

تأثیر نانوسلولز در اصلاح مشخصات مکانیکی و تغییر حجم خاک بستر ماسه‌ای لای دار در کنترل گسیختگی موضعی آن

سارا سرفراز، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه یزد

محمد مهدی خیبری*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه یزد

حمید مهرنهاد، دانشیار بخش ژئوتکنیک و راه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

Email: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۶

چکیده

در دو دهه اخیر، نشست و گسیختگی بستر استقرار جاده‌ها در مناطق کویری عامل ایجاد گسیختگی سطح جاده‌ها نیز شده است. مطالعات اصلاح رفتار خاک مسلح با الیاف اغلب توسط آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا انجام می‌شود. در این تحقیق، مطالعاتی در زمینه پایدارسازی خاک بستر راه‌های احداثی در مناطق خاک‌های ماسه رسی با استفاده از نانوالیاف سلولزی انجام گردید. هدف از این تحقیق، پایدارسازی بستر ترک خوردگی و مقاوم کردن آن با استفاده از افزودن نانوسلولز به خاک بود. برای شناسایی نوع خاک منطقه و میزان اثرگذاری نانوسلولز، آزمایش‌های فیزیکی و مقاومتی انجام شد. نمونه‌ها در این آزمایش‌ها با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسلولز ترکیب شدند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که افزودن نانوسلولز سبب افزایش حد روانی و خمیری به ترتیب بین ۲۱ تا ۲۷ درصد و ۶۰ تا ۶۵ درصد و کاهش شاخص خمیری بین ۲۵ تا ۴۰ درصد گردید. رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر به ترتیب افزایش و کاهش یافتند. مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها بین ۳۰ تا ۸۵ درصد و عدد CBR ماکزیمم تا ۱۲ برابر افزایش پیدا کرد. رده مقاومتی خاک در تمامی نمونه‌ها به بستر "خیلی خوب" جهت استفاده در روسازی تغییر یافت. همچنین، نتایج انرژی ناحیه گسیختگی نشان داد که افزایش نانوسلولز تأثیر مثبت بر نمونه‌های اصلاح‌شده دارد و مدت زمان وقوع ترک‌های گسیختگی ناشی از بارگذاری و تغییرات حجمی را به تأخیر می‌اندازد. روش آماری سطح پاسخ برای پیش‌بینی متغیرهای هدف نیز به کار گرفته شد.

واژه‌های کلیدی: ماسه روان، بستر ترک‌خورده، نانوسلولز، گسیختگی سطحی، روش سطح پاسخ

۱. مقدمه

یکی از مشکلات راه‌سازی در بسترهای ماسه حاوی لای و رس، مقاومت کم این خاک‌ها است، که منجر به بروز خرابی‌های زودرس می‌شود. مشکل کمبود مقاومت خاک بستر ضعیف را می‌توان با تثبیت برطرف نمود. انتخاب نوع مناسب تثبیت‌کننده بستگی به نوع خاک، هزینه، عوامل محیطی و مقدار مقاومت مورد نیاز دارد (ژو، ۲۰۱۹).

در دو دهه اخیر، گسیختگی زمین محدوده‌های کویری و به عنوان نمونه در استان یزد، بخصوص در دشت یزد- اردکان، عامل ایجاد خسارت‌های فراوان در این منطقه شده است. نمود ظاهری گسیختگی‌ها به صورت نشست و ترک‌های گسترش یافته در سطح جاده‌ها و بازشدن ترک‌ها در زمین‌های حریم راه، نمایان است. شکل ۱، نمونه‌ای از گسیختگی سطحی و عمقی کناره‌ی بستر یک مسیر فرعی را نمایش می‌دهد.

یکی از مهمترین و اساسی‌ترین موارد در اجرای کلیه طرح‌های عمرانی، مناسب بودن زمین جهت اجرای پروژه می‌باشد. ضعف خاک در ظرفیت باربری و کمبود خواص مکانیکی مطلوب، ترفندهای جدیدی را نیاز داشتند که با تکامل دانش مهندسی و ظهور فناوری‌های نو در رشته عمران به این مهم نائل آمدند. روش‌های مختلفی جهت بهسازی خاک، با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، فاکتورهای زیست‌محیطی، مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است که شناخت منطقه و بررسی انواع خاک‌هایی که ایجاد مشکل می‌کنند نیز از ضرورت و اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۱. تصویری از نواحی گسیخته شده در کناره‌ی مسیر عبور (بستر راه فرعی)- سمت راست و تصویری از یکی از گمانه‌های مورد برداشت- سمت چپ

مطالعات گسترده‌ای در شناخت این پدیده و نیز گسترش آن انجام شده است. زارع جونقانی و همکاران (۱۳۹۶) طی تحقیقی، با انجام حفاری، نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های شیمیایی و مکانیکی، رابطه‌ی کانی-شناسی خاک با خصوصیات مکانیکی آن را مورد بررسی قرار داده تا پس از شناسایی خاک، اقدام به بهسازی آن شود. ابتدا مطالعات دفتری و سپس مطالعات صحرایی و پس از آن آزمایش‌های مکانیک خاک و کانی‌شناسی را انجام داده و سپس تفسیر و تحلیل اطلاعات صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های شیمیایی و فلئورسنس

اشعه ایکس (XRF) وجود کاتیون سدیم را دلیل اصلی واگرایی خاک و آزمایش کانی‌شناسی^۱ (XRD) وجود بیش از ۸۱ درصد کانی ایلایت را نشان داد. در مطالعات قبلی، جهت بررسی رفتار خاک تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن، آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR (نسبت باربری کالیفرنیا)^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آزمایش تک‌محوری و CBR نشان داد که افزودن الیاف، هم در خاک سمته و هم در خاک غیرسمته، باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR و کرنش محوری در

²- California Bearing Ratio

¹- X-Ray Diffraction

مختلف نانومواد بر اصلاح خصوصیات تورمی دو نوع خاک رسی با خاصیت خمیری کم و زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که تأثیر افزودن نانومواد بر پتانسیل تورم خاک با خمیرایی زیاد (CH) بیشتر از خاک با خمیرایی کم (CL) است (تنزاده و همکاران، ۲۰۱۹). بهمنی و همکاران (۲۰۱۴) طی تحقیقاتی آزمایشگاهی، تأثیر نانوذرات SiO_2 را بر خاک رس اصلاح شده با سیمان بررسی کردند. افزودن این نانوذرات باعث بهبود تراکم خاک و خواص هیدرولیکی آن شد. علاوه بر این، افزودن ۰/۴ درصد نانوسیلیکا به خاک اصلاح شده باعث شد تا مقاومت فشاری آن تا ۸۰٪ افزایش یابد. با بررسی نتایج آزمون‌های XRD، SEM، FTIR، مشخص گردید که نانوذرات سیلیکا باعث تغییر در واکنش پوزولانی و تبدیل پرتلند به ژل هیدرات سیلیکات کلسیم می‌شود. معمولاً میزان استفاده شده نانومواد شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن خشک خاک در نمونه‌ها است که با افزایش این درصد نانورس، حد روانی و خمیری خاک افزایش می‌یابد. به طور کلی، آزمایش‌ها بیانگر بهبود خواص خاک با افزایش درصد کم نانورس می‌باشند (امانوئل و همکاران، ۲۰۱۹).

در صنایع نانوسولوزی در جهان، نانوسولوز به عنوان یک افزودنی به انواع مصالح مانند جوهر، بیوپلاستیک و محصولات ساختمانی محسوب می‌شود. بلورهای سلولزنانویی (CNCs) یک نانومواد است که از الیاف چوب استخراج می‌شود. مقدار کمی از CNC اضافه شده به یک ماده می‌تواند مقاومت کششی را افزایش دهد؛ حتی افزایش ۲۵ درصدی مقاومت را نشان داده است. به عنوان نمونه شاهد، کاهش ۱۵ تا ۲۵ درصد در حجم بتن مورد نیاز برای تأمین مقاومت، هنگامی که با نانوالیاف سلولزی مخلوط می‌شود، می‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد، حتی اگر در سراسر جهان استفاده نشود (لی و همکاران، ۲۰۱۴). اگرچه تعیین مدول واقعی و مقاومت نانوسولوز

