دهد.<sup>[۲۸]</sup> همچنین در پژوهش دیگری به بررسی تأثیر نانوذرات در خصوصیات شاخص خاک پرداخته شده است.<sup>[۲۹]</sup> در سال ۲۰۰۹، نیز اندیس‌های شاخص خاک رسی آغشته به نانورس مطالعه و از ترکیب ۹۸٪ خاک و ۲٪ نانوذره از همان نوع خاک استفاده شده و خواص ۳ نمونه‌ی خاک در حالت طبیعی و در حالتی که با نانوذرات مخلوط شده‌اند، بررسی شده و نتایج مطالعه‌ی مذکور حاکی از بهبود اندیس‌های شاخص خاک در هنگام استفاده از نانورس بوده است.<sup>[۳۱]</sup>

همچنین در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۲، نشان داده شده است که با افزودن نانورس به خاک، خصوصیات تورمی و انقباضی خاک بهبود پیدا می‌کند.<sup>[۳۲]</sup> در بررسی تأثیر نانورس مونتوریلونایت<sup>۷</sup> اصلاح شده و بنتونیت در حدود اتربرگ خاک رس منابع قرصه‌ی استفاده‌شده در هسته‌ی سد ماملو (۱۱۱۲۰)، این نتایج به دست آمده است که نانورس بیشتر از بنتونیت می‌تواند اندیس‌های شاخص خاک را تحت تأثیر قرار دهد.<sup>[۳۳]</sup>

در پژوهش حاضر، درصد‌هایی از نانورس به خاک رس نازلوی شهرستان ارومیه و ماسه‌ی فیروزکوه افزوده شده و اثر نانورس در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مذکور بررسی شده است. هدف از بهبود خصوصیات رس نازلو، بررسی امکان استفاده از آن به‌عنوان مصالح آستر رسی در یک مدفن زباله‌ی مهندسی بوده و هدف از بهبود خصوصیات ماسه‌ی فیروزکوه بررسی امکان استفاده از ترکیب ماسه - نانورس به‌عنوان مصالح جایگزین در صورت عدم امکان دسترسی به خاک رسی است. در استانداردهای پایه‌یی تعریف شده برای انتخاب خاک مناسب برای ساخت آستر رسی مدفن زباله‌ی مهندسی، خصوصیات رطوبتی (حدود اتربرگ)، تراکمی و نفوذپذیری اهمیت ویژه‌یی دارند که در مطالعه‌ی حاضر بررسی قرار شده‌اند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. مواد

در پژوهش حاضر از خاک رس سیلتی منطقه‌ی نازلو واقع در کیلومتر ۱۷ شمال غرب شهرستان ارومیه استفاده شده است. ماسه‌ی مورد استفاده نیز از کارخانه‌ی تأمین ماسه‌ی ریخته‌گری فیروزکوه با کد ۱۶۱ تهیه شده است. آزمایش‌های پایه‌ی مکانیک خاک شامل دانه‌بندی با الک و هیدرومتری، حدود اتربرگ، آزمایش چگالی ویژه و آزمایش تراکم انجام شده است. منحنی دانه‌بندی خاک‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۱، نیز مشخصات فیزیکی نتیجه شده از آزمایش‌های پایه‌ی مکانیک روی رس نازلو و ماسه‌ی فیروزکوه را نشان می‌دهد. نانورس استفاده‌شده از تولیدات شرکت آنکای ترکیه است که در جدول ۲، مشخصات فیزیکی - شیمیایی آن ارائه شده است.

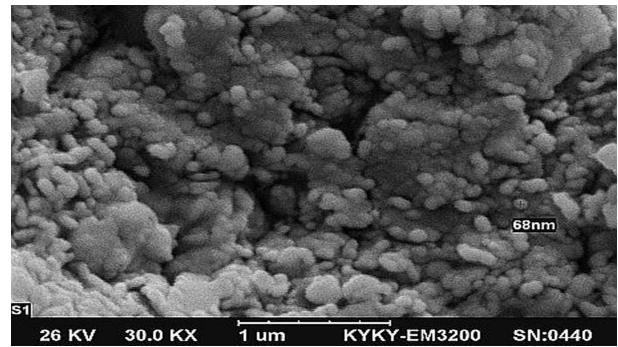
نتایج آزمایش دانه‌بندی خاک رسی نازلو (شکل ۱) نشان می‌دهد که خاک مذکور، ۱۶٪ رس، ۷۳٪ سیلت، ۸٪ ماسه و ۳٪ شن دارد؛ و طبق استاندارد، خاک سیلت رسی با اندکی ماسه و شن تعریف می‌شود. مطابق جدول ۱ و با استفاده از نمودار کاساگرانده، خاک رسی نازلو به دلیل داشتن حد روانی ۳۹٫۳٪ و شاخص خمیری ۱۷٫۶٪، رس با خاصیت خمیری کم (CL) تعریف می‌شود. در متن نوشتار حاضر، به اختصار از عبارت «رس نازلو» برای خاک مذکور استفاده شده است.



شکل ۳. تصویر آزمایش نفوذپذیری سه محوری روی رس نازلو.

شکل با قطر و ارتفاع  $10^\circ$  و  $11/7$  سانتی متر، در دستگاه نفوذپذیری آزمایش و ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها تعیین شده است. روی هر نمونه، ۲ آزمایش انجام شده است. گرادیان هیدرولیکی و فشار محفظه‌ی اعمال شده در تمام آزمایش‌ها به ترتیب برابر با  $30^\circ$  و  $100 \text{ kPa}$  بوده است. این مقادیر برای شبیه‌سازی شرایط صحرایی یک لایه خاک رسی کوبیده شده در داخل یک سد خاکی و یا یک آسترسی در کف یک مدفن زباله‌ی مهندسی در نظر گرفته شده است. شکل ۳، تصویر دستگاه آزمایش نفوذپذیری سه محوری را در حال انجام آزمایش هم‌زمان روی ۳ نمونه‌ی خاک نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش‌های نفوذپذیری روی ماسه‌ی خالص و ترکیب ماسه با نانورس، از روش آزمایش نفوذپذیری بار ثابت و بار افتان استفاده و میانگین نتایج به دست آمده به عنوان ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها انتخاب شده است. به دلیل ریزدانه بودن ماسه‌ی فیروزکوه و ریزدانه شدن بافت آن هنگام ترکیب با نانورس، دو روش آزمایش نفوذپذیری بار ثابت و بار افتان روی این خاک انجام شده است، تا اثر نوع آزمایش نفوذپذیری در نتایج مشخص شود. به منظور تطابق شرایط آزمایش‌ها با شرایط صحرایی آسترها و از آنجا که آسترها در مدفن‌های زباله معمولاً تحت گرادیان هیدرولیکی پایینی قرار می‌گیرند، آزمایش‌های نفوذپذیری نیز تحت گرادیان پایینی انجام شده‌اند تا امکان شسته شدن و ناپایداری (فرسایش) داخلی مصالح نانورس در مخلوط ماسه و نانورس به وجود نیاید. در هنگام آزمایش‌های نفوذپذیری نیز پدیده‌ی شسته شدن ریزدانه‌ها مشاهده نشده است.<sup>[۳۶]</sup> از آنجا که بافت ماسه‌ی فیروزکوه چه به صورت خالص و چه پس از اختلاط با نانورس در هنگام نصب در دستگاه نفوذپذیری سه محوری نمی‌تواند حفظ شود، لذا به دلیل مشکلات اجرایی، ترجیح داده شده است از دیگر روش‌های آزمایش نفوذپذیری استفاده شود.

