

تأثیر اختلاط نانورس و خاکستر ساقه نی (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)

در تثبیت بستر خاکی ریزدانه راه‌های جنگلی

آیدین پارساخو^{۱*} و ایوب رضایی مطلق^۲

*^۱ - نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پست الکترونیک: aidinparsakhoo@yahoo.com

^۲ - کارشناس ارشد جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶

چکیده

امروزه استفاده تلفیقی از تثبیت‌کننده‌های زیستی خاک مانند انواع خاکسترها و نانوذرات برای تسریع و تقویت فرآیند تثبیت بستر خاکی تورم‌پذیر راه‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. خاک رس تورم‌پذیر مورد استفاده در این پژوهش از مسیر عبور جاده‌های پیشنهادی سری دو طرح جنگل‌داری دکتر بهرام‌نیا واقع در استان گلستان تهیه شد. برای آماده‌سازی تیمارهای تثبیت خاک، ابتدا درصدهای وزنی اختلاط ۰/۵ نانورس مونت‌مریلونیت و دو خاکستر ساقه نی (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)، یک نانورس و چهار خاکستر، ۱/۵ نانورس و شش خاکستر و دو نانورس و هشت خاکستر به خاک اضافه شد و به مدت پنج دقیقه هم زده شد تا مخلوط همگن و عاری از کلوخه به دست آید. پس از عمل‌آوری و گذشت هفت، ۱۴ و ۲۸ روز از زمان تثبیت، آزمایش‌های حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و ظرفیت بارگذاری کالیفرنیا (CBR) در چهار تکرار در مورد مخلوط‌های خاک و نمونه شاهد انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانورس به خاک سبب کاهش حد روانی، افزایش حد خمیری و کاهش شاخص خمیری خاک شد. همچنین، با افزایش درصد وزنی مواد افزودنی مذکور، رطوبت بهینه افزایش یافت و حداکثر تراکم خشک خاک کم شد. مقاومت فشاری نامحدود و CBR خاک تا تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت، اما افزودن مقادیر بیشتر خاکستر و نانورس، تغییرات محسوسی در مقاومت خاک ایجاد نکرد. در این پژوهش، افزایش زمان عمل‌آوری سبب کاهش شاخص خمیری، افزایش حداکثر تراکم خشک و مقاومت خاک شد. به این ترتیب، تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز برای تثبیت خاک رس منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، جاده‌های پیشنهادی، رس تورم‌پذیر، زمان عمل‌آوری، مونت‌مریلونیت.

مقدمه

و در نتیجه خرابی روسازی شده‌اند (Nasiri et al., 2016). برای قابل استفاده کردن این نوع خاک‌ها می‌توان با افزودن موادی مانند آهک، خاکستر، سیمان، نانوپلیمر و نانوذرات، مقاومت مکانیکی آن‌ها را بهبود داد (Kavak et al., 2010;)

در جنگل‌های هیرکانی خاک‌های ریزدانه رس‌دار به دلیل تورم‌پذیر بودن مشکلات زیادی در پروژه‌های ساختمانی به‌ویژه جاده‌سازی ایجاد کرده‌اند و باعث ناپایداری بستر راه

که به‌عنوان یک نانورس مورد توجه بیشتری است و به‌دلیل داشتن ویژگی‌های تعلیق، انتشار و پراکندگی خوب و نیز قالب‌دار شدن، بیشتر از سایر رس‌ها استفاده می‌شود (Nikookar *et al.*, 2013). از دیگر انواع نانورس‌ها می‌توان به نانورس بنتونیت و کائولینیت اشاره کرد. تغییرات ایجادشده در خاک در نتیجه افزودن نانوذرات رس یا هر افزودنی دیگری، آنی نیست. فرآیند رساندن افزودنی‌ها به تمام ذرات خاک به زمان معینی نیاز دارد که به آن دوره عمل‌آوری گفته شده و مدت آن حدود یک تا چهار هفته است (Taherkhani & Salami, 2014). به‌عنوان مثال، Pashabavandpouri و Jahangiri (۲۰۱۵) تأثیر نانوسیلیس و آهک را بر مشخصات مکانیکی خاک در دوره‌های عمل‌آوری هفت و ۲۸ روز بررسی کرده و دریافتند که با گذشت زمان بر مقاومت خاک افزوده شد.

امروزه پژوهشگران دریافته‌اند که نانوذرات به‌تنهایی نمی‌توانند اثر قابل توجهی بر بهبود خواص مکانیکی خاک بگذارند (Pashabavandpouri & Jahangiri, 2015)، بنابراین ترکیب آن‌ها با مواد افزودنی مانند آهک و خاکستر برخی ضایعات کشاورزی از گیاهان خانواده گرامینه، دم‌اسب و نخل که در آن‌ها عنصر سیلیس به‌وفور وجود دارد، می‌تواند عملکرد نانوذرات را ارتقا دهد (Bahmani *et al.*, 2014; Pashabavandpouri & Jahangiri, 2015). ضمن آنکه استفاده از آهک در جنگل، آلودگی به‌همراه دارد و با توجه به درصد اختلاط بیشتر، هزینه حمل و نقل آن نیز بیشتر است. علاوه‌براین، برخی از خاک‌ها به‌دلیل فقدان سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها با آهک واکنش نشان نمی‌دهند. همچنین، استفاده از سیمان برای تثبیت خاک‌های ریزدانه با دامنه خمیری زیاد توصیه نمی‌شود (Taherkhani, 2016). به این ترتیب، امروزه از مواد پلیمری مانند RPP (Musavi *et al.*, 2014) و نانو پلیمرها مانند CBRPLUS حتی در شرایط بوم‌سازگان جنگل نیز استفاده می‌شود (Lotfalian *et al.*, 2016)، بنابراین از آنجایی که تاکنون گزارشی در مورد تأثیر منفی نانورس بر محیط جنگل منتشر نشده است، می‌توان با توجه به کارایی زیاد آن، برای تثبیت خاک بستر راه‌های جنگلی استفاده کرد