تنش گسیختگی باعث کاهش رفتار ترد می‌شود. نتایج آزمایش‌های تراکم نیز نشان داد که در مخلوط خاک، سیمان و الیاف، تأثیر مقدار سیمان در وزن مخصوص خشک ماکزیمم بیشتر بوده، ولی در تعیین درصد رطوبت بهینه، هم مقدار سیمان و هم مقدار الیاف مؤثر بودند (قدک‌پور و همکاران، ۲۰۲۰؛ شماره ۴؛ ارمغانی و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از مواد طبیعی و با منشأ گیاهی در تحقیقات گذشته مورد توجه بوده است. در سال ۲۰۰۵، باشا و همکاران، خاک رس تثبیت شده با سیمان و خاکستر پوسته برنج را مورد مطالعه قرار دادند. موارد بررسی شده شامل مقاومت و تراکم نمونه‌ها و آزمون XRF بود. نتایج نشان داد که هر دو ماده باعث کاهش خاصیت پلاستیسیته خاک، کاهش دانسیته خشک و افزایش رطوبت بهینه می‌گردد. در نهایت، مقدار بهینه سیمان و خاکستر پوسته برنج به ترتیب ۶ تا ۸ درصد و ۱۰ تا ۱۵ درصد در نظر گرفته شد. اوچی و همکاران (۲۰۰۷) روشی را برای تولید الیاف از بطری‌های نوشابه ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از این الیاف، بتنی را ساختند که مقاومت برشی و خمشی آن بهبود پیدا کرد. با پیشرفت علم نانو در زمینه تهیه و کاربرد نانومواد، استفاده از این نوع مواد در علوم مختلف، به‌ویژه مهندسی ژئوتکنیک، مورد توجه خاصی قرار گرفته است. استفاده از این نانومواد، حتی با وجود درصد بسیار کم، در مهندسی ژئوتکنیک می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر رفتار فیزیکی، شیمیایی و خواص مهندسی خاک‌ها بگذارد (زنگ و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از مشکلات استفاده از افزودنی‌های رایج به خاک، آلودگی زیست‌محیطی می‌باشد. ولی استفاده از نانوذرات، به‌ویژه با منشأ طبیعی، سبب زیست تخریب پذیری کمتری خواهد شد. همچنین، استفاده از آن در بهسازی خاک، کنترل خواص مقاومتی و بهبود سایر پارامترهای ژئوتکنیک را در پی خواهد داشت (بوآزار، ۲۰۱۹).

یکی از دلایل وقوع گسیختگی سطحی، رفتار تورمی بخش ریزدانه‌های خاک بستر است. اثر افزودن مقادیر

خواص فیزیکی را به خوبی بهبود بخشند و ۶۰ درصد حفظ آب را در خاک‌های خشک، در مقایسه با عدم استفاده از هیچ پلیمری، افزایش دهند. الیاف سلولز طبیعی به طور قابل توجهی افزایش مقاومت کششی و خمشی خاک را به خود اختصاص می‌دهند (سیواکومار و واسودروان، ۲۰۰۸؛ حسن و همکاران، ۲۰۰۸، میشل و سوگال، ۲۰۰۵). علاوه بر این، سلولز در سایش روسازی درشت‌دانه با دانه‌بندی باز^۱ (OGFC) استفاده شده است. مزایای مخلوط OGFC به طور معمول افزایش نفوذپذیری سطح، کاهش نویز و افزایش اصطکاک سطح، به‌ویژه در هوای مرطوب، بوده و شامل درشت‌دانه با حفره‌های بزرگ است، که این منجر به افزایش مقدار آسفالت می‌شود و سلولز عملکرد آن را با محدود کردن بیرون‌زدگی و ترک‌خوردگی انعکاسی درشت‌دانه بهبود می‌بخشد (استولوا و هوسپوداژوا، ۲۰۱۵).

هدف از این تحقیق، پایداری بستر ترک خورده‌ی روسازی و مقاوم کردن آن با استفاده از افزودن نانوسلولز به خاک به منظور احداث راه روی آن است. مناطق ماسه-رسی گسترده‌ی زیادی در مناطق خشک و بیابانی کشور دارند. هنگامی که این نوع خاک به عنوان بستر راه استفاده شود مقاومت مناسبی نداشته و تغییرشکل و گسیختگی زیادی، خصوصاً در صورت قرارگیری در معرض رطوبت، از خود نشان می‌دهد. از این رو، مواردی نظیر انتخاب نوع و نسبت ترکیبی الیاف سلولزی، آب و خاک کناره‌ی راه برای دستیابی به بهترین عملکرد مقاومتی و تراکمی و نیز رفتار گسیختگی و دوام آن در این تحقیق بررسی شدند.

۲. مواد و روش‌ها

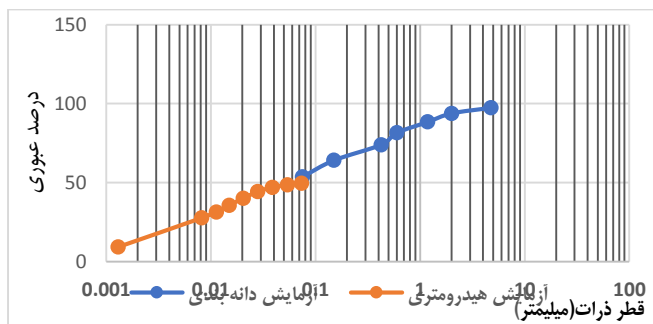
مصالح اصلی استفاده شده در تحقیق شامل نمونه‌های خاک از دشت یزد - اردکان، نانوالیاف سلولزی و آب

چالش‌برانگیز است، ولی محاسبات نظری و شبیه‌سازی‌های عددی مورد استفاده مدول محوری یک نانوسلولز را تقریباً ۵۸-۱۸۰ GPa تخمین زده‌اند. همانطور که در مورد مقاومت کششی سلولز، پیش-بینی‌های نظری نشان می‌دهد که نانوسلولز دارای مقاومت کششی در محدوده ۰/۳ تا ۲۲ GPa هستند (لانی و همکاران، ۲۰۱۴). گیلیس (۱۹۶۹)، سختی تئوری یک نانوسلولز را در حدود ۳۰۰ GPa به دست آورد. در مطالعه‌ای با هدف جداسازی نانوسلولز از فیبر میوه‌ای (EFB) و اثر تقویت کننده آنها بر فیلم‌های مخلوط نشاسته/ پلی‌وینیل الکل (PVA) مجموعه‌ای از فیلم‌های PVA نشاسته با محتوای مختلف نانوسلولز با روش ریخته‌گری محلول تهیه شد. الیاف نانوسلولز با قطر ۴ تا ۱۵ نانومتر با موفقیت تهیه شد. از طرف دیگر، فیلم‌های PVA نشاسته تقویت شده با الیاف نانوسلولز دارای خواص بهبود یافته قابل توجهی در مقایسه با فیلم غیرتقویت شده بودند. از بین نتایج، فیلم‌های PVA نشاسته با افزودن ۵٪ نانوسلولز بهترین ترکیب از خواص را به نمایش گذاشتند. مشخص شد که این نانوکامپوزیت دارای مقاومت کششی در حدود ۵/۶۹۴ MPa و کشیدگی در زمان استراحت ۴۸۱/۸۵ درصد است. علاوه بر خواص مکانیکی بالا، این نانوکامپوزیت از مقاومت خوبی در برابر آب و تجزیه‌پذیری برخوردار است شماره ۱۶؟ (مقچیچ و همکاران، ۲۰۱۷).

استفاده از پلیمرها به عنوان یک افزودنی تثبیت‌کننده خاک برای کنترل تخریب خاک و بیابانزایی و همچنین بهبود خاک‌های خشک و نیمه‌خشک توسعه یافته است. در تحقیقی توسط ماهر (۱۹۹۴) شماره ۱۷؟ به منظور تعیین اثرات پلیمرهای مصنوعی و بیوپلیمرها، از آنها در غلظت کم (۰/۳ - ۱ درصد) در خاک خشک و نیمه-خشک در شمال آفریقا استفاده شده است. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های پلیمر (۱۰ میلی‌گرم در لیتر پلی‌آکریل امید و ۵ گرم در لیتر نانوسلولز) در خاک می‌توانند

عدم مشاهده این گسیختگی‌ها مزید بر علت در عدم دقت در شناسایی عملکرد بستر مسیر نیز می‌گردد.

خصوصیات و خواص ژئوتکنیک ماسه لای دار مطابق با استاندارد ASTM D: 422 در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از دو گمانه در محل با کدهای A و B (شکل ۱) و از هرگمانه دو نمونه انتخاب شد که از اعماق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری برداشت گردید. دلیل ایجاد دو گمانه در دو محل متفاوت و در دو عمق مختلف، بررسی هرچه کامل تر ویژگی‌های ژئوتکنیک خاک مورد تحقیق (شکل ۲) و دلیل انتخاب این اعماق، کاهش سطح تنش در گستره‌ی بستر کناره‌ی راه بود. بنابراین، نیاز به اعماق پایین تر نبود.



شرب شهری بود، که ویژگی‌های آنها در ادامه بررسی شده‌اند.

۲-۱. شناسایی خاک محل

منطقه مورد مطالعه، اراضی دشت رسی واقع در جنوب شرق یزد است (شکل ۱) که منطقه‌ای کاملاً بیابانی است. محل برداشت نمونه‌ها از لحاظ موقعیت جغرافیایی در محدوده عرض جغرافیایی $31^{\circ} 50' 39''$ تا $31^{\circ} 50' 44''$ شمالی و طول جغرافیایی $54^{\circ} 28' 32''$ تا $54^{\circ} 28' 38''$ شرقی، به وسعت $3/3$ هکتار می‌باشد. سطح مسیر، به علت توفان‌های دوره‌ای، معمولاً از ماسه سطحی پوشانده شده و در ظاهر گسیختگی‌های موضعی دیده نمی‌شود.