از خاک‌های ریزدانه‌ی رسی در ساخت آسترهای رسی در کف مدفن‌های زباله‌ی مهندسی برای کاهش انتشار آلودگی ناشی از شیرابه‌ی زباله به لایه‌های خاک زیر مدفن استفاده می‌شود. در آسترهای رسی مکانیزم حرکتی غالب، انتشار مولکولی است. آزمایش‌های انتشار مولکولی برای ارزیابی اثر نانورس در ضریب انتشار مولکولی خاک رس نازلو انجام شده است. برای انجام آزمایش‌های انتشار مولکولی، از لوله‌های پولیکا با قطر داخلی ۴ اینچ ( $10/16 \text{ cm}$ ) استفاده شده است. ابتدا نانورس با درصد وزنی معین با آب مقطر مخلوط و سوسپانسیون به دست آمده به خاک رس نازلو اضافه شده است تا درجه‌ی رطوبتی حدود  $1/1$  بیش از درجه‌ی رطوبت بهینه داشته باشد. سپس خاک در داخل لوله‌ی پلیکا مطابق روش تراکم استاندارد در ۳ لایه کوبیده شده است، طوری که ارتفاع خاک حدود  $13 \text{ cm}$  بشود. سپس محلول کلرورسدیم با غلظت یون کلر حدود  $3800 \text{ mg/l}$  به سطح خاک در فضای خالی داخل لوله و با ارتفاع حدود  $6 \text{ cm}$  ریخته و آزمایش آغاز شده است. در طول هر آزمایش از محلول داخل مخزن نمونه برداری شده است، تا



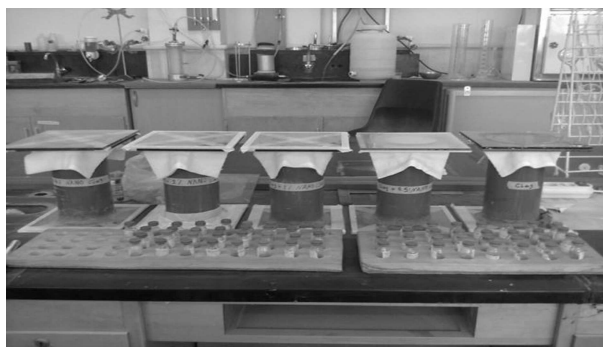
شکل ۲. تصویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی از نانورس (برگرفته شده از داده‌های شرکت آنکای ترکیه).

به خاک اضافه شده است. روش اختلاط نانورس با آب بدین صورت بوده است که ابتدا درصد وزنی مشخصی از نانورس با درصد معین وزنی رطوبت مورد نظر که باید به خاک افزوده شود، به مدت  $20^\circ$  دقیقه در دستگاه هم‌زن مخلوط شده و سپس از سوسپانسیون به دست آمده برای متراکم کردن خاک استفاده شده است. درصد‌های وزنی نانورس و آب براساس وزن خشک خاک تعیین شده‌اند. مدت زمان اختلاط نیز با توجه به آزمون‌های صورت گرفته برای به دست آوردن سوسپانسیون شفاف و یکنواخت تعیین شده است. درصد‌های وزنی نانورس در آزمایش‌های مخلوط رس نازلو با نانورس عبارت از  $0/5$ ،  $1$ ،  $2$ ،  $4$  درصد وزنی خاک رس نازلو بوده است. برای اختلاط ماسه‌ی فیروزکوه با نانورس از روش اختلاط مستقیم آن‌ها به صورت خشک به همراه اضافه کردن تدریجی آب در یک هم‌زن استفاده شده و درصد‌های وزنی نانورس عبارت از  $2$ ،  $4$  و  $8$  درصد وزنی ماسه‌ی فیروزکوه بوده است. آزمایش‌های پایه و تخصصی مکانیک خاک شامل: چگالی ویژه، حدود اتربرگ، تراکم پروکتور استاندارد، نفوذپذیری (سه محوری) و آزمایش انتشار مولکولی روی خاک رس نازلو به صورت خالص (فاقد نانورس) و پس از اختلاط با نانورس انجام و اثر نانورس در پارامترهای مذکور بررسی شده است. برای آسترهای رسی در مدفن‌های زباله، داشتن ضریب نفوذپذیری در حد استاندارد (حدود  $10^{-9} \text{ m/s}$  و کمتر) مهم‌ترین پارامتر ژئوتکنیکی و ضریب انتشار مولکولی در حد استاندارد (حدود  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  و کمتر برای یون کلر) مهم‌ترین پارامتر ژئوبیست محیطی محسوب می‌شوند. بدین منظور دو پارامتر مذکور، جزء پارامترهای مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر هستند. روی خاک ماسه‌ی فیروزکوه (به صورت خالص و پس از اختلاط با نانورس) آزمایش‌های تراکم و نفوذپذیری (بار ثابت و بار افتان) انجام و اثر نانورس بررسی شده است. آزمایش‌های چگالی ویژه، حدود اتربرگ و تراکم به ترتیب مطابق روش‌های استاندارد ASTM D-۸۵۴، ASTM D-۴۳۱۸ و ASTM D-۶۹۸ انجام شده‌اند. تمام آزمایش‌ها در درجه حرارت آزمایشگاه برابر با  $22 \pm 2^\circ \text{ C}$  انجام شده‌اند.

