

## تأثیر مقدار نانوسلولز در نانوکامپوزیت‌های هیدروژلی بر روی استحکام سله‌های ایجاد شده (مطالعه موردی: ماسه‌بادی کویر سیازگه ابوزیدآباد)

زهرا فیضی<sup>۱</sup>، ابوالفضل رنجبر فردوئی<sup>۱\*</sup> و علیرضا شاکری<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴)

### چکیده

حفظ ساختار خاک و ثبات آن، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که خاک دارای ثبات ساختاری ضعیف بوده، ضروری است. تخریب خاک و سله‌های آن می‌تواند باعث فرسایش بادی و بیابانزایی شود. هدف از این مطالعه، بررسی اثر استفاده از مالچ نانوکامپوزیتی هیدروژلی در تثبیت سطوح ماسه‌ای است. به‌منظور بررسی میزان فرسایش پذیری نمونه‌های تیمار شده با مقادیر مختلف نانوکامپوزیت هیدروژلی از آزمایش تونل بادی استفاده شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها از طریق نفوذسنج دستی اندازه‌گیری شد. نانوکامپوزیت‌های تهیه شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)، طیف سنجی مادون قرمز (FTIR) و پراش پرتو ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تونل بادی نشان داد که اضافه‌کردن نانوکامپوزیت هیدروژلی به نمونه‌ها باعث بهبود ۱۰۰ درصدی نرخ فرسایش پذیری خاک در برابر باد با سرعت ۱۵m/s در مقایسه با نمونه شاهد شد. ایجاد اتصال در بین ذرات ماسه از طریق پاشش نانوکامپوزیت هیدروژلی عامل بهبود خاصیت فرسایش‌پذیری ماسه است. اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی نمونه‌های تیمار شده بعد از ۳۰ روز نشان داد که میزان مقاومت سله‌های تشکیل شده با افزایش مقدار نانوذره سلولزی در کامپوزیت افزایش پیدا کرد که می‌توان آن را به‌دلیل افزایش سطح بالای نانوذره و امکان اتصالات بیشتر بستر پلیمری نانوکامپوزیت با ذرات ماسه بیان کرد. درحالی که قطر سله تشکیل شده با افزایش غلظت تغییر چندانی از خود نشان نداده و نمونه تیمار شده با نانوکامپوزیت‌های حاوی ۳ درصد نانوذره در قیاس با نمونه‌های دیگر ضخامت و مقاومت بیشتری داشت.

واژه‌های کلیدی: نانوسلولز، سله، فرسایش‌پذیری، مقاومت فشاری، FTIR، FE-SEM، XRD

۱. گروه بیابان‌زدایی، دانشکده علوم زمین و منابع طبیعی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲. گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: aranjbar@kashanu.ac.ir

## مقدمه

فرسایش بادی باعث وقوع گرد و غبار و طوفانهای ماسه در نواحی مختلف جهان به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک و اراضی بایر با خاکهای ماسه‌ای می‌شود. کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی با معضل فرسایش بادی روبرو است. حدود ۲۰ میلیون هکتار از کشور تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارد (۲۶). وقوع طوفانهای ماسه در ماه‌های مختلف سال به ویژه در فصل بهار و تابستان باعث ایجاد مشکلات متعددی در اکثر نواحی ایران شده است. فرسایش بادی با حمل مواد مغذی خاک باعث فقر آن شده و به اراضی کشاورزی، مسکونی و راه‌ها و تأسیسات آسیب وارد می‌کند (۱۹ و ۲۹) و حتی بر سلامت انسان نیز اثرات زیان‌باری دارد. نیروی باد باعث برداشت ذرات خاک و انتقال و پراکنش آنها در سطح وسیع و در نهایت ته‌نشست در مناطق مختلف می‌شود. اگر سرعت باد در مناطق مختلف به آستانه فرسایش بادی (سرعت حداقل مورد نیاز برای جابجایی ذرات ماسه) برسد ذرات خاک شروع به حرکت می‌کنند. میزان برداشت خاک به قطر ذرات، اتصال آنها به یکدیگر و به قدرت فرساینده باد بستگی دارد (۲).

به منظور کنترل فرسایش بادی از روش‌های مختلف شیمیایی، مکانیکی و زیستی استفاده می‌شود (۹، ۱۳ و ۲۶) متداول‌ترین روش کنترل فرسایش بادی استفاده از مالچ است (۱) که باعث افزایش چسبندگی ذرات و رطوبت خاک و مقاومت در برابر نیروهای برشی باد می‌شود (۱۱). در طی دهه‌های گذشته استفاده از مالچ نفتی بسیار رایج بوده که باعث بروز فجایع زیست‌محیطی از جمله تخریب و زوال پوشش گیاهی و جانداران و کاهش نفوذ آب می‌شود. بنابراین، در سال‌های اخیر به منظور کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از مالچ‌پاشی استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری و نانو ذرات به منظور تثبیت سطوح مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از مالچ‌های بیولوژیکی و زیستی به عنوان مالچ تثبیت‌کننده خاک توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. زارع و همکاران (۳۰) به بررسی اثر خاک‌پوش‌های مختلف ژئولیت،

ملاس و لیگنوسلولز روی ویژگی‌های رسوبات بادرفتی ریگ بلند کاشان پرداختند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان داد که استفاده ترکیبی از مالچ‌های مورد بررسی اثر بیشتری در بهبود شاخص پایداری خاک دارد. ممینی و همکاران (۲۰) به بررسی میکروالیاف لیگنوسلولز باگاس در تثبیت سطوح ماسه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که اضافه کردن میکرولیف و لیکور سیاه باعث بهبود خواص مقاومتی ماسه می‌شود. آنها بیان کردند که افزودن الیاف سلولزی باعث افزایش خاصیت چسبندگی در بین ذرات ماسه می‌شود. از دستگاه نفوذسنج دستی به منظور تعیین مقاومت سل‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد که بین مقاومت فشاری و برشی و میزان مالچ استفاده شده رابطه مستقیمی وجود دارد. الماجد و همکاران (۳) به بررسی اثرات بیوپلیمر در تثبیت سطوح ماسه‌ای بیابان نفود پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از بیوپلیمر مذکور باعث ایجاد نیروهای بین ذره‌ای شده و ماسه را در برابر باد در قیاس با نمونه شاهد مقاوم می‌کند. چن و همکاران (۷) از آزمون تونل بادی برای اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌های تیمار شده با بیوپلیمر استفاده کردند. برای سل‌های تشکیل شده نیز از نفوذسنج با قطر ۶ میلی‌متر استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که بین وزن خاک از دست رفته در دستگاه تونل بادی و نتایج حاصل از آزمون نفوذسنج ارتباط مستقیمی وجود دارد.

در این مطالعه از نانو سلولز استخراج شده از پوست گردو به منظور تهیه نانو کامپوزیت هیدروژلی استفاده شد. نانوسلولز خاصیت پراکنده‌کنندگی خوبی در محیط‌های محلول آبی دارد می‌تواند برخی از خواص هیدروژل‌ها را اصلاح نماید (۲۱). سلولز از جمله بیوپلیمر طبیعی است (۱۰) که به دلیل نانو اندازه بودن، خواص سطحی و مکانیکی، زیست‌تخریب‌پذیری و سطوح ویژه بالا و چگالی پایین مورد توجه قرار گرفته است (۲۲ و ۲۷). نانوسلولز یک عامل تقویت‌کننده بوده و با پلیمرهای آبدوست به خوبی برهم‌کنش دارد و زیست‌تخریب‌پذیر، زیست‌سازگار، تجدیدپذیر و یک ماده دوست‌دار محیط زیست است. نسبت سطحی بالای نانو سلولز

دستی و به طور یکنواخت بر روی سطح نمونه‌ها پاشیده شده و فرسایش پذیری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تونل بادی بررسی و خواص مکانیکی سله‌های ایجاد شده نیز مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در این مطالعه به منظور بررسی خواص نانوکامپوزیت مورد استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان و پراش پرتو ایکس استفاده شد.