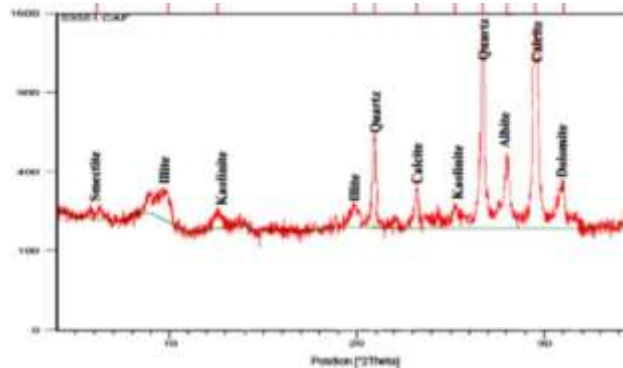
شکل ۲. نمونه‌ای از خاک استفاده شده در تحقیق (سمت راست) و دانه‌بندی تصویر نمونه (سمت چپ)

طبقه‌بندی خاک‌ها در رده‌ی ماسه حاوی MH, ML قرار می‌گیرد. در سطح (عمق ۲۰-۰ سانتی متر) لای با حد روانی کم و در عمق (۴۰-۲۰ سانتی متر) لای با روانی زیاد طبقه‌بندی شد. در این پژوهش، به منظور شناسایی کانی‌های موجود در نمونه‌های خاک از روش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شده است. این روش بسیار سریع

آزمایش دانه‌بندی به روش شست‌وشویی و آزمایش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM-2488 و ASTM C: 117-45 انجام گرفت که نمودار دانه‌بندی نمونه‌های خاکی و جدول نوع نمونه‌ها به ترتیب در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. حد روانی و حد خمیری طبق آزمایش‌های استاندارد ASTM D: 4318-87 انجام شد. لذا،

پیک) در این نمونه خاک است. همچنین، پیک حضور کلسیت و دولومیت در این خاکها تشخیص داده شد. حضور این ذرات در مقایسه با سایر ذرات از اهمیت و تأثیرگذاری بیشتری بر خصوصیات شیمیایی و مکانیکی خاک برخوردار است.

و کاربردی است و در آن تنها به مقدار بسیار کمی از نمونه احتیاج است. نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس خاک کامل بدون تفکیک خاک نمونه در شکل ۳ آورده شده است (زارع جونقانی، ۱۳۹۶). تفسیر دیفراکتوگرام‌های به دست آمده از خاک تفکیک نشده هم نشان داد که بیشترین فراوانی کانی‌های کوارتز (در دو



شکل ۳. نمونه دیفراکتوگرام^۱ پراش اشعه ایکس خاک کامل بدون تفکیک در گمانه‌ها

چسبندگی خوب و جایگزین مناسب برای الیاف مصنوعی، استعداد کاربردی زیادی در این ماده ایجاد کرده است. در جدول ۱ و شکل ۴، ژل نانوالیاف سلولزی و تصویر SEM^۲ آن با نام تجاری ژل نانوفیبر سلولز-مکانیکی (CNF-G-M) قابل مشاهده می‌باشد (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۱. مشخصات نانوسلولز مورد استفاده

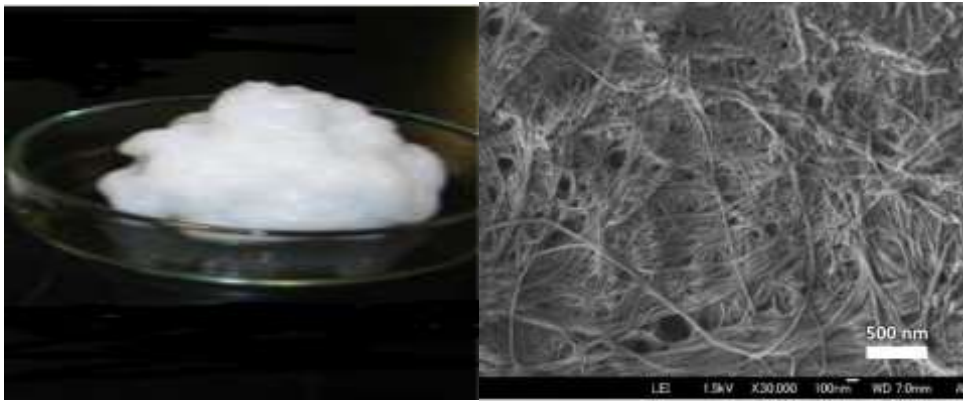
ژل نانوالیاف سلولزی	نام
(C ₅ H ₁₀ O ₅) _n	فرمول
Gel (2.5%)	حالت ماده
سفید	رنگ
Ave. 35 nm	قطر نانوالیاف
≥۹۹٪	درجه خلوص

۲-۲. نانوالیاف سلولزی

نانوالیاف سلولزی استفاده شده در این تحقیق از ورق‌های الیاف سلولزی به روش بالا به پایین سوپر آسیاب دیسکی تولید شده است. الیاف سلولز، الیافی مشتق شده از چوب است که از طریق خرد کردن الیاف چوب تهیه می‌شود. در نهایت، لیفی بسیار ظریف به دست می‌آید که با وجود سبکی، بسیار محکم است. الیاف سلولز آرایه‌ای از بلورهای سوزنی شکل که به شکلی فشرده در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. بنابراین، خواص مکانیکی عالی آن قابل توجیه است. سلولز تلفیقی از خواص مناسب را در خود دارد. سختی زیاد (مدول کششی ۲۹-۱۴۵ GPa)، مقاومت کششی زیاد (MPa ۷۵۰۰)، افزایش مقاومت برشی، وزن مخصوص کم، دانسیته تقریبی ۱/۵ g/cm³، سطح ویژه بزرگ ۴۸۲ m²/g، قابلیت بازتولید، قابلیت دسترسی زیاد، هزینه کم،

¹- Diffractogram

²- Scanning Electron Microscopy



شکل ۴. ژل نانوالیاف سلولز (سمت راست) و تصویر SEM از نانوسلولز (سمت چپ)

۲-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

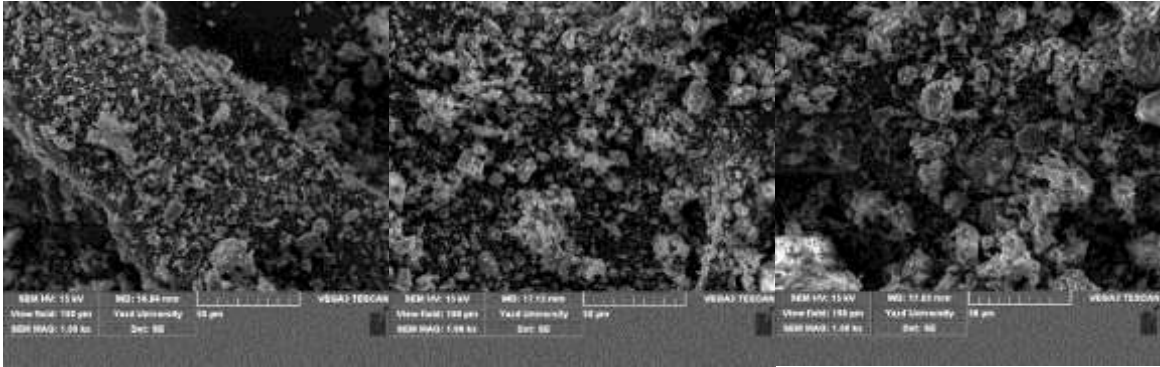
پس از تهیه خاک مورد نظر از محل، به دلیل وجود مواد اضافی مانند ساقه گیاه، اقدام به جداسازی آنها شد. مقدار خاک لازم برای آزمایش‌های مورد بررسی جدا و از الک استاندارد رد شده و سپس نانوسلولز با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد طی مراحل آزمایش به خاک اضافه گردید. قابل ذکر است که برای تهیه ترکیب‌های سلولزی، ابتدا مقدار نانوسلولز مورد نیاز را با آب کاملاً مخلوط کرده و سپس به خاک اضافه شد و چون نانوسلولز به صورت ژل مورد استفاده قرار می‌گرفت، از این رو بخشی از آب مورد نیاز از طریق ژل تأمین می‌شد. در پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه افزودن مواد نانو به خاک، حدود ترکیبی نانو معمولاً بین ۰/۲۵ تا ۳ درصد لحاظ شده بود (زنگ و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، در این تحقیق، درصد‌های اعمالی منطقی به نظر می‌رسد. آزمایش‌های معمول انجام شده جهت شناسایی رفتار خاک اصلاح شده در برابر بار و عملکرد طولانی مدت آن در تحقیق مطابق استانداردهای مختلف بودند. دوام مطابق استاندارد ASTM D:560-96، تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D: 2166-87، نسبت باربری کالیفرنیا مطابق ASTM D:1883-87 و تراکم پروکتور استاندارد مطابق ASTM D: 698 انجام گرفت. جهت شناخت رفتار دوام

طی زمان، به‌ویژه اینکه رفتار طولانی مدت و نیز اثر رطوبت بر رفتار مکانیک مخلوط ناشناخته بود، لذا برای این مخلوط از استانداردهای ASTM و ASTM D 2166 و D 559 استفاده گردید (شیهاتا و بغدادی، ۲۰۰۱).