برای آزمایش‌های نفوذپذیری رس نازلو از دستگاه نفوذپذیری سه محوری با جداره‌ی انعطاف پذیر<sup>۱</sup> ساخت شرکت ELE انگلستان، موجود در آزمایشگاه پژوهشی ژئوتکنیک زیست محیطی دانشکده‌ی فنی دانشگاه ارومیه و مطابق با استاندارد ASTM D-۵۰۸۴ استفاده شده است. برای آگاهی از جزئیات مراحل آزمایش می‌توان به پژوهش‌های<sup>[۳۵،۳۴]</sup> مراجعه کرد. قبل از انجام آزمایش‌ها، رس نازلو از الک شماره‌ی ۴۰ عبور داده شده و برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های خاک رس نازلو فاقد نانورس و پس از اختلاط با نانورس در درصد‌های وزنی  $0/5$ ،  $1$ ،  $2$  و  $4$  ابتدا در محفظه‌ی تراکم با رطوبت  $1/1$  بیش از درصد رطوبت بهینه طبق روش توضیح داده شده‌ی اخیر تراکم شده‌اند. سپس نمونه‌های متراکم شده‌ی استوانه‌یی

جدول ۳. چگالی ویژه و حدود اتربرگ رس نازلو هنگام ترکیب با درصد های مختلف نانورس.

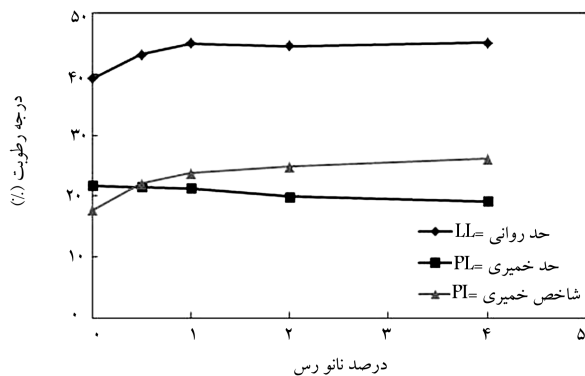
ویژگی	درصد نانورس در خاک رس نازلو				
	۰	۰٫۵	۱	۲	۴
چگالی ویژه	۲٫۶۹	۲٫۶۲	۲٫۶۲	۲٫۶۶	۲٫۶۷
حد روانی (%)	۳۹٫۳	۴۳٫۳	۴۵٫۱	۴۴٫۷	۴۵٫۲
حد خمیری (%)	۲۱٫۷	۲۱٫۵	۲۱٫۳	۱۹٫۹	۱۹٫۱
شاخص خمیری (%)	۱۷٫۶	۲۲	۲۳٫۸	۲۴٫۸	۲۶٫۱



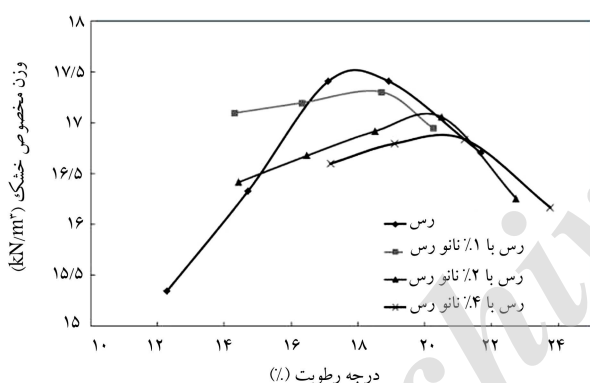
شکل ۴. آزمایش های انتشار مولکولی روی رس نازلو.

تغییرات غلظت یون کلر در مخزن در طول زمان مشخص شود. آزمایش ها حدود ۱۷ روز به طول انجامیده است. شکل ۴، تصویر آزمایش های انتشار مولکولی را نشان می دهد.

در پایان هر آزمایش، محلول مخزن تخلیه و نمونه ی خاک داخل لوله با فشار خارج و به ۷ قطعه بریده شده است. از هر قطعه، نمونه ی کوچکی برای تعیین درجه ی رطوبت برداشته و سپس آب حفره یی هر قطعه توسط دستگاه استحصال آب حفره یی خاک برای تعیین غلظت یون کلر در آب حفره یی استخراج شده است. محلول های نمونه برداری شده از مخزن و محلول های آب حفره یی توسط دستگاه یون متر آنالیز شده و غلظت یون کلر در محلول ها به دست آمده است. سپس نمودارهای مشاهده یی غلظت - زمان برای مشاهده یی روند تغییرات غلظت یون کلر در طول آزمایش در مخزن بالای خاک و نمودارهای مشاهده یی غلظت - عمق خاک برای مشاهده یی روند تغییرات غلظت در ارتفاع خاک در پایان آزمایش ها ترسیم شده اند. برای تعیین ضریب انتشار مولکولی یون کلر در نمونه ی خاک های آزمایش شده، از نرم افزار پولوت<sup>۱۱</sup> استفاده شده است.<sup>[۳۷]</sup> برای این منظور، داده های هندسی، فیزیکی و شیمیایی هر آزمایش به همراه یک ضریب انتشار مولکولی تخمینی به نرم افزار معرفی شده و داده های نظری غلظت - زمان و غلظت - ارتفاع خاک با استفاده از نرم افزار محاسبه شده اند. سپس با استفاده از داده های مذکور، نمودارهای نظری روی نمودارهای مشاهده یی ترسیم شده اند. با سعی و خطا و تکرار محاسبات، یک ضریب انتشار مولکولی که بهترین برازش را بین داده های مشاهده یی و نظری غلظت - زمان و غلظت - ارتفاع خاک نتیجه داده است، به عنوان ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک آزمایش شده انتخاب شده است. در ادامه، نتایج آزمایش های انتشار مولکولی روی نمونه های خاک رس نازلو، پس از اختلاط با نانورس ارائه و بحث شده است.



شکل ۵. نمودار تغییرات حدود اتربرگ رس نازلو پس از ترکیب با درصد های مختلف نانورس.



شکل ۶. منحنی های تراکم رس نازلو پس از ترکیب با درصد های مختلف نانورس.

