**مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران**
**تابستان ۱۳۹۸، جلد دوازدهم، شماره ۲، صفحه ۷۳ تا ۸۵**

# بررسی آزمایشگاهی کاهش پتانسیل واگرایی رس با استفاده از افزودن نانو اکسید آلومینیوم و آهک

هادی احمدی* [۱]، حمید اکرامی [۲]

دریافت مقاله: ۹۸/۰۱/۰۶ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۵/۲۳

## چکیده

خاک‌های واگرا از جمله مهم‌ترین خاک‌های مساله‌دار در سازه‌های خاکی بویژه پروژه‌های سدهای خاکی به شمار می‌آیند. آهک و سولفات آلومینیوم به دلیل ایجاد جایگزینی مناسب یون‌های کلسیم یا آلومینیوم بجای سدیم، از افزودنی‌های سنتی و رایج در بهسازی خاک‌های واگرا به شمار می‌روند. با توجه به پیشرفت تکنولوژی نانو و استفاده از آن در بهسازی خاک‌ها، در این مطالعه از نانواکسید آلومینیوم جهت بهسازی خاک واگرا استفاده شده است. برای این منظور ترکیبات مختلفی از ماده نانو به مقدار وزنی ۰، ۰/۲، ۰/٤، ۰/۸ و ۱/۰ درصد به رس واگرا و رس واگرای مخلوط شده با ۲، ٤ و ٦ درصد آهک افزوده شده و تاثیر آن در واگرایی خاک‌ها از طریق آزمایش هیدرومتری دوگانه بررسی شده است. نتایج نشان داده است که با افزایش نانواکسید آلومینیوم، درصد واگرایی به شدت کاهش می‌یابد. بطوریکه برای رس واگرای مورد آزمایش، ماده نانو اکسید آلومینیوم به تنهایی تا ٦٤ درصدی پتانسیل واگرایی را کاهش داده است و در نمونه‌های دارای ۲ درصد آهک، با افزودن تنها ۰/۲ درصد ماده نانو، خاک مورد نظر در رده خاک‌های غیرواگرا قرار گرفته است. تصاویر SEM تهیه شده از نمونه‌ها نشان می‌دهد که نانواکسید آلومینیوم با تجمع و کلوخه‌ای نمودن خاک بطور قابل توجهی سطح ویژه را کاهش داده و از جذب آب توسط خاک کاسته است.

**کلید واژه‌ها:** *خاک واگرا، تثبیت خاک، هیدرومتری دوگانه، نانواکسید آلومینیوم، آهک.*

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، hadiahmadi@guilan.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، جهاد دانشگاهی رشت
* مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

**۱. مقدمه**

وجود خاک‌های واگرا در بدنه یا مخزن سدهای خاکی و یا دارای هسته خاکی می‌تواند موجب بروز مشکلات اساسی در بهره‌برداری از آنها گردد. از آنجاییکه نیاز به منابع قرضه محلی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در ساخت سدهای خاکی است، لازم است در صورت عدم وجود منابع قرضه مناسب و یا عدم امکان اجرایی و اقتصادی برداشت مصالح، اینگونه از لایه‌ها در محل پروژه مورد بهسازی قرار گیرند. عمده مشکلات خاک های واگرا به دلیل وجود درصد قابل ملاحظه یون سدیم در آنها است که می‌تواند سبب جداسازی ذرات در شرایط مجاورت با آب و در نتیجه حل شدن خاک شود. آهک و سولفات آلومینیوم از افزودنی‌های سنتی و رایج در بهسازی خاک های واگرا به شمار می‌روند. در این شرایط یون کلسیم (موجود در آهک) و یا آلومینیوم (موجود در سولفات آلومینیوم) جایگزین سدیم موجود در خاک می‌شود (نشریه کمیته سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۵). مطالعات گسترده‌ای در زمینه تاثیر افزودن آهک در کاهش پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی انجام شده است (Supakij and Santi 1995, Umesha et al., 2009). مطالعات نشان داده است که تبادل کاتیونی، کلوخه شدن، کربناته شدن و واکنش پوزولانی چهار عامل مهم در موثر بودن استفاده از آهک به عنوان افزودنی در رس‌های واگرا به شمار می‌رود.

روشن ضمیر و یوسف زاده (۱۳۸۹) اصلاح خاک‌های واگرا با افزودنی‌های آهک، سیمان، سولفات آلومینیوم و سولفات کلسیم هم به‌صورت مجزا و هم به صورت ترکیبی بررسی نموده‌اند. هر چند بکارگیری همزمان چند نوع افزودنی جهت افزایش مقاومت و سختی خاک رایج است، ولی استفاده ترکیبی از افزودنی‌ها برای بهسازی خاک های واگرا کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های پین‌هول، کرامب و هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های تثبیت شده خاک واگرا با ترکیب افزودنی های مختلف نشان می‌دهد که افزودن ترکیبی سولفات آلومینیوم با آهک یا سیمان شرایط بهینه تری نسبت به استفاده هر یک از این مواد به تنهایی را دارد. امیرخانی و حسنلو (۱۳۹۳) نیز بهسازی خاک‌های رسی واگرا را با افزودن آهک و سولفات آلومینیوم بررسی کرده و مقایسه نموده‌اند. در آزمایش‌های مذکور افزودنی‌ها بطور جداگانه و ترکیبی برای اصلاح واگرایی خاک موجود در سد میرزاخانلو زنجان استفاده‌گردیده و مقدار و زمان بهینه هر یک از افزودنی‌ها جهت کاهش پتانسیل واگرایی معرفی شده است. نتایج حاصل از آزمایشهای پین‌هول، کرامب و نیز هیدرومتری مضاعف نشان داده است که ترکیب آهک با سولفات آلومینیوم ضمن عملکرد مناسب در جلوگیری از وقوع واگرایی، به لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است و مقدار کمتری از افزودنی‌ها نسبت به استفاده جداگانه از آنها را به دنبال دارد. از دیگر مواد ترکیبی به عنوان افزودنی موثر در کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌توان آهک و خاکستر بادی را نام برد که با توجه به ایجاد واکنش‌های پوزولانی، می‌تواند نقش موثری در کاهش واگرایی داشته باشد(Sharma et al., 2009, Premkumar et al., 2016).

