



## بررسی تاثیر نانورس بر رفتار خاک‌های واگرا (مطالعه موردی: شهرستان میناب در استان هرمزگان)

عادل عساکره\*، احمد آوازه

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ تیر ۱۳۹۴  
بازنگری: ۳۰ مرداد ۱۳۹۵  
پذیرش: ۱۰ آبان ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۱۵ آذر ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

خاک واگرا  
تشبیت  
نانورس  
سدیم  
آزمایش‌های واگرایی

**چکیده:** خاک‌های واگرا به محض تماس با آب به سرعت شسته می‌شوند. بالا بودن درصد یون سدیم از خصوصیات عمده این خاک‌ها می‌باشد. در اینگونه خاک‌ها ذرات رسی در مجاورت با آب، چسبندگی خود را از دست می‌دهند و در نتیجه ذرات کلوئیدی خاک به سهولت از یکدیگر دور شده و با نیروی کمی که می‌تواند ناشی از حرکت بسیار آرام آب باشد به حرکت در می‌آیند. برای مقابله با اثرات منفی این گونه از خاک سه راه کار عمده شامل اجتناب از ساخت و ساز بر روی آن، تعویض خاک واگرایی موجود در محل و استفاده از افزودنی‌های مختلف جهت اصلاح و تثبیت مورد توجه بوده است. در اکثر مواقع استفاده از دو گزینه‌ی اول امکان پذیر نبوده و مقرون به صرفه نیست اما استفاده از افزودنی‌های مختلف تاکنون مشکل بسیاری از پروژه‌ها را که بر روی این گونه از خاک ساخته شده‌اند مرتفع نموده است. در این تحقیق تاثیر نانورس بر خاک واگرایی موجود در تصفیه خانه فاضلاب شهر میناب با استفاده از آزمایش‌های ویژه تعیین واگرایی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن درصد‌های پایین نانورس به خاک اندکی رده‌ی واگرایی خاک را بهبود می‌بخشد ولی هرچه میزان نانورس مصرفی افزایش پیدا می‌کند خاک به سمت واگرایی بیشتر میل می‌کند.

### ۱- مقدمه

خاک‌های واگرا از جمله خاک‌های مشکل‌آفرینی هستند که استفاده از آن‌ها تاکنون منجر به خسارت‌های زیادی در پروژه‌های عمرانی و کشاورزی شده است. این نوع خاک‌ها زمانی که در مجاورت آب قرار گیرند و یا با جریان یافتن آب در ترک‌های خاک، ذرات رس در آب معلق گشته و فرسایش می‌یابند. یون سدیم قابل تعویض عامل اصلی ایجاد واگرایی در خاک‌های رسی است. به عبارتی دیگر واگرایی پدیده‌ای فیزیکی-شیمیایی بوده که بر اثر آن ذرات رس در مجاورت آب چسبندگی خود را از دست داده و یکدیگر را دفع می‌نمایند [۱].

تاکنون برای تثبیت خاک‌های واگرا از انواع افزودنی‌ها از قبیل سیمان، آهک و مواد مختلف شیمیایی استفاده شده و محققین بارها به مقایسه آن‌ها پرداخته‌اند. هارون و همکاران [۲] در هندوستان ضمن مطالعه بر روی خاک ریزی که از خاک واگرا ساخته شده بود توانستند با افزودن ۲/۵ تا ۳٪ آهک مشکل واگرایی خاک را کاملاً برطرف نمایند. توکتا [۳] ضمن استفاده از آزمایش سوراخ‌زنی و مطالعه بر روی خاک قرصه سدی واقع در آنکارا

نتیجه گرفت که از خاکستر بادی نوع C<sup>۲</sup> میتوان جهت کاهش پتانسیل واگرایی استفاده نمود. بلوری و ثقفی [۴] تاثیر درصد اشباع خاک‌های واگرا را در میزان واگرایی آنها مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که میزان رطوبت تأثیری در میزان واگرایی خاک ندارد. در تحقیقات صورت گرفته از ماده آلی پلیمری پلی وینیل الکل برای اصلاح واگرایی خاک استفاده شد و مشخص شد که افزودن این ماده تأثیر مثبت قابل توجهی بر خصوصیات خاک دارد. اوحدی و گودرزی [۵] به بررسی تأثیر سولفات آلومینیوم بر پتانسیل واگرایی خاک پرداختند و دریافتند که با افزودن ۱/۵ تا ۲٪ سولفات آلومینیوم میتوان خاک شدیداً واگرا را اصلاح نمود. اومشا و همکاران [۶] آهک و سیمان را جهت اصلاح واگرایی به کار بردند و نشان دادند که با افزودن ۳٪ آهک و ۳٪ سیمان خاک واگرا به طور کامل اصلاح می‌گردد. اما اوحدی و همکاران [۷] گزارش کردند که افزایش بیش از درصد بهینه آهک موجب کاهش میزان بهره‌وری آهک شده ولی افزودن ۶٪ آهک موجب از بین رفتن کامل پتانسیل واگرایی در خاک می‌شود.

نتایج تحقیقات انجام‌شده در سال‌های اخیر نشان داده است که افزایش مقادیر کم سیمان به خاک بستر (۰/۸ تا ۴ درصد) باعث تثبیت خاک واگرا می‌شود. این عمل با جایگزینی یون‌های کلسیم آزاد موجود در سیمان پرتلند و نیز با ایجاد خاصیت چسبندگی ناشی از هیدراتاسیون سیمان، ذرات رس

3 خاکستر بادی پر کلسیم، که حداقل ۵۰٪ وزن آن از سه کانی اکسید سیلیس، آلومینیوم و آهن تشکیل شده و اکسید کلسیم موجود در آن بیشتر از ۱۰٪ است

4 Umesha et al.

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: asakereh@hormozgan.ac.ir

1 Haroon et al.

2 Tokta

است.