این کاهش قابل ملاحظه نیست. کاهش اندک چگالی ویژه ی رس نازلو در اثر ترکیب با نانورس را به وزن مخصوص (یا چگالی) کم ذرات نانورس می توان نسبت داد که موجب کاهش اندک در چگالی ویژه ی ترکیبات می شود. همان طور که در جدول ۳ و شکل ۵ مشاهده می شود، افزودن نانورس به رس نازلو موجب افزایش حد روانی و کاهش حد خمیری رس نازلو می شود، لیکن اثر آن در افزایش حد روانی خاک بیشتر است. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، کانی غالب در نانورس، کانی مونتوریلونایت است که ذرات ریز و ساختمان کریستالی آن باعث می شود که کانی مذکور قدرت جذب آب بالا و در نتیجه حد روانی بالایی داشته باشد.<sup>[۳۸]</sup> بنابراین افزایش درصد نانورس در خاک، باعث افزایش حد روانی خاک می شود. مطابق نتایج نشان داده شده در جدول ۳، افزودن ۴٪ نانورس موجب افزایش ۴۸٪ شاخص خمیری رس نازلو شده است. شکل ۶، منحنی های تراکم رس نازلو بدون نانورس و با نانورس در درصد های اختلاط ۱، ۲، و ۴ را نشان می دهد. در جدول ۴،

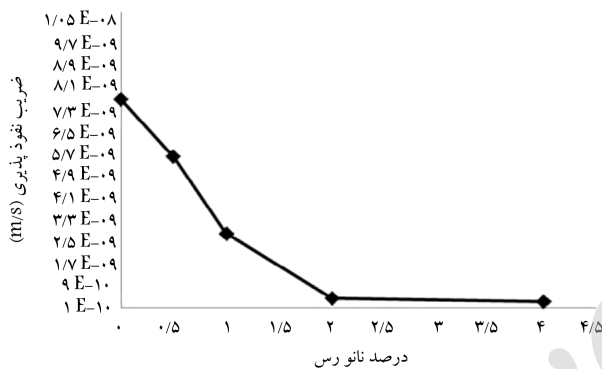
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. آزمایش های چگالی ویژه، حدود اتربرگ و تراکم

جدول ۳، نتایج آزمایش های چگالی ویژه و حدود اتربرگ روی رس نازلو به صورت خالص و آغشته به نانورس با درصد های مختلف را نشان می دهد، که در آن (و جدول هایی که در ادامه ارائه شده اند)، ترکیب ۰٪ نانورس، همان رس خالص نازلو است که فاقد نانورس است. شکل ۵، نیز روند تغییرات درجه های رطوبت حدی و شاخص خمیری ترکیبات را نسبت به درصد نانورس نشان می دهد. آزمایش های حد خمیری و حد روانی با دست کم ۳ بار تکرار برای هر کدام از درصد ها انجام و میانگین نتایج در جدول ۳ و شکل ۵ نشان داده شده اند. مطابق جدول ۳، افزودن نانورس به رس نازلو به طور میانگین موجب کاهش اندک چگالی ویژه خاک می شود، لیکن

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری روی رس نازلو پس از ترکیب با درصد‌های مختلف نانورس.

درصد نانورس	شماره‌ی نمونه	ضریب نفوذپذیری (m/s)
۰	۱	$8,27 \times 10^{-9}$
۰	۲	$7,23 \times 10^{-9}$
۰/۵	۱	$5,51 \times 10^{-9}$
۰/۵	۲	$5,78 \times 10^{-9}$
۱	۱	$2,29 \times 10^{-9}$
۱	۲	$3,36 \times 10^{-9}$
۲	۱	$4,38 \times 10^{-10}$
۲	۲	$4,21 \times 10^{-10}$
۴	۱	$3,28 \times 10^{-10}$
۴	۲	$3,01 \times 10^{-10}$



شکل ۸. منحنی تغییرات ضریب نفوذپذیری رس نازلو پس از ترکیب با درصد‌های مختلف نانورس.

استفاده شده است. برای مشاهده‌ی اثر نانورس، ضریب نفوذپذیری رس نازلو نسبت به درصد نانورس در شکل ۸ نشان داده شده است، که مطابق آن، افزایش درصد نانورس موجب کاهش ضریب نفوذپذیری رس نازلو می‌شود. افزودن ۲ و ۴ درصد نانورس به رس نازلو ضریب نفوذپذیری خاک را به ترتیب ۹۴٪ و ۹۶٪ نسبت به رس خالص کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای کاهش ضریب نفوذپذیری رس نازلو، افزودن ۲٪ نانورس کافی است و استفاده از درصد‌های بیشتر، کاهش زیادی در ضریب نفوذپذیری ایجاد نمی‌کند.

### ۲.۲.۳. آزمایش‌های نفوذپذیری روی ماسه‌ی فیروزکوه

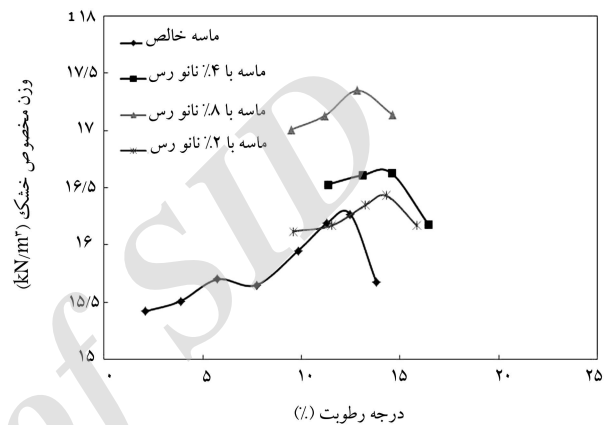
جدول ۷، نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری به روش‌های بار ثابت و بارافتان روی ماسه‌ی فیروزکوه را نشان می‌دهد. در شکل ۹، نیز نتایج به صورت نمودار نشان داده شده است. میانگین نتایج نفوذپذیری به دو روش ذکر شده نیز در جدول ۷ و شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشهود است، مقادیر به دست آمده از روش بارافتان اندکی بیشتر از روش بار ثابت است، لیکن اختلاف نتایج، قابل ملاحظه نیست و از هر دو روش نفوذپذیری مذکور می‌توان استفاده کرد. اگر مقادیر میانگین استفاده شوند، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن ۲٪ نانورس به ماسه‌ی فیروزکوه، ضریب نفوذپذیری آن را حدود ۹۰٪ کاهش می‌دهد. افزودن ۴٪ نانورس باعث کاهش حدود

جدول ۴. درجه رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی رس نازلو پس از ترکیب با درصد‌های مختلف نانورس.