### مواد و روش‌ها

نمونه ماسه‌های مورد استفاده در این مطالعه از کویر سیازگه ابوزیدآباد واقع در شمال استان اصفهان جمع‌آوری شد (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه یکی از کانون‌های مهم فرسایش بادی در ایران است. این منطقه در شمال دشت کاشان و روی رسوبات دوران کواترنر واقع شده است. خاک این منطقه بر اساس سیستم طبقه‌بندی ایالت متحده جز ماسه ریز است.

گردو یکی از محصولات باغی کشت شده در ایران است که پوست سفت آن به عنوان ضایعات کشاورزی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. پوست گردو مورد استفاده در این پژوهش از شهرستان دماوند استان تهران جمع‌آوری شد. پوست گردو از سه بخش لیگنین، سلولز و همی‌سلولز تشکیل شده است. به منظور استخراج نانوسلولز به روش هیدرولیز، از اسید سولفوریک (۹۸ درصد وزنی)، سدیم کلریت و سدیم هیدروکسید (۹۹ درصد وزنی) تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ بدون خالص سازی استفاده شد.

### تهیه نانو سلولز

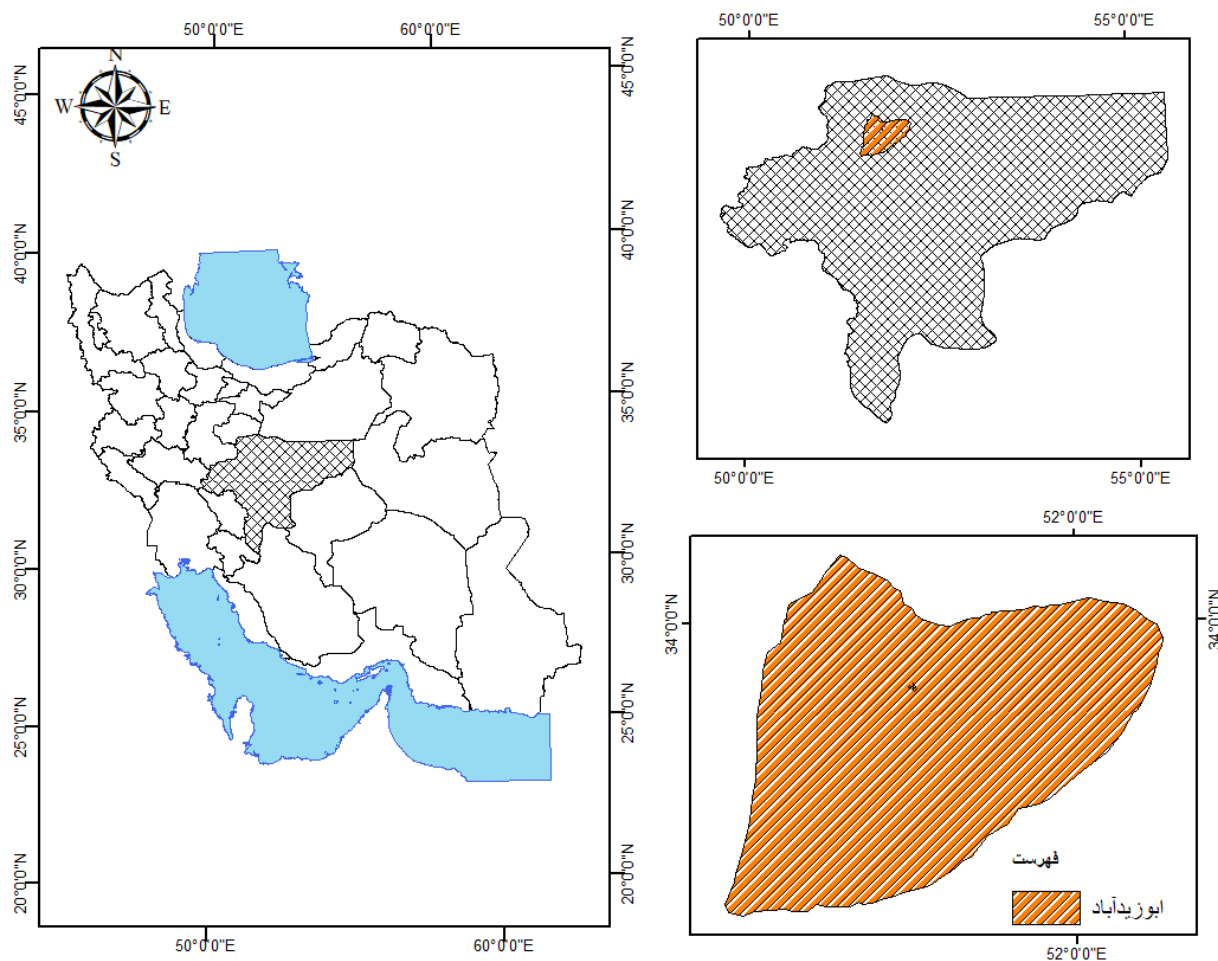
به منظور تهیه نانو سلولز از پوست گردو مطابق روش (۴، ۲۴ و ۳۱) عمل شد. ابتدا به منظور حذف آلودگی و ناخالصی‌های پوست گردو شسته شده و پس از خشک شدن به وسیله آسیاب گلوله‌ای دو کاپه خرد شد. سپس به منظور حذف همی سلولز محلول دو درصدی سدیم کلریت تهیه شد. دو گرم پوست با بیست گرم محلول کلریت ترکیب و به مدت چهار ساعت در دمای صد درجه سانتی‌گراد بر روی همزن مغناطیسی

و استحکام آن کمک می‌کند تا نانو کامپوزیتی با خواص بهبود یافته در قیاس با ماده زمینه خالص ایجاد شود. اما موضوع اصلی در بهبود خواص آنها این است که با افزودن نانو ذره سلولز به پلیمر، ویسکوزیته محلول افزایش و قدرت تحرک پلیمر مذکور کاهش می‌یابد. پلیمرهای زیست تخریب پذیر یا پلیمرهای حاصل از مواد زیست تخریب پذیر در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش فشار بر روی محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در سال‌های اخیر، سنتز و استفاده از سوپر جاذب‌های بر پایه مواد طبیعی مورد توجه قرار گرفته است. سوپر جاذب‌ها به عنوان شبکه‌های سه بعدی با قابلیت چند برابری جذب آب هستند (۱۸). سنتز سوپر جاذب‌هایی با قابلیت جذب، مقاومت مکانیکی بالا هدف اصلی بسیاری از مطالعات بوده است (۱۴).

بنابراین، به نظر می‌رسد که استفاده از پلیمرهای مختلف به عنوان مالچ به دلیل ایجاد باندهای فیزیکی-شیمیایی در بین ذرات خاک باعث اتصال ذرات به یکدیگر و با ایجاد خاکدانه‌های درشت‌تر خواص آنها را بهبود می‌بخشد. از طرف دیگر با افزایش جمعیت و نیاز روبه رشد به مواد غذایی تولید محصولات کشاورزی با رشد چشمگیری روبه‌رو شده است. گردو به عنوان یکی از محصولات خوراکی در مناطق مختلف ایران کشت شده و پوست آن به عنوان ضایعات کشاورزی سوزانده و یا دفن می‌شود. بنابراین، با توجه به حجم بالای ضایعات کشاورزی فرض استفاده از آن به عنوان یک جزء از مالچ تثبیت کننده مطرح شد.