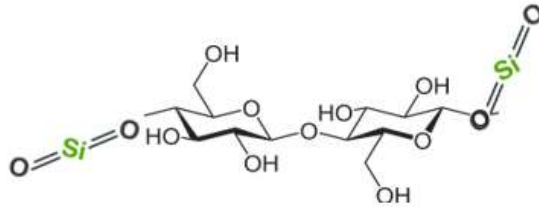
۲-۴. آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

(SEM) نمونه‌ها

به منظور بررسی و مقایسه ریزساختار خاک مورد مطالعه و نمونه‌های ترکیبی با نانوسلولز، آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی روی خاک پایه و نمونه‌های فرآوری شده انجام شد. همانگونه که در شکل ۵ مشخص است، خاک مورد نظر ذراتی با اندازه تقریباً یکنواخت و پراکنده است. اما افزودن نانوسلولز سبب به هم چسبیدن ذرات خاک شده است. ذرات خاک توسط نانوسلولز دربرگرفته می‌شوند. این شکل نشانگر موضوع چگونگی چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر را با افزایش درصد نانوسلولز نشان می‌دهد. انتظار می‌رود خاک دارای سلولز بیشتر رفتارهای مقاومت بهتری داشته باشد (فاضلی و همکاران، ۲۰۱۹). در شکل ۶، ساختار دو مولکول قطبی که با نیروی واندروالس توان ننگه داشت مولکول‌ها و تشکیل ساختار زنجیره‌ای را تقویت می‌نماید مشاهده می‌شود.



شکل ۵. تصاویر بزرگ شده از نمونه خاک (فوقانی)، نمونه‌های ترکیبی با ۰/۵ درصد نانوسلولز (سمت چپ)، ۱ درصد نانوسلولز (وسط) و ۱/۵ درصد نانوسلولز (سمت راست)



شکل ۶. پیوند واندروالسی بین اتم‌های سیلیس و نانوالیاف سلولزی

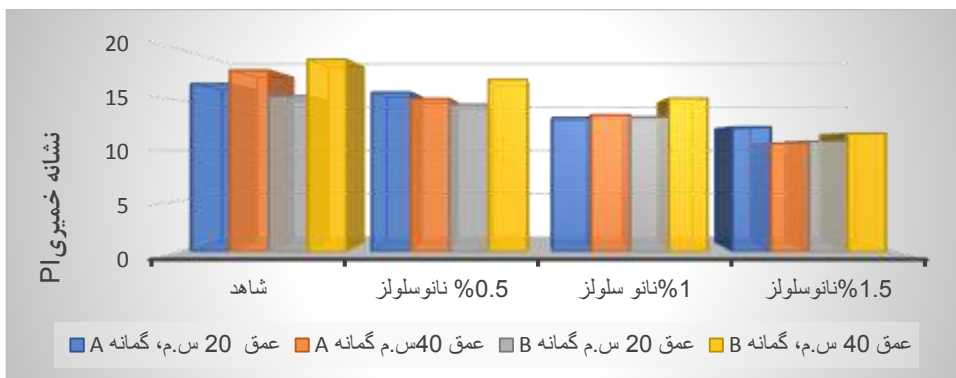
با استناد به این نتایج می‌توان ذکر کرد که ذرات نانو با توجه به سطح ویژه‌ی زیاد خود باعث فعل و انفعالات بین ذره‌ای می‌شوند. از دلایل دیگر تأثیر ماده نانوسلولز روی خصوصیات اتربرگ خاک می‌توان به ساختار متراکم نانو که شامل حفره‌هایی می‌باشد، اشاره نمود که با آب پر می‌شوند و همانند موجود درون ذره‌ای روی حدود اتربرگ تأثیر می‌گذارند. از این رو، اضافه نمودن نانوسلولز به خاک باعث تغییر در خصوصیات خمیری و روانی خاک می‌شود (میچل و سوگا، ۲۰۰۵).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج آزمایش خواص پلاستیسیته بستر

اصلاح شده

هدف از انجام این آزمایش، بررسی اثر نانوسلولز بر کاهش تغییرات حجمی در اثر رطوبت است. با توجه به نمودار شکل ۷، در آزمایش تعیین حدود اتربرگ می‌توان به این موضوع اشاره کرد که پس از اضافه کردن نانوسلولز منجر به کاهش دامنه خمیری می‌شود. این ویژگی در مهندسی ژئوتکنیک برای خاک‌های با پلاستیسیته زیاد، به دلیل ویژگی انقباض شدید پس از خشک شدن، بسیار قابل اهمیت می‌باشد.

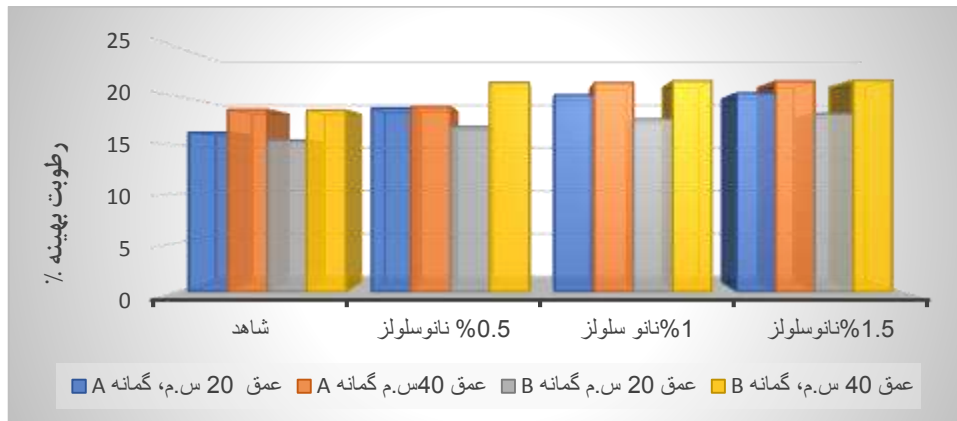


شکل ۷. تغییرات نشانه خمیری، برای درصدهای مختلف ترکیبی با نانوسلولز، از هر دو عمق و هر دو گمانه انتخابی

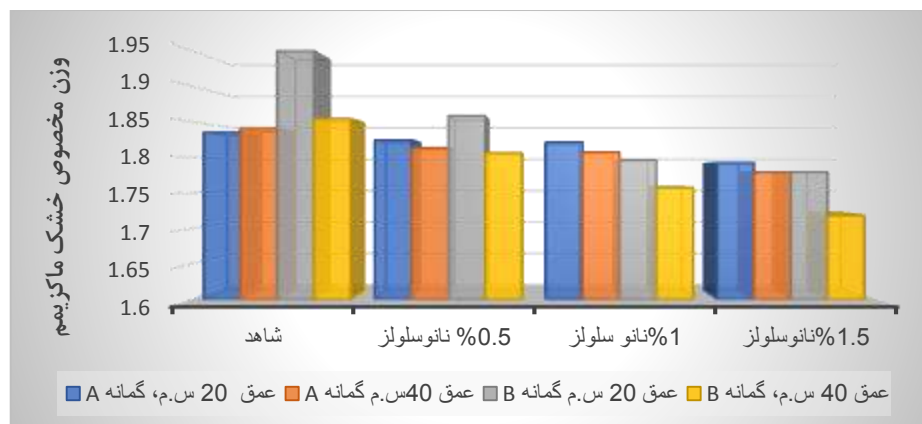
۳-۲. نتایج آزمایش تراکم

از آن، وزن مخصوص خشک آن تعیین و نمودار وزن مخصوص خشک خاک در برابر رطوبت رسم گردید. نتایج در شکل‌های ۸ و ۹ برای هر دو عمق از هر دو گمانه مشاهده می‌شود.

در این تحقیق، از روش آزمایش تراکم استاندارد استفاده شد. آزمایش تراکم با ۳ الی ۶ مرتبه تکرار انجام گرفت و وزن مخصوص مرطوب و رطوبت آن تعیین گشت. پس



شکل ۸. تغییرات درصد رطوبت بهینه برای درصدهای مختلف ترکیبی با نانوسلولز، از هر دو عمق و هر دو گمانه انتخابی



شکل ۹. تغییرات جداکنر وزن مخصوص خشک برای درصدهای مختلف ترکیبی با نانوسلولز، از هر دو عمق و هر دو گمانه انتخابی

خصوصیات تراکمی نمونه‌ها آنچنان دستخوش تغییر نشده است.