درصد نانورس	۰	۱	۲	۴
درجه‌ی رطوبت بهینه (%)	۱۷/۹	۱۸/۶	۲۰/۱	۲۰/۶
وزن مخصوص خشک بیشینه ( $kN/m^3$ )	۱۷/۵	۱۷/۳	۱۷/۱	۱۶/۹

جدول ۵. درجه رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی ماسه‌ی فیروزکوه پس از ترکیب با درصد‌های مختلف نانورس.

درصد نانورس	۰	۲	۴	۸
درجه‌ی رطوبت بهینه (%)	۱۲/۲	۱۴	۱۴/۱	۱۲/۸
وزن مخصوص خشک بیشینه ( $kN/m^3$ )	۱۶/۳	۱۶/۴	۱۶/۶	۱۷/۳



شکل ۷. منحنی‌های تراکم ماسه‌ی فیروزکوه پس از ترکیب با درصد‌های مختلف نانورس.

نیز درجات رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی حاصل از منحنی‌های تراکم مذکور خلاصه شده است.

مطابق شکل ۶ و جدول ۴، با افزایش درصد وزنی نانورس در خاک، رطوبت بهینه افزایش، و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک کاهش یافته است. اختلاط و افزایش درصد نانورس، که حاوی کانی‌های مونت‌موریلونایت است، موجب جذب آب (رطوبت) بیشتر در خاک می‌شود و درجه‌ی رطوبت بهینه‌ی خاک را افزایش می‌دهد. از طرفی به دلیل سبک بودن ذرات نانورس، افزایش درصد آن در خاک، موجب پایین آمدن چگالی خشک بیشینه‌ی خاک می‌شود.

نتایج آزمایش‌های تراکم روی ماسه‌ی فیروزکوه به صورت خالص و پس از ترکیب با نانورس در جدول ۵ و شکل ۷ نشان می‌دهند که افزایش نانورس در ماسه‌ی فیروزکوه تغییر معنی‌داری در درجه‌ی رطوبت بهینه‌ی ماسه ندارد، لیکن وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی ماسه را قدری افزایش می‌دهد؛ هر چند این افزایش قابل ملاحظه نیست، به طوری که افزودن ۸٪ وزنی نانورس به ماسه، وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی ماسه را فقط ۶٪ افزایش می‌دهد.

### ۲.۳. آزمایش‌های نفوذپذیری و انتشار مولکولی

#### ۱.۲.۳. آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری روی رس نازلو

نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری روی رس نازلو به صورت خالص و هنگام ترکیب با نانورس برای هر نمونه در جدول ۶ ثبت و میانگین اعداد برای هر نمونه

جدول ۷. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری روی ماسه‌ی فیروزکوه پس از ترکیب با درصد‌های مختلف نانو رس.

درصد نانورس	ضریب نفوذپذیری ( $m/s$ )		متوسط ضریب نفوذپذیری آزمایش‌های بار ثابت و بار افتان ( $m/s$ )
	بار ثابت	بار افتان	
۰	$4,61 \times 10^{-5}$	$6,54 \times 10^{-5}$	$5,57 \times 10^{-5}$
۲	$4,01 \times 10^{-6}$	$6,87 \times 10^{-6}$	$5,43 \times 10^{-6}$
۴	$1,97 \times 10^{-7}$	$7,75 \times 10^{-7}$	$4,86 \times 10^{-7}$
۸	$4,70 \times 10^{-8}$	$1,75 \times 10^{-7}$	$1,11 \times 10^{-7}$

جدول ۸. داده‌های ورودی و خروجی نرم‌افزار پولوت.

داده‌های ورودی	داده‌های خروجی
ضخامت خاک - پوکی خاک - وزن مخصوص خشک خاک - تعداد جزء لایه‌های خاک - ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک ( $D_e$ ) - غلظت پیشینه‌ی یون کلر در خاک - ارتفاع شیرابه (محلول کلرور سدیم) در بالای خاک - غلظت اولیه‌ی یون کلر در بالای خاک - مقدار محلول نمونه‌برداری شده برای تعیین غلظت در طول مدت آزمایش - شرط مرزی بالای خاک (جرم محدود) - شرط مرزی پایین خاک (جریان توده‌ی صفر)	داده‌های غلظت یون کلر در مخزن کلرور سدیم در بالای خاک در طول زمان و داده‌های غلظت یون کلر در ارتفاع نمونه‌برداری شده به صورت نوشتاری و بالایی خاک (جرم محدود) ترسیمی

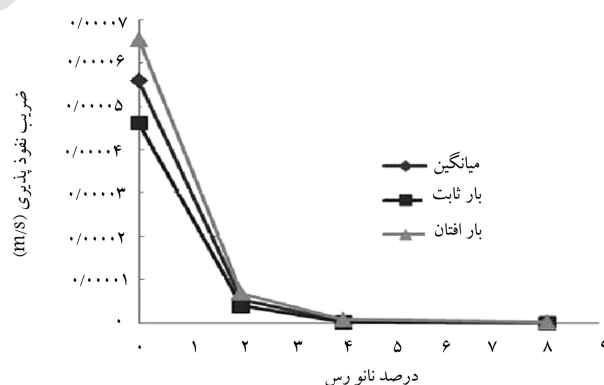
جدول ۹. داده‌های اصلی آزمایش‌های انتشار مولکولی رس نازلو.