از سوی دیگر استفاده از مواد نانو برای بهبود خواص مکانیکی و مشکلات ژئوتکنیکی خاک ها در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (صنایعی کرمانی و همکاران، ۱۳۹۷). در بین این مطالعات استفاده ترکیبی از آهک و مواد نانو جهت بهسازی خاک رس گسترش بیشتری داشته است. اما بسیاری از این مطالعات جهت افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش خواص خمیری خاک انجام پذیرفته است. از جمله این مطالعات می‌توان به بهبود خواص مقاومتی و کاهش پلاستیسیته خاک رس دارای پلاستیسیته بالا توسط آهک و نانو سیلیس (Pashabavandpoori and Jahangiri, 2015)، تاثیر افزودن نانو رس در رفتار خمیری و مقاومت تک‌محوری خاک رس (Nohani and Alimakan, 2015) و بررسی مشخصه‌های برشی خاک تثبیت‌شده با نانو اکسید منزیم (Gao et al., 2017) اشاره نمود. در زمینه خاک‌های واگرا نیز مطالعات عباسی و فرجاد (۱۳۹٦) امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی را بررسی نموده است. بر اساس آزمایش های پین هول انجام شده بر روی دو نوع رس واگرا، ۰/۵ و ۱/۰ درصد ذرات نانو رس توانسته است پتانسیل واگرایی خاک را از رده بندی شدیداً واگرا به رده بندی نسبتاً واگرا تقلیل

www.SID.ir

Archive of SID


دهد. بطور مشابه در مطالعه‌ای دیگر، عسکریه و آوازه (Asakereh and Avazeh, 2017) بر مبنای آزمایش های پین هول و هیدرومتری دوگانه استفاده از ۰/۵ درصد نانو رس جهت کاهش پتانسیل واگرایی خاک رس شهر میناب مناسب دانسته‌اند.

در این مطالعه ترکیب ماده افزودنی سنتی آهک و ماده نوین نانو اکسید آلومینیوم در کاهش پتانسیل واگرایی خاک رس مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت تعیین درصد واگرایی از آزمایش استاندرد هیدرومتری دوگانه (مضاعف) استفاده شده است.

## ۲. مصالح و برنامه آزمایشگاهی

### ۲. ۱. *برنامه آزمایشگاهی*

در بخش مطالعات آزمایشگاهی ابتدا نمونه‌ای از خاک رس در شرایط طبیعی تهیه شده و خصوصیات ژئوتکنیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش های شاخص و شناسایی استاندارد شامل آزمایش دانه‌بندی، تعیین حدود اتربرگ، تعیین چگالی ویژه دانه‌های جامد خاک و نیز تراکم استاندارد بر روی نمونه مورد نظر انجام گردیده است. همچنین از طریق آزمایش طیف‌سنجی با استفاده از پرتو ایکس عناصر موجود در خاک آنالیز گردیده است. جهت سنجش تاثیر نانو مواد از جنس نانواکسید آلومینیوم بر پتانسیل واگرایی خاک و همچنین نقش آن در خاک‌های تثبیت شده با آهک، ترکیب‌های مختلفی از مواد افزودنی مورد آزمایش هیدرومتری دوگانه قرار گرفته است. بدین منظور رس واگرا با هر یک از ترکیب‌های صفر، ۰/۲، ۰/٤، ۰/۸ و ۱/۰ درصد نانو اکسید آلومینیوم و صفر، ۲، ٤ و ٦ درصد آهک (نسبت به وزن خاک) مورد آزمایش قرار گرفته است. در مجموع ۲۰ ترکیب مختلف از خاک و افزودنی تهیه و مقدار درصد واگرایی آن سنجیده شده است. بنابراین می‌توان در دو بخش ویژه شامل: ۱) تاثیر افزودن نانو اکسید آلومینیوم روی رس واگرا، ۲) تاثیر افزودن نانو اکسید آلومینیوم در بهسازی رس واگرا به کمک آهک، شرایط تثبیت خاک را بررسی نمود.

### ۲. ۲. *مصالح مورد استفاده*

خاک مورد مطالعه ذرات عبوری از الک شماره ۱۰ است که دارای رنگ قهوه‌ای است و پلاستیسیته چندان بالایی ندارد. بر روی نمونه خاک آزمایش دانه بندی (بر اساس استاندارد ASTM D2487-17) و آزمایش تعیین حدود اتربرگ (بر اساس استاندارد ASTM D4318-17) انجام شده است که نتایج نشان می‌دهد این خاک بر اساس روش طبقه‌بندی متحد در رده خاک CL (رس با خاصیت خمیری کم) قرار دارد. در شکل ۱ نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه نشان داده شده است. پارامترهای شاخص خاک در جدول ۱ آورده شده است. همچنین آنالیز عنصری خاک مورد استفاده از طریق انجام آزمایش طیف سنجی فلوئورسانس پرتو ایکس (XRF) بر اساس استاندارد ASTM E1621-13 در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس این آنالیز، خاک دارای ۱۱/۲۳ درصد اکسید سدیم و ٤/٦٥ درصد اکسید آلومینیوم است.

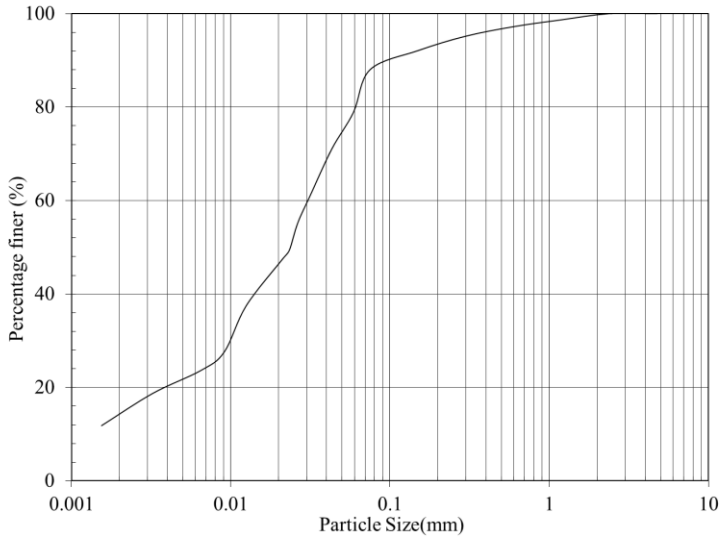
همچنین آزمایش تراکم استاندارد بر اساس استاندارد ASTM D698-07 جهت تعیین مقادیر وزن مخصوص حداکثر خاک و رطوبت بهینه انجام گردیده است که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل برای نمونه مورد مطالعه، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک حدود ۱۷/٦ کیلونیوتن بر متر مکعب و رطوبت بهینه ۱۸/۹ درصد بدست آمده است.