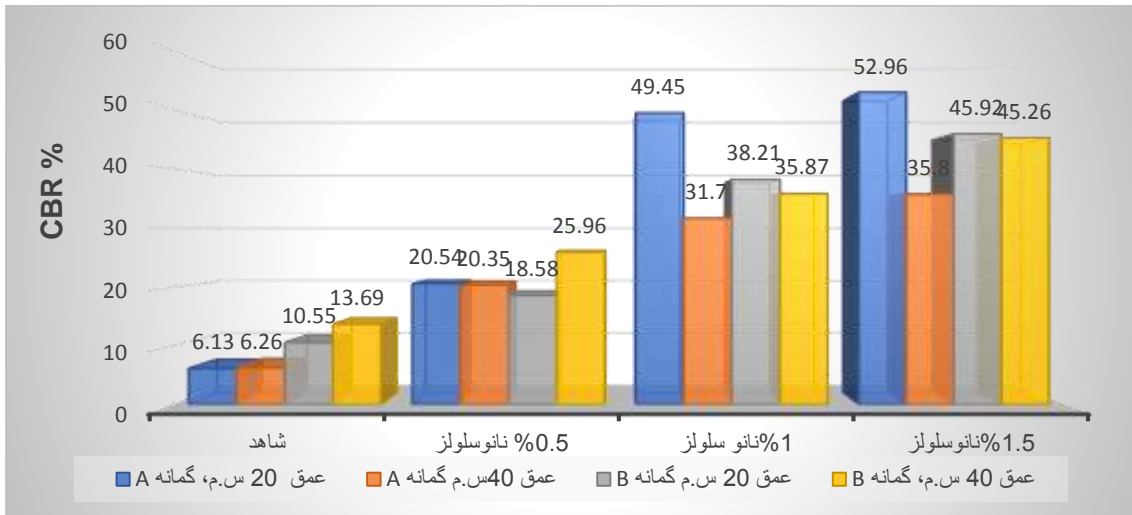
۳-۳. نتایج آزمایش CBR

نتایج به دست آمده از آزمایش CBR برای خاک مورد استفاده، مطابق با شکل ۱۰ برای تمامی نمونه‌ها با مقادیر صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسلولز قابل مشاهده می‌باشد. قابل ذکر است در محاسبه CBR، چون منحنی‌های نیرو- تغییرشکل فاقد نقطه عطف بودند، لذا

مشهود است که با افزایش درصد نانوسلولز، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک خاک کاهش یافته است. نکته قابل توجه این است که با افزودن درصد نانوسلولز به ۱/۵، تغییر چندانی در درصد رطوبت بهینه نسبت به ۱ درصد نانوسلولز ایجاد نشده است. همان طور که در نمودار قابل مشاهده است، غالباً شیب نمودار قبل از رطوبت بهینه ملایم‌تر است و در واقع نرخ تغییرات وزن مخصوص خشک کمتر می‌باشد. با توجه به تأثیر نسبتاً کم افزودن نانوسلولز بر مقادیر مذکور، در مجموع،

زمانی کمتر از یک ساعت این آزمون آزمایشگاهی انجام شد. این متن اصلاح شود

لزومی به اصلاح نمودار نبود. کلیه نمونه ها در رطوبت بهینه تراکم ساخته شدند و بدن عملآوری یعنی در فاصله



شکل ۱۰. مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌های شاهد و ترکیبی با نانوسلولز، اعماق ۲۰ و ۴۰ س.م، گمانه‌های A و B

یافته است، اما بیشتر آنها برای رفتار پیچیده خاک در حالت مرطوب و پلاستیک کاربرد دارند. نرخ رهاسازی انرژی، سرعتی است که در آن انرژی یک ماده به مرحله گسیختگی وارد می‌شود و بیانگر مقاومت نمونه در برابر ترک خوردگی و گسیختگی است و دارای واحد انرژی در واحد سطح می‌باشد. میزان آزادسازی انرژی هنگام حل مشکلات و برآورد خواص مواد مربوط به شکستگی و خستگی در زمینه مکانیک شکستگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای مواد ناهمسانگرد (غیرایزوتروپیک) نظیر کامپوزیت‌ها با شرایط بارگذاری و هندسه پیچیده مصالح اولیه، استفاده از روش‌های الاستیک خطی دشوار است. با این حال، در بسیاری از تست‌های سنجش رفتار مصالح از بارگذاری الاستیک خطی استفاده می‌شود. لذا، در مطالعه حاضر، آزمایش فشاری تک‌محوری، برای تعیین مقاومت فشاری یک استوانه خاک بدون هیچ بار جانبی، استفاده شده است، که از آن می‌توان برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک‌های ماسه لای دار و یا رس دار استفاده کرد.

با توجه به این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانوسلولز سبب افزایش مقاومت خاک شده و با افزایش درصد نانوسلولز، مقاومت نیز افزایش می‌یابد. این افزایش در ۱/۵ درصد چندان قابل توجه نمی‌باشد. همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد، با افزایش درصد نانوسلولز، شیب تندتری را تجربه می‌کنند، که این نشان‌دهنده‌ی سریع‌تر بودن رشد مقاومت‌ها در حضور افزایش نانوسلولز می‌باشد (لطفعلیان و همکاران، ۲۰۱۶). علت افزایش این مقاومت را می‌توان به تغییر بافت فیزیکی خاک نسبت داد. با گذشت زمان، مقاومت نمونه تثبیت شده افزایش می‌یابد. در واقع، فرصت پوشش فیزیکی ذرات خاک و نیز تکمیل زنجیره‌های ذرات تشکیل‌دهنده خاک در این افزایش مقاومت تأثیرگذار است.

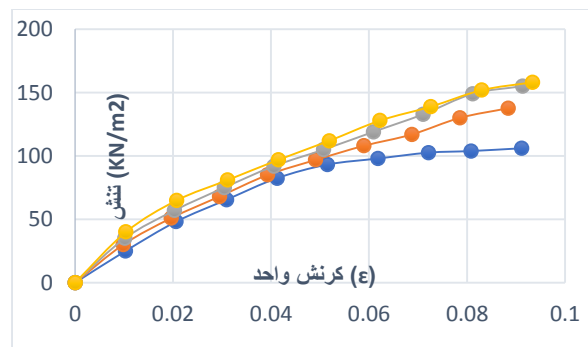
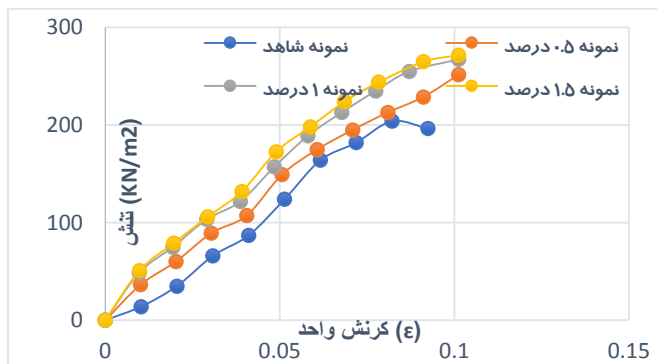
۳-۴. نتایج مقاومت نهایی گسیختگی و شکل-پذیری خاک اصلاح شده

توسعه ترک و گسیختگی در بسترهای خاکی روسازی از خرابی‌های مطرح است. برای توصیف گسترش ترک، تعدادی از مدل‌های مکانیک شکست برای خاک توسعه

تأثیر نانوسولوز در اصلاح مشخصات مکانیکی و تغییر حجم خاک بستر ماسه ای لای دار در کنترل گسیختگی موضعی آن

آزمایش تک محوری برای خاک مورد استفاده، مطابق شکل ۱۱ برای تمامی نمونه‌ها با مقادیر ترکیبی صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسولوز آمده است.

نمونه‌های حاکی استوانه‌ای به ترتیب با ارتفاع و قطر تقریبی ۷ و ۳/۷ سانتی متر تهیه شدند و در دستگاه آزمایش قرار گرفتند. قرائت‌های بارگذاری تا ظاهر شدن ترک در نمونه ادامه پیدا کرد. نتایج به دست آمده از



شکل ۱۱. نمودارهای تنش- کرنش، مقایسه نمونه‌های شاهد و ترکیبی با نانوسولوز، عمق ۲۰ س.م.، گمانه A (سمت چپ) و گمانه B (سمت راست)

از افزایش مدول تغییرشکل به دست آمده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف نانوسولوز در مقایسه با خاک شاهد است. که این سبب افزایش مقاومت لایه‌های روسازی در برابر بارهای وارده و کاهش ترک خوردگی می‌شود. در شکل ۱۲، نحوه‌ی گسترش ترک خوردگی و شکست دو نمونه قابل مشاهده می‌باشد. ملاحظه می‌شود که هیچکدام از نمونه‌ها دچار گسیختگی کلی نشده و اغلب ترک خوردگی‌ها موضعی و سطحی و در راستای طولی اتفاق افتاده‌اند.