درصد نانورس	ارتفاع خاک (cm)	غلظت اولیه‌ی یون کلر ( $mg/l$ )	ضریب انتشار مولکولی یون کلر ( $m^2/s$ ) $\times 10^{-10}$
۰	۱۳	۳۸۰۰	۶,۹۷
۰,۵	۱۳	۳۸۲۰	۵,۸۹
۱	۱۳,۲	۳۸۱۰	۵,۸۴
۲	۱۳,۹	۳۸۰۰	۷,۳۴
۴	۱۲,۴	۳۸۰۰	۷,۶۰

فیروزکوه هنگام ترکیب با ۸٪ نانورس  $1,11 \times 10^{-7}$  است. این مقدار بسیار بیشتر از پیشینه‌ی ضریب نفوذپذیری قابل قبول ( $1 \times 10^{-9} m/s$ ) برای یک عایق رطوبتی و آلودگی است. بنابراین ترکیب تا ۸٪ نانورس و ماسه، به عنوان یک ماده‌ی جایگزین مناسب برای خاک رسی به عنوان عایق رطوبتی و آلودگی نمی‌تواند توصیه شود و ترکیب‌های حاوی نانورس بیشتر نیز به دلیل گران بودن نانورس شاید از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشند. مطالعات انجام شده نشان داده است که در غیاب خاک رسی، ترکیب ماسه و بتونیت می‌تواند به عنوان ماده‌ی جایگزین در نظر گرفته شود. [۴۰:۳۹]

### ۳.۲.۳. آزمایش‌های انتشار مولکولی

در جدول ۸، اسامی داده‌های ورودی و خروجی استفاده شده در محاسبات نظری با نرم‌افزار پولوت، برای آزمایش‌های انتشار مولکولی ارائه شده است. در جدول ۹، نیز داده‌های اصلی آزمایش‌های انتشار مولکولی درج شده‌اند. نمونه‌ی از نمودارهای غلظت - عمق خاک و غلظت - زمان که مربوط به آزمایش خاک رس نازلو با ترکیب ۲٪ نانورس است، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰ و جدول ۹، در آزمایش مذکور، ضریب انتشار مولکولی یون کلر برابر با  $7,34 \times 10^{-10} m^2/s$  به دست آمده است. همچنین روند تغییرات ضریب انتشار مولکولی با افزایش درصد نانورس در رس نازلو در جدول ۹ ارائه شده است، که مطابق آن، هر چند با افزایش درصد نانورس، ضریب انتشار مولکولی ابتدا اندکی کاهش و سپس اندکی افزایش نشان داده است، لیکن این نوسانات اندک، تغییرات معنی‌داری محسوب نمی‌شود و می‌توان



شکل ۹. منحنی تغییرات ضریب نفوذپذیری ماسه‌ی فیروزکوه پس از ترکیب با درصد‌های مختلف نانورس.

۹۹٪ در ضریب نفوذپذیری و افزودن ۸٪ نانورس، باعث کاهش ۹۹,۸٪ در ضریب نفوذپذیری ماسه‌ی فیروزکوه می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن بیش از ۲٪ نانورس به ماسه‌ی فیروزکوه، مثلاً، فقط باعث کاهش اندکی در ضریب نفوذپذیری می‌شود (حدود ۱٪ کاهش بیشتر) و لذا افزودن بیش از ۲٪ نانورس ضرورتی ندارد و ترکیب حاوی ۲٪ نانورس در ماسه‌ی فیروزکوه، ترکیب مناسبی از نظر کاهش نفوذپذیری این خاک محسوب می‌شود. مطابق جدول ۷، متوسط ضریب نفوذپذیری ماسه‌ی

برای استفاده به عنوان مصالح آستر رسی، اصلاح خصوصیات نفوذپذیری خاک مذکور ضروری است.

۲. افزودن نانورس به رس نازلو تا ۴٪، تغییر چندانی در چگالی ویژه ایجاد نکرده است؛ لیکن موجب افزایش درجه‌ی رطوبت حد روانی، کاهش درجه‌ی رطوبت حد خمیری و در نتیجه موجب افزایش ۴۸٪ شاخص خمیری خاک شده است. وجود کانی ریز مونتموریلونایت در نانورس قدرت جذب آب رس را بالا برده و موجب بالا رفتن درجه‌ی رطوبت حد روانی رس نازلو شده است.

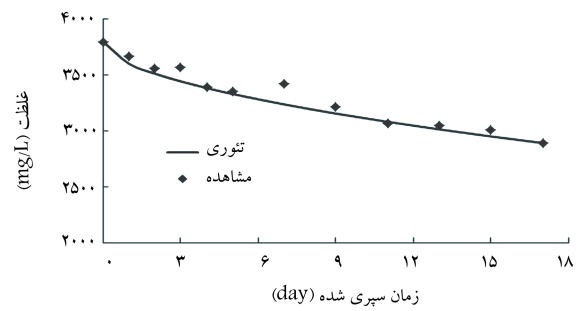
۳. نتایج آزمایش‌های تراکم روی رس نازلو هنگام ترکیب با نانورس نشان داده است که افزودن نانورس تا ۴٪، موجب افزایش درجه‌ی رطوبت بهینه‌ی رس نازلو تا ۱۵٪ و کاهش اندک وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک می‌شود. وجود کانی مونتموریلونایت در نانورس، قدرت جذب آب را در ترکیب خاک بالا می‌برد؛ از طرفی سبک بودن دانه‌های نانورس موجب کاهش اندک وزن مخصوص خشک خاک می‌شود.

۴. افزودن نانورس به رس نازلو باعث کاهش ضریب نفوذپذیری خاک شده است. با افزودن ۲٪ نانورس، ضریب نفوذپذیری خاک ۴۹٪ کاهش پیدا کرده و به ضریب نفوذپذیری حدود  $4/3 \times 10^{-10} m/s$  رسیده است که مقدار مطلوبی برای یک آستر رسی است.

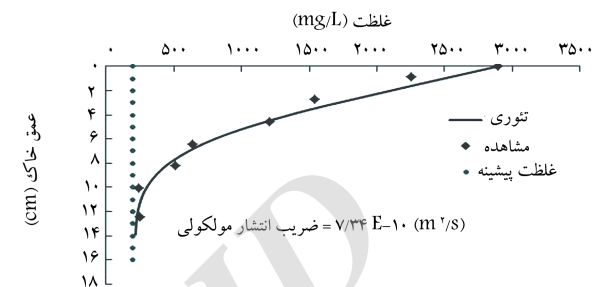
۵. افزودن نانورس به رس نازلو تغییر معنی‌داری در ضریب انتشار مولکولی یون کلر در این خاک ایجاد نکرده است. از نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انتشار مولکولی ضریب متوسط  $6/7 \times 10^{-10} m^2/s$  برای رس نازلوی حاوی نانورس به‌دست آمده است که با مقادیر به‌دست آمده در مطالعات پیشین برای همین خاک هم‌خوانی داشته و در حد استاندارد تعریف‌شده برای خاک‌های رسی بوده است.