افزودنی مورد استفاده در آزمایش‌ها آهک و نانو اکسید آلومینیوم می‌باشد. بطور کلی آهک متداول‌ترین افزودنی برای تثبیت خاک‌های رسی به شمار می‌رود. رایج‌ترین روش برای جلوگیری از ایجاد واگرایی در خاک نیز استفاده از آهک است. عامل شیمیایی اصلی آهک مورد استفاده اکسید کلسیم است. در جدول ۲ مشخصات شیمیایی آهک مورد استفاده آورده شده است. افزودنی خاص بکار برده شده در این مطالعه پودر نانو اکسید آلومینیوم است. اکسیدآلومینیوم یکی از ترکیبات غیرآلی با فرمول شیمیایی $Al_2O_3$ است که نام‌های تجاری متنوعی مانند آلومینا، کوراندوم و غیره دارد. این ماده دارای دمای ذوب بسیاربالایی واز لحاظ شیمیایی بسیار پایدار است. سختی،

www.SID.ir

Archive of SID

استحکام و مقاومت به سایش آلومینا در بین اکسیدها، از همه بالاتراست (دارای سختی ۹ در مقیاس ماوس). در جدول ۳ مشخصات نانو آلومینیوم استفاده شده در این مطالعه ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۳ نتایج آزمایش XRD بر روی نانواکسید آلومینیوم (توسط شرکت آرمان جستجوگران، ۱۳۹۷) نشان داده شده است.




**شکل ۱.** نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

**جدول ۱.** مشخصات فیزیکی و شاخص خاک مورد مطالعه

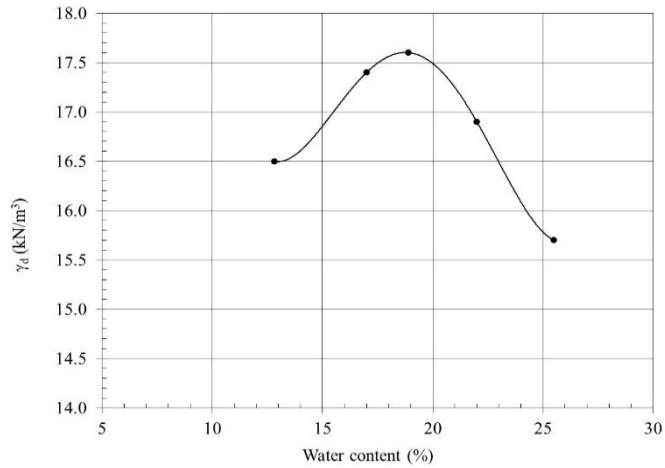
| Soil | USCS | LL | PL | PI | $G_S$ | p.p. #200 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Clay | CL | 48 | 19 | 29 | 2.72 | 88.03 |

**جدول ۲.** آنالیز شیمیایی خاک و آهک مورد مطالعه به وسیله دستگاه XRF

| Oxide compound | Clay (%) | Lime (%) |
|---|---|---|
| $Na_2O$ | 11.23 | - |
| $P_2O_5$ | 0.19 | - |
| MnO | 0.24 | 0.25 |
| $K_2O$ | 3.05 | 0.1 |
| MgO | 3.67 | 0.94 |
| $Al_2O_3$ | 4.65 | 0.45 |
| $Fe_2O_3$ | 8.02 | 0.24 |
| CaO | 15.02 | 72.15 |
| SrO | 0.15 | - |
| $SO_3$ | - | 0.1 |
| $SiO_2$ | 40.38 | 1.35 |
| $TiO_2$ | 0.9 | - |
| L.O.I | 12.5 | 24.42 |

www.SID.ir

Archive of SID

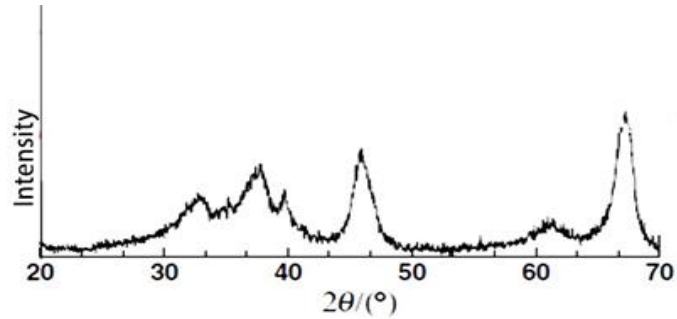




**شکل ۲.** نتایج آزمایش تراکم بر روی خاک مورد مطالعه

افزودنی مورد استفاده در آزمایش‌ها آهک و نانو اکسید آلومینیوم می‌باشد. بطور کلی آهک متداول‌ترین افزودنی برای تثبیت خاک‌های رسی به شمار می‌رود. رایج‌ترین روش برای جلوگیری از ایجاد واگرایی در خاک نیز استفاده از آهک است. عامل شیمیایی اصلی آهک مورد استفاده اکسید کلسیم است. در جدول ۲ مشخصات شیمیایی آهک مورد استفاده آورده شده است. افزودنی خاص بکار برده شده در این مطالعه پودر نانو اکسید آلومینیوم است. اکسیدآلومینیوم یکی از ترکیبات غیرآلی با فرمول شیمیایی Al2O3 است که نام‌های تجاری متنوعی مانند آلومینا، کوراندوم و غیره دارد. این ماده دارای دمای ذوب بسیاربالایی واز لحاظ شیمیایی بسیار پایدار است. سختی، استحکام و مقاومت به سایش آلومینا در بین اکسیدها، از همه بالاتراست (دارای سختی ۹ در مقیاس ماوس). در جدول ۳ مشخصات نانو آلومینیوم استفاده شده در این مطالعه ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۳ نتایج آزمایش XRD بر روی نانواکسید آلومینیوم (توسط شرکت آرمان جستجوگران، ۱۳۹۷) نشان داده شده است.

**جدول ۳.** مشخصات نانو آلومینیوم استفاده شده (تهیه شده از شرکت آرمان جستجوگران، ۱۳۹۷)

| Formula | Color | Density (g/mL) | Formula Weight (g/mol) | Size (nm) | Type |
|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | White | 2.9 | 101.96 | 20 | Powder |




**شکل ۳.** نتایج آزمایش XRD بر روی نانواکسید آلومینیوم (توسط شرکت آرمان جستجوگران، ۱۳۹۷)

www.SID.ir

Archive of SID

### ۳. آزمایش هیدرومتری دو گانه

آزمایش هیدرومتری دوگانه یکی از چهار روش متداول در شناسایی خاک‌های واگرا است. به منظور تعیین مقدار پتانسیل واگرایی خاک توسط آزمایش هیدرومتری دوگانه، روی هر یک از نمونه‌ها دو بار آزمایش هیدرومتری انجام گردیده است. در مرحله اول آزمایش هیدرومتری معمولی مطابق با استاندارد ASTM D 422-63 انجام شده است که در آن از ماده پراکنده ساز هگزا متافسفات سدیم و همزن مکانیکی برای جداسازی ذرات استفاده شده است. در مرحله دوم روی نمونه دیگری از همان ترکیب آزمایش هیدرومتری دوبل مطابق با استاندارد ASTM D 4221-17 انجام گرفته است. تفاوت این آزمایش با آزمایش معمولی عدم استفاده از ماده پراکنده ساز (هگزا متافسفات سدیم) و همزن مکانیکی است. با انجام آزمایش هیدرومتری در دو مرحله ذکر شده، درصد واگرایی نمونه ها بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\text{Dispersion } Percent = \frac{A}{B} \times 100\% \qquad (۱)$$