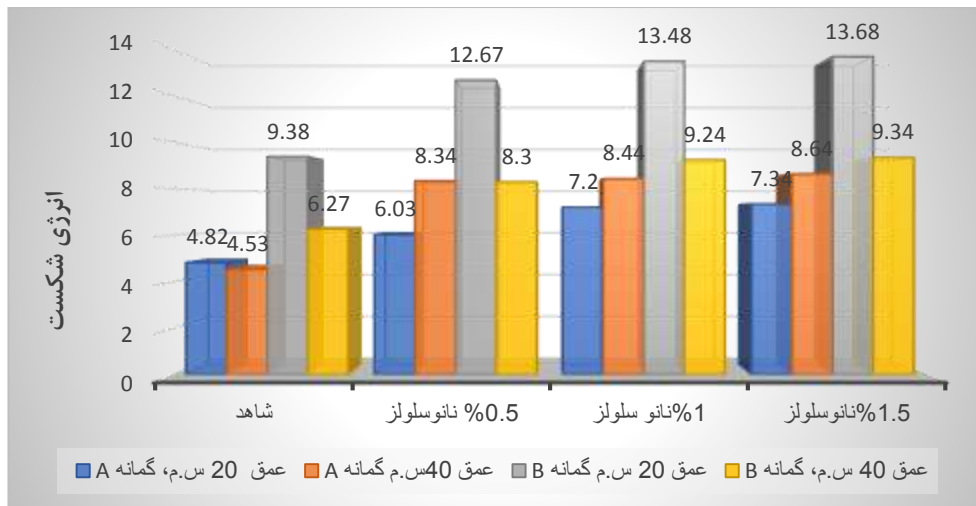
با ملاحظه نمودارها می‌توان دریافت که با افزودن نانو خاک، کرنش در لحظه گسیختگی بین ۲ تا ۱۳ درصد افزایش یافته است که به علت افزایش خواص خمیری، کاهش نسبت منافذ نمونه، تغییر بافت خاک‌ها و پیوند بهتر بین ذرات خاک می‌باشد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزودن نانوسولوز به خاک، به دلیل چسبندگی و پیوند بین ذرات و کاهش خلل و فرج خاک و فعل و انفعالات شیمیایی، مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها بین ۳۰ تا ۸۶ درصد افزایش یافته است. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر بیشتر نانوسولوز، میزان تغییرات مقاومت شیب ملایمی دارد و نتایج حاکی



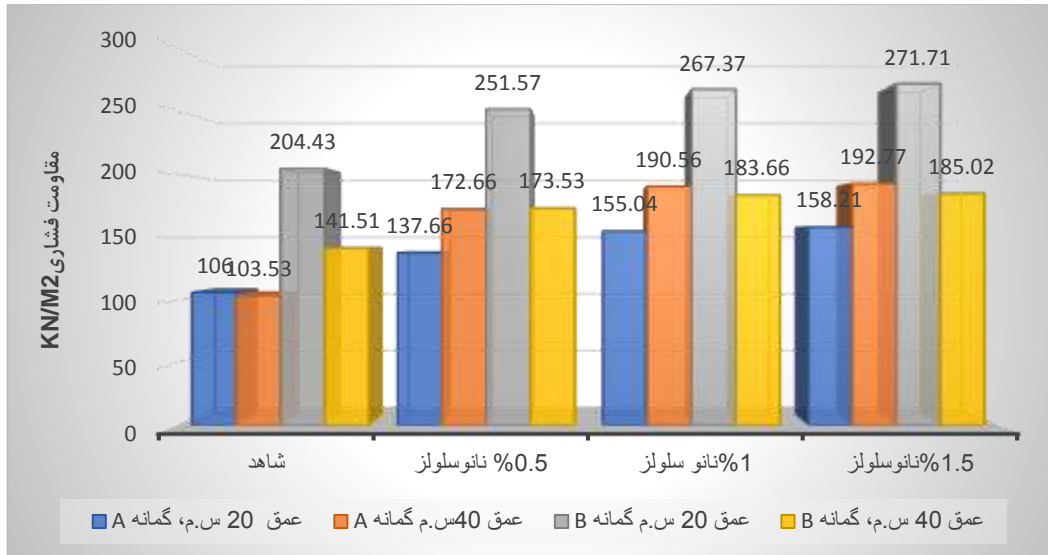
شکل ۱۲. گسترش ترک خوردگی دو نمونه تحت آزمایش تک محوری

نانوسلولز، افزایش مقاومت فشاری تک محوره و انرژی شکست سیب ملایم تری تجربه می کنند (ژالس و همکاران، ۲۰۲۰). علت افزایش انرژی شکست و مقاومت در برابر گسیختگی را می توان به رفتار الیاف و ایجاد پدیده پل شدگی نسبت داد. الیاف سلولزی در مقیاس میکروساختاری مانع از گسیختگی ذرات و اجزای خاک می شوند.

در ادامه، مقایسه انرژی شکست و تغییرات مقاومت نمونه های شاهد و ترکیبی با نانوسلولز در شکل های ۱۳ و ۱۴ آمده است. با توجه به این نمودارها می توان دریافت که افزودن نانوسلولز سبب افزایش مقاومت خاک شده و با افزایش درصد نانوسلولز، مقاومت نیز افزایش می یابد. ولی افزایش مقاومت فشاری در ۱/۵ درصد چندان قابل توجه نمی باشد. قابل مشاهده می باشد که با افزایش درصد



شکل ۱۳: نمودارهای مقایسه انرژی شکست نمونه های شاهد و ترکیبی با نانوسلولز، اعماق ۲۰ و ۴۰ س.م، گمانه A و B

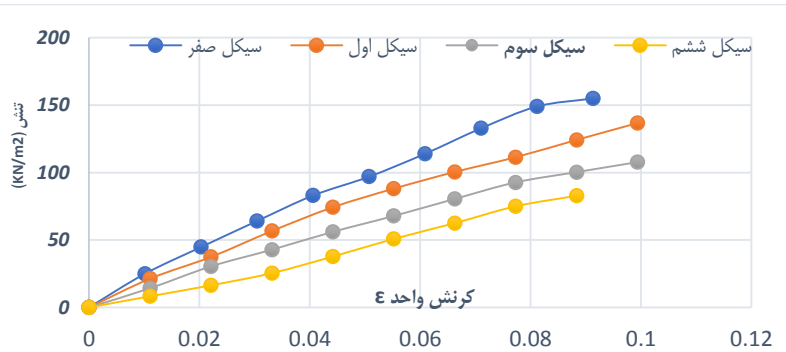


شکل ۱۴. مقایسه مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های شاهد و ترکیبی با نانوسلولز، اعماق ۲۰ و ۴۰ س.م. گمانه‌های A و B

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ قابل مشاهده است. نتایج کلیه نمونه‌ها در سیکل صفر همان نتایج به دست آمده از آزمایش تک‌محوری می‌باشد. قابل ذکر است که نمونه‌های شاهد در سیکل اول انجماد- ذوب و نمونه‌های ترکیبی با ۰/۵ درصد سلولز در سیکل سوم و همچنین نمونه‌های ترکیبی با ۱ و ۱/۵ درصد نانوسلولز نیز در سیکل ۱۰ دوام نیاوردند و مقاومت خود را از دست دادند. شکل ۱۵، نمونه‌ای تحت آزمایش بارگذاری بعد از سیکل انجماد- ذوب و رفتار مصالح در برابر بارگذاری را نشان می‌دهد. شکل ۱۶، مقایسه اثر درصد‌های مواد سلولزی و تعداد سیکل‌ها بر نمونه‌های خاک حاوی مواد نانویی را نمایش می‌دهد.

۳-۵. بررسی دوام خاک اصلاح شده

یکی از مسائل مرتبط با استفاده از مواد طبیعی نظیر سلولزها، ثبات عملکرد آنها طی زمان است. از این رو، طراحی آزمایشی که پایداری مقاومت را در طول زمان کاربرد و وجود آن در خاک بررسی نماید ضروری به نظر رسید. بنابراین، از آزمایش‌های تعریف شده در این موضوع استفاده شد. برای اعمال سیکل‌های یخ زدن و آب شدن، از استاندارد شماره ASTM D 560-96 استفاده شده است. نمونه‌های آزمایشی ساخته شده از هر یک از مخلوط‌ها تحت دوره‌های انجماد و ذوب متفاوت شامل صفر، ۱، ۳، ۶ و ۱۰ روزه قرار گرفتند. اثر دوره‌های انجماد و ذوب بر مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف طبق



شکل ۱۵. یکی از نمونه‌های آزمایش دوام تحت بارگذاری منحنی تنش- کرنش در سیکل انجماد- ذوب، نمونه ترکیبی با ۱ درصد نانوسلولز، عمق ۲۰ س.م. گمانه A



شکل ۱۶. مقایسه انرژی شکست سیکل‌های انجماد- ذوب، نمونه ۲۰ س.م.

بهینه در فضای چند متغیره برسد، به عنوان روش سطح پاسخ گفته می‌شوند. این روش‌ها منحصراً برای بررسی "سطح" یا رابطه بین پاسخ و عوامل مؤثر در پاسخ استفاده می‌شود. از مدل‌های رگرسیون برای تحلیل پاسخ استفاده می‌شود، زیرا اکنون تمرکز بیشتر بر ماهیت رابطه بین پاسخ و عوامل تا شناسایی عوامل مهم است. هنگامی که پارامتر تحقیق در مجاورت پاسخ بهینه قرار گرفت، آزمایشگر یک مدل دقیق را بین پاسخ و فاکتورها ارائه می‌دهد. برای تحقق این هدف، از طرح‌های آزمایشی ویژه به نام RSM^۱ استفاده می‌شود. از مدل مناسب برای رسیدن به بهترین شرایط کار استفاده می‌شود که منجر به حداکثر یا حداقل پاسخ می‌شود. پس از انجام آزمایش، با استفاده از داده‌های حاصل و با کمک نرم‌افزار Design expert، توابع پیش‌بینی مقاومت فشاری، نسبت باربری کالیفرنیا و انرژی شکست پس از افزودن مواد نانوسلولز محاسبه گردید. شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ نمایش سه‌بعدی از پارامترهای بررسی شده در آزمایش‌های این مطالعه است. در جدول ۲، روابط پیشنهادی نرم‌افزار ارائه شده است. توابع ارائه شده توسط نرم‌افزار بیشتر از نوع توابع درجه دو و با ضریب همبستگی زیاد بوده، که می‌توان در پیش-بینی رفتار مکانیکی خاک بستر اصلاح‌شده با مواد نانوسلولز استفاده نمود.