۶. از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی رس نازلو می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزودن ۲٪ وزنی نانورس به رس نازلو برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک از نظر شاخص خمیری، تراکم، نفوذپذیری و انتشار مولکولی کفایت می‌کند و افزودن نانورس بیشتر تأثیر چشم‌گیری در بهتر شدن خصوصیات خاک ندارد. از نظر اقتصادی افزودن ۲٪ نانورس برای رس نازلو برای بهسازی این خاک جهت ساخت آستر رسی یک مدفن زباله می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد. استفاده از بنتونیت نیز برای بهسازی رس نازلو توصیه می‌شود، لیکن برای رسیدن به مقادیر نفوذپذیری و سایر پارامترهای ژئوتکنیکی حاصل‌شده با نانورس در مطالعه‌ی حاضر، به درصدهای بیشتری از بنتونیت نیاز خواهد بود (حدود ۱۰٪ و یا بیشتر براساس سایر مطالعات دیگر بدو) که نهایتاً با قیمت تمام‌شده در صورت استفاده از نانورس ممکن است برابری کند. برای حصول اطمینان، بررسی اقتصادی دقیق‌تر در این خصوص توصیه می‌شود.

۷. نتایج آزمایش‌های تراکم و نفوذپذیری نشان داده است که افزودن نانورس به ماسه‌ی فیروزکوه تأثیر قابل ملاحظه‌ی در بهبود خصوصیات تراکمی این خاک ایجاد نمی‌کند، لیکن موجب کاهش ضریب نفوذپذیری این خاک می‌شود. ضریب نفوذپذیری ماسه هنگام ترکیب با ۸٪ نانورس  $(m/s) 1/11 \times 10^{-7}$  است که در مقایسه با ماسه‌ی خالص حدود ۱۰٪ کمتر است. هر چند نانورس باعث کاهش چشم‌گیر ضریب نفوذپذیری می‌شود، لیکن با حد استاندارد تعریف‌شده برای عایق‌های رسی فاصله‌ی زیادی داشته و لذا این ترکیب نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای خاک رسی جهت استفاده در یک آستر رسی مدفن زباله‌ی مهندسی محسوب شود.



الف) نمودار غلظت - زمان در مخزن کلرور سدیم؟



ب) نمودار غلظت - عمق خاک در آزمایش انتشار مولکولی روی خاک رس نازلو حاوی ۲ درصد نانو رس.

شکل ۱۰. الف) نمودار غلظت - زمان در مخزن کلرور سدیم، ب) نمودار غلظت - عمق خاک در آزمایش انتشار مولکولی روی خاک رس نازلو حاوی ۲ درصد نانو رس.

نتیجه گرفت که افزودن نانورس به رس نازلو تا ۴٪، تأثیر محسوسی در ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک رس نازلو ندارد. لذا می‌توان ضریب  $6/7 \times 10^{-10} m^2/s$  را به‌عنوان عدد متوسط برای رس نازلوی حاوی نانورس در نظر گرفت. این مقدار با مقادیر به‌دست آمده در مطالعات پیشین برای خاک مذکور هم‌خوانی دارد. [۴۲، ۴۱]

#### ۴. خلاصه و نتیجه‌گیری

همواره از خاک رسی برای ساخت آستر رسی در کف مدفن‌های زباله که با اصول بهداشتی - مهندسی ساخته می‌شوند، استفاده می‌شود. اگر خاک رسی در دسترس نباشد، می‌توان از مخلوط ماسه با سایر افزودنی‌ها نیز به‌عنوان مصالح جایگزین استفاده کرد. در مطالعه‌ی حاضر، اثر نانورس در اصلاح پاره‌یی از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس منطقه‌ی نازلوی شهرستان ارومیه و ماسه‌ی فیروزکوه بررسی شده است. بر حسب مورد، خصوصیات: رطوبتی، تراکمی، نفوذپذیری و انتشار مولکولی برای رس نازلو و خصوصیات تراکمی و نفوذپذیری برای ماسه‌ی فیروزکوه، هنگام ترکیب با نانورس بررسی شده‌اند. نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

۱. با توجه به نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، نوع خاک منطقه‌ی نازلوی شهرستان ارومیه، رسی سیلتی با خاصیت خمیری کم (CL) تشخیص داده شده است. از نظر مناسب بودن این خاک جهت استفاده در یک آستر رسی مدفن زباله‌ی مهندسی، شاخص خمیری این خاک ۱۷٪ و بیش از کمینه‌ی استاندارد ۷٪ بوده و بیش از ۱۵٪ دانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میکرون داشته است؛ لیکن ضریب نفوذپذیری بالاتر از استاندارد (بیشینه‌ی  $1 \times 10^{-9} m/s$ ) داشته است. بنابراین

پانوشتها

1. bentonite
2. nano silicates
3. micro silica
4. nano clay
5. nanocor
6. nanosol
7. montmorillonite
8. van der waals
9. suspension
10. triaxial flexible wall hydraulic conductivity apparatus
11. pollute