که در آن B درصد عبوری از قطر ۰/۰۰۵ میلیمتر در آزمایش هیدرومتری معمولی (با ماده پراکنده‌ساز و همزن مکانیکی) و A درصد عبوری از قطر ۰/۰۰۵ میلیمتر در آزمایش هیدرومتری دوگانه (بدون ماده پراکنده‌ساز) است. برای تعیین میزان پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه از معیارهای ارائه شده در جدول٤ و یا جدول ۵ استفاده می‌شود. در شکل ٤ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه خاک عبوری از الک شماره ۱۰ نشان داده شده است. برای خاک پایه مقدار درصد عبوری از اندازه ۵ میکرون (۰/۰۰۵ میلیمتر) در شرایط استاندارد (با مواد پراکنده ساز هگزامتافسفات سدیم) حدود ۳۱/۳٤ درصد و در شرایط دوگانه (بدون مواد پراکنده ساز و همزن مکانیکی) حدود ۱٦/۷۸ درصد بدست آمده است. بنابراین با توجه به این دو مقدار، درصد واگرایی خاک برداشت شده حدود ٥٤ درصد می‌باشد که بر اساس معیار شرارد و همکاران (Sherard et al., 1976) خاک در رده خاک‌های واگرا و مطابق با معیار بل و ماود (Bell and Maud, 1994) خاک در محدوده خاک‌های دارای واگرایی شدید قرار می‌گیرد.

**جدول ٤.** تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه بر اساس معیار شرارد و همکاران، (۱۹۷٦)

| Dispersoin Percentage | Soil Dispersion Potential |
|---|---|
| ≤ 15 | Non-Dispersive |
| 15 – 35 | Intermediate |
| ≥ 35 | Dispersive |

**جدول ۵.** تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه بر اساس معیار بل و ماود، (۱۹۹٤)

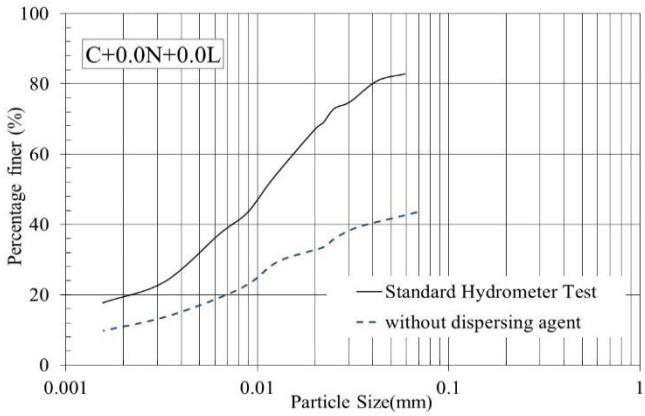
| Dispersoin Percentage | Soil Dispersion Potential |
|---|---|
| ≤ 15 | Non-Dispersive (N. D.) |
| 15 – 30 | Slightly Dispersive (S. D.) |
| 30 – 50 | Moderately Dispersive (M. D.) |
| ≥ 50 | Highly Dispersive (H. D.) |

با مشخص شدن قرارگیری خاک در رده خاک‌های واگرا، مطابق با برنامه آزمایشگاهی ارائه شده در جدول ۵، نمونه‌های مختلف از ترکیب خاک، مواد نانو و آهک تهیه گردید. با توجه به وجود آهک در نمونه‌ها، هر یک از نمونه‌ها در ظرف در بسته و در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۸ روز نگهداری شده است. پس از دوره عمل آوری، هر یک از نمونه ها مورد آزمایش هیدرومتری دوگانه قرار گرفته است. در شکل‌های ۵ تا ۸ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه به ترتیب برای نمونه‌های دارای صفر، ۲، ٤