با توجه به نمودارهای به‌دست آمده از آزمایش، مشهود است که افزودن نانوسلولز سبب مقاومت بیشتر نمونه‌های خاکی نسبت به نمونه‌های شاهد در برابر سیکل‌های انجماد- ذوب می‌شود. ولی با افزایش دوره‌های انجماد- ذوب این مقاومت رفته رفته کاهش پیدا می‌کند. به طور نمونه، در سیکل اول، مقاومت تمامی نمونه‌ها کاهش یافته که این کاهش مقاومت در نمونه‌های ترکیبی با ۰/۵ درصد نانوسلولز بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. در واقع، چرخه‌های ذوب- انجماد در خاک‌های ریزدانه موجب تغییر در حجم، تراکم، چگالی، ظرفیت تحمل و ساختار خاک می‌گردد. در طول چرخه‌های ذوب - انجماد، چون در ساختار خاک فرو پاشیدگی ذرات رخ می‌دهد و تخلخل نمونه‌ها بیشتر می‌شود، در نتیجه مقاومت نمونه‌ها کم شده و گسیخته می‌شوند. ولی در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن نانوسلولز به خاک، مقاومت لایه‌های روسازی در برابر سیکل انجماد- ذوب بیشتر می‌شود.

۴. تحلیل آماری نتایج سطح پاسخ

طرح‌های آزمایشی معمول در دو آزمایش فاکتوریل سطح و طرح‌های فاکتوریل کسرکننده به آزمایشگر کمک می‌کنند تا عوامل مؤثر بر پاسخ را شناسایی کند. روش‌هایی که به آزمایشگر کمک می‌کنند تا به تابع هدف پاسخ

^۱- Response Surface Methodology

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

CBR (%)

● Design points above predicted value

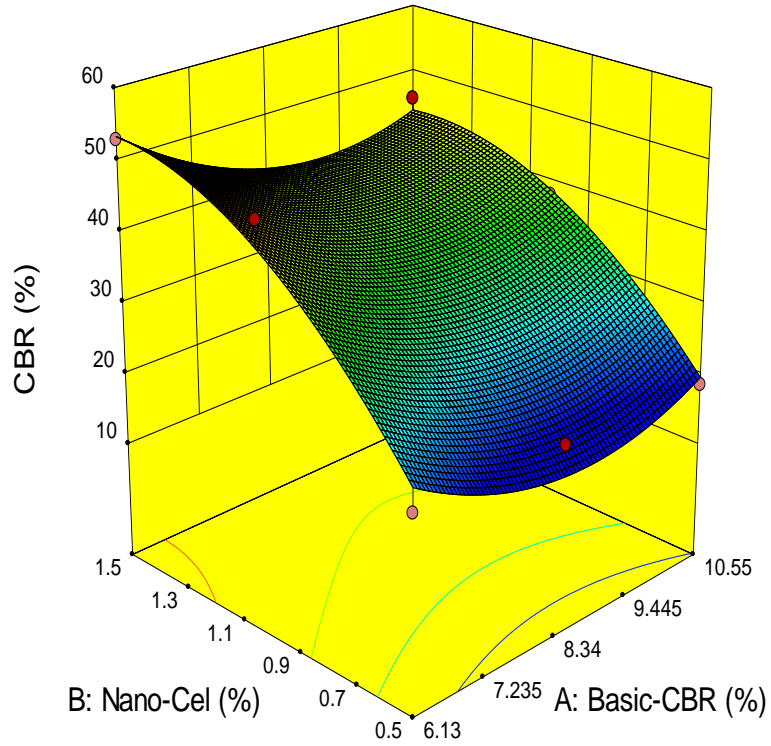
○ Design points below predicted value

52.96

18.58

X1 = A: Basic-CBR

X2 = B: Nano-Cel



شکل ۱۷. پیش‌بینی ظرفیت باربری خاک بستر تثبیت شده با استفاده از روش تحلیل سطح پاسخ

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Modi-Qu (Kg/cm2)

● Design points above predicted value

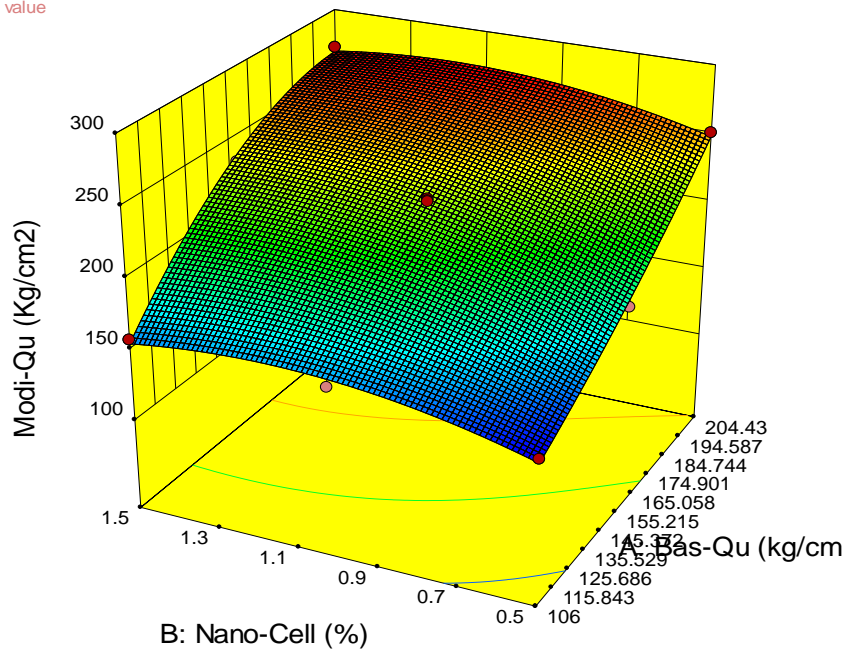
○ Design points below predicted value

271.71

137.66

X1 = A: Bas-Qu

X2 = B: Nano-Cell



شکل ۱۸. نمودار پیش‌بینی مقاومت فشاری خاک بستر تثبیت شده با استفاده از روش تحلیل سطح پاسخ

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Frac-Ener (kg.cm)

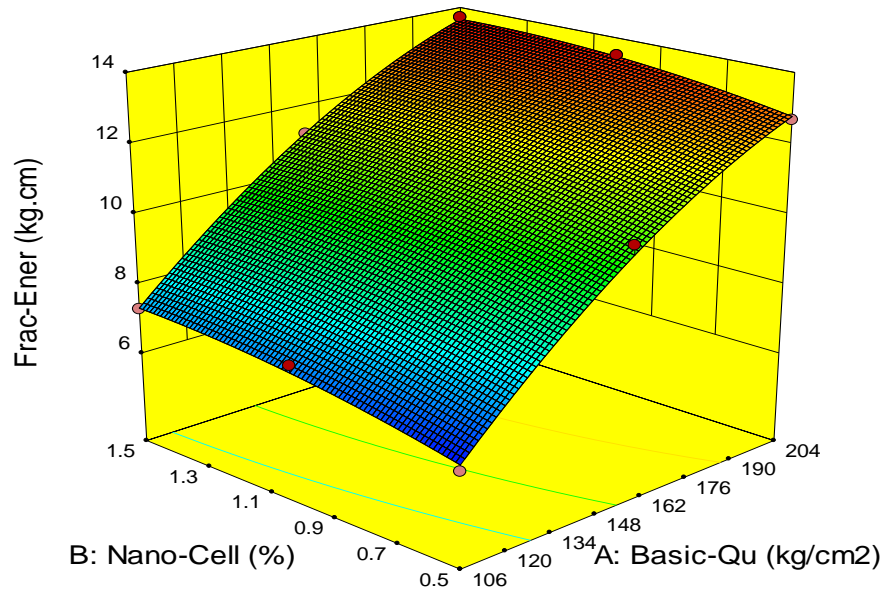
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value



X1 = A: Basic-Qu

X2 = B: Nano-Cell



شکل ۱۹. پیش‌بینی انرژی شکست نمونه‌های خاک بستر تثبیت شده با استفاده از روش تحلیل سطح پاسخ

جدول ۲. توابع پیش‌بینی پارامترهای بررسی شده در آزمایش‌های وابسته به متغیرهای مکانیکی اولیه خاک بستر و درصد

نانوسلولز

Parameter	Adj R-Squared	Adeq Precision	Final Equation	شماره رابطه
CBR	0.9313	18.237	$CBR = +77.65052 - 22.93850 * Basic - CBR + 93.10534 * Nano - Cel - 1.14932 * Basic - CBR * Nano - Cel + 1.35260 * Basic - CBR^2 - 28.23500 * Nano - Cel^2$	(۱)
Compression Strength	0.9770	24.673	$Modi - Qu = +154.57348632 - 1.72105 * Bas - Qu - 129.7544420 * Nano - Cell + 3.99727056 * Bas - Qu * Nano - Cell + 9.450413E - 003 * Bas - Qu^2$	(۲)
Fracture Energy	0.9950	60.494	$Frac - Ener = -9.14661078717198 + 0.16507 * Basic - Qu + 3. * Nano - Cell - 3.06122E - 003 * Basic - Qu * Nano - Cell - 3.097667E - 004 * Basic - Qu^2 - 0.975 * Nano - Cell^2$	(۳)

۵. نتیجه‌گیری

- افزودن نانوالیاف سلولزی به خاک مورد مطالعه باعث کاهش شاخص خمیری خاک به میزان ۲۵ تا ۴۰ درصد می‌شود. نانوالیاف سلولزی با کاهش شاخص خمیری خاک سبب کاهش شکل‌پذیری خاک و مقاومت لایه‌های روسازی در مقابل شرایط اشباع (بارندگی) و افزایش کارایی خاک می‌گردد.
- افزودن نانوالیاف سلولزی تا مقدار ۱/۵ درصد سبب افزایش ۱۰ تا ۲۵ درصدی رطوبت بهینه و

در تحقیق حاضر، به منظور تعیین تأثیر نانوالیاف سلولزی بر خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک مورد مطالعه، نمونه‌هایی با درصدهای مختلف ساخته شدند و آزمایش‌های مختلفی روی آنها انجام گرفت. برای رسیدن به این منظور، از نانوالیاف سلولزی به عنوان یک الیاف نانومقیاس طبیعی تثبیت‌کننده‌ی بستر ترک‌خورده‌ی راه استفاده شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد. در ادامه، نتایج این تحقیق به صورت خلاصه ارائه شده است.

