



The Effect of Time and Wetting-Drying Cycles on Durability of Mulches in Soil to Control Wind Erosion

F. Nooralivand¹, A. Farrokhian Firouzi^{2*}

Received: 20-12-2021

Revised: 22-01-2023

Accepted: 06-02-2023

Available Online: 08-02-2023

How to cite this article:

Nooralivand, F., & Farrokhian Firouzi, A. (2023). The effect of time and wetting-drying cycles on durability of mulches in soil to control wind erosion. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 295-314. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.2023.74277.1127>

Introduction

Wind erosion is one of the important processes of soil degradation in arid and semi-arid regions. Increased soil surface resistance is a key factor to prevent wind erosion. Mulch can increase the resistance of soil surface against erosive agents by creating a coating on the soil surface. The effectiveness of mulch on wind erosion control is on the quantity, type, and durability of the used in dust sources of Iran for stabilizing soil surface against wind erosion. In recent decades, petroleum mulch has been broadly used for stabilizing soil surface against wind erosion in dust sources of Iran. Bio-polymers (e.g. cellulose hydrogel and biochar) and naturally accessible materials (e.g. nanoclay) as environment-friendly mulches can be an alternative to chemical polymers and petroleum mulches. In arid and semi-arid regions, wetting-drying cycles play a crucial role in soil aggregate formation and strength. However, there have been limited studies assessing the impact of wetting-drying cycles on the durability of applied mulches. The main objective of this study was to assess the effectiveness of different types of mulches, including inorganic montmorillonite nanoclay, chemical polyvinyl acetate polymer, and biological biochar and cellulose hydrogel, at various time intervals. The study aimed to improve the physical and mechanical properties of soil, as well as control wind erosion in a loamy sand soil using a wind tunnel. Additionally, the durability of these mulches was evaluated over time after subjecting them to four wetting-drying cycles.

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted based on completely randomized design with three replications. The factors including mulch type (four levels: nanoclay montmorillonite, polyvinyl acetate polymer, biochar and cellulose hydrogel), mulch concentration (Nanoclay montmorillonite: 0, 16 and 32, Polyvinyl Acetate polymer: 0, 8, and 16, biochar and cellulose hydrogel: 0, 65 and 200 g/m²) and duration (21, 42, 63 and 126 days). The soil used in the wind tunnel experiments was collected from a dust source in the southeast of Ahvaz (Site Number 4). Trays measuring 50×30×5 cm were filled with this soil. The soil surface was then uniformly sprayed with an emulsion of Nanoclay and Polyvinyl Acetate. Additionally, biochar and cellulose hydrogel were mixed uniformly with the soil. Water was sprayed on the soil surface to maintain a constant moisture content of 75% of field capacity. After a specified period, soil properties such as mean weight diameter of aggregates, fractal dimension, penetration resistance, and shear strength were measured. The trays were then placed in a wind tunnel, and a wind erosion test was conducted at a wind speed of 20 m/s for a duration of 5 minutes. The amount of soil loss was measured using the weight method. Then, at each time, the best treatment from each mulch (in terms of reducing wind erosion) was selected and subjected to wet and dry cycles (four cycles).

Results and Discussion

The results showed a significant interaction effects ($p < 0.01$) of mulch type, mulch concentration and time factors on soil aggregate stability and fractal dimension, penetration resistance, shear strength were significant ($p < 0.01$). Soil loss decreased in soils amended with biochar and cellulose hydrogel and increased in the case of montmorillonite and polyvinyl acetate polymer over the time. The amount of soil loss in soil amended with

1 and 2– Ph.D Graduated of Soil Science and Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: a.farrokhian@scu.ac.ir)

DOI: [10.22067/JSW.2023.74277.1127](https://doi.org/10.22067/JSW.2023.74277.1127)

cellulose hydrogel decreased by 99.3%. The highest amount of soil penetration resistance and shear strength was observed in cellulose hydrogel mulch at the fourth time which were equal to 1038 and 123 kPa, respectively. Over time, the mean weight diameter of aggregates increased in the soil treated with cellulose and biochar hydrogels, but decreased in the polyvinyl acetate and montmorillonite nanoclay treatments. There was a negative correlation between aggregate stability and the fractal dimension of aggregates. In terms of soil loss, at the fourth measurement time, soils modified with cellulose hydrogels, biochar, polyvinyl acetate, and montmorillonite nanoclay experienced reductions of 99%, 71%, 84%, and 85% respectively, compared to the control. After four wet and dry cycles, the soil loss further decreased by 98%, 64%, 76%, and 81% in the respective treatments, compared to the control.