بنابراین، در این مطالعه به بررسی اثر کامپوزیت هیدروژلی در حضور نانوسلولز استخراج شده از پوست گردو پرداخته و یک مجموعه مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف نانو سلولز (۰، ۱، ۳ و ۵ درصد) در کامپوزیت هیدروژلی تحت عنوان نانوکامپوزیت هیدروژلی و همچنین تعداد دفعات پاشش مالچ روی ویژگی‌های ماسه بادی جمع‌آوری شده از کویر سیازگه ابوزیدآباد (استان اصفهان) مورد بررسی قرار شد. بدین منظور تیمارهای مختلف پس از تهیه با استفاده از آبپاش



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی در سطح استان و کشور (رنگی در نسخه الکترونیکی)

استفاده قرار گرفت (۱۵).

#### تهیه محلول نانوکامپوزیت هیدروژل

به منظور ساخت مالچ مورد نظر مطابق روش رن و همکاران (۲۱) عمل شد. برای تهیه نانوکامپوزیت هیدروژلی حاوی ۱ درصد نانو سلولز، ۰/۰۱ گرم نانوسلولز استخراج شده از پوست گردو در ۱۵ میلی لیتر آب پراکنده شد. سپس ۱ میلی لیتر اکریلیک اسید به محلول اضافه شده و بر روی گرمکن با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت. سپس به ترتیب ۰/۲۵ گرم اکریل آمید، ۰/۰۶ گرم آمونیوم پرسولفات به عنوان شروع کننده واکنش پلیمری شدن و ۰/۰۰۹ گرم متیلن بیس آمید به عنوان عامل شبکه ساز

به هم خورد. این مرحله چهار بار تکرار و هربار به منظور حذف همی سلولز سانتریفیوژ شده و با آب مقطر شستشو داده شد. در مرحله بعد محلول بافر از ترکیب ۲/۷ گرم سدیم هیدروکسید و ۷/۵ گرم استات اسید تهیه شد. سپس پودر حاصل از مرحله قبل با محلول بافر و سدیم کلرید ترکیب شد. سپس به منظور حذف ناخالصی چندین بار با آب مقطر شستشو تا به pH خنثی رسید. در نهایت پودر گردو با ۸/۷۵ میلی لیتر سدیم سولفوریک (۶۴ درصد) در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد و به مدت یک ساعت بهم خورد. به منظور توقف واکنش به محلول آب مقطر اضافه شد و در سانتریفیوژ با دور ۱۰۰۰۰ قرار گرفت. پودر حاصل پس از خشک شدن تحت عنوان نانوذرات سلولزی استخراج شده از پوست گردو مورد

شده از دستگاه ترمونیکولت ساخت کشور آمریکا Thermo Nicolet, USA استفاده شد. آنالیز FTIR در محدوده اعداد موجی  $600$  الی  $4000 \text{ cm}^{-1}$  مورد بررسی قرار گرفت.

#### آماده سازی نمونه های تیمار شده

نمونه های جمع آوری شده از محدوده مطالعاتی پس از عبور از الک با مش شماره ۲ درون سینی های فلزی با ابعاد  $100 \times 30 \times 20$  سانتی متر ریخته شد. سپس با استفاده از پیستول ۲/۵ لیتری اقدام به پاشش یکنواخت مالچ بر روی سطح نمونه ها شد.

سینی نمونه ها به مدت یک هفته در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند تا خشک شود. سپس اقدام به پاشش لایه دوم شد. به منظور مقایسه با حالت شاهد یک نمونه نیز بدون استفاده از مالچ و از طریق آب شهری آبیاری شد. بدین منظور چهار نوع مالچ با مقادیر مختلف نانوسلولز تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش به منظور مقایسه با حالت بدون مالچ یک تیمار هم به عنوان شاهد در نظر گرفته شد ( $T_w$ ) و مطابق سایر تیمارها آبیاری صورت گرفت. در جدول ۱ تیمارهای مختلف مورد استفاده مشخص شده است.

#### آزمایش تونل بادی

به منظور بررسی مقاومت نمونه های تیمار شده در برابر فرسایش بادی دستگاه تونل بادی مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده از سه بخش پروانه مولد باد، بخش آزمایش و محفظه رسوبگیر تشکیل شده است. حداکثر سرعت باد ایجاد شده بوسیله این دستگاه  $15 \text{ m/s}$  است. بخش دوم دستگاه محل قرارگیری سینی های نمونه بوده که با فاصله از فن قرار دارد. بخش سوم از محفظه پلاستیکی به طول ۱۰ متر تشکیل شده که محل رسوبگذاری ماسه های حمل شده توسط باد است.

نمونه های تیمار شده به مدت یک هفته در دمای اتاق قرار گرفتند، نمونه شاهد ۲۴ ساعت پس از آبیاری مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه گیری سرعت آستانه فرسایش بادی طی دو

هیدروژل به آب مقطر درون فلاسک سه دهنه با همزن مغناطیسی، مبرد برگشتی و تحت اتمسفر نیتروژن در دمای  $70$  درجه سانتی گراد اضافه شد. ترکیب مذکور سپس به محلول اکریلیک اسید اضافه شده و به مدت  $20$  دقیقه بر روی گرمکن با دمای  $80$  درجه سانتی گراد قرار گرفت. برای تهیه سایر تیمارهای نانوکامپوزیت های مقادیر مشخصه ای از نانو سلولز توزین و نانوکامپوزیت تهیه برای تهیه هیدروژل مراحل بالا بدون حضور نانو سلولز تهیه شد.

#### آنالیز تعیین خواص نانوکامپوزیت هیدروژلی تهیه شده

پس از تهیه نانو کامپوزیت هیدروژلی به منظور بررسی ویژگی های آن مقداری از ترکیب مذکور به مدت یک روز در آون و پس از خشک شدن نانوکامپوزیت مذکور را به صورت پودر در آورده شد (شکل ۲-د).

به منظور بررسی ویژگی های ظاهری مالچ تهیه شده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. بدین منظور نمونه ها به مدت ۳ روز در دمای  $50$  درجه سانتی گراد قرار گرفتند و سپس توسط یک لایه طلا پوشانده شدند.

علاوه بر این، به منظور بررسی خواص بلوری مالچ نانو کامپوزیت هیدروژلی تهیه شده از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شد.

#### آزمون پراش پرتو ایکس

کریستالیتی مواد با استفاده از دستگاه الگوی پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار می گیرد. این دستگاه امکان تصویربرداری مستقیم از کریستال های سلولزی را فراهم می کند. الگوی پراش پرتو ایکس در این مطالعه با استفاده از دستگاه D8 پیشرفته، بروکر ساخت کشور آلمان (D8 ADVANCE, Bruker, Germany) تهیه شد.

#### طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

##### (Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR))

به منظور تعیین گروه های عاملی نانوکامپوزیت هیدروژلی تهیه

جدول ۱. ترکیب تیمارهای مورد استفاده در پژوهش حاضر

یک لایه پاشش			دو لایه پاشش				
تیمار	اکریلیک اسید کو اکریل آمید (%)	نانو سلولز (%)	کد	تیمار	اکریلیک اسید کو اکریل آمید (%)	نانو سلولز (%)	کد
AA+AM	۱	۰	T۱				
	۱	۱	T۲		۱	۱	T۵
NCWS- graft- p(AA-AM)*	۱	۳	T۳	NCWS- graft- p(AA-AM)	۱	۳	T۶
	۱	۵	T۴		۱	۵	T۷
شاهد			Tw				

\* Nanocellulose walnut shell- graft- polymer (acrylic acid- acrylamide)

مقاومت سنج برشی استفاده شد. افزایش مقاومت لایه‌های سطحی عامل کلیدی در کنترل فرسایش بادی است. بعد از گذشت ۳۰ روز از مالچ‌پاشی اقدام به اندازه‌گیری مقاومت برشی تیمارها در ۵ قطه از سطح سینی و با ۳ تکرار شد. حداکثر تنش توسط دستگاه نشان داده شد (۱۶).