(Firoozi *et al.*, 2014; Majdi *et al.*, 2014). امروزه به‌منظور تقویت خواص مکانیکی خاک از نانوکربن، نانومس، نانوزیولیت (Firoozi *et al.*, 2014)، نانوتیوپ‌های کربن، نانورس‌ها، نانوسیلیس‌ها (Li, 2004; Bahmani *et al.*, 2014) و اکسیدهای فلزات دیگر مانند نانواکسید منیزیم و نانواکسید تیتانیوم (Babu & Joseph, 2016) استفاده می‌شود که در این بین، نانورس‌ها و نانوسیلیس‌ها بیشتر از دیگر مواد، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند (Azizi & Daroukolaei, 2012). از مشخصات و متغیرهای نانوذرات می‌توان به درجه خلوص، متوسط اندازه ذره، سطح ویژه، رنگ، شکل و چگالی اشاره کرد (Taipodia *et al.*, 2011). کاهش زمان عمل‌آوری و افزایش اطمینان از وقوع فرآیند تثبیت خاک یکی از مزیت‌های نانورس است و می‌تواند به به‌سازی خاک و تحکیم سازه‌های مهندسی به‌ویژه در شرایط سخت و مرطوب جنگل‌های هیرکانی کمک کند (Mohammadi & Niazian, 2013).

به‌طور معمول کانی‌های رسی به‌حالت بلور یافت می‌شوند و از واحدهای چهاروجهی سیلیس یا هشت‌وجهی آلومین تشکیل شده‌اند. بلورهای کانی‌های رسی در ردیف ذرات کلوئیدی ۰/۰۰۱ تا یک میکرون قرار دارند. اندازه بسیار کوچک و شکل پهن و نازک این بلورها، عامل مهمی در بسیاری از خواص اصلی کانی‌های رسی است. در مقابل، نانورس‌ها به‌عنوان موادی که حداقل یکی از ابعاد آن (طول، عرض، ضخامت) کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد، تعریف شده‌اند و در نتیجه به‌دلیل بزرگ بودن سطح ویژه و بارهای سطحی، تأثیرگذاری آن‌ها بر خواص مکانیکی خاک بیشتر از کانی‌های بلوری است (Pham & Nguyen, 2014). نانورس‌ها، پایه معدنی دارند و به‌صورت پودر می‌توانند باعث بهبود برخی خواص خاک شوند (Uddin, 2008; Pashabavandpouri & Jahangiri, 2015; Anandha Kumar & Manikandan, 2016). این مواد به‌دلیل قابلیت‌های بسیار و در دسترس بودن، توجهات زیادی را در زمینه فناوری نانو به‌خود جلب کرده‌اند (Priyadharshini & Arumairaj, 2015). مونت‌مریلونیت تنها رس طبیعی است

(Sadeqian Leylan & Alamir, 2015).

ساقه نی (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) به عنوان یک گیاه خودرو و در دسترس، سرشار از سیلیس آمورف است که این موضوع بیانگر خواص پوزولانی این گیاه است. Karim و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که با افزودن خاکستر ساقه نی به خاک رس، حد روانی و حد خمیری افزایش یافت، اما شاخص خمیری کم شد. Jimoh و Apampa (۲۰۱۴) به بررسی اثر خاکستر ساقه ذرت بر برخی مشخصات مکانیکی خاک لاتریت مانند ظرفیت بارگذاری کالیفرنیا (CBR) و مقاومت تک محوری پرداختند. آن‌ها مقادیر صفر، ۱/۵، ۳، ۴/۵، ۶ و ۷/۵ درصد خاکستر را در ترکیب با خاک آزمایش کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که با به کارگیری سه درصد خاکستر ساقه ذرت، ظرفیت بارگذاری خاک و نیز مقاومت تک محوری در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. Sadeeq و همکاران (۲۰۱۵) از ترکیب خاکستر نیشکر و آهک هیدراته با نسبت‌های وزنی صفر، دو، چهار، شش و هشت درصد برای اصلاح خواص مکانیکی خاک لاتریت در کشور نیجریه استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که حداکثر ظرفیت بارگذاری خاک (۴۳ درصد) و حداکثر مقاومت فشاری نامحدود (۶۹۸ کیلو نیوتن بر مترمربع) از ترکیب هشت درصد آهک و شش درصد خاکستر نیشکر به دست آمد. Karim و همکاران (۲۰۱۵) نیز گزارش کردند که با افزایش مقدار

خاکستر ساقه نی از صفر تا ۱۲ درصد، مقاومت تک محوری از ۱۶۴ به ۳۰۴/۹ کیلو پاسکال و CBR از ۴/۹ به ۱۶ درصد افزایش یافت.