Conclusion

In general, it can be concluded that cellulose hydrogel presented the greatest effect on reducing soil loss and controlling wind erosion. In the soils amended with biochar and cellulose hydrogel, the effect of mulches on reducing soil loss increased over the time. However, the opposite results were found in the case of polyvinyl acetate and montmorillonite nanoclay polymers. Therefore, biochar and cellulose hydrogel in the long term and polyvinyl acetate polymer and montmorillonite nanoclay in the short term can control wind erosion. Wet and dry cycles at all durations increased soil loss. But their effect remained on soil loss reduction until the end of the fourth cycle. The results revealed that environmentally friendly biopolymers synthesized from biomass components can be considered as sustainable sources to reduce wind erosion. Bio-polymers are a new window into the use of sustainable biomaterials instead of synthetics in wind erosion control.

Keywords: Biochar, Cellulose hydrogel, Montmorillonite nanoclay, Polyvinyl acetate polymer, Wind Erosion

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۳۱۴-۲۹۵

اثر زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن بر ماندگاری خاکپوش در خاک برای کنترل فرسایش بادی

فاطمه نورعلی‌وند^۱ - احمد فرخیان فیروزی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

چکیده

خاکپوش با ایجاد پوششی بر سطح خاک می‌تواند مقاومت سطحی خاک را در برابر جریان فرساینده‌ی باد افزایش دهد. هدف این مطالعه بررسی کارایی خاکپوش‌های معدنی (نانورس مونت‌موریلونایت)، شیمیایی (پلیمر پلی‌وینیل‌استات) و زیستی (زغال زیستی و هیدروژل سلولز) در زمان‌های مختلف برای اصلاح برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک و کنترل فرسایش بادی بود. همچنین دوام و پایداری این خاکپوش‌ها در زمان‌های مختلف با چهار چرخه تر و خشک شدن بررسی شد. آزمایش فاکتوریل به صورت طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل (۱) نوع خاکپوش شامل چهار سطح: نانورس مونت‌موریلونایت، پلیمر پلی‌وینیل‌استات، زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم، (۲) غلظت خاکپوش شامل نانورس مونت‌موریلونایت: ۰، ۱۶ و ۳۲، پلیمر پلی‌وینیل‌استات: ۰، ۸ و ۱۶ و زغال زیستی و هیدروژل سلولز: ۰، ۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع و (۳) زمان شامل ۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز بودند. خاک مورد مطالعه از کانون گرد و غبار جنوب شرق اهواز نمونه‌برداری شد. سینی‌های تونل باد با ابعاد ۵×۳۰×۵ (سانتی‌متر) با خاک پر شدند. خاکپوش نانورس و پلیمر پلی‌وینیل‌استات روی سینی‌ها به صورت یکنواخت اسپری شد. خاکپوش زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم ابتدا با خاک مخلوط شد سپس با اسپری نمودن آب روی سطح خاک رطوبت در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی ثابت نگهداشته شد. پس از گذشت مدت زمان مورد نظر ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شد و سینی‌ها در تونل با سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه (در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری سطح نمونه) به مدت ۵ دقیقه قرار داده شدند. مقدار فرسایش خاک به روش وزنی تعیین شد. سپس در هر زمان بهترین تیمار از هر خاکپوش (از نظر کاهش فرسایش بادی)، انتخاب شده و تحت چرخه تر و خشک شدن (چهار چرخه) قرار گرفت. نتایج نشان داد در خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز با گذشت زمان مقدار فرسایش خاک کاهش یافت اما در خاکپوش نانورس مونت‌موریلونایت و پلیمر پلی‌وینیل‌استات با گذشت زمان مقدار آن افزایش یافت. مقدار فرسایش در خاک تیمار شده با هیدروژل سلولز ۹۹/۳ درصد کاهش یافت. بیشترین مقدار مقاومت فروری و برشی خاک در خاکپوش هیدروژل سلولز در زمان چهارم مشاهده شد که به ترتیب برابر با ۱۰۳۸ و ۱۲۳ کیلوپاسکال بدست آمد. با گذشت زمان پایداری خاکدانه‌ها در حضور هیدروژل سلولز و زغال زیستی افزایش و در پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت‌موریلونایت کاهش یافت. بین پایداری و بعد فرکتال خاکدانه‌ها رابطه منفی مشاهده شد. مقدار فرسایش خاک در زمان چهارم در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت‌موریلونایت به ترتیب ۹۹، ۷۱، ۸۴ و ۸۵ درصد و بعد از چهار چرخه تر و خشک شدن، به ترتیب ۹۸، ۶۴، ۷۶ و ۸۱ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش یافت. با توجه به نتایج این پژوهش هیدروژل سلولز به عنوان یک پلیمر زیستی و سازگار با محیط زیست، خاکپوشی مناسب برای کنترل فرسایش