#### تعیین ضخامت سله

ضخامت سله با استفاده از دستگاه کولیس اندازه‌گیری شد. بدین منظور با استفاده از فرچه ماسه‌های زیر سله کنار زده شدند و سپس ضخامت سله تعیین شد.

#### تجزیه تحلیل آماری

این پژوهش در طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. به منظور تجزیه و تحلیل نتایج از تجزیه واریانس و به منظور بررسی میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه تحلیل واریانس در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### نتایج

##### آنالیز هیدروژل پلیمری

نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه نشان‌دهنده وجود گروه‌های عاملی هیدروکسیل (بیک  $3351\text{cm}^{-1}$ ) (۱۲)، سدیم کربوکسیلات ( $1556\text{cm}^{-1}$ ) (۳۰)، کربونیل ( $1563\text{cm}^{-1}$ ),

دوره ۷ روزه و ۳۰ روزه انجام شد. بدین منظور پس از قرار گرفتن سینی‌ها درون دستگاه سرعت باد به آرامی افزایش داده شد و به مدت ۲۰ دقیقه در معرض باد با سرعت بیشینه قرار گرفت. مقایسه وزن سینی قبل و بعد از قرار گرفتن در دستگاه بیانگر میزان ماسه جابجا شده توسط باد بود.

#### آزمون مقاومت فشاری سطحی

به منظور اندازه‌گیری مقاومت سطحی نمونه‌های تیمار شده از دستگاه نفوذسنج دستی استفاده شد. این دستگاه به‌طور معمول به منظور تخمین سریع مقاومت نامحدود فشاری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲). این دستگاه نفوذسنج به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری کیفی تیمار و مقاومت سله‌های تشکیل شده به کار برده می‌شود. پژوهشگران بسیاری از این دستگاه به‌عنوان شاخصی جهت اندازه‌گیری مقاومت ذرات خاک مورد استفاده قرار داده‌اند (۵، ۶ و ۷). دستگاه نفوذسنج دستی به صورت مستقیم میزان مقاومت نامحدود فشاری را با مقیاس  $\text{kg/cm}^2$  نشان می‌دهد. بعد از اینکه نمونه‌ها در دمای اتاق به‌طور کامل خشک شدند و پس از ۳۰ روز، نفوذسنج در سطح نمونه‌ها فرورانده شد تا میزان مقاومت فشاری اندازه‌گیری شود. این آزمون در ۱۰ نقطه و با پراکنش یکسان در سطح هر سینی و با ۳ تکرار انجام شد.

#### آزمون مقاومت برشی

به منظور تعیین میزان چسبندگی نمونه‌های تیمار شده از

جدول ۲. مقایسه میانگین شاخص های اندازه گیری شده مالچ بین تیمارهای مختلف

خطای استاندارد $\pm$ میانگین			
تیمارها	مقاومت فشاری (kg/cm <sup>2</sup> )	ضخامت سله (mm)	مقاومت برشی (N/cm <sup>2</sup> )
تیمار ۲	۰/۶۹ $\pm$ ۰/۰۸ <sup>cd</sup>	۱۵/۱۹ $\pm$ ۱/۶۹ <sup>cd</sup>	۰/۲۳ $\pm$ ۰/۰۳ <sup>d</sup>
تیمار ۳	۱/۰۵ $\pm$ ۰/۱۲ <sup>bc</sup>	۱۶/۱۲ $\pm$ ۱/۷۹ <sup>b</sup>	۰/۸۶ $\pm$ ۰/۱ <sup>b</sup>
تیمار ۴	۰/۷۹ $\pm$ ۰/۰۹ <sup>cd</sup>	۱۴/۶۲ $\pm$ ۱/۶۲ <sup>d</sup>	۰/۲۵ $\pm$ ۰/۰۳ <sup>d</sup>
تیمار ۵	۱/۷۷ $\pm$ ۰/۲ <sup>ab</sup>	۱۶/۱۶ $\pm$ ۱/۸ <sup>b</sup>	۰/۳۶ $\pm$ ۰/۰۴ <sup>c</sup>
تیمار ۶	۲/۴ $\pm$ ۰/۲۷ <sup>a</sup>	۱۶/۸۸ $\pm$ ۱/۸۸ <sup>a</sup>	۱/۶ $\pm$ ۰/۱۸ <sup>a</sup>
تیمار ۷	۱/۹۷ $\pm$ ۰/۲۲ <sup>a</sup>	۱۵/۶۲ $\pm$ ۱/۷۴ <sup>bc</sup>	۰/۴۲ $\pm$ ۰/۰۵ <sup>c</sup>
تیمار ۱	۰/۳ $\pm$ ۰/۰۳ <sup>d</sup>	۱۳/۲۷ $\pm$ ۱/۴۷ <sup>e</sup>	۰/۱ $\pm$ ۰/۰۱ <sup>e</sup>
شاهد	۰/۱ $\pm$ ۰/۰۱ <sup>d</sup>	۱ $\pm$ ۰/۱۱ <sup>f</sup>	۰/۱ $\pm$ ۰/۰۱ <sup>e</sup>

می شود نمونه تیمار حاوی ۱ درصد نانو ذره کمترین مقدار مقاومت فشاری (۰/۶۹  $\pm$  ۰/۰۸ kg/cm<sup>2</sup>) را از خود نشان داده است. نمونه تیمار شده با مقدار ۳ درصد نانو ذره دارای بیشترین مقدار مقاومت (۲/۴  $\pm$  ۰/۲۷ kg/cm<sup>2</sup>) است. با افزایش مقدار نانوذره تا ۳ درصد، میزان مقاومت فشاری افزایش پیدا کرده است و پس از آن کاهش یافته است.

به طور مشابه، نمونه های تیمار شده با مقادیر بالاتر نانوذره و همین طور دفعات پاشش بیشتر دارای حداکثر مقاومت فشاری بودند. بدین ترتیب تیمار T6 بیشترین مقاومت را در برابر نیروی فشاری از خود نشان داد. تیمار ۱ (فاقد نانوذره) از نظر مقاومت فشاری فاقد اختلاف معنی دار با نمونه کنترل بود. همان طور که در نمودار مشخص است با افزایش تعداد دفعات پاشش مالچ در هر سطح، مقدار مقاومت فشاری تقریباً دوبرابر شده است.

مقایسه میانگین مقاومت برشی نشان داد که بیشترین مقاومت برشی مربوط به تیمار ۶ (۱/۶  $\pm$  ۰/۱۸ N/cm<sup>2</sup>) بوده که با سایر تیمارها تفاوت معنی داری دارد. نتایج برای کاربرد نانوذره در حالت یکبار پاشش نشان داد که بکارگیری نانوذره به میزان ۳ درصد مقاومت برشی بیشتری نسبت به دو تیمار دیگر داشت. میزان مقاومت برشی تیمارهای نانوذره چه در حالت یکبار پاشش و چه در حالت دو بار پاشش مقاومت برشی بهتری نسبت به تیمار شاهد ایجاد کرد (شکل ۴)

N-H (۳۳۴۳)، C-N (۱۴۰۱) (۸)، کلسیم کربنات (۱۴۴۳cm<sup>-1</sup>) (۸) (شکل ۲-الف) در هیدروژل پلیمری است. وجود این گروه های عاملی بر روی زنجیره پلیمری سبب برهم کنش های قطبی آنها با ذرات ماسه می شود.