حسنلو و همکاران [۱۲] تاثیر پارامترهای شیمیایی را بر میزان واگرایی خاک‌های رسی مورد بررسی قرار دادند و در این بررسی به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های واگرا میزان ESP<sup>۲</sup> بزرگتر از ۲۰ و میزان SAR<sup>۵</sup> بزرگتر از ۱۰ بوده و هم‌چنین با افزایش میزان SAR، هدایت الکتریکی و pH افزایش می‌یابد.

در مورد تاثیر نانورُس بر خاک‌های واگرا قبل از این تحقیق جامعی صورت نگرفته است اما برخی از محققین در رابطه با تاثیر آن بر روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک بررسی‌هایی انجام داده‌اند. بازاریار و همکاران [۱۳] گزارش کرده‌اند که نانورُس مونت موریلونیت اصلاح شده (MMN<sup>۶</sup>)، حد روانی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. محمدزاده ثانی و همکاران [۱۴] تاثیر نانورُس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌های رس‌دار را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که حد روانی و حد خمیری پس از اضافه کردن نانورُس افزایش یافته است. قاضی [۱۵] همچنین مقادیر مختلف MMN بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رسی را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که با افزایش MMN مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافته و در بیشترین مقدار خود، ۳۴/۲ درصد نسبت به حالت بدون افزودنی بهبود یافته است. باتوجه به تاثیری که نانو مواد در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک دارد، جای خالی آن در تحقیقات انجام شده در مورد خاک‌های واگرا کاملاً مشهود است.

در این تحقیق به ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی یک نمونه خاک واگرا قبل و پس از ترکیب آن با نانورُس، در محدوده شهرستان میناب واقع در استان هرمزگان پرداخته شده است.

## ۲- مصالح

در این تحقیق از ۳ نقطه واقع در تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان میناب که شواهد عینی حکایت از واگرا بودن آن داشت نمونه‌هایی تهیه گردید و بعد از انجام آزمایش‌های مربوط به واگرایی یک نمونه از میان آن‌ها که رده واگرایی بالاتری داشت انتخاب و به‌عنوان خاک مینا با کد ANO نام‌گذاری شده است. نانورُس مورد نیاز به صورت تجاری خریداری گردید.

مشخصات مکانیکی و فیزیکی نانورُس مورد استفاده که از نوع مونت موریلونیت می‌باشد و توسط شرکت تهیه‌کننده این مواد ارائه شده است عیناً در جدول ۱ و آنالیز شیمیایی در جدول ۲ و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نانورُس مصرفی در شکل ۱ ارائه گردیده است.

واگرا را به‌خوبی تثبیت نموده و خاصیت فرسایش‌پذیری آن را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. مخلوط‌های خاک سیمان حاصل‌شده به‌خوبی قادر به تحمل جریان آب با سرعت‌های تا ۲ متر در ثانیه نیز بوده است [۸]. در اثر اختلاط سیمان با خاک، دو واکنش پایه اما پیچیده به شرح زیر اتفاق می‌افتد. الف) بهبود نسبتاً سریع و یا فوری به دلیل تبادل کاتیونی (ب) واکنش پوزولانی که در بازه زمانی از چند دقیقه تا چند ماه و یا بیشتر رخ می‌دهد. هنگامی که سیمان با خاک‌های رسی با چسبندگی کم با هم مخلوط می‌شوند و در معرض رطوبت قرار می‌گیرند، واکنش‌های شیمیایی زیادی رخ داده که شامل تبادل کاتیونی، کلوخه‌شدن، واکنش پوزولانی<sup>۱</sup> و کرناسیون می‌باشد [۷]. تبادل کاتیونی و کلوخه‌شدن جزو واکنش‌های اولیه هستند که بلافاصله بعد اختلاط صورت می‌گیرند. در جریان این واکنش‌ها کاتیون‌های یک ظرفیتی واقع در لایه دوگانه پولک‌های رُس با کاتیون دو ظرفیتی کلسیم جایگزین می‌شود. در مطالعاتی که صورت گرفته است، جرج و همکاران [۹] به مطالعه تاثیر دما بر فرآیند تثبیت خاک با آهک پرداختند و بر اساس نتایج این پژوهشگران، دما موجب کاهش در نشانه‌ی خمیری همراه با افزایش در حد خمیری و کاهش در حد روانی شده است. در مطالعات دیگری اوحدی و همکاران [۱۰]، به مطالعه‌ی تحکیم پوزولانی رس نرم تثبیت‌شده با آهک و سیمان پرداختند و سه جنبه‌ی مهم از تثبیت خاک با آهک و سیمان که شامل: ۱) تعیین درصد بهینه‌ی آهک و سیمان برای تثبیت خاک، ۲) ارائه واژه فنی جدید به دانش ژئوتکنیک با عنوان تحکیم پوزولانی که در پایدارسازی رس نرم با آهک و سیمان رخ می‌دهد و ۳) ارائه یک معیار علمی برای تعیین درصد بهینه ماده تثبیت‌کننده با دانش تنش پیش‌تحکیمی و شاخص تورم را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین اوحدی و همکاران [۱۰] به بررسی نرخ رشد و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک واگرا و آهک در کوتاه‌مدت و بلندمدت از نظر زیرساختاری و درشت‌ساختاری و هم‌چنین تعیین میزان آهک مصرفی در گذشت زمان و تاثیر آن بر پارامترهای مکانیکی پرداختند. از مهم‌ترین نتایج تحقیق می‌توان به ارایه یک معیار ساده برای شروع واکنش‌های پوزولانی و تعیین میزان آهک مصرف شده در مدت واکنش‌های پوزولانی بر اساس pH و ضریب هدایت الکتریکی (EC<sup>۳</sup>) اشاره نمود.