(References) منابع

1. Keith, K.S. and Murray, H.H., *Clay Liners and Barriers*, In: Carr, D.D. (Ed.), *Industrial Minerals and Rocks, Sixth Edition*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, Colorado, pp. 435-452 (1994).
2. Rowe, R.K. "Long-term performance of contaminant barrier systems", *45th Rankine Lecture, Geotechnique*, **55**(9), pp. 631-678 (2005).
3. Rowe, R.K., Quigley, R.M., Brachman, R.W.I. and Booker, J.R., *Barrier Systems for Waste Disposal*, 2nd Edition, Spon Press, London, UK (2004).
4. Badv, K., *Engineering Principles of Solid Waste Landfilling- Fundamentals of Landfill Design*, Urmia University Press, p. 497 (in Persian) (2013).
5. Rowe, R.K. *Liner systems. Chapter 25 of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, U.S.A., pp. 739-788 (2001).
6. Rowe, R.K., Caers, C.J., Reynolds, G. and Chan, C. "Design and construction of barrier system for the halton landfill", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(3), pp. 662-675 (2000).
7. Kayabali, K. "Engineering aspects of a novel landfill liner material: Bentonite amended natural zeolite", *Engineering Geology*, **46**(2), pp. 105-114 (1997).
8. Asavasipit, S., Nanthamontry, W. and Polprasert, C. "Influence of condensed silica fume on the properties of cement based solidified wastes", *Cement and Concrete Research*, **31**(8), pp. 1147-1152 (2001).
9. Prabakar, J., Dendorkar, N. and Morchhale, R.K. "Influence of fly ash on strength behavior of typical soils", *Construction and Building Materials*, **18**(4), pp. 263-267 (2003).
10. Kalkan, E. and Akbulut, S. "The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners", *Engineering Geology*, **73**(1-2), pp. 145-156 (2004).
11. Cetin, H., Fener, M. and Gunaydin, O. "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material", *Engineering Geology*, **88**(1-2), pp. 110-120 (2006).
12. Kalkan, E. "Utilization of red mud as a stabilization material for preparation of clay liners", *Engineering Geology*, **87**(3-4), pp. 220-229 (2006).
13. Sezer, A., Inan, G., Yilmaz, H.R. and Ramyar, K. "Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay", *Building and Environment*, **41**(2), pp. 150-155 (2006).
14. Akbulut, S., Arasan, S. and Kalkan, E. "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", *Applied Clay Science*, **38**(1-2), pp. 23-32 (2007).
15. Aliashrafi, H. and Badv, K. "An investigation into the effect of fine powder material on the hydraulic conductivity of sand", *7th National Congress of Civil Engineering, Zahedan, Iran*, pp. 1-6, (In Persian) (2013).
16. Badv, K. and Shayesteh, A. "Laboratory investigation of the utilization of the rock processing industry residue powder material in construction of the landfill barrier layers", *Journal of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University*, **43**(2), pp. 1-9 (in Persian) (2013).
17. Akgun, H. "Geotechnical characterization and performance assessment of bentonite/sand mixtures for underground waste repository sealing", *Applied Clay Science*, **49**(4), pp. 394-399 (2010).
18. Komine, H. "Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill", *Applied Clay Science*, **26**(1-4), pp. 13-19 (2004).
19. Mollins, L.H., Stewart, D.I. and Cousens, T.W. "Predicting the properties of bentonite sand mixtures", *Clay Minerals*, **31**(2), pp. 243-252 (1996).
20. Yonekura, R. and Miwa, M. "Fundamental properties of sodium silicate based grout", *Eleventh Southeast Asia Geotechnical Conference, Singapore*, pp. 439-44 (1993).
21. Noll, M.R., Bartlett, C. and Dochat, T.M. "In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica", *In Proceedings 6th National Outdoor Action Conference, Singapore*, pp. 443-457 (1992).
22. Gallagher, P.M. and Mitchell, J.K. "Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9), pp. 1017-1026 (2002).
23. Gallagher, P.M. and Lin, Y. "Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms", *In Proceedings GSP 136: Innovations in Grouting and Soil Improvement, Geo-Frontiers 2005 Congress, Reston, VA: ASCE*, pp. 15-26 (2005).
24. Gallagher, P.M., Conlee, C.T. and Rollins, K.M. "Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, ASCE*, **133**(2), pp. 186-196 (2007).
25. Badv, K. and Aliashrafi, H. "The effect of bentonite on the unconfined compressive strength of sand", *First National Geotechnical Conference, Ardabil, Iran*, pp. 1-5 (In Persian) (2013).
26. Badv, K. and Emdadi, H. "Using microsilica to improve geotechnical properties of Nazloo clay", *Journal of Civil Engineering, Sharif University of Technology* (Accepted-In Persin) (2014).
27. Zhang, G. "Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils", *Proceedings of the Geo-Denver 2007, Advances of Measurement and Modelling of Soil Behaviour, ASCE*, pp. 1-13 (2007).



28. Zhang, G., Germaine, J.T., Whittle, A.J. and Ladd, C.C. "Soil structure of a highly weathered old alluvium", *Geotechnique*, **54**(7), pp. 453-466 (2004a).
29. Zhang, G., Germaine, J.T., Whittle, A.J. and Ladd, C.C. "Index properties of a highly weathered old alluvium", *Geotechnique*, **54**(7), pp. 441-451 (2004b).
30. Uddin, F. "Clays, nanoclays and montmorillonite minerals", *The Minerals, Metals and Materials Society and ASM International, Metallurgical and Materials Transactions A*, **39A**, pp. 2804-1814 (2008).
31. Taha, M.R. "Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures", In *Nanotechnology in Construction 3*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 377-382 (2009).
32. Taha, M.R. and Taha, O.M.E. "Influence of nanomaterial on the expansive and shrinkage soil behavior", *Journal of Nanoparticle Research*, **14**(10), pp. 1-13 (2012).
33. Baziar, M.H., Ghazi, H. and Mirkazemi, S.M. "Investigation of the effect of nanoclay additive on the basic engineering-geotechnical properties of soil", *4th International Conference on Geotechnique and Soil Mechanics*, Tehran, Iran, pp. 1-8 (2011).
34. Badv, K. and Omidi, A. "Triaxial permeability testing on the synthetic leachate effect on the hydraulic conductivity of clayey soil", *7th International Congress on Civil Engineering*, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran (2006).
35. Badv, K. and Omidi, A. "Effect of synthetic leachate on the hydraulic conductivity of clayey soil in Urmia City landfill site", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, **31**(B5), pp. 535-545 (2007).
36. Badv, K., *Engineering Principles of Solid Waste Landfilling - Fundamentals of landfill Design*, Urmia University Press, 497 p. (2013).
37. Rowe, R.K. and Booker, J.R. "POLLUTE v.6.: 1D pollutant migration through a non-homogeneous soil", Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada (1983, 1990, 1994).
38. Anthony, J.W., Bideaux, R.A., Bladh, K.W. and Nichols, M.C. Eds., *Handbook of Mineralogy, Mineralogical Society of America*, Chantilly, VA 20151-1110, USA, <http://www.handbookofmineralogy.org/> (2010).
39. Akgun, H. "Geotechnical characterization and performance assessment of bentonite/sand mixtures for underground waste repository sealing", *Applied Clay Science*, **49**(4), pp. 394-399 (2010).
40. Badv, K. and Aliashrafi, H. "Laboratory investigation of geotechnical and geoenvironmental characteristics of bentonite-enhanced sand mixtures as landfill liner material", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Tabriz University, **45**(2), pp. 13-23 (2015).
41. Badv, K., and Jafari, H. "Laboratory modeling of two-dimensional diffusive and advective-diffusive chloride transport through silt and clay", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **37**(C2), pp. 311-324 (2013).
42. Badv, K. and Emdadi, H. "The use of silica fume to improve geotechnical properties of Nazloo clay", *Journal of Civil Engineering, Sharif University of Technology*, **2-33**(1.2), pp.91-100 (2016).