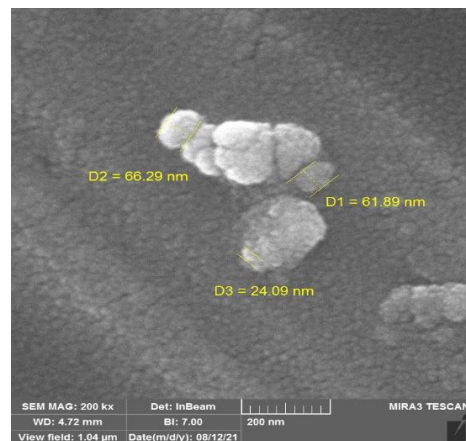
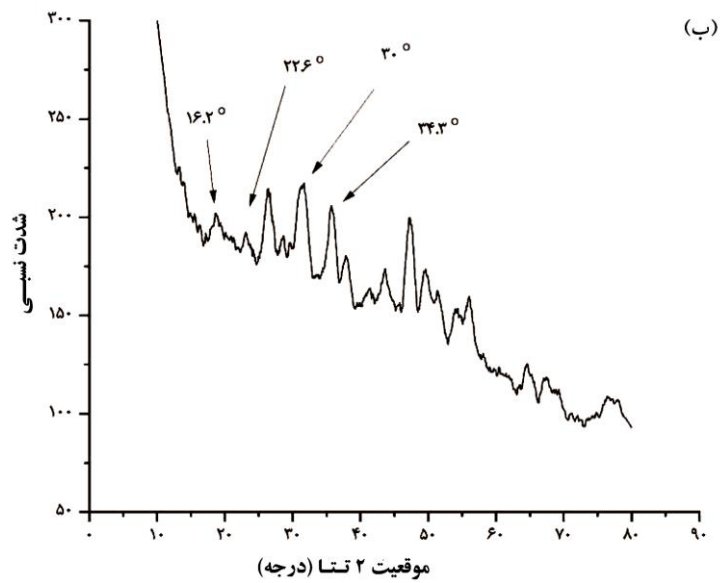
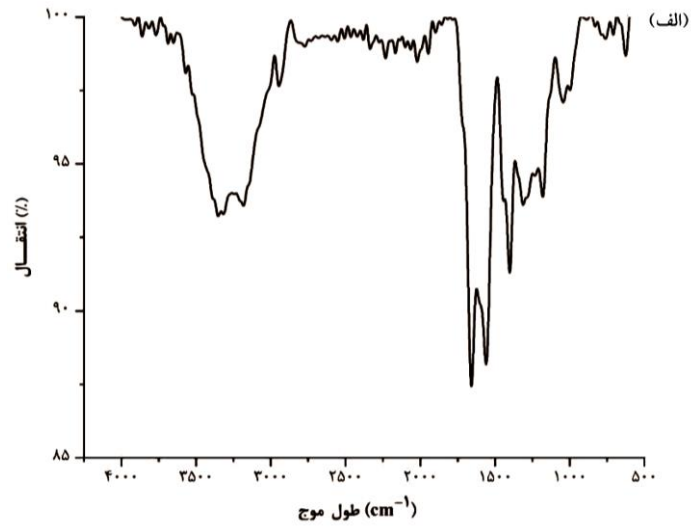
الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) (شکل ۲-ب) واقع در محدوده دو تتا ۱۶/۲۰، ۲۲/۶۰ و ۳۴/۳۰ بیانگر وجود ساختارهای بلوری سلولز I $\beta$  است (۲۳ و ۲۸).

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ذرات سلولز (شکل ۲-ج) نشان می دهد که ذرات سلولز دارای اندازه میانگین ۶۲ نانومتر هستند.

#### آنالیز فرسایش بادی تیمارها و اندازه گیری مقاومت سله ها

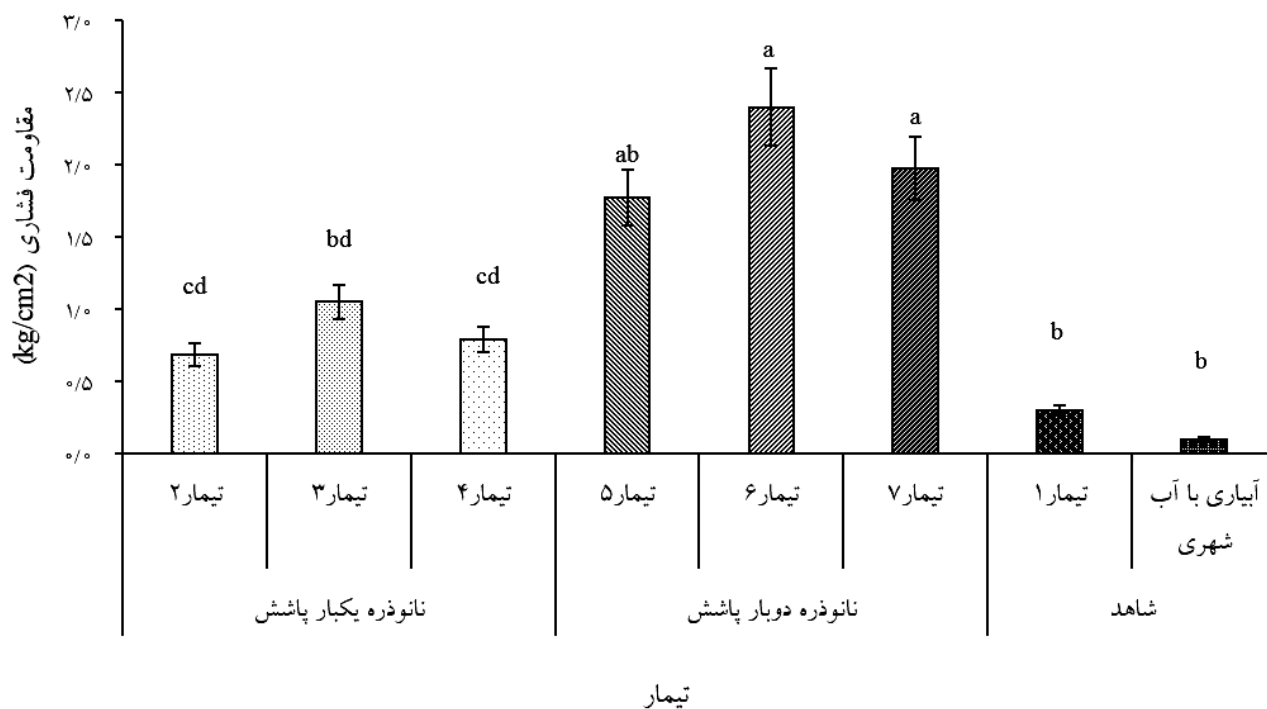
نتایج حاصل از آزمایش تونل بادی نشان داد که تمامی نمونه ها نسبت به حداکثر باد ایجاد شده توسط دستگاه مقام بودند و هیچ گونه هدر رفتی در نمونه ها مشاهده نشد. درحالی که نمونه شاهد دارای آستانه فرسایشی ۵ m/s بود.