در پژوهش پیش رو سعی شد تا از اختلاط نانوذرات رس و خاکستر ساقه نی برای تثبیت خاک ریزدانه بستر راه‌های جنگلی بهره گرفته شود. در همین راستا، بهترین زمان عمل‌آوری و درصد بهینه اختلاط این مواد با خاک ریزدانه تعیین شد.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و مشخصات خاک مورد مطالعه

خاک رس تورم‌پذیر مورد استفاده در این پژوهش از سری دو طرح جنگل‌داری آموزشی- پژوهشی دکتر بهرام‌نیا و از مسیر عبور جاده‌های پیشنهادی منطقه تهیه شد. ابتدا ۱۰۰ متر از طول مسیر که دربرگیرنده خاک رس تورم‌پذیر بود، به روش تصادفی- منظم و در فاصله‌های دو متر نمونه برداری شد. در هر یک از فاصله‌ها، حدود دو کیلوگرم خاک تا عمق ۲۰ سانتی متری جمع‌آوری شد و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. در مجموع، ۵۰ نمونه با وزن کل ۱۰۰ کیلوگرم تهیه شد (Bahari & Shahnazari, 2015). برخی مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نمونه‌های خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نمونه‌های خاک رس تورم‌پذیر با حدروانی زیاد یا رس چاق

مقدار	متغیر	مقدار	متغیر
۶۹	حد روانی (درصد)	۴۱/۶	رس (درصد)
۱۹/۵	حد خمیری (درصد)	۳۰	سیلت (درصد)
۴۹/۵	شاخص خمیری (درصد)	۲۸/۴	شن (درصد)
۱/۶	حداکثر تراکم خشک (گرم بر سانتی مترمکعب)	۲۸/۳	رطوبت وزنی (درصد)
۲۳	رطوبت بهینه (درصد)	۳/۲	مواد آلی (درصد)
۷	CBR (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)	۳	آهک (درصد)
۱۴۲	مقاومت فشاری نامحدود (کیلو پاسکال)	۲/۵	چگالی ویژه (گرم بر سانتی مترمکعب)

شیمیایی این نانورس و ترکیب شیمیایی آن در جدول‌های ۲ و ۳ ذکر شده است.

مشخصات نانورس و خاکستر ساقه نی نانورس مونت‌مریلونیت مورد نیاز برای تثبیت خاک رس از شرکت مهرگان شیمی تهیه شد. ویژگی‌های فیزیکی و

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانورس مونت‌مریلونیت

ویژگی	مقدار
چگالی	۰/۵-۰/۷ گرم بر متر مکعب
اندازه ذرات	۱-۲ نانومتر
مساحت سطح ویژه	۲۲۰-۲۷۰ متر مربع بر گرم
مقدار تبادل الکتریکی	-۲۵ Mv
ضریب تبادل یونی	۴۸ (meg/100gr)
فاصله خالی بین ذرات	۶۰ Å
رنگ	زرد کم‌رنگ
رطوبت	۱-۲ درصد

جدول ۳- تجزیه شیمیایی نانوپودر رس مونت‌مریلونیت

نام ترکیب	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	LOI
واحد (درصد)	۰/۹۸	۳/۲۹	۱۹/۶	۵۰/۹۵	۰/۸۶	۱/۹۷	۰/۶۲	۵/۶۲	۱۵/۴۵

ساقه‌های نی از حاشیه جاده‌ها و رودخانه‌های شهر گرگان جمع‌آوری شدند. این ساقه‌ها برای تسهیل و تسریع فرآیند تولید خاکستر در اندازه‌های حداکثر چهار میلی‌متر آسیاب شده سپس به مدت دو ساعت در دمای ۵۸۰ درجه سانتیگراد کوره سوزانده و به خاکستر تبدیل شدند (Nasiri *et al.*, 2016). سپس، ترکیب شیمیایی خاکستر به دست آمده در آزمایشگاه مشخص شد.

روش پژوهش

برای آماده‌سازی تیمارها ابتدا با مرور منابع و توجه به فرمولاسیون‌هایی که در پژوهش‌های مختلف به کار برده شده بود، درصدهای وزنی اختلاط ۰/۵ نانورس و دو خاکستر، یک نانورس و چهار خاکستر، ۱/۵ نانورس و

شش خاکستر و دو نانورس و هشت خاکستر با مقدار آب متناظر با درصد رطوبت بهینه برای حداکثر تراکم خاک درون بشر ریخته شد. این ترکیبات به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک قرار داده شدند تا نانوذرات به طور همگن در آب حل شوند. سپس، هر یک از ترکیبات به دست آمده به خاک اضافه شده و به مدت پنج دقیقه هم زده شده تا در پایان مخلوط همگن و عاری از کلوخه به دست آید. پس از عمل‌آوری و گذشت هفت، ۱۴ و ۲۸ روز از زمان تثبیت، آزمایش‌های حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و CBR در چهار تکرار بر روی مخلوط‌های خاک و نمونه شاهد (بدون اعمال تیمار) انجام شد.

به منظور بررسی اثر اختلاط نانورس و خاکستر ساقه

به ۲۵/۵ درصد رسید که یک روند افزایشی را نشان داد (شکل ۲-ج). نکته قابل توجه آنکه در دو تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس و هشت درصد خاکستر و دو درصد نانورس، منحنی‌های پروکتور به تقریب منطبق بر یکدیگر بودند. این موضوع نشان داد که استفاده از مقادیر بیشتر از شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس نتوانسته تأثیری بر مقادیر تراکم خشک و رطوبت بهینه خاک بگذارد (شکل ۲).