اوحدی و همکاران [۷] با نگرشی ویژه به تغییرات ریزساختاری و حل‌شدگی قله‌های اصلی کانی‌های رسی و تشکیل ترکیبات جدید پرداختند. خاک واگرایی مورد مطالعه در آن پژوهش با آهک شکفته مخلوط شده و بعد از پایان دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی قرار گرفته و میزان تغییرات پتانسیل واگرایی و بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک ارزیابی شده قرار گرفتند. هم‌چنین روند تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها شامل حل‌شدگی کانی‌های رسی و تشکیل ترکیبات جدید و اندرکنش خاک واگرا و آهک تحلیل شده است. هم‌چنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و تحکیم نشان‌دهنده افزایش مقاومت و کاهش میزان ضریب فشردگی

4 Exchangeable Sodium Percentage

5 Sodium Absorption Ratio

6 Modified Montmorillonite Nanoclay

1 Pozzolanic Reaction

2 George et al.

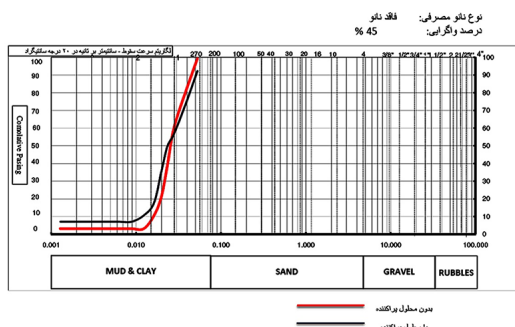
3 Electrical Conductivity

آزمایش‌های چگالی در محل، دانه‌بندی و تعیین حدود اتربرگ<sup>۱</sup> بر روی نمونه‌های دست خورده انجام گرفته است. آزمایش چگالی در محل به روش مخروط ماسه به منظور دستیابی به خصوصیات فیزیکی لایه‌های خاک مورد آزمایش، و تعیین وزن مخصوص خاک در محل به روش مخروط ماسه مطابق استاندارد ASTM-D1556 در عمق مورد نظر جهت تعیین میزان وزن مخصوص تر و خشک و درصد رطوبت طبیعی خاک محل انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۳ درج گردیده است. همچنین بر روی نمونه‌های اخذ شده آزمایش حد روانی بر اساس استاندارد (AASHTO-T89) و حد خمیری بر اساس استاندارد (AASHTO-T90) بر روی بخش ریزدانه خاک (عبوری از الک نمره ۴۰) انجام شد و نشانه خمیری برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید. بر اساس نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ و انجام طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید<sup>۲</sup> می‌توان نتیجه گرفت که خاک منطقه مورد مطالعه عمدتاً رس با خاصیت خمیری کم (CL<sup>۳</sup>) می‌باشد. مشخصات نمونه خاک مورد نظر در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۳: مشخصات خاک مینا (فاقد نانو)

Table 3. Soil specifications (without nanoclay)

ANO	کد نمونه
CL	نوع خاک
۱/۵۴	دانسیتته خشک در محل (kg/cm <sup>3</sup> )
۳/۵	درصد رطوبت خاک
۳۳	حد روانی
۱۱	دامنه خمیری
۴۵	نسبت واگرایی در هیدرومتری دوگانه
D1	رده‌بندی طبق آزمایش سوراخ زنی
واکنش متوسط	نتیجه آزمایش کرامپ



شکل ۲: نمودار دانه‌بندی خاک مینا (ANO)

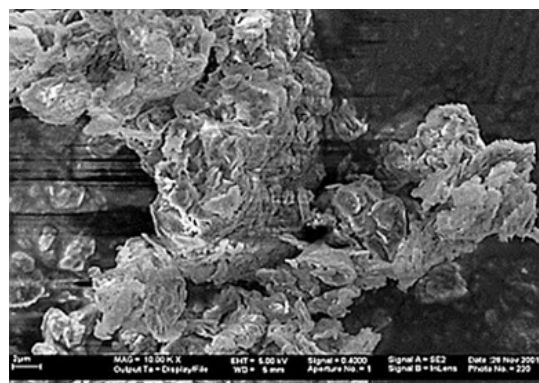
Fig. 2. Particle size distribution curve

جدول ۱: مشخصات مکانیکی و فیزیکی نانورس مصرفی  
Table 1. Mechanical and physical properties of nanoclay

مونت موریلونیت	نوع کانی
۳۰۰-۳۷۰	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
۱-۲	اندازه ذرات (nm)
۲۲۰-۲۷۰	مساحت سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)
۲۵	هدایت الکتریکی (MV)
۴۸	ضریب تعادل یونی (meg/100gr)
۶۰	فاصله خالی بین ذرات (Å)
زرد	رنگ
۱-۲	رطوبت (%)

جدول ۲: آنالیز شیمیایی نانورس مصرفی  
Table 2. Chemical analysis of nanoclay

درصد وزنی	نام ترکیب
۰/۹۸	Na <sub>2</sub> O
۳/۲۹	MgO
۱۹/۶۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵۰/۹۵	SiO <sub>2</sub>
۰/۸۶	K <sub>2</sub> O
۱/۹۷	CaO
۰/۶۲	TiO <sub>2</sub>
۵/۶۲	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱۵/۴۵	LOI



شکل ۱: تصویر SEM نانورس مصرفی

Fig. 1. SEM image of nanoclay

- 1 Atterberg Limits
- 2 Unified Soil Classification System
- 3 Low plasticity Clay

۱-۲- تعیین مشخصات خاک مینا

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و تعیین نوع جنس خاک

**جدول ۵: میزان واگرایی خاک نمونه‌ی خاک بر اساس آزمایش‌های مختلف**

Table 5. Soil dispersion of samples based on different experiments

ANO	کد نمونه
واگرا	آزمایش هیدرومتری دوگانه
واکنش متوسط	آزمایش کرامپ
D1	آزمایش سوراخ‌زنی
واگرا	آزمایش شیمیایی

اما نکته دیگر آنکه در عملیات اجرایی تثبیت خاک امکان استفاده از روش دوم به طریق مطلوب وجود ندارد. یعنی نمی‌توان در مقیاس بزرگ حجم زیادی از خاک را به صورت خشک با یک افزودنی مخلوط کرد و سپس با اضافه کردن آب، خاک تثبیت شده را به رطوبت بهینه رساند. تحقیقات قبلی نیز نشان داده است که در اجرا روش اول به نتایج بهتری منجر می‌شود و استفاده از دوغاب توصیه شده است [۱۶].