آزمون مقاومت فشاری به منظور بررسی رفتار سله تحت فشار اعمال شده خارجی انجام شد. مقاومت فشاری سله های تشکیل شده بوسیله فشار دادن نفوذسنج در سطح سله تعیین شد. محدوده نفوذسنج قرائت شده در این مطالعه از ۰ kg/cm<sup>2</sup> الی ۱/۶۰ kg/cm<sup>2</sup> است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده

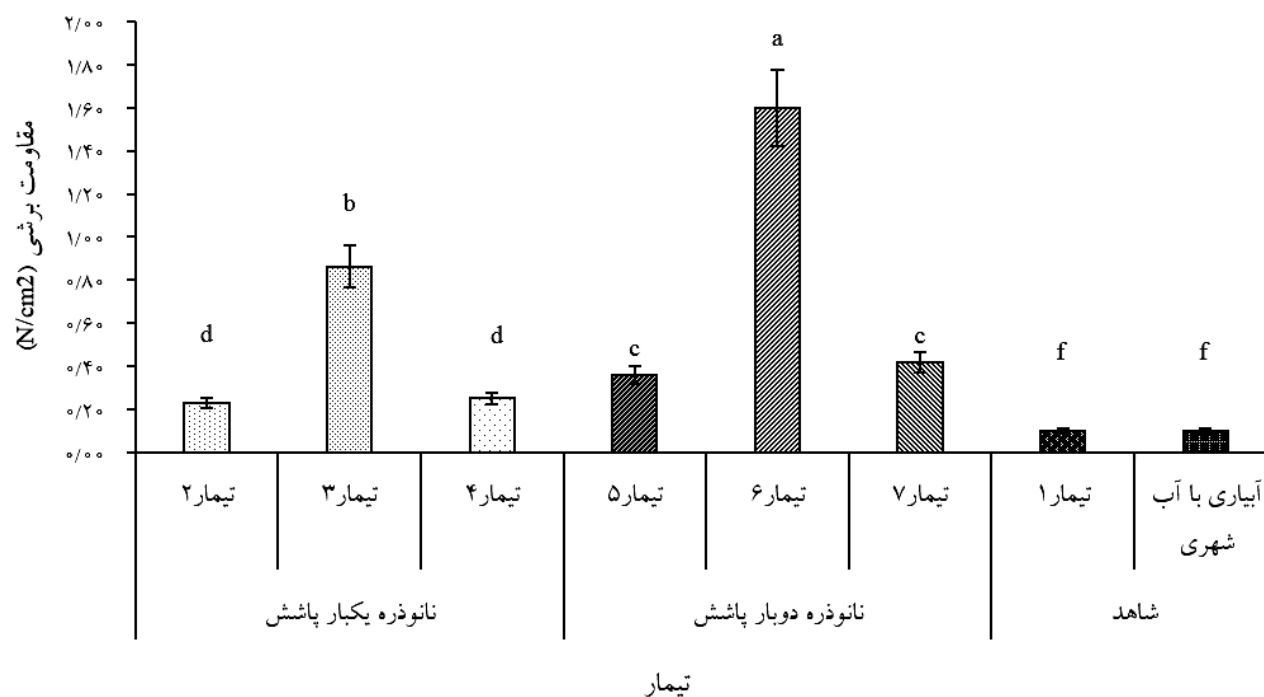


شکل ۲. الف) نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز، ب) الگوی پراش پرتو ایکس، ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی د) پودر نانوکامپوزیت هیدروژل حاوی نانوسلولز پوست گردو (رنگی در نسخه الکترونیکی)





شکل ۳. مقایسه میانگین مقاومت فشاری بین تیمارهای مختلف مالچ (Mean±SE) (تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی دار ندارند)



شکل ۱. مقایسه میانگین مقاومت برشی بین تیمارهای مختلف مالچ (Mean±SE) (تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی دار ندارند)

### اثر مالچ بر روی سله‌های تشکیل شده

همان‌طور که قبلاً اشاره شد مالچ نانوکامپوزیتی مورد استفاده با مقادیر مختلف نانو سلولز و به صورت یک لایه و دولایه بر روی نمونه‌های ماسه پاشیده شد. ضخامت سله نمونه‌های تیمار شده با مالچ هیدروژلی (فاقد نانوسلولز) در قیاس با نمونه شاهد (آبیاری شده با آب شهری) دارای افزایش حداقل ۱۳ برابری بودند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده افزایش مقدار نانوسلولز منجر به افزایش ضخامت سله نشد و بیشترین ضخامت سله در نمونه تیمار شده با ۳ درصد نانوسلولز مشاهده شد.

### بحث

#### آنالیز هیدروژل پلیمری

با توجه به نتایج حاصل آنالیز FTIR در ساختار هیدروژل پلیمری گروه‌های عاملی متفاوتی وجود دارند. با افزایش مقدار هیدروژل، تعداد گروه‌های عاملی اتصال‌دهنده افزایش پیدا می‌کنند، بنابراین، سله‌های تشکیل شده از استحکام بیشتری برخوردار هستند. این موضوع با نتایج حاصل از پژوهش ال ماجد و همکاران (۲) مطابقت دارد. آنها بیان کردند که افزایش مقدار بیوپلیمر باعث افزایش گروه عاملی کلسیم کربنات شده که به‌عنوان عامل اتصال دهنده ذرات است.

الگو پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های پیشین ماسه‌بادی نشان‌دهنده این موضوع بود که ماسه تنها شامل کوارتز است (۲)، درحالی که آنالیز XRD سله‌های حاوی نانوکامپوزیت هیدروژلی استفاده شده نشان‌دهنده وجود گروه کلسیم کربنات ( $2\theta = 30^\circ$ ) است. وجود کربنات کلسیم به‌عنوان عاملی اتصال دهنده ذرات ماسه شناخته می‌شود که با نتایج پژوهش (۲ و ۳) مطابقت دارد.

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که به‌علت سطح تماس زیاد و برهم‌کنش‌های قوی بین نانو ذرات سلولزی این مواد بعد از خشک‌شدن تشکیل خوشه داده‌اند.

### آزمایش تونل بادی

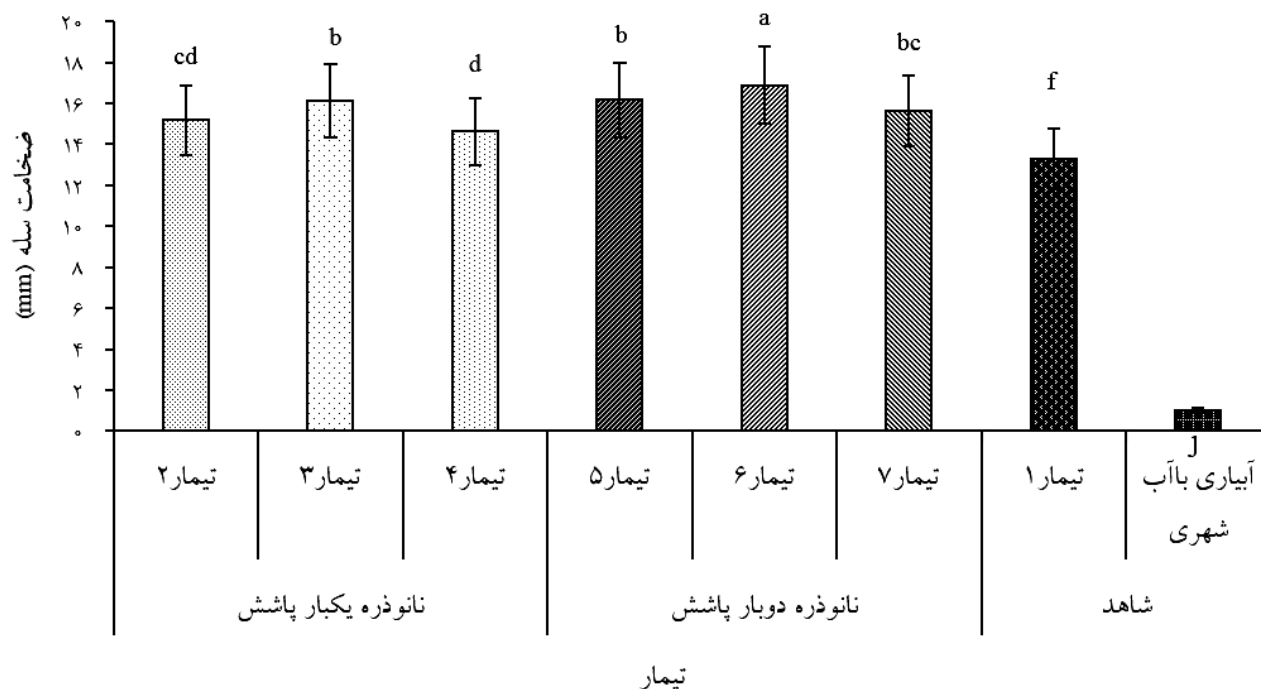
آشکار است که نرخ فرسایش نمونه آبیاری شده (شاهد) به تدریج با قرار گرفتن در معرض باد شدیدتر به دلیل افزایش قدرت فرساینده‌گی باد و فرسایش پذیری بالای ذرات ماسه افزایش می‌یابد. درحالی که نمونه‌های تیمار شده با مالچ بعد از گذشت ۳۰ روز همچنان نسبت به باد مقاوم بوده که علت آن را می‌توان قابلیت حفظ رطوبت و ایجاد اتصال بین ذرات خاک دانست که مانع از برداشت آنها توسط باد می‌شود. این موضوع با نتایج حاصل از (۱۴ و ۱۷) مطابقت دارد.