- کاهش ۲ تا ۳ درصدی حداکثر وزن مخصوص خشک می شود.
- با توجه به نتایج آزمایش باربری کالیفرنیا (CBR) و رسم نمودارها نتیجه می شود که افزودن درصد های مختلف نانوسلولز موجب افزایش مقاومت خاک و در نتیجه بهبود سطح کیفی ساختار خاک می گردد. نکته قابل توجه اینکه هیچ یک از نمونه های ترکیبی با نانوسلولز، برخلاف نمونه شاهد، گسیخته نشدند.
- در آزمایش تک محوری کرنش در لحظه گسیختگی به علت افزایش خواص خمیری، کاهش نسبت منافذ نمونه، تغییر بافت خاک ها و پیوند بهتر بین ذرات خاک بیشتر شده است. همچنین، مشاهده گردید که با افزودن نانوسلولز به خاک به دلیل چسبندگی و پیوند بین ذرات و کاهش خلل و فرج خاک و فعل و انفعالات شیمیایی، مقاومت فشاری محصور نشده نمونه ها بین ۳۰ تا ۸۶ درصد افزایش می یابد.
- نتایج به دست آمده از آزمایش دوام بیانگر این می باشد که افزودن نانوسلولز سبب مقاومت بیشتر نمونه های ترکیبی نسبت به نمونه های شاهد در برابر سیکل های انجماد- ذوب می شود. ولی با افزایش دوره های انجماد-ذوب، این مقاومت رفته رفته کاهش پیدا می کند. در طول چرخه های ذوب- انجماد، چون در ساختار خاک فروپاشیدگی ذرات رخ می دهد و تخلخل نمونه ها بیشتر می شود، در نتیجه مقاومت نمونه ها کم شده و گسیخته می شوند.
- با کمک روش تحلیل سطح پاسخ، نمودار سه- بعدی و تابع پیش بینی مربوط به مقاومت فشاری، نسبت باربری کالیفرنیا و انرژی شکست محاسبه و ارائه گردید، که بیشترین وابستگی بین انرژی شکست با متغیرهای اولیه (درصد نانوسلولز- مقاومت فشاری) در مقایسه با دو پارامتر هدف دیگر دارد.

منابع

- [1] Zhou, D. (2019). Experimental Study on Permanent Deformation of Fine Sandy Subgrade Filling in Coastal Region. In Key Engineering Materials (Vol. 814, pp. 419-424). Trans Tech Publications Ltd.
- [۲] زارع جونقانی، ن.، ۱۳۹۶ بررسی خصوصیات کانی شناسی و رفتار مکانیکی نهشته های رسوبی عهد حاضر در جنوب شرق یزد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد. صفحه ۱۴۰.
- [3] Ghadakpour, M., Choobbasti, A. J., & Kutanaei, S. S. (2020). Investigation of the Kenaf fiber hybrid length on the properties of the cement-treated sandy soil. *Transportation Geotechnics*, 22, 100301.
- [4] Mitchell, J.K., Soga, K : (2005), "Fundamentals of soil behavior" 3rd edn. John Wiley and Sons, New York, 978-0-471-46302-3, p 592.
- [5] Armaghani, D. J., Mirzaei, F., Shariati, M., Trung, N. T., Shariati, M., & Trnavac, D. (2020). Hybrid ANN-based techniques in predicting cohesion of sandy-soil combined with fiber. *Geomechanics and Engineering*, 20(3), 191-205.
- [6] Basha E.A, Hashim R, Mahmud H.B, Muntohar A.S.(2005), "Stabilization of Residual soil using SiO2 nanoparticles and cement" ., *Constr. Build. Mater.* 64 ,350-359.

- [7] Ochi T, Okubo S, Fukui K. (2007), "Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber", *Cement & Concrete Composites*, 29,448-455
- [8] Zeng, L., Xiao, L., Zhang, J., & Fu, H. (2020). The Role of Nanotechnology in Subgrade and Pavement Engineering: A Review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(8), 4607-4618.
- [9] Buazar, F. (2019). Impact of biocompatible nanosilica on green stabilization of subgrade soil. *Scientific reports*, 9(1), 1-9.
- [10] Tanzadeh, R., Vafaeian, M., & Fard, M. Y. (2019). Effects of micro-nano-lime (CaCO₃) particles on the strength and resilience of road clay beds. *Construction and Building Materials*, 217, 193-201.
- [11] Bahmani S.H, Huat B.B.K, Asadi A, Farzadnia N. (2014), "Stabilization residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement"., *Constr. Build. Mater.* 64, 350-359.
- [12] Emmanuel, E., Lau, C. C., Anggraini, V., & Pasbakhsh, P. (2019). Stabilization of a soft marine clay using halloysite nanotubes: A multi-scale approach. *Applied Clay Science*, 173, 65-78.
- [13] Koon-yang, Lee, Yvonne Aitomaki, Lars A. Berglund, Kristiina Oksman, Alexander Bismarck,(2014), On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites, *Composites Science and Technology* 105,15-27
- [14] Lani, N. S., Ngadi, N., Johari, A., & Jusoh, M. (2014). Isolation, characterization, and application of nanocellulose from oil palm empty fruit bunch fiber as nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, Article ID 702538 , 9 pages [10.1155/2014/702538](https://doi.org/10.1155/2014/702538).
- [15] Gillis PP. (1969), Effect of hydrogen bonds on the axial stiffness of crystalline native cellulose. *J polym Sci part A-2 ; polym phys ;* 7(5): 783-940
- [16] Maghchiche, A; Haouma, A And Immirzi, B, (2010), Use of polymers and biopolymers for water retaining and soil stabilization in arid and semiarid regions Département de pharmacie Faculté de médecine, Université El Hadj Lakhdar, Batna 05395Algeria.
- [17] Maher, M.; Ho, Y. Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite. *J Geotech. Eng.* 1994, 120, 1381–1393.
- [18] Sivakumar Babu, G.; Vasudevan, A. Strength and Stiffness Response of Coir Fiber - Reinforced Tropical Soil. *J. Mater. Civ. Eng.* 2008, 20, 571–577.
- [19] Hassan, H.; Al-Oraimi, S.; Taha, R. Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibers and styrene butadiene rubber polymer. *J. Mater . Civ . Eng.* (2005), 17, 416–422.
- [20] Nadezda Stevulova and Viola Hospodarova,(2015), Cellulose Fibres Used in Building Materials Proceedings of REHVA Annual Conference “Advanced HVAC and Natural Gas Technologies” Riga, Latvia,p211-216, 10.7250/rehvaconf.031,
- [21] Yousefi, H., Azari, V., & Khazaeian, A. (2018). Direct mechanical production of wood nanofibers from raw wood microparticles with no chemical treatment. *Industrial Crops and Products*, 115, 26-31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092666901830116X>.
- [22] Shihata, S. A., & Baghdadi, Z. A. (2001). Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement. *Journal of materials in civil engineering*, 13(4), 243-247.
- [24] Fazeli, M., Florez, J. P., & Simão, R. A. (2019). Improvement in adhesion of cellulose fibers to the thermoplastic starch matrix by plasma treatment modification. *Composites Part B: Engineering*, 163, 207-216.
- [25] Lotfalian, M., Parsakhoo, A., & Savadkoohi, A. (2016). Improvement of forest road gravel surfacing quality by Nano-polymer CBR PLUS. *Croatian Journal of Forest*

تأثیر نانوسلولز در اصلاح مشخصات مکانیکی و تغییر حجم خاک بستر ماسه ای لای دار در کنترل گسیختگی موضعی آن

Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 37(2), 352-345.

[26]Rosales, J., Agrela, F., Marcobal, J. R., Diaz-López, J. L., Cuenca-Moyano, G. M., ج ۲
Caballero, Á., & Cabrera, M. (2020). Use of Nanomaterials in the Stabilization of
Expansive Soils into a Road Real-Scale Application. Materials, 13(14), 3058.