نتایج نشان داد که با افزودن خاکستر نی و نانورس، مقاومت فشاری نامحدود خاک تا مرز ۵۴۵ کیلوپاسکال یعنی ۲۸۴ درصد افزایش یافت (شکل ۳). مقاومت فشاری تا تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد شد، اما افزودن مقادیر بیشتر خاکستر و نانورس، تغییرات محسوسی در مقاومت خاک ایجاد نکرد. افزایش زمان عمل‌آوری سبب افزایش مقاومت فشاری خاک شد، به طوری که بیشینه مقاومت پس از ۲۸ روز مشاهده شد. در رابطه با ظرفیت بارگذاری نیز CBR خاک تا تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس روند افزایشی داشت، اما افزودن مقادیر بیشتر خاکستر و نانورس سبب کاهش آن شد. بیشینه CBR ۲۴ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بود که در تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس و پس از ۲۸ روز به ثبت رسید (شکل ۴).

نی بر ویژگی‌های خاک، آزمایش‌های حدود آتربرگ، تراکم خشک، مقاومت تک‌محوری و CBR به ترتیب براساس استانداردهای ASTM D4318 (ASTM, 2000a), ASTM D1557 (ASTM, 2000b), ASTM D2166 (ASTM, 2013) و ASTM D1883 (ASTM, 2002) در مورد کلیه نمونه‌های آزمایشی انجام شد.

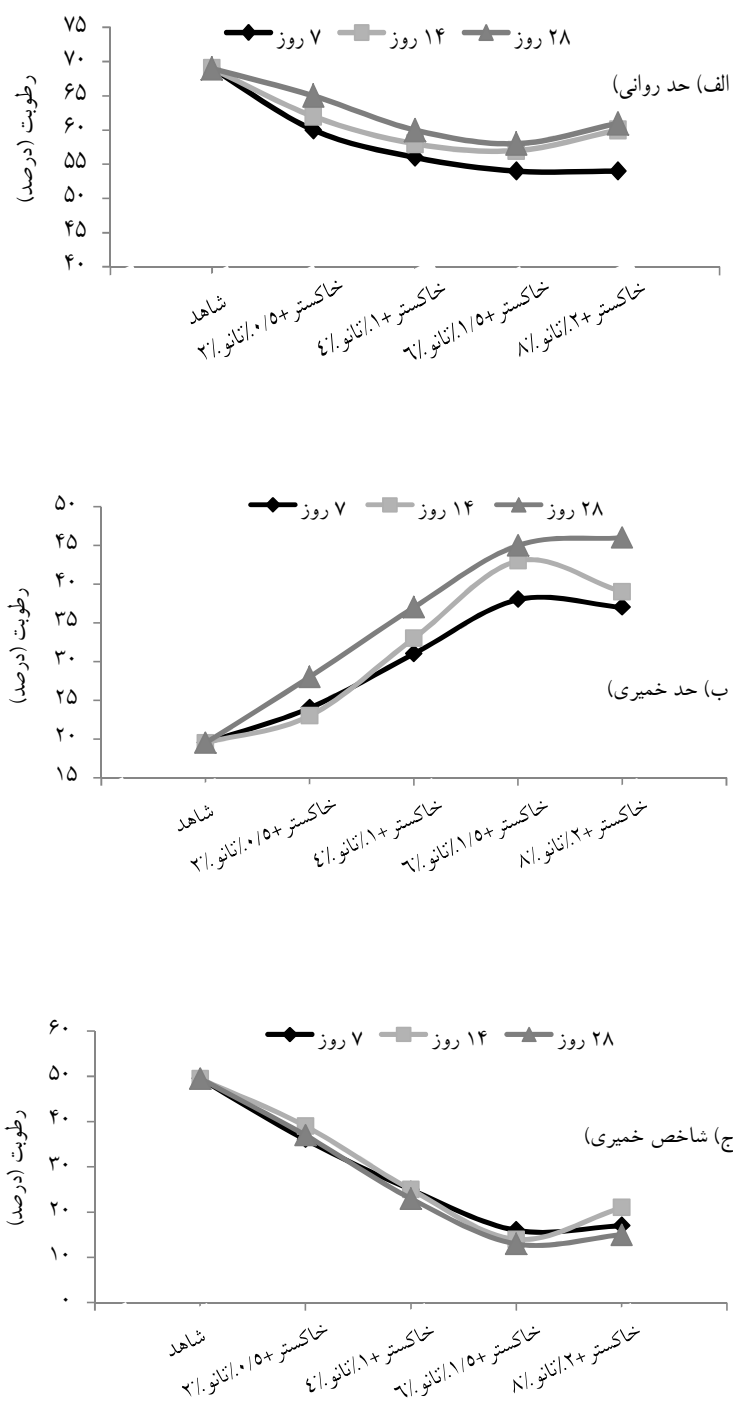
نتایج

ترکیب شیمیایی خاکستر به دست آمده از ساقه‌های نی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که با افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانورس به خاک، میانگین کل تغییرات به صورت کاهش ۲۲ درصدی حد روانی و افزایش ۱۳۶ درصدی حد خمیری بود (شکل‌های ۱-الف و ۱-ب). تغییرات به وجود آمده در حدود آتربرگ سبب کاهش شاخص خمیری به مقدار ۷۴ درصد و بهبود خواص مکانیکی خاک شد. کمترین مقدار شاخص خمیری برای خاک تیمار شده با شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به ثبت رسید (شکل ۱-ج).