### اثر مالچ بر روی سله‌های تشکیل شده

همان‌طور که قبلاً اشاره شد افزایش مقدار نانوسلولز منجر به افزایش ضخامت سله نشد و بیشترین ضخامت سله در نمونه تیمار شده با ۳ درصد نانوسلولز مشاهده شد که با نتایج حاصل از ماجد و همکاران (۲) همخوانی دارد. آنها در پژوهش خود نشان دادند که افزایش مقدار پلیمر کامپوزیتی باعث افزایش ضخامت سله نمی‌شود. این موضوع نشان‌دهنده این است که با افزایش غلظت پلیمر ویسکوزیته افزایش می‌یابد و عمق نفوذ پلیمر کاهش می‌یابد بنابراین، سله‌هایی با ضخامت کمتر ایجاد می‌شوند. پلیمر از طریق ۳ مکانیسم اصلی با خاک واکنش نشان می‌دهد ۱- برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک ۲- پیوند هیدروژنی ۳- نیروی واندروالس. برای پلیمرهای پلی الکترولیت با مکان‌های فعال اکریلیک اسید، تبادل یونی یک عامل غالب در ایجاد اتصال بین ذرات خاک است (۵).

### اثر مقدار نانوسلولز بر استحکام سله

افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقدار نانوسلولز را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزودن نانوسلولز به کامپوزیت هیدروژلی سبب انتقال بار از سطح هیدروژل پلیمر به بخش تقویت‌کننده نانوسلولز می‌شود از آنجایی که نانو سلولز بسیار محکم‌تر از بخش پلیمر نانو کامپوزیت است و نقش تقویت‌کنندگی برای هیدروژل را دارد بنابراین، می‌تواند سبب



شکل ۵. مقایسه میانگین ضخامت سله بین تیمارهای مختلف مالچ (Mean±SE) (تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی دار ندارند)

تیمارهای حاوی (۳ درصد) نانوسلولز منجر به بهبود مقاومت سله می شوند. می توان پیشنهاد داد که در شرایط محیطی دشوار و با بهره برداری بالا و همچنین سرعت بالای باد، استفاده از این نوع مالچ می تواند باعث افزایش مقاومت در برابر فشارهای وارده شود. در خصوص تیمار ۱ (فاقد نانوذره) ضخامت لایه تشکیل شده در قیاس با تیمارهای دیگر اختلاف چندانی نداشته است. این تیمار در برابر نیروهای خارجی تفاوت چندانی با نمونه کنترل از خود نشان نداده اما در مقایسه با تیمارهای دارای نانوذره دارای اختلاف معنی داری است.

### نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی اثر استفاده از نانوسلولز در کامپوزیت هیدروژلی بر روی تثبیت سطوح ماسه ای کویر سیازگه ابوزیدآباد در برابر فرسایش بادی پرداخته شد. نتایج زیر به طور خلاصه از این پژوهش حاصل شد:

همه تیمارهای استفاده شده در این مطالعه روی سطح ماسه

افزایش مقاومت فشاری شود و از طرفی سطح ویژه نانوسلولز بالا است بنابراین، پلیمر به عنوان اتصال دهنده بین ذرات ماسه، می تواند اتصالات بیشتری ایجاد کند.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود تیمار ۶ بیشترین مقاومت برشی ( $1/6 \pm 0/18 \text{ N/cm}^2$ ) و تیمار ۱ دارای کمترین ( $0/1 \text{ N/cm}^2$ ) مقدار مقاومت برشی است که نشان دهنده نقش نانو سلولز بعنوان تقویت کننده هیدروژل و افزایش مقاومت برشی نمونه می شود همان طور که ذکر شد گروه های عاملی هیدروکسیل موجود در سطح نانو سلولز می توانند با گروه های عاملی کربوکسیلات ( $\text{-COO-}$ ) و گروه عاملی آمیدی ( $\text{-CONH-}$ ) هیدروژل برهم کنش های قوی هیدروژنی و قطبی ایجاد کند و مقاومت های مکانیکی هیدروژل را افزایش دهند.

با توجه به اینکه همه تیمارها در برابر باد مقاوم بودند می توان بیان کرد که تیمار ۱ در مناطقی با سرعت باد پایین و یا در مناطقی که خاک در معرض فشار حاصل از نیروی خارجی (وسایل نقلیه، جانداران و انسانها) قرار ندارد قابلیت استفاده دارد.

در قیاس اهمیت مقدار نانو ذره و تعداد دفعات پاشش، این نتیجه بدست آمد که مقدار پلیمر (تعداد دفعات پاشش نسبت به غلظت آن) از اهمیت بیشتری برخوردار است. به طوری که پلیمر با غلظت ۳ درصد نانوسلولز و دو بار پاشش دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌ای است که با نانوکامپوزیت حاوی ۵ درصد نانوسلولز و یک بار پاشش تیمار شده است. بیشترین مقاومت در برابر فرسایش بادی مربوط به نمونه تیمار شده با ۳ درصد نانو ذره و با پاشش دو لایه بود.

سله تشکیل دادند و مقاومت بالایی در برابر فرسایش بادی از خود نشان دادند، به حدی که میزان فرسایش بادی در برابر باد با سرعت ۱۵ m/s بعد از یک هفته برابر صفر بود.

با افزایش غلظت نانو ذره ضخامت لایه تشکیل شده تغییری محسوسی نداشته و بیشترین ضخامت سله مربوط به نمونه تیمار شده با ۳ درصد نانوسلولز بود. که این امر نشان دهنده این است که افزودن نانوسلولز در هیدروژل باعث افزایش ویسکوزیته و در نتیجه کاهش نفوذ پذیری می شود. عدم نفوذ به لایه‌های پایین تر باعث اتصال بیشتر ذرات در سطح سله شده که به نوبه خود باعث افزایش مقاومت فشاری و برشی سله شد.