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری علوم خاک و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: a.farrokhan@scu.ac.ir)

واژه‌های کلیدی: پلیمر پلی‌وینیل استات، فرسایش بادی، زغال زیستی، نانورس مونت‌موریلونایت، هیدروژل سلولز

مقدمه

فرسایش بادی یکی از فرآیندهای مهم بیابان‌زایی است که خسارات جدی به کشاورزی، منابع طبیعی، صنایع و سایر زیرساخت‌های مهم جامعه وارد می‌کند. اگر سرعت باد بیشتر از سرعت آستانه حرکت ذرات خاک باشد می‌تواند منجر به انتقال ذرات از سطح و ایجاد طوفان گرد و غبار شود (Cosentino et al., 2006). افزایش مقاومت سطح خاک در برابر تنش برشی جریان باد عامل کلیدی برای مبارزه با فرسایش بادی است (Naghizade Asl et al., 2017). تاکنون روش‌های مختلفی برای کنترل فرسایش بادی مورد استفاده قرار گرفته است؛ استقرار پوشش گیاهی طبیعی بهترین و پایدارترین روش است (Hong Miri et al., 2017; Miri et al., 2019 et al., 2020; Miri et al., 2017;). با وجود این در صورت فراهم نبودن شرایط زیستی برای حیات گیاهان، روش‌های غیر زیستی مانند استفاده از بادشکن‌ها و انواع مختلف خاکپوش‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند.

خاکپوش به عنوان یک پوشش که سطح خاک را از تماس با جریان فرساینده‌ی باد حفظ می‌کند تعریف شده است. طبق این تعریف انواع مختلفی از مواد طبیعی و مصنوعی را می‌توان به عنوان خاکپوش به کار برد (Sun et al., 2004; Naghizade Asl et al., 2018; Ahmadi 2011;). افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش فرسایش‌پذیری ذرات خاک نیاز به استفاده از تثبیت‌کننده‌هایی با خاصیت سیمانی دارد. تقویت استحکام خاک سطحی با استفاده از مواد مختلفی از جمله سیمان، آهک، کلرید کلسیم، خاکستر، پلیمرهای آلی و امولسیون‌های نفتی ساله‌است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. ذرات ریز این تثبیت‌کننده‌ها، فضای بین ذرات خاک را پر می‌کند که به دلیل چسبندگی بین ذرات منجر به تخلخل کمتر ذرات و مقاومت بیشتر خاک می‌شود (Arzaghi et al., 2017; Kadokawa et al., 2008; Majdi et al., 2006).