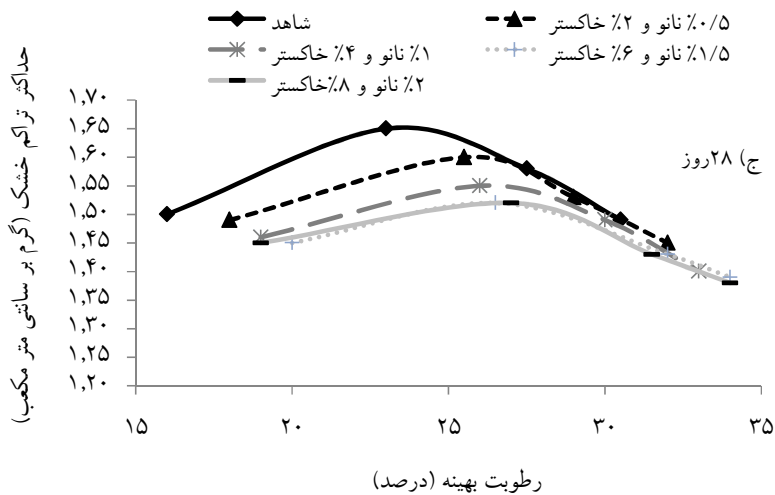
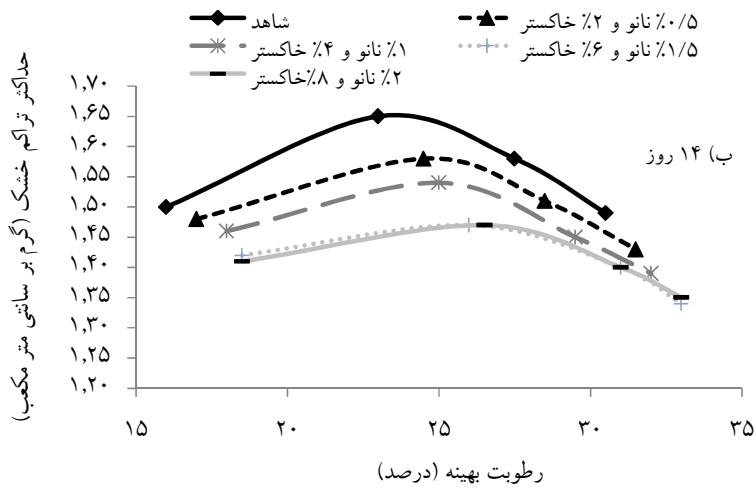
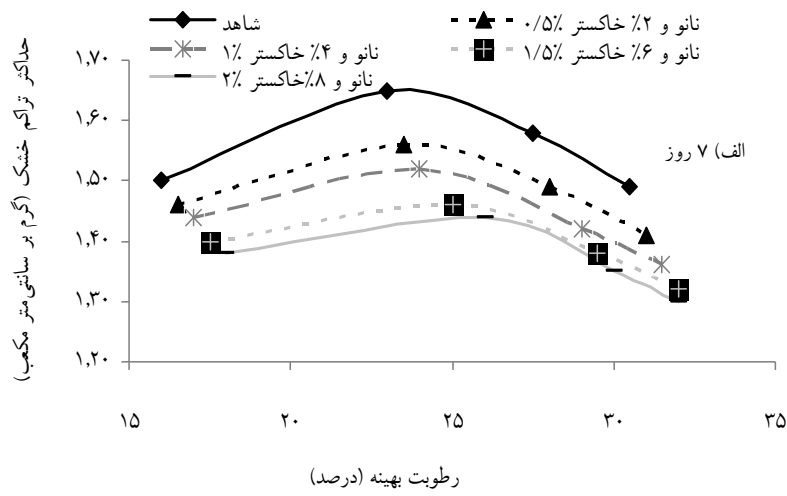
با افزایش مقدار ترکیبات خاکستر نی و نانورس به مقدار رطوبت بهینه افزوده شد و حداکثر تراکم خشک خاک کاهش یافت (شکل‌های ۲-الف و ۲-ب). البته با افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز، حداکثر تراکم خشک خاک تیمار شده با ۰/۵ درصد نانورس و ۲ درصد خاکستر به ۱/۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب و رطوبت بهینه

جدول ۴- تجزیه شیمیایی خاکستر نی

نام ترکیب	SO ₃	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
واحد (درصد)	۱/۵۲	۰/۰۸	۱۲/۴۳	۶۵/۴۲	۲/۵۳	۶/۱۴	۰/۱۹	۲/۷۶	۰/۰۳