در آزمایشگاه لزوماً طبق آنچه در اجرا صورت می‌گیرد، عمل نمی‌شود. دستورالعمل ASTM-D3551 در مورد تهیه نمونه‌های تثبیت شده به وسیله آهک برای انجام آزمایش فشاری تک‌محوری مقرر داشته است که از روش دوم استفاده شود [۱۶].

باتوجه به اینکه خاک مورد مطالعه در این تحقیق دارای رطوبتی بسیار پایین است (۳/۵ درصد)، برای ساختن نمونه‌های آزمایشگاهی امکان ترکیب ماده افزودنی با آب و سپس ترکیب کردن آن با خاک وجود نداشت چرا که مخلوط با این روش همگن نمی‌شود. به همین دلیل ابتدا درصد وزنی نانو ماده‌ی مورد استفاده تعیین و به وسیله کاردک حداقل به مدت نیم‌ساعت عمل مخلوط کردن آن ادامه پیدا می‌کرد تا از رسیدن نانورس به نسبت مساوی به تمام قسمت‌های خاک اطمینان حاصل شود. سپس میزان آب موردنظر به ترکیب اضافه گردیده و عمل مخلوط کردن به وسیله مخلوط‌کن برقی با دور بالا تکرار گردید. برای جلوگیری از خشک شدن نمونه‌ها پس از حصول اطمینان از بدست آمدن مخلوط همگن، نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی در بسته ریخته‌شد و قبل از انجام هر آزمایش نیز داخل همان کیسه‌های در بسته حداقل به مدت نیم‌ساعت با دست ورز داده شد.

**۴- آزمایش‌های ویژه واگرایی پس از افزودن درصد‌های مختلف نانورس**

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی خاک مبنا و قطعیت یافتن واگرایی نمونه خاک موردنظر مقادیر مختلف نانورس، به میزان ۰/۵، ۱، ۲ و ۴٪ با خاک واگرایی مورد مطالعه ترکیب گردید و آزمایش‌های مربوط به واگرایی شامل سوراخ‌زنی، هیدرومتری دوگانه، کرامپ و آنالیز شیمیایی بر روی آن انجام گرفت.

آزمایش‌های شیمیایی نیز جهت تعیین مقادیر کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم (برحسب اکی والان گرم در لیتر) و تعیین مقادیر ESP (درصد سدیم) و TDS<sup>۱</sup> (میزان کل نمک‌های محلول در عصاره اشباع) و SAR (نسبت جذب سدیم) موجود در خاک مورد نظر انجام شد که نتایج آنالیز شیمیایی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، ارزیابی واگرایی خاک مبنا (فاقد نانو مواد) به صورت جدول ۵ می‌باشد.

**۳- نحوه اختلاط افزودنی‌ها با خاک**

مسئله مورد توجه در اینجا چگونگی ساختن نمونه‌های تثبیت شده از لحاظ اختلاط افزودنی‌ها با خاک است. به‌طور کلی این مسئله قبلاً در زمینه‌های دیگر خصوصاً مقاومت خاک، چه در اجرا و چه در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج به دست آمده از تحقیقات قبلی، در این جا قابل استفاده است. ولی آنچه به بررسی این مسئله اهمیت می‌بخشد، نکات دخیل در آن است که عبارتند از:

- ۱- مواد افزودنی مورد استفاده
- ۲- آزمایش مورد نظر که بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام می‌شود. که هر دو مورد مذکور باید مورد توجه قرار گیرند. از لحاظ چگونگی اختلاط این مواد با خاک دو روش مطرح است، در روش اول ماده تثبیت کننده در آب حل و سپس دوغاب به دست آمده به خاک مرطوب اضافه شود اما در روش دوم ماده تثبیت کننده با خاک خشک مخلوط و پس از آن مقدار آب مورد نظر به خاک اضافه شود.

برای انتخاب یکی از دو روش نکات مختلفی می‌تواند مدنظر باشد، اول امکان حل کردن افزودنی در آب باشد چون بعضی از آن‌ها قابلیت حل شدن در آب را به مقدار زیاد داشته و بعضی دیگر انحلال‌پذیری کمی دارند یا اصلاً در آب حل نمی‌شوند.

**جدول ۴: آنالیز شیمیایی خاک مبنا (فاقد نانو)**

Table 4. Chemical analysis of soil (without nanoclay)

ANO	کد نمونه
۱۳۱/۱	غلظت Na (meq/lit)
۶/۷۳	غلظت K (meq/lit)
۳۸	غلظت Ca (meq/lit)
۱۹/۲	غلظت Mg (meq/lit)
۱۹۵/۰۳	TDS
۲۴/۵۱	SAR
۶۷/۲۲	ESP
واگرا	نتیجه (براساس نمودار شرارد)

1 Total dissolved solids

۰/۰۰۵ اندازه دارند را با درصدی از مقادیر مشخص شده در آزمون استاندارد بیان می‌کنند که به‌عنوان نسبت پراکنش یا درصد واگرایی بیان می‌کنند. یعنی درصد واگرایی برابر است با درصد ذرات کوچکتر از ۵μ در آزمایش هیدرومتری با محلول پراکنده‌ساز تقسیم بر درصد ذرات کوچکتر از ۵μ در آزمایش هیدرومتری بدون محلول پراکنده‌ساز که حاصل در عدد ۱۰۰ ضرب می‌شود.