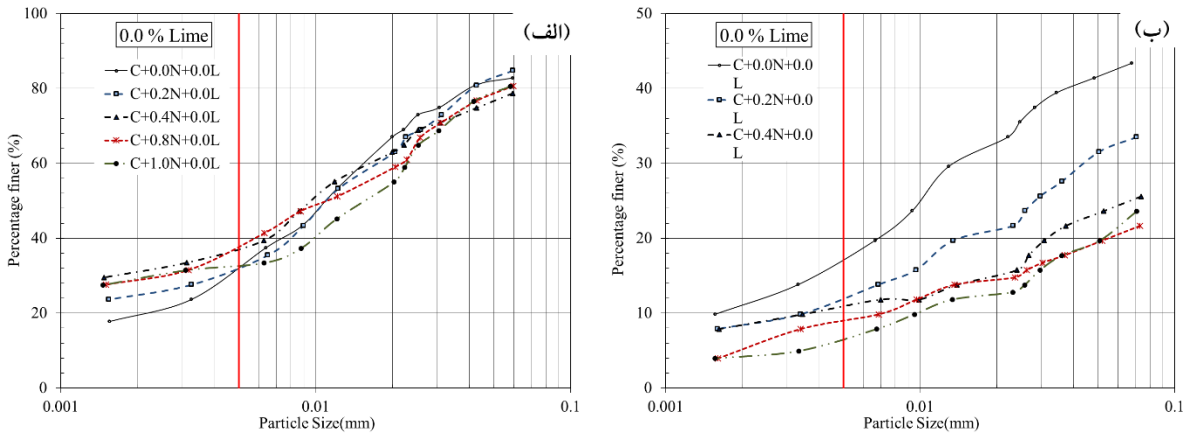
www.SID.ir

Archive of SID

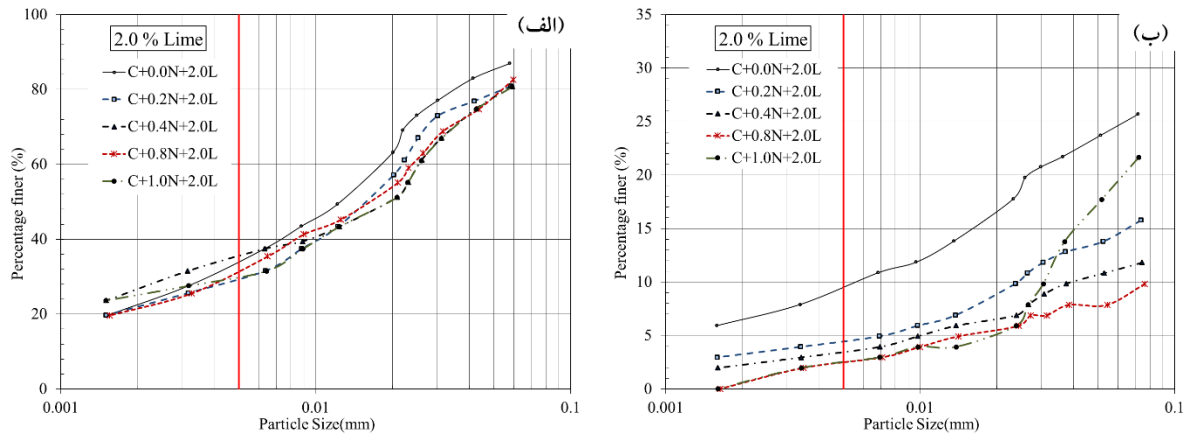

و ٦ درصد آهک و مقادیر مختلف نانو اکسید آلومینیوم نشان داده شده است.




شکل ٤. نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه رس پایه



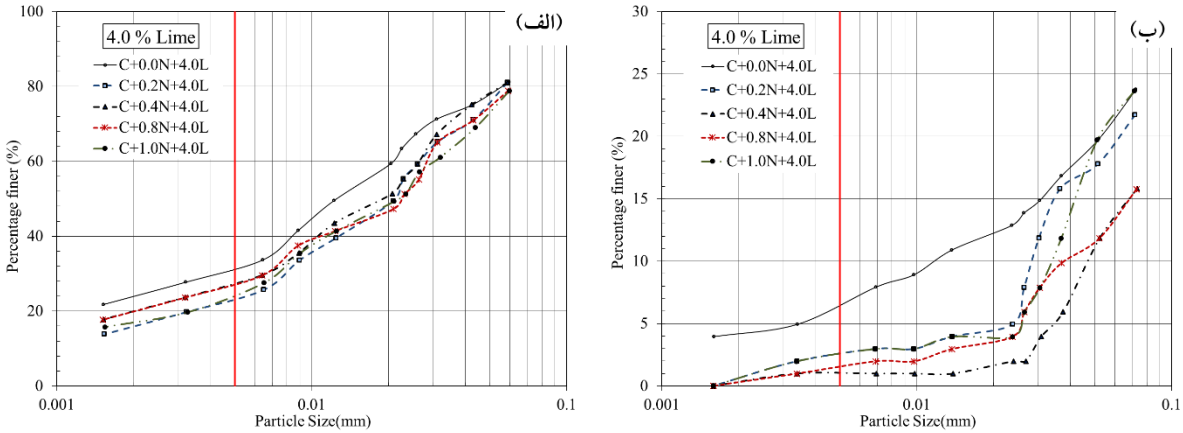

**شکل ٥.** نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای مقادیر مختلف نانو آلومینیوم و بدون آهک؛ (الف) با ماده پراکنده ساز و (ب) بدون ماده پراکنده ساز



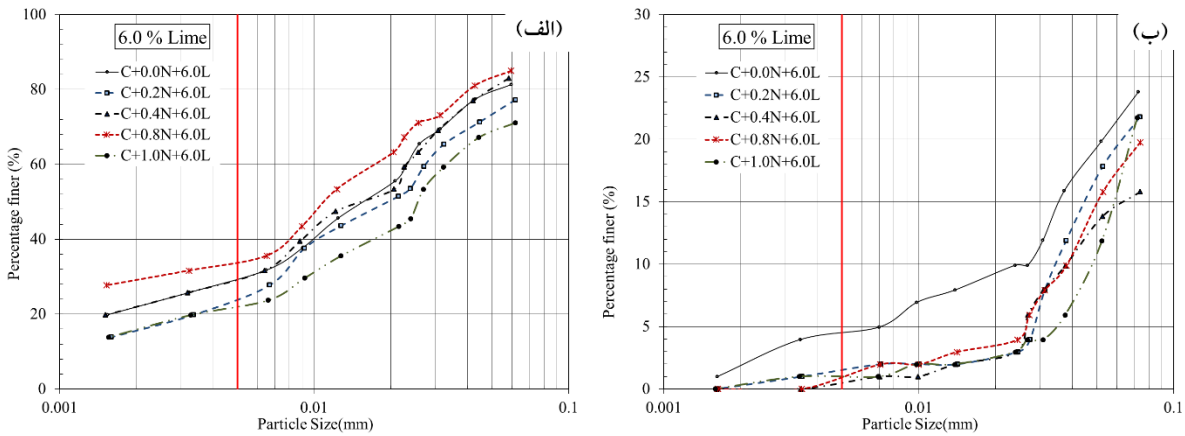

**شکل ٦.** نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ۲ درصد وزنی آهک و مقادیر مختلف نانوآلومینیوم ؛ (الف) باماده پراکنده ساز و (ب) بدون ماده پراکنده ساز

www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۷.** نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ٤ درصد وزنی آهک و مقادیر مختلف نانو آلومینیوم؛ (الف) با ماده پراکنده ساز و (ب) بدون ماده پراکنده ساز




**شکل ۸.** نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های دارای ٦ درصد وزنی آهک و مقادیر مختلف نانو آلومینیوم؛ (الف) با ماده پراکنده ساز و (ب) بدون ماده پراکنده ساز