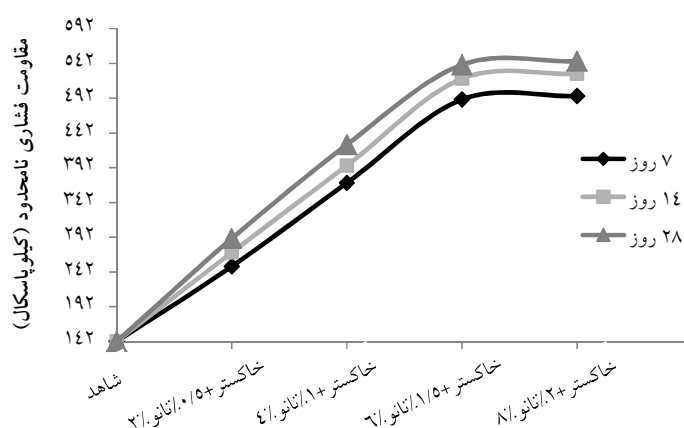


شکل ۱- تغییرات حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری در اثر افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانورس به خاک پس از گذشت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

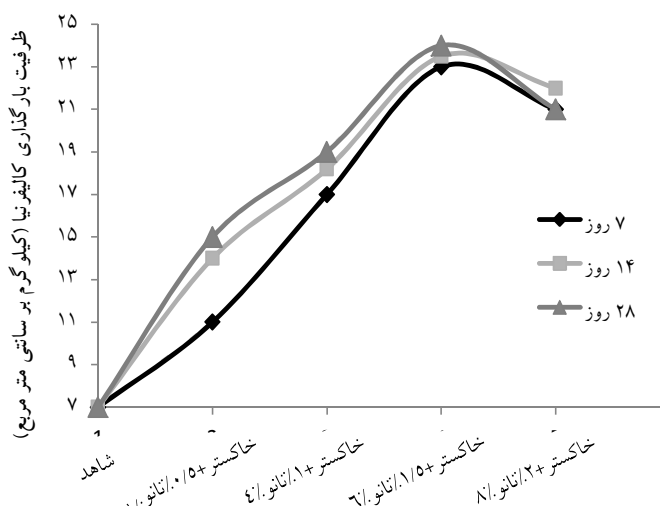


شکل ۲- تغییرات حداکثر تراکم خشک و درصد رطوبت بهینه در اثر افزودن ترکیبات مختلف خاکستری

و نانورس به خاک پس از گذشت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز



شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری نامحدود در اثر افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانورس به خاک پس از گذشت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز



شکل ۴- تغییرات ظرفیت بارگذاری کالیفرنیا در اثر افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانورس به خاک پس از گذشت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

بحث

Abbasi (۲۰۱۶) گزارش کردند که افزودن یک درصد نانورس به خاک تأثیری در منحنی دانه‌بندی، حدود آتربرگ و مشخصات تراکمی نداشت. دلیل این موضوع این است که نانوذرات به‌تنهایی نمی‌توانند اثر قابل توجهی بر بهبود خواص مکانیکی خاک بگذارند (Bahmani et al., 2014). با این وجود، Majeed و Taha (۲۰۱۳) و Nohani و Alimakan (۲۰۱۵) ثابت کردند که افزودن نانورس سبب

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانورس به خاک سبب کاهش شاخص خمیری و بهبود خواص مکانیکی خاک شد. کمترین مقدار شاخص خمیری برای خاک تیمار شده با شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به‌ثبت رسید. برخلاف یافته‌های پژوهش پیش‌رو، Sharifnasab و

(Karimian Nokabadi *et al.*, 2013).

در پژوهش پیش‌رو مشخص شد که با افزایش مقدار خاکستر نی و نانورس، مقاومت فشاری نامحدود و CBR خاک افزایش پیدا کرد. بسیاری از پژوهشگران دریافته‌اند که با افزودن نانورس به خاک، پایداری و استحکام خاک بیشتر می‌شود (Yonekura & Miwa, 1993; Bahari & Shahnazari, 2015). دلیل این افزایش، واکنش پوزولانی است که هنگام آمیخته شدن خاکستر با خاک رس اتفاق می‌افتد (SiO_2 موجود در خاکستر + Ca^{++} موجود در خاک). این فرآیند که در اصطلاح کلوخه‌سازی گفته می‌شود، سبب به‌وجود آمدن ذرات درشت‌تر می‌شود. ضمن آنکه در پژوهش پیش‌رو این‌چنین به‌نظر می‌رسد که با افزودن نانورس به خاک، یون‌های کلسیم و هیدروکسید موجود در ساختمان آهک خاک تجزیه شدند که این موضوع pH را افزایش می‌دهد. در این هنگام، سیلیکات‌های نامحلول و یون‌های سیلیس موجود در نانورس با یون‌های هیدروکسید ترکیب می‌شوند که حاصل آن، تولید Si(OH)_3 است. سپس این هیدروکسیدها با یون‌های کلسیم ترکیب می‌شوند و ژل‌های سیمانی شکلی که سیلیکات کلسیم هیدراته نام دارند را به‌وجود می‌آورند. نفوذ این ژل‌های سیمانی به درون خلل و فرج بافت خاک سبب افزایش مقاومت خاک و کاهش تورم‌پذیری آن می‌شود (Bell, 1996; Yong & Ouhadi, 2007). بر اساس یافته‌های پژوهش پیش‌رو، بیشینه مقاومت خاک در تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به ثبت رسید. در مورد زمان عمل‌آوری، Sadeeq و همکاران (۲۰۱۵) و Nasiri و همکاران (۲۰۱۶) پژوهش‌های خود را در سه دوره عمل‌آوری هفت، ۱۴ و ۲۸ روز انجام دادند. آن‌ها دریافته‌اند که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت خاک در اثر افزودن خاکسترهای محتوی سیلیس افزایش پیدا کرد.