نسبت‌های پراکنندگی که بیشتر از ۵۰٪ باشند را تحت-عنوان "واگرایی زیاد"، مقادیر ۳۰ تا ۵۰٪ را "واگرایی معتدل"، ۱۵ تا ۳۰٪ را "تا حدی واگرا"، و در نهایت کمتر از ۱۵٪ را "غیر واگرا" می‌خوانیم [۱۸].

پس از انجام آزمایش هیدرومتری بر روی نمونه‌ها رده واگرایی آن‌ها بر اساس درصد واگرایی به دست آمده مشخص شد که نتایج حاصله مطابق جدول ۸ می‌باشد.

آزمون‌های شیمیایی را به منظور تعیین میزان سدیم در قیاس با دیگر کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم و پتاسیم) موجود در نمونه خاک و آب منفذی مورد استفاده قرار می‌دهند. برای تعیین میزان واگرایی خاک از طریق آزمایش‌های شیمیایی لازم است که میزان پتاسیم ( $K^+$ )، سدیم ( $Na^+$ )، منیزیم ( $Mg^{2+}$ ) و کلسیم ( $Ca^{2+}$ ) را به‌دست آورد. در جدول ۹ نتیجه آنالیز شیمیایی خاک حاوی نانورُس ارائه گردیده است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های شیمیایی درصد سدیم (ESP) موجود در نمونه‌ها طبق رابطه ۱ و ۲ محاسبه می‌شود که مقادیر به‌دست آمده در جدول ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته میزان نسبت سدیم قابل جذب (SAR) تمام نمونه‌ها مطابق جدول ۱۱ محاسبه گردید:

$$Na(\%) = \frac{Na^+}{TDS} \times 100 \quad (1)$$

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{0.5(Ca^{2+} + Mg^{2+})}} \quad (2)$$

**جدول ۸: درصد واگرایی طبق آزمایش هیدرومتری دوگانه**  
Table 8. Dispersion percent by Double hydrometer test

کد نمونه	درصد واگرایی
ANO	۴۵
ANO + %0.5 nano clay	۳۳
ANO + %1 nano clay	۳۷
ANO + %2 nano clay	۳۸
ANO + %4 nano clay	۴۲

آزمایش سوراخ‌زنی ارائه دهنده روشی مستقیم و کیفی برای اندازه‌گیری پتانسیل واگرایی و فرسایش‌پذیری کلوئیدی خاک‌های رسی توسط عبور آب از سوراخ کوچک ایجاد شده در میان نمونه است. این آزمایش مدلی از عملکرد جریان آب در طول ترک ایجاد شده در یک خاک‌ریز است. مقایسه نتایج روش سوراخ‌زنی با روش‌های دیگر بر روی صدها نمونه آزمایش شده نشان می‌دهد که نتایج آزمایش سوراخ‌زنی بهترین همبستگی را با مشاهدات عملی از فرسایش رُس در طبیعت داشته است. آزمایش سوراخ‌زنی صرفاً برای شناسایی خاک‌های واگرا ابداع شده است و به‌عنوان مدلی هندسی با مقیاس مشخص از شرایط واقعی نیست و لذا نتایج این آزمایش کمی نخواهد بود. [۱۷]. نتایج آزمایش سوراخ‌زنی با درصدهای مختلف نانورُس در جدول ۶ ارائه گردیده است. بر روی نمونه‌ها آزمایش کرامپ نیز انجام شد و نتایج حاصل در جدول ۷ ارائه گردیده است.

**جدول ۶: رده بندی نمونه‌ها از نظر واگرایی طبق آزمایش سوراخ زنی**  
Table 6. Dispersion classification of samples by pinhole test

کد نمونه	نتیجه آزمایش
ANO	D1
ANO + %0.5 nano clay	ND4
ANO + %1 nano clay	ND3
ANO + %2 nano clay	ND3
ANO + %4 nano clay	D2

**جدول ۷: نتایج حاصل از آزمایش کرامپ**  
Table 7. Crambe test results

کد نمونه	نتیجه آزمایش
ANO	واکنش متوسط
ANO + %0.5 nano clay	واکنش خفیف
ANO + %1 nano clay	واکنش خفیف
ANO + %2 nano clay	واکنش خفیف
ANO + %4 nano clay	واکنش متوسط

آزمون هیدرومتری دوگانه هم طبق استاندارد ASTM-D422-63 و به شرح زیر انجام گرفته است:

آزمون هیدرومتری دوگانه براساس پراکنش خاک از طریق سنجش گرانش طبیعی تکه‌های کانی خاک در تعلیق آب خالص در قیاس با آزمون استاندارد هیدرومتری که در آن از ماده‌ی شیمیایی پراکنده‌ساز استفاده می‌شود، انجام می‌گیرد و طبق تعریف مقدار اجزایی که کمتر از mm

جدول ۹: آنالیز شیمیایی خاک حاوی نانورس

Table 9. Chemical analysis of soils with nanoclay

کد نمونه	میزان منیزیم Mg <sup>2+</sup> (meq100/gCLAY)	میزان کلسیم Ca <sup>2+</sup> (meq100/gCLAY)	میزان پتاسیم K <sup>+</sup> meq100/gCLAY)	میزان سدیم Na <sup>+</sup> (meq100/gCLAY)
ANO	۱۹/۲	۳۸	۶/۷۳	۱۳۱/۱
ANO + %0.5 nano clay	۲۳/۴	۴۵	۶/۹۵	۱۵۴/۱
ANO + %1 nano clay	۲۲/۸	۴۴	۷/۱۱	۱۴۹/۵
ANO + %2 nano clay	۲۰/۴	۴۲	۶/۸۴	۱۴۲/۶
ANO + %4 nano clay	۱۶/۸	۳۳	۶/۵۸	۱۰۵/۸