## ٤. تحلیل نتایج

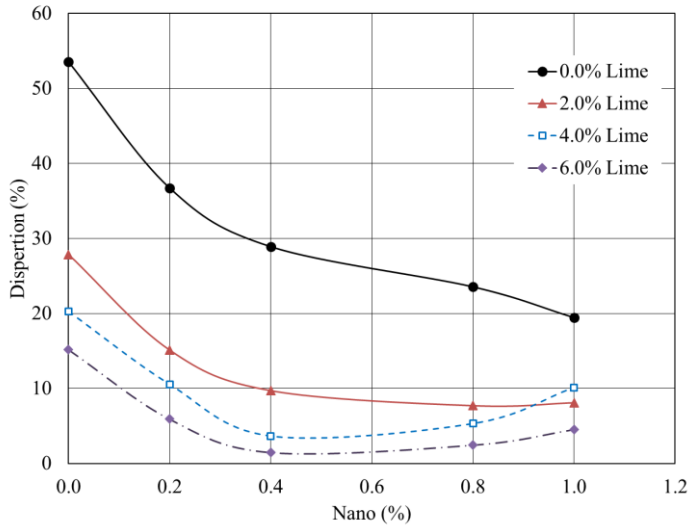
با انجام آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های تهیه شده با درصدهای مختلف آهک و نانو اکسید آلومینیوم، مقدار درصدهای ریزتر از اندازه ۵ میکرومتر در هریک از شرایط با و بدون ماده پراکنده‌ساز هگزامتافسفات سدیم اندازه‌گیری گردیده است. نسبت درصد ریزتر از ۵ میکرومتر در شرایط بدون ماده پراکنده‌ساز به درصد ریزتر از ۵ میکرومتر در شرایط با ماده پراکنده‌ساز (بصورت درصد) در جدول ٦ به عنوان درصد واگرایی محاسبه و ثبت گردیده است. به منظور بررسی تاثیر افزودن نانواکسید آلومینیوم بر شرایط واگرایی خاک، نمودار تغییرات درصد واگرایی به ازای افزایش ماده نانو اکسید آلومینیوم در شکل ۹ نشان داده شده است. بطور مشابه نمودار تغییرات درصد واگرایی بر حسب افزایش مقدار آهک به نمونه در شکل ۱۰ آورده شده است. نکته قابل ذکر در مورد نتایج آزمایشهای هیدرومتری دوگانه اینکه بررسی نتایج دانه بندی بر اساس‌هیدرومتری استاندارد (با ماده پراکنده ساز هگزامتافسفات سدیم و همزن مکانیکی) در کلیه نمونه‌ها بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. اختلاف جزئی موجود در نمودار دانه‌بندی هیدرومتری استاندارد برای نمونه‌ها می تواند ناشی از ترکیبات شیمیایی بوجود آمده (بویژه در نمونه‌های دارای آهک) و یا خطاهای آزمایشگاهی (ناشی از روابط تجربی، تصحیح دمای محیط و یا دقت در قرائت هیدرومتر) باشد. بنابراین حتی پس از بهسازی نمونه‌ها، ماده جداساز تا حد زیادی توانسته است بطور موثری سبب پراکندگی ذرات خاک از یکدیگر گردد.

www.SID.ir

Archive of SID


**جدول ٦.** نتایج تعیین درصد واگرایی از روی آزمایش هیدرومتری دوگانه برای نمونه های مختلف

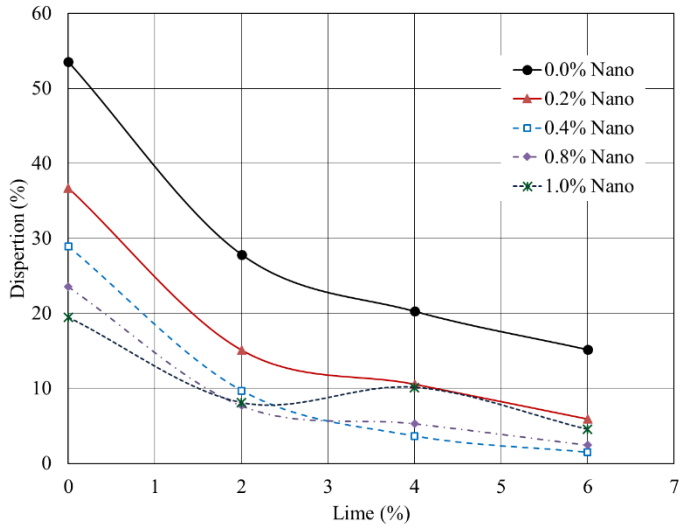
| Test No. | Sample Name | Lime (%) | Nano (%) | % passing 5-µm in Test Method D 422 | % passing 5-µm in Test Method D 4221 | Dispersion (%) | Soil Dispersion Potential |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | C+0.0N+0.0L | 0 | 0.0 | 31.34 | 16.78 | 53.56 | H. D |
| 2 | C+0.2N+0.0L | 0 | 0.2 | 31.84 | 11.70 | 36.73 | M. D. |
| 3 | C+0.4N+0.0L | 0 | 0.4 | 36.99 | 10.69 | 28.91 | S. D. |
| 4 | C+0.8N+0.0L | 0 | 0.8 | 37.25 | 8.77 | 23.55 | S. D. |
| 5 | C+1.0N+0.0L | 0 | 1.0 | 32.60 | 6.34 | 19.45 | S. D. |
| 6 | C+0.0N+2.0L | 2 | 0.0 | 33.33 | 9.29 | 27.87 | S. D. |
| 7 | C+0.2N+2.0L | 2 | 0.2 | 29.02 | 4.39 | 15.12 | S. D. |
| 8 | C+0.4N+2.0L | 2 | 0.4 | 35.00 | 3.40 | 9.71 | N. D. |
| 9 | C+0.8N+2.0L | 2 | 0.8 | 30.89 | 2.38 | 7.70 | N. D. |
| 10 | C+1.0N+2.0L | 2 | 1.0 | 29.77 | 2.41 | 8.10 | N. D. |
| 11 | C+0.0N+4.0L | 4 | 0.0 | 31.02 | 6.29 | 20.29 | S. D. |
| 12 | C+0.2N+4.0L | 4 | 0.2 | 22.97 | 2.43 | 10.57 | N. D. |
| 13 | C+0.4N+4.0L | 4 | 0.4 | 27.03 | 0.99 | 3.66 | N. D. |
| 14 | C+0.8N+4.0L | 4 | 0.8 | 27.00 | 1.44 | 5.32 | N. D. |
| 15 | C+1.0N+4.0L | 4 | 1.0 | 23.94 | 2.43 | 10.14 | N. D. |
| 16 | C+0.0N+6.0L | 6 | 0.0 | 29.02 | 4.40 | 15.18 | S. D. |
| 17 | C+0.2N+6.0L | 6 | 0.2 | 23.70 | 1.40 | 5.92 | N. D. |
| 18 | C+0.4N+6.0L | 6 | 0.4 | 29.06 | 0.43 | 1.47 | N. D. |
| 19 | C+0.8N+6.0L | 6 | 0.8 | 33.74 | 0.83 | 2.46 | N. D. |
| 20 | C+1.0N+6.0L | 6 | 1.0 | 21.81 | 0.99 | 4.53 | N. D. |




**شکل ۹.** تغییرات درصد واگرایی بر حسب تغییرات مقدار نانواکسید آلومینیوم

www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۱۰.** تغییرات درصد واگرایی بر حسب تغییرات مقدار آهک