به‌طور کلی براساس یافته‌های پژوهش پیش‌رو می‌توان تیمار شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانورس با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز را برای تثبیت خاک رس منطقه مورد مطالعه پیشنهاد کرد.

افزایش حدود آتبرگ و کاهش شاخص خمیری خاک رس می‌شود. کاهش خواص خمیری خاک به دگرگون شدن طبیعت خاک و گرانوله‌شدن خاک‌دانه‌ها نسبت داده می‌شود (Karim *et al.*, 2015). دلیل دیگر کاهش شاخص خمیری، واکنش پوزولانی است که هنگام آمیخته شدن خاکستر با خاک رس اتفاق می‌افتد. پوزولان‌ها، سیلیس یا سیلیس آلومیناتی هستند که به‌خودی خود ارزش چسبندگی ندارند، اما به‌شکل ذرات بسیار ریز خاکستر و در مجاورت با رطوبت در درجه‌های معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی دارند و ترکیباتی را به‌وجود می‌آورند که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند (Pham & Nguyen, 2014). Bahari و Shahnazari (۲۰۱۵) نیز دریافته‌اند که افزودن نانورس به خاک به‌صورت قابل توجهی باعث بهبود خواص مکانیکی خاک شد. Baziar و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که افزودن هشت درصد وزنی نانورس مونت‌میلونیت به خاک رس با دامنه خمیری کم، حد خمیری را حدود ۶۸ درصد افزایش داد.

براساس یافته‌های پژوهش پیش‌رو، با افزایش ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانورس، حداکثر تراکم خشک خاک کم شد و رطوبت بهینه افزایش یافت. این یافته با نتایج پژوهش‌های Priyadharshini و Arumairaj (۲۰۱۵) و Jimoh و Apampa (۲۰۱۴) هم‌خوانی دارد. کاهش در مقدار حداکثر تراکم خشک خاک را می‌توان به حضور خاکستر و نانورس در مخلوط نسبت داد که در مقایسه با وزن مخصوص خاک (۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب) وزن مخصوص به‌نسبت کمتری دارند، بنابراین منجر به ایجاد ذرات بزرگ با حفره‌های بزرگ‌تر می‌شوند. از این‌رو وزن مخصوص خاک کاهش می‌یابد، اما افزایش مقدار رطوبت بهینه خاک به‌دلیل افزودن خاکستر و نانورس بود که برای متراکم شدن مخلوط و اتصال خاکستر و نانورس (به‌دلیل مساحت ویژه زیاد) به گل‌ولای آزاد و ذرات درشت خاک به آب بیشتری احتیاج است. این وضعیت در مقدار بهینه‌ای از خاکستر و نانورس منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری مخلوط نسبت به خاک طبیعی می‌شود

- Jimoh, Y.A. and Apampa, O.A., 2014. An evaluation of the influence of corn cob ash on the strength parameters of lateritic soils. *Civil and Environmental Research*, 6(5): 1-10.
- Karim, H.H., Samueel, Z.W. and Ahmed, S.F., 2015. Geotechnical properties of soft clay soil stabilized by reed ashes. 2nd International Conference on Buildings, Construction and Environmental Engineering. Lebanon, 17-18 Oct. 2015: 154: 1-5.
- Karimian Nokabadi, M., Hajiannia, A. and Abtahi, S.M., 2013. Rice husk ash potential for consolidation of silt sandy soil. 2nd International Conference of New Researches in Engineering, Islamic Azad University, Khomeinishahr, 3 Mar. 2013, 7p (In Persian).
- Kavak, A., Bilgen, G. and Mutman, U., 2010. In-situ modification of a road material using a special polymer. *Scientific Research and Essays*, 5(17): 2547-2555.
- Li, G., 2004. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 34(6): 1043-1049.
- Lotfalian, M., Parsakhoo, A. and Savadkoochi, A., 2016. Improvement of forest road gravel surfacing quality by nano-polymer CBR PLUS. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 372(2): 345-352.
- Majeed, Z.H. and Taha, M.R., 2013. A review of stabilization of soils by using nanomaterials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(2): 576-581.
- Majdi, M., Uromeihy, A. and Nikudel, M.R., 2014. Investigation on the effect of adding nano SiO₂ on geotechnical properties of clay soil. 1th National Conference of Soil Mechanic and Foundation Engineering, Tehran, 3-4 Dec. 2014: 9p (In Persian).
- Mohammadi, M. and Niaziyan, M., 2013. Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, 3(3): 37-46.
- Musavi, F., Abdi, E., Estabragh, A.R. and Majnounian, B., 2014. Assessing the capability of polymer stabilizer in forest road stabilization (Case study: Kheyroud forest). *Iranian Journal of Forest*, 6(1): 1-10 (In Persian).
- Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A. and Wu, W., 2016. Optimum utilization of rice husk ash for stabilization of sub-base materials in construction and repair projects of forest roads. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37(2): 333-343.
- Nikookar, M., Bahari M., Nikookar, H. and Arabani, M., 2013. The strength characteristics of silty soil stabilized using nano-clay. The 7th International Symposium on Advances in Science and Technology. Bandar Abbas, Iran, 7-8 Mar. 2013: 7p.