جدول ۱۰: محاسبه درصد سدیم

Table 10. Calculated percentage of sodium

کد نمونه	مجموع کاتیون ها TDS	در صد سدیم ESP
ANO	۱۹۵/۰۳	۶۷/۲۲
ANO + %0.5 nano clay	۲۲۹/۴۵	۶۷/۱۶
ANO + %1 nano clay	۲۲۳/۴۱	۶۶/۹۲
ANO + %2 nano clay	۲۱۱/۸۴	۶۷/۳۱
ANO + %4 nano clay	۱۶۲/۱۸	۶۵/۲۴

جدول ۱۱: نسبت سدیم قابل جذب

Table 11. Absorbable sodium ratio

کد نمونه	نسبت جذب سدیم SAR	$\sqrt{0.5(Ca^{2+} + Mg^{2+})}$	مجموع کلسیم و منیزیم Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>
ANO	۲۴/۵۱	۵/۳۵	۵۷/۲
ANO + %0.5 nano clay	۲۶/۶۶	۵/۷۸	۶۶/۸
ANO + %1 nano clay	۲۵/۸۷	۵/۷۸	۶۶/۸
ANO + %2 nano clay	۲۵/۵۳	۵/۵۹	۶۲/۴
ANO + %4 nano clay	۲۱/۲۰	۴/۹۹	۴۹/۸

خاک افزوده می‌شود. از طرفی به علت سطح ویژه بسیار بالا میزان آب جذب شده نیز با افزایش درصد نانورس بالا رفته و این آب جذب شده بیشتر سبب می‌شود یون سدیم موجود در نانورس راحت تر به شکل محلول درآید و به خاک اضافه شود. لذا مشاهده می‌شود که با افزایش نانورس مصرفی میزان واگرایی خاک نیز افزایش پیدا می‌کند. در ضمن نانورس آبدوست بوده و به جذب بیشتر آب توسط خاک کمک می‌کند.

پس از انجام آزمایش هیدرومتری دوگانه مشخص شد که هنگام استفاده از نانورس تغییری در رده بندی خاک از نظر واگرایی پدید نمی‌آید اما با افزایش درصد نانورس درصد واگرایی افزایش می‌یابد که دلیل آن کاهش سرعت سقوط ذرات به دلیل حل شدن نانورس در آب و در پی آن بیشتر شدن ذرات کوچک تر از  $5\mu$  در حالت هیدرومتری بدون محلول پراکنده ساز است که باعث افزایش درصد واگرایی می‌شود.

#### ۶- تحلیل آزمایش های شیمیایی بعد از افزودن نانورس

برای تعیین میزان سدیم در قیاس با دیگر کاتیون های موجود در نمونه خاک (کلسیم، منیزیم و پتاسیم) و در پی آن محاسبه میزان نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد سدیم (ESP) آزمایش های شیمیایی بر روی نمونه خاک فاقد و حاوی درصد های مختلف نانورس انجام گرفت. در جدول ۹ نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی بر روی عصاره اشباع حاصل از ترکیبات مختلف نانورس با خاک ارائه شده است. در واقع اعداد ارائه شده در این جدول حکایت از میزان کاتیون هایی دارد که به صورت محلول درآمده و پس از عصاره گیری از خاک خارج شده اند و مثلاً هرچه میزان سدیم موجود در عصاره بیشتر باشد، نشان می‌دهد که میزان سدیم آزاد موجود در خاک کمتر است چرا که میزان سدیم بیشتری در واکنش ها شرکت کرده و به صورت محلول درآمده است و برعکس هرچه میزان سدیم اندازه گیری شده در عصاره اشباع کمتر است نشان می‌دهد که میزان سدیم آزاد موجود در خاک که عامل اصلی ایجاد واگرایی در خاک است افزایش پیدا کرده است. تحلیل نتایج حاصل به شرح زیر است:

آنالیز شیمیایی خاک حاوی  $0.5$ ،  $1$ ،  $2$  و  $4$  % نانورس جهت تعیین میزان سدیم، منیزیم، کلسیم و پتاسیم موجود و تاثیر آن بر خاک و اگر انجام گرفته و طبق جدول ۹ میزان کاتیون های موجود در عصاره اشباع به دست آمده است. طبق این جدول می‌توان مشاهده کرد که با افزایش میزان نانورس در خاک میزان سدیم در عصاره اشباع کاهش داشته است و در واقع هرچه به میزان نانورس مصرفی افزوده شده، میزان سدیم آزاد در خاک افزایش داشته است. علت این موضوع را می‌توان در ترکیبات نانورس مصرفی جستجو کرد. طبق جدول ۲ نانورس مصرفی دارای  $0.98$  درصد  $Na_2O$ ،  $3/29$  درصد  $MgO$ ،  $0.86$  درصد  $K_2O$  و  $1/97$  درصد  $CaO$  است. براساس این داده ها و باتوجه به ثابت بودن کاتیون های موجود در خاک فاقد نانورس، دیده می‌شود که با ترکیب  $0.5$  درصد نانورس در خاک، افزایش قابل توجهی در سدیم خاک ایجاد نمی‌شود ولی  $CaO$  موجود در نانورس با سدیم موجود