### منابع مورد استفاده

- Ahmadi, H., S. Feiznia, M. R. Ekhtesasi and M. J. Ghanei Bafghi. 2001. Control methods of wind erosion for railroads protection (Case study: Bafgh region). *Biaban* 6 (9): 33-49 (In Farsi).
- Almajed, A., K. Lemboye, M.G. Arab and A. Alnuaim. 2020. Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique. *Soils and Foundations* 60 (2): 356-371.
- Almajed, A., H.K. Tirkolaei, E. Kavazanjian and N. Hamdan. 2019. Enzyme Induced Biocementated Sand with High Strength at Low Carbonate Content. *Scientific Reports* 9 (1): 1-7.
- Beck-Candanedo, S., M. Romanand and D.G. Gray. 2005. Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions. *Biomacromolecules* 6 (2): 1048-1054.
- Bengough, A.G. and C.E. Mullins. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science* 41 (3): 341-358.
- Chen, R., X. Ding, H. Lai and L. Zhang. 2021. Improving dust resistance of mine tailings using green biopolymer. *Environmental Geotechnics* 8 (6): 382-391.
- Chen, R., I. Lee and L. Zhang. 2015. Biopolymer stabilization of mine tailings for dust control. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 141 (2): 04014100.
- Dai, H., Y. Zhang, L. Ma, H. Zhang and H. Huang. 2019. Synthesis and response of pineapple peel carboxymethyl cellulose-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide)/graphene oxide hydrogels. *Carbohydrate Polymers* 215: 366-376.
- Goudie, A.S. and N.J. Middleton. 2006. Dust storm control. PP. 193-199. Goudie, A., S. Middleton and J. Nicholas. (Eds.), *In: Desert Dust in the Global System*, Springer Berlin Heidelberg.
- Gurunathan, T., S. Mohanty and S.K. Nayak. 2015. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibers and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 77: 1-25.
- Han, Z., T. Wang, Z. Dong, Y. Hu and Z. Yao. 2007. Chemical stabilization of mobile dune fields along a highway in the Taklimakan Desert of China. *Journal of Arid Environments* 68 (2): 260-270.
- Huang, J., R.B. Kogbara, N. Hariharan, E.A. Masad and D.N. Little. 2021. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials* 305:124685.
- Jafarishalkoohy, A., M. Vafaeian, M.A. Rowshanzamir and M. Mirmohammadsadeghi. 2015. Effective Factors in Fine-Grained Soil Stabilization to Prevent Dust Generation. *Journal of Water and Soil Science* 19 (73): 273-286.
- Kargarzadeh, H., M. Ioelovich, I. Ahmad, S. Thomas and A. Dufresne. 2017. Methods for Extraction of Nanocellulose from Various Sources. PP. 1-50. Kargarzadeh, H., A. Ishak, S. Thomas and A. Dufresne (Eds.). *In: Handbook of Nanocellulose and Cellulose Nanocomposites*, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA.
- Kasiri, N. and M. Fathi. 2018. Production of cellulose nanocrystals from pistachio shells and their application for stabilizing Pickering emulsions. *International Journal of Biological Macromolecules* 106: 1023-1031.
- Khalili moghadam, B., T. Jamili, H. Nadian and E. Shahbazi. 2015. The influence of sugarcane mulch on sand dune stabilization in Khuzestan, the southwest of Iran. *Iranian Agricultural Research* 34 (2): 71-80.
- Mahdizadeh, M. and N. Najafi. 2018. Applications of Nanomaterials in Soil Remediation. *Land Manegment* 6 (1): 31-48.

18. Buchholz, F.L. and A.T. Graham. 1998. Modern Superabsorbent Polymer Technology. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA.
19. Mombeni, M., H.R. Asgari, S. Zare and H. Yousefi. 2020. Investigation of Mechanical Behavior of Inflatable Sand Using Malass and Black Liqueur. *Rang and Watershed Management* 72 (4): 1061-1073.
20. Mombeni, M., H. Reza Asgari, A. Mohammadian Behbahani, S. Zare and H. Yousefi. 2021. Effect of bagasse lignocellulose microfibrils on sand stabilization: A laboratory study. *Aeolian Research* 49: 100654.
21. Nascimento, D.M., Y.L. Nunes, M.C.B. Figueirêdo, H.M.C. De Azeredo, F.A. Aouada, J.P.A. Feitosa, M.F. Rosa and A. Dufresne. 2018. Nanocellulose nanocomposite hydrogels: Technological and environmental issues. *Green Chemistry* 20: 2428-2448.
22. Phuong, H.T., N.K. Thoa, P.T.A. Tuyet, Q.N. Van and Y.D. Hai. 2022. Cellulose Nanomaterials as a Future, Sustainable and Renewable Material. *Crystals* 12 (1): 106.
23. Radakissin, R., M.S.A. Majid, M.R.M. Jamir, M. Jawaid, M.T.H. Sultan and M.F.M. Tahir. 2020. Structural, morphological and thermal properties of cellulose nanofibers from napier fiber (*Pennisetum purpureum*). *Materials* 13(18): 4125.
24. Rahimi Kord Sofla, M., R.J. Brown, T. Tsuzuki and T.J. Rainey. 2016. A comparison of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibres extracted from bagasse using acid and ball milling methods. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 7 (3): 035004.
25. Ren, J., W. Kong and R. Sun. 2014. Preparation of Sugarcane Bagasse/Poly (Acrylic Acid-co-Acrylamide) Hydrogels and their Application. *Bioresources* 9 (2): 3290-3303.
26. Saiedi, N., A.A. Besalatpour, H. Shirani, P. Abbaszadeh Dehaji, I. Esfandiarpour and M. Faramarzi. 2017. Aggregation and fractal dimension of aggregates formed in sand dunes stabilized by PistachioPAM and PistachioPVAc mulches. *European Journal of Soil Science* 68 (5): 783-791.
27. Valencia, L., V. Arumughan, B. Jalvo, H.J. Maria, S. Thomas and A.P. Mathew. 2019. Nanolignocellulose extracted from environmentally undesired prosopis juliflora. *ACS Omega* 4 (2): 4330-4338.
28. Xie, J., C.Y. Hse, C.F. De Hoop, T. Hu, J. Qi and T.F. Shupe. 2016. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from bamboo using microwave liquefaction combined with chemical treatment and ultrasonication. *Carbohydrate Polymers* 151: 725-734.
29. ChiYang, K. and Z. Tang. 2012. Effectiveness of fly ash and polyacrylamide as a sand-fixing agent for wind erosion control. *Water, Air, and Soil Pollution* 223 (7): 4065-4074.
30. Zare, S., M. Jafari, H. Rouhipour and R. Khalil Arjomandi. 2019. Studying the effectiveness of some non-oil mulches on sand dunes fixation. *Range and Watershed Management* 71 (4): 939-948.
31. Zheng, D., Y. Zhang, Y. Guo and J. Yue. 2019. Isolation and characterization of nanocellulose with a novel shape from walnut (*Juglans Regia L.*) shell agricultural waste. *Polymers* 11 (7): 1130.

## The Effect of Nanocellulose Content in Hydrogel Nanocomposites on the Strength of the Crusts (Case Study: Sand Dune Sample of Abuzidabad Siazgeh Desert)

Z. Feizi <sup>1</sup>, A. Ranjbar Fordoie<sup>1\*</sup> and A. R. Shakeri<sup>2</sup>

(Received: June 14-2022 ; Accepted: February 13-2023)

### Abstract

Maintaining soil structure and stability is essential, especially in arid and semi-arid regions with poor soil structural stability. Destruction of soil and its crust can cause wind erosion and desertification. The objective of this study was to investigate the effect of using hydrogel nanocomposite mulch on the stabilization of sand surfaces. A wind tunnel test was used to evaluate the erodibility of samples treated with different amounts of hydrogel nanocomposite. The compressive strength of the samples was measured by a manual penetrometer. The prepared nanocomposites were examined using scanning electron microscopy (FE-SEM), infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD) images. The results of the wind tunnel showed that the addition of hydrogel nanocomposite to the samples improved the soil erosion rate by 100% at a speed of 15 m/s compared to the control sample. Bonding between sand particles by spraying hydrogel nanocomposites improves the erodibility of sand. Measurement of mechanical strength of treated samples after 30 days showed that the resistance of the crust increased with increasing the amount of nanocellulose in the composite, which can be expressed due to the increased surface area of the nanoparticle and the possibility of further bonding of the nanocomposite polymer bed with sand particles. While the crust diameter showed no significant difference with increasing concentration and the sample treated with nanocomposites containing 3% nanoparticles was thicker compared to other samples.

**Keywords:** Nanocellulose, Crust, Erodibility, Compressive strength, XRD, FE-SEM, FTIR

---

1. Department of Desert Management and Controlling, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Iran.

2. School of Chemistry, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

\*: Corresponding author, Email: [aranjbar@kashanu.ac.ir](mailto:aranjbar@kashanu.ac.ir)