References

- Anandha Kumar, S. and Manikandan, R., 2016. Influence of nanosized additives on the improvement of clay soil. *International Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 1(1): 23-30.
- ASTM, 2013. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International D2166, West Conshohocken, PA, United States, 7p.
- ASTM, 2000a. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International D4318, West Conshohocken, PA, United States, 14p.
- ASTM, 2000b. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). ASTM International D1557, West Conshohocken, PA, United States, 10p.
- ASTM, 2002. Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM D1883 International, West Conshohocken, PA, United States, 32p.
- Azizi Daroukolaei, M., 2012. Investigating the effect of the use of nano clay on improvement of geotechnical properties of sandy soil at the Babolsar coasts. M.Sc. thesis, International Pardis, University of Guilan, Rasht, 77p (In Persian).
- Babu, S. and Joseph, S., 2016. Effect of nano materials on properties of soft soil. *International Journal of Science and Research*, 5(8): 634-637.
- Bahari, M. and Shahnazari, A., 2015. Experimental study of the fine-grained earthen bed stabilization using nanoclay. *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agricultural and Natural Resources)*, 19(72): 107-114 (In Persian).
- Bahmani, S.H., Huat, B.B.K., Asadi, A. and Farzadnia, N., 2014. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials*, 64(14): 350-359.
- Baziari, M.H., Ghazi, H. and Mirkazemi, S.M., 2010. Investigation on the effect of nano clay additive on basal geotechnical-engineering properties of soil. 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, Iran, 2-3 Nov. 2010: 7p (In Persian).
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4): 223-237.
- Firoozi, A.A., Taha, M.R., Firoozi, A.A. and Khan, T.A., 2014. Assessment of nano-zeolite on soil properties. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(19): 292-295.

- properties of soils. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1): 250-258 (In Persian).
- Taherkhani, H., 2016. Investigation of compressive strength of clay soils stabilized by cement, lime and CBR PLUS nano- polymer. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(4): 161-173 (In Persian).
 - Taherkhani, H. and Salami, H., 2014. Comparison of lime, cement and CBR PLUS additives for stabilizing clay soil. *Journal of Transportation Engineering*, 5(2): 263-274 (In Persian).
 - Taipodia, J., Dutta, J. and Dey, A.K., 2011. Effect of nano particles on properties of soil. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, India*, 15-17 Dec. 2011: 105-108.
 - Uddin, F., 2008. Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(12): 2804-2814.
 - Yonekura, R. and Miwa, M., 1993. Fundamental properties of sodium silicate based grout. *Proceedings of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference. Singapore*, 4-8 May 1993: 439-444.
 - Yong, R.N. and Ouhadi, V.R., 2007. Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. *Applied Clay Science*, 35(3-4): 238-249.
 - 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.
 - Pham, H. and Nguyen, Q.P., 2014. Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticles dispersions. *Journal of Nanoparticle Research*, 16: 2137.
 - Priyadharshini, R. and Arumairaj, P.D., 2015. Improvement of bearing capacity of soft clay using nanomaterials. *International Journal of Scientific Research*, 4(6): 218-221.
 - Sadeeq, J.A., Ochepo, J., Salahudeen, A.B. and Tijjani, S.T., 2015. Effect of bagasse ash on lime stabilized Lateritic Soil. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 9(2): 203-213.
 - Sadeqian Leylan, A.R. and Alamir, M.A., 2015. The use of huck rice ash on stabilization of soil by lime. *2th Iranian Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Qom, Iran*, 14-15 Oct. 2015:4p(In Persian).
 - Sharifnasab, H. and Abbasi, N., 2016. Effect of nanoclay particles on some physical and mechanical

Investigating the effect of the combination of nano-clay and reed ash (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) on stabilization of the fine aggregate earthy bed of forest roads

A. Parsakhoo^{1*} and A. Rezaee Motlaq²

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: aidinparsakhoo@yahoo.com

2- M.Sc. Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 17.03.2018

Accepted: 13.08.2018

Abstract

Today, the use of the biological stabilizers of soil such as ashes and nano-particles has been concerned to accelerate and improve the stabilizing process of the swelling soil of road bed. In this study the swell soil was brought from the routes of recommended forest road in district two of Bahramnia forest management plan in Golestan province according to the appearance and performance properties of soil. At first, for preparing the soil stabilization treatments the mixtures of 0.5% montmorillonite nano clay and 2% reed ash (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), 1% nano clay and 4% ash, 1.5% nano clay and 6% ash and 2% nano clay and 8% ash were added to soil and then mixed for 5 minute to access homogenous mixture without lump. After the curing time of 7, 14 and 28 days from the stabilization time, the Atterberg limit, standard proctor, unconfined compressive strength and Californian bearing ratio tests were done for 4 replications on mixtures of soil and control sample. Results showed that adding reed ash and nano clay increased the plastic limit and decreased the liquid limit and plastic index. Moreover, with increasing the amount of additive materials in the soil, the maximum dry density of the mixture decreased and optimum moisture content increased. The CBR and unconfined compressive strength of the mixture increased considerably until adding 1.5% nano clay and 6% ash and then adding more additive materials didn't change the soil strength. In this study increasing the curing time, caused that the maximum dry density and soil strength to increase, whereas the plastic index of the mixture decrease. So, the optimal treatment of 1.5% nano clay and 6% ash and curing time of 28 day is recommended for stabilization of clay soil in study area.

Keywords: Curing time, montmorillonite, recommended roads, soil stabilization, swelling clay.