#### ۵- تحلیل نتایج آزمایش های واگرایی پس از افزودن نانورس

آزمایش سوراخ زنی طبق استاندارد ASTM-D 4647 برای بررسی تاثیر افزودن نانورس بر میزان واگرایی خاک و با افزودن  $0.5$ ،  $1$ ،  $2$  و  $4$  درصد از آن به خاک مورد مطالعه انتخاب گردید. با افزودن  $0.5$  درصد نانورس به خاک دبی خروجی بسیار پایین و در حد  $50$  mm بود. رنگ خاک نیز به تدریج از حالت دارای اثر تیرگی به کمی تیره و در نهایت به متوسط تغییر پیدا کرد. در حد  $180$  mm دبی آب خروجی نسبت به دبی آب خروجی خاک حاوی  $4$  % نانو سیلیس در همین حد، اندکی افزایش را نشان داد، ولی این تغییرات چشمگیر نبوده است. رنگ تیره خاک در این حالت و نیز افزایش دبی خروجی و رنگ خیلی تیره آن در پایان دقیقه دوم از حد  $380$  mm نشان می‌داد که خاک در رده  $ND_4$  یعنی خاک با واگرایی کم قرار دارد. دو برابر کردن میزان نانورس و رساندن آن به  $1$  % باعث شد که رده ی خاک به  $ND_3$  یعنی خاک با واگرایی متوسط تنزل پیدا کند. این روند با افزودن  $2$  % نانورس نیز ادامه پیدا کرد. در این وضعیت علاوه بر افزایش دبی خروجی آب، رنگ آب خروجی نیز از حالت کمی تیره در پایان  $5$  دقیقه اول آزمایش و در حد  $50$  mm، به تیرگی متوسط در  $5$  دقیقه دوم در حد  $50$  mm و تیره در حد  $180$  mm و خیلی تیره در حد  $380$  mm تغییر کرد و در پایان دقیقه ی سوم در این حد، خاک متلاشی شد. لذا می‌توان در این حالت نیز خاک را در رده  $ND_3$  یعنی خاک با واگرایی متوسط ارزیابی کرد. وقتی میزان نانورس به  $4$  % افزایش پیدا کرد علاوه بر افزایش سریع دبی خروجی رنگ خاک نیز تیره و پس از  $8$  دقیقه و در دبی  $50$  mm به شدت تیره گردید که این موضوع حکایت از آن دارد که رده واگرایی خاک باز هم نزول کرده و به رده  $D2$  یعنی خاک و اگر رسیده است.

این رفتار خاک را می‌توان از دو منظر فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار داد. از نظر فیزیکی این نکته قابل تامل است که چون نانورس به دلیل اندازه ی نانومتری خود دارای سطح ویژه ی بسیار بالایی است حتی در درصد های پایین اختلاط نیز به راحتی در تمام حجم خاک نفوذ کرده و عمل جابجایی با دیگر عناصر موجود را انجام می‌دهد. اما از منظر شیمیایی علت بروز این رفتار را می‌توان در دو عامل جستجو کرد. اول این که مطابق شکل ۱ نانورس دارای ماهیتی پلیمری است و بخشی از یون سدیم موجود در خاک در این نانو تخلخل ها به دام می‌افتد و دوم اینکه مطابق جدول ۲ نانورس مصرفی دارای  $0.98$  درصد اکسید سدیم ( $Na_2O$ ) است. وقتی که میزان نانورس مصرفی  $0.5$  درصد است بخشی از یون سدیم خاک در نانو تخلخل موجود که البته ماهیتی پلیمری دارد محبوس می‌گردد و از طرفی در این حالت میزان سدیم موجود در نانورس افزوده شده به خاک نیز در حدی نیست که بتواند میزان سدیم خاک حاوی نانورس را به مقدار محسوسی افزایش دهد. لذا خاک اندکی بهبود در رده ی واگرایی از خود نشان می‌دهد. با افزوده شدن میزان نانورس مقدار سدیم افزوده شده به خاک از مقدار سدیم به دام افتاده در نانو تخلخل موجود پیشی گرفته و رفته رفته بر میزان واگرایی

در خاک واکنش داده و باعث می‌شود در عصاره اشباع میزان سدیم محلول افزایش یافته و به تبع آن میزان سدیم آزاد موجود در خاک کاهش یابد. در درصدهای بالا نیز CaO موجود باعث کاهش سدیم خاک می‌شود ولی سدیم موجود در نانورس میزان سدیم آزاد خاک را افزایش می‌دهد.

این نتایج با نتایج حاصل از آزمایش سوراخ‌زنی نیز مطابقت دارد چرا که در ترکیب ۰/۵ درصدی نانورس و خاک، واگرایی خاک کم شده است و با افزایش درصد نانورس افزوده شده به خاک میزان واگرایی افزایش می‌یابد. در ترکیب نانورس و خاک با توجه به میزان کاتیون‌های موجود ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان نانورس نسبت جذب سدیم کاهش یافته است یعنی هرچه نانورس افزایش پیدا کرده در مجموع میزان سدیم کمتری جذب گردیده است، که می‌توان روند نزولی نسبت جذب سدیم را به افزایش سدیم خاک در اثر افزایش میزان سدیم حاصل از درصدهای بیشتر نانورس دانست. کاهش میزان کلسیم در عصاره اشباع و به تبع آن افزایش کلسیم در خاک با افزودن بر میزان نانورس نیز به همین دلیل است. در ترکیب ۰/۵ درصدی نانورس میزان کلسیم موجود با سدیم خاک ترکیب شده و میزان کلسیم باقی مانده در خاک کاهش می‌یابد. هرچه بر میزان نانورس مصرفی افزوده می‌شود، با توجه به ثابت بودن سدیم خاک، نسبت کلسیم موجود در خاک نیز که دیگر سدیم آزاد جهت ترکیب نمی‌یابد افزایش پیدا می‌کند.