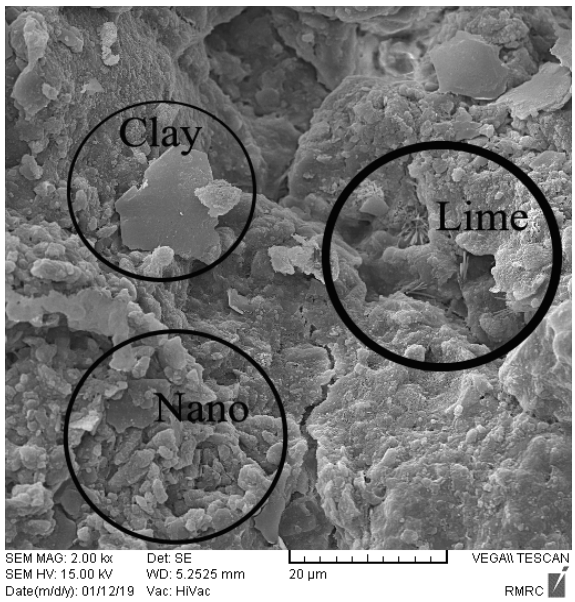
همانطور که از روی نمودار فوقانی شکل ۹ مشخص است، روند تغییرات درصد واگرایی به ازای افزودن نانواکسید آلومینیوم به نمونه خاک واگرا، دارای شیب کاهشی نسبتاً زیادی است. به عبارت دیگر مقدار کمی از نانواکسید آلومینیوم توانسته است بطور قابل ملاحظه‌ای سبب کاهش پتانسیل واگرایی گردد. افزایش ۰/۲ درصدی نانواکسید آلومینیوم به نمونه رس واگرا سبب شده است که درصد واگرایی از ٥٤ درصد با کاهش نسبی ۳۱ درصدی به ۳۷ درصد برسد. هرچند همچنان خاک در وضعیت واگرا بر اساس معیار شرارد قرار می‌گیرد ولی کاهش قابل ملاحظه است و بر اساس معیار بل و ماود در رده خاک با واگرایی ملایم قرار گرفته است. همچنین افزودن ۰/٤ درصد نانواکسید آلومینیوم به نمونه رس واگرا، شرایط را در وضعیت متوسط قرار داده است. هر چند که افزایش یک درصدی نانو اکسید آلومینیوم نتوانسته است که معیار شرارد را برای غیر واگرا بودن نمونه تامین نماید، ولی کاهش پتانسیل واگرایی کاملاً محسوس است. با افزایش یک درصدی مواد نانو، درصد واگرایی به حدود ۱۹/٥ درصد رسیده است (حدود ٦٤ درصد کاهش درصد واگرایی) که در معیار شرارد، خاک با واگرایی متوسط و در معیار بل و ماود، خاک با واگرایی ناچیز محسوب می‌شود. نقش افزودن آهک در کاهش واگرایی خاک ها از گذشته بارز بوده است و در این مطالعه هم این روند بطور مناسبی دیده شده است، بطوریکه افزودن ۲، ٤ و ٦ درصد آهک به نمونه خاک واگرا (با درصد واگرایی ٥٤ درصد) توانسته است به ترتیب درصد واگرایی را به ۲۸، ۲۰ و ۱٥ درصد کاهش داده و کاهشی به ترتیب حدود ٤۸، ٦۲ و ۷۲ درصدی در پتانسیل واگرایی داشته باشد (شکل ۱۰). هر چند این روند با افزایش درصد آهک به صورت کاهشی ادامه دارد، اما مطالعات اوحدی و همکاران (۱۳۹۳) که بر روی تثبیت خاک واگرا با استفاده از آهک انجام شده است، نشان می‌دهد که شیب تغییرات پتانسیل واگرایی با مقادیر بیش از ٦ درصد آهک، چندان بالا نیست و مقدار پتانسیل واگرایی پس از ٦ درصد آهک تغییر چندان نسبت به نمونه های ساخته شده با ٦ درصد آهک ندارند. تاثیر افزودن نانو اکسید آلومینیوم در طرح تثبیت خاک واگرا به کمک آهک، موضوع اساسی بوده که بطور خاص در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر خلاف نمونه‌های فاقد آهک، با افزودن تنها ۰/۲ درصد پودر نانو اکسید آلومینیوم، نمونه‌های دارای درصد آهک پایین (۲ درصد آهک) نیز در رده خاک های غیرواگرا قرار گرفته است. درصد واگرایی برای نمونه های حاوی تنها ۲ درصد آهک، با اضافه شده ۰/۸ درصد ماده نانو حدود ۸ درصد رسیده است که اطمینان مناسبی برای عدم واگرایی نمونه خواهد داشت. بررسی شرایط نمودارهای شکل های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که روند کاهشی

www.SID.ir

Archive of SID


ترکیب آهک و نانو ادامه‌دار نیست و با افزایش بیشتر ماده نانو، لزوماً شرایط غیرواگرایی بهتر نخواهد شد. برای نمونه‌های دارای ٦ درصد آهک، افزودن ٠/٤ درصد ماده نانو اکسید آلومینیوم شرایط بهینه را فراهم کرده است و درصد واگرایی نزدیک به صفر رسیده است. برای سایر درصدهای آهک نیز مقدار ٠/٤ تا ٠/٨ ماده نانو شرایط بهتری را ایجاد نموده است.

در شکل ١١ تصویر میکروسکوپ اکترونی (SEM) تهیه شده از نمونه دارای ٦ درصد آهک و ١/٠ درصد نانو اکسید آلومینیوم نشان داده شده است (تهیه شده در آزمایشگاه مرکز پژوهش متالورژی رازی). همانگونه که در تصویر مشخص است، پیوستگی نسبتا مناسبی بین ذرات رس به دلیل وجود آهک و مواد نانو بوجود آمده است.




**شکل ١١.** عکس SEM از نمونه رس دارای ٦ درصد آهک و ١/٠ درصد ماده نانو

بر اساس تصاویر SEM دو تغییر جدی در نمونه رس واگرا پس از افزودن آهک و مواد نانو قابل مشاهده است. افزودن آهک سبب واکنش شیمیایی بین دانه‌ای شده و بافت های پیوسته‌ای بین ذرات بوجود می‌آورد. این واکنش ضمن ایجاد پیوستگی مناسب بین ذرات کاهش خواص خمیری و افزایش مقاومت خاک، سبب جایگزینی یون‌های کلسیم حاصل از هیدراتاسیون آهک و یونیزه شدن آن با سدیم موجود در خاک واگرا می‌شود. تبادل کاتیونی آهک به صورت زیر قابل نمایش است:

$$Ca^{++} + Clay \rightarrow Ca^{++}Clay + (Na^{+}, K^{+}) \qquad (٢)$$

از سوی دیگر نانو اکسید آلومینیوم با حل کردن بخشی از کانی‌های رسی، آنها از حالت ورقه‌ای خارج ساخته و با اضافه نمودن یون‌های کلسیم سبب کلوخه‌ای شدن و دانه‌ای نمودن ذرات رس شده است. با توجه به وجود آهک واکنش پوزولانی زیر نیز در نمونه می‌تواند رخ دهد:

$$Ca^{++} + 2(OH)^{-} + Al_2O_3 \rightarrow CAH \qquad (٣)$$

در این شرایط در خاک‌های واگرا بخشی از یون های آلومینیوم جایگزین یون‌های سدیم موجود در خاک واگرا می‌گردد. با کاهش سطح ویژه ایجاد شده در ذرات، جذب آب ذرات رس نیز کاهش یافته و کاهش خواص خمیری و افزایش سختی نمونه را به همراه خواهد داشت.