#### ۷- نتیجه گیری

باتوجه به بررسی‌های صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه خاک مورد استفاده در این تحقیق که از تصفیه خانه شهرستان میناب تهیه شده است، مشخص شد که این خاک، رس با خاصیت خمیری کم (CL) بوده و در رده خاک‌های واگرا قرار دارد. لذا برای بررسی تاثیر نانورس، بر خاصیت واگرایی، آزمایش‌های مرسوم و معمول واگرایی بر روی نسبت‌های مختلف ترکیب آن با خاک مبنا انجام گرفت که یافته‌های حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که:

- افزودن درصدهای پایین نانورس به خاک اندکی رده‌ی واگرایی خاک را بهبود می‌بخشد ولی هرچه میزان نانورس مصرفی افزایش پیدا می‌کند خاک به سمت واگرایی بیشتر میل می‌کند که البته باتوجه به این نکته، استفاده از درصدهای پایین نانورس نیز برای مقابله با واگرایی توصیه نمی‌شود.
- آزمایش سوراخ‌زنی بهترین و کاراترین آزمایش برای تعیین رده واگرایی خاک است چرا که تقریباً شرایط طبیعی موجود در محل در این آزمایش مدل می‌شود.
- طبق معیار شرارد در آزمایش‌های شیمیایی تمامی نمونه‌های ساخته شده در رده‌ی واگرا قرار دارند ولی کاهش یا افزایش میزان سدیم آزاد در نمونه‌ها با نتایج حاصل از آزمایش سوراخ‌زنی همخوانی دارد.
- نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌ها حکایت از

- همخوانی با نتایج حاصل از آزمایش سوراخ‌زنی دارد.
- آزمایش کرامپ به تنهایی معیار مناسبی جهت تشخیص رده‌ی خاک‌های واگرا نیست و تنها می‌تواند به عنوان تستی جهت تعیین صحت مابقی آزمایش‌ها تلقی شود.
- بهترین روش ترکیب نانومواد با خاک، در حالت اجرایی حل کردن آن‌ها در آب و سپس اضافه نمودن آن به خاک است ولی در آزمایشگاه به علت پایین بودن درصد آب و نانو ماده مورد استفاده، بهتر است نانو مواد به صورت خشک با خاک مخلوط شده و سپس آب اضافه شود و مخلوط حاصل با همزن برقی با دور بالا مخلوط گردد.
- با توجه به ماهیت نانو مواد، استفاده از آن‌ها در مقایسه با مصالح سنتی مانند سیمان و آهک آثار زیان بار کمتری بر محیط زیست خواهند داشت.

#### مراجع

- [1] Ghasemi Ghahsare, A., Moradi Harsini, K., Ansari, A., Moshrefi far, M. R. and Ghasemi Ghahsare, M. , Investigation of the divergence potential at the top of the clay deposits along the Karoon River (Ahvaz to Khoramshahr), in: 2nd Geological Congress of Iranian Plateau, 2012, pp. 988-997. (In Persian)
- [2] Haroon, M., Shah, S.S., and Khan, S.A., Identification and stabilization of the dispersive soil by admixture of lime, in: 2nd International Seminar on Soil Mechanic and Foundation Engineering of Iran, 1993, pp. 175-186.
- [3] Tokta, F., Behavior and Stabilization of Dispersive Soils with C Type Fly Ash, MSc Thesis 2001.
- [4] Bolouri-Bazaz, J. and Saghafy, H. R., Properties and behavior of dispersive clayey soil treated by PVA, in: International Conference on Geotechnical Engineering, Beirut, 2003.
- [5] Ouhadi, V.R. and Goodarzi, A.R., Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum, Engineering Geology, 85 (2006) 91-101.
- [6] Umesha, T.S., Dinesh, S.V. and Sivapullaiah, P.V., Control of dispersivity of soil using lime and cement, International Journal of Geology, 1(3) (2009) 8-16.
- [7] Ouhadi, V.R., Amiri, M. and Hamidi, S., Dispersive soil improvement with lime, special attention to the reduction of peak intensity of clay minerals in XRD analysis, Modares Civil Engineering Journal, 14(2) (2014) 14-26. (In Persian)
- [8] Alper, S., Gozde, I., Recep, Y.H. and Kambiz, R., Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay, Building and Environment, 42(2) (2006) 150-155.



- Tehran, Iran, 2010. (In Persian)
- [14] Mohammad sani, A., Arabani, M., Khodaparast, A. and Jamshidi chenari, R., Nanoclay Effect on Geotechnical Properties of Sandy Clay, in: 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, Iran, 2010. (In Persian)
- [15] Ghazi, H., Baziar, M.H. and Mirkazemi, S.M., The effects of nano-material additives on the basic properties of soil, in: 14th Asian regional conf. of geotechnic, Hong-Kong, 2011.
- [16] Heydarian, H., Standard methods of soil mechanics laboratory tests according to ASTM 2000, Avand-E-Andisheh, Shiraz, 2008. (In Persian)
- [17] Miller, R.W. and Gardiner, D.T., Soils in our Environment, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1982.
- [18] Walker, D.J.H., Dispersive soils in KwaZulu-Natal, MSc Thesis. University of Natal, Durban, 1997.
- [9] George, S.Z., Ponniah, D.A., And Little, J.A., Effect of temperature on Lime-Soil Stabilization, Construction and Building Materials, 6(4) (1992) 247-252.
- [10] Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M. and Ouhadi, M.H., Pozzolanic Consolidation of Stabilized Soft Clays, Applied Clay Science, 95 (2014) 111-118.
- [11] Ouhadi, V.R., Amiri, M. and Zangeneh, M., Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized Dispersive Soil, Modares Civil Engineering Journal, 16(1) (2016) 11-22. (In Persian)
- [12] Hasanloo, M. and Mahmood Khani, B., Investigation of the effect of chemical parameters on the degree of divergence of clay soils, in: 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, 2011. (In Persian)
- [13] Bazyar, M., Ghazi, H. and Mirkazemi, SM., Investigating the Effect of Nanoclay Additive on Soil Geotechnical Engineering Properties, in: 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics,

Please cite this article using:

A. Asakereh, A. Avazeh, "The Effects of Nano Clay on Dispersive Soils Behavior (Case Study of Minab City)", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 503-512.

DOI: 10.22060/ceej.2016.868

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