## ٥. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر استفاده از نانو ذرات اکسید آلومینیوم در بهسازی خاک واگرا با استفاده از آهک از طریق آزمایش هیدرومتری دوگانه بررسی شده است. معیار شرارد و همکاران

www.SID.ir

Archive of SID

(۱۹۷٦) و بل و ماود (۱۹۹٤) نیز برای تشخیص شرایط واگرایی از روی نتایج آزمایشها در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است که با افزایش نانواکسید آلومینیوم، درصد واگرایی به شدت کاهش می‌یابد. بطوریکه در نمونه‌های آزمایش شده با ۰/۲، ۰/٤، ۰/۸ و ۱/۰ درصد نانواکسید آلومینیوم، مقدار درصد واگرایی به ترتیب حدود ۳۱، ٤٦، ٥٦ و ٦٤ درصد کمتر شده است. تاثیر ماده نانو به ویژه در نمونه‌های حاوی آهک محسوس می‌باشد. نرخ تغییرات کاهش بوجود آمده در پتانسیل واگرایی بویژه در نمونه‌های مخلوط با آهک، برای درصدهای پایین نانو (تا ۰/٤ درصد) بیشتر مشاهده شده است. بر خلاف نمونه های فاقد آهک، با افزودن تنها ۰/۲ درصد ماده نانو به نمونه‌های دارای ۲ درصد آهک، نمونه مستعد مورد آزمایش در رده خاک‌های غیرواگرا قرار گرفته است. درصد واگرایی برای نمونه‌های حاوی تنها ۲ درصد آهک، با اضافه شده ۰/۸ درصد ماده نانو به زیر ۱۰ درصد (حدود ۸ درصد) رسیده است که اطمینان مناسبی برای عدم واگرایی نمونه خواهد داشت. البته آزمایش نشان داده است که مقدار بهینه‌ای برای درصد ماده نانو در خاک‌های مخلوط شده با آهک وجود دارد. همچنین بررسی تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از نمونه خاک واگرای تثبیت شده با آهک و ماده نانو نشان داده است که آهک با ایجاد پیوستگی نسبتا مناسبی بین ذرات رس و نانو اکسید آلومینیوم با تجمع بافتی و کاهش سطح ویژه، ضمن افزایش سختی و کاهش خواص خمیری خاک، با جایگزینی یون‌های کلسیم و آلومینیوم با سدیم و پتاسیم موجود در خاک، موجب کاهش و یا حذف پتانسیل واگرایی می گردد.

## منابع


امیرخانی، م.ر. و حسنلو، م.ر.، ۱۳۹۳. بررسی تثبیت خاکهای رسی واگرا بوسیله نتایج آزمایش های پین هول ،کرامب و هیدرومتری دوگانه، همایش ملی مهندسی عمران ، شهرسازی و توسعه پایدار، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.

اوحدی، و.، امیری. م.، حمیدی ص.، ۱۳۹۳. بهسازی خاک های واگرا با آهک با نگرش ویژه به کاهش شدت قله‌های اصلی کانی های رسی در پراش پرتو ایکس. مهندسی عمران مدرس، جلد ١٤، شماره ۲، ۲۵- ۱۳.

روشن ضمیر، م. و یوسف زاده، ر.، ۱۳۸۹. اصلاح خاک‌های واگرا با افزودنی‌های مختلف و مقایسه آن‌ها، دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی. کرج، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

صنایعی کرمانی، م.، نیکودل، م. و ارومیه‌ای، ع.، ۱۳۹۷. تأثیر نانوذرات بنتونیت بر تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۱، شماره ۱، ٤۷- ۳۷.

عباسی، ن. و فرجاد، الف.، ۱۳۹٦. بررسی امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاکهای رسی، تحقیقات آب و خاک ایران، جلد ٤۸، شماره ۳، ٥۲٤ – ٥۱٥ .

نشریه شماره هشت کمیته سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۵. شناسائی و کاربرد خاکهای واگرا در سدهای خاکی، وزارت نیرو، دفتر فنی آب، ۷۱ ص.

ASTM, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, D422-63.

ASTM, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), D698-07.

ASTM, 2013. Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry, E1621-13.

ASTM, 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), D2487-17.

ASTM, 2017. Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer, D4221-17.

ASTM, 2017. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, D4318-17.

Asakereh, A. and Avazeh, A., 2017. The Effects of Nano Clay on Dispersive Soils Behavior (Case Study of Minab City). Amirkabir Journal of Civil Engineering, 49(3): 153-156.


www.SID.ir

Archive of SID


Bell, F. G., Maud R. R., 1994. Dispersive Soils: A Review from a South African Perspective. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1994, 11: 195 -21.

Gao, L., Ren, K., Ren, Z. and Yu, X., 2017. Study on the shear property of nano-MgO-modified soil. Marine Georesources & Geotechnology, 36(4): 465-470.

Nohani, E. and Alimakan, E., 2015. The Effect of Nanoparticles on Geotechnical Properties of Clay. International Journal of Life Sciences, 9 (4): 25 – 27.

Pashabavandpouri, M.A. and Jahangiri, S., 2015. Effect of nano silica on swelling, compaction and strength properties of clayey soil stabilized with lime. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 5(7S): 538-548.

Premkumar, S., Piratheepan, J. Rajeev, P. and Arulrajah A., 2016. Stabilizing Dispersive Soil Using Brown Coal Fly Ash and Hydrated Lime. Geo-Chicago 2016, ASCE, 874-884.

Sharma, N.K., Swain, S.K. and Sahoo, U.C., 2012. Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. Geotechnical and Geological Engineering, 30 (5): 1197–1205.

Sherard, L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., 1976. Identification and Nature of Dispersive Soils. ASCE Journal of Geotechnical Division, 102 (GT4): 69-85.

Supakij, N., and Santi, K., 1995. Stabilization of dispersive soil using hydrated lime. Proc. Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailand.

Umesha, T.S., Dinesh, S.V. and Sivapullaiah, P.V., 2009, Control of dispersivity of soil using lime and cement. International Journal of Geology, 1(3): 8-16.

www.SID.ir