خاکپوش‌های نفتی در برابر اثرات سودمند در تثبیت‌شن‌های روان، اثرات زیان‌باری مانند ضریب جذب حرارتی بالا و آلودگی محیط زیست دارند و تهدیدی برای سفره‌های آب زیرزمینی و سلامتی انسان و جانوران هستند (Vaezi, 2011). تقویت شیمیایی برای بهبود خاک نیز روشی رایج است که با استفاده از مواد افزودنی مانند تثبیت‌کننده‌های سنتی و مواد افزودنی غیر سنتی انجام می‌شود. تثبیت‌کننده‌های شیمیایی سنتی مانند آهک، خاکستر، گچ، زئولیت، سیمان و سایر پسماندهای صنعتی برای بهبود مقاومت خاک استفاده می‌شوند

(Abbawi, 2015). در سال‌های اخیر یک روند جهانی پدید آمده است که از مواد سازگار با محیط زیست در زمینه‌های مختلف استفاده می‌کند تا تأثیر منفی کمتری بر روی انسان و محیط بگذارد. بنابراین، ضروری است که استفاده از مواد جدید برای جایگزینی این مواد شیمیایی در کاهش فرسایش بررسی شود. اخیراً، مواد شیمیایی غیر سنتی مانند پلیمرهای مایع برای کاهش فرسایش و افزایش حاصلخیزی خاک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Arzaghi et al., 2017; Cao et al., 2017; Hueso-González et al., 2016).

نتایج پژوهش گونگ و همکاران (Gong et al., 2016) نشان داد که دو پلیمر پلی‌وینیل استات و کوپلیمر وینیل استات-اتیلن می‌توانند مقاومت فشاری خاک شنی را افزایش دهند و علاوه بر افزایش مقاومت خاک نسبت به فرسایش بادی، سبب افزایش رشد میکروبی و تولید محصول ذرت در خاک شنی شوند. استفاده از مواد معدنی طبیعی مانند خاکپوش‌های رسی یکی دیگر از مواد سازگار با محیط زیست در جهت کنترل فرسایش بادی است. خاکپوش رسی می‌تواند با به هم چسباندن ذرات شن و جلوگیری از حرکت آنها نقش مهمی در کنترل فرسایش بادی داشته باشد. بنابراین یکی از راه‌های مهار کردن فرسایش بادی و افزایش چسبندگی میان ذرات خاک استفاده از ذرات رس در قالب خاکپوش رسی است (Majdi et al., Ekhtesasi and Hazirei, 2006). افزودن خاکپوش نانورس به خاک، مقاومت فشاری و خاصیت چسبندگی خاک را افزایش می‌دهد. نتایج پژوهش بهاری و شاه‌نظری (Bahari and Shahnazari, 2015) نشان داد با افزودن یک درصد وزنی نانورس به خاک مقاومت فشاری خاک افزایش یافت و استحکام خاک از حالت سخت به حالت بسیار سخت رسید. همچنین مجدی و همکاران (Majdi et al., 2006) تأثیر ترکیب، غلظت و ضخامت مالچ رسی را بر تثبیت‌شن‌های روان بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد افزودن کاه به مالچ‌های رسی و افزایش ضخامت مالچ مقاومت آن را در برابر جریان باد افزایش می‌دهد. نتایج پژوهش پدیدار و همکاران (Padidar et al., 2017) نشان داد که کاربرد نانوذرات رس در سطح خاک می‌تواند باعث تثبیت‌شن‌های روان، افزایش خاکدانه‌سازی و کاهش فرسایش بادی شود. پوسته‌های بیولوژیکی نیز خاک را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌کنند. رشته‌های قارچ، باکتری، جلبک و گل‌سنگ پوسته‌هایی بیولوژیکی روی خاک تشکیل می‌دهند و سطح خاکدانه‌های هوا خشک را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌سازند (Arzaghi et al., 2015; Naghizade Asl

(et al., 2018; Rajabi Agereh et al., 2019).

(Wang et al., 2013).

هدف این مطالعه استفاده از چهار نوع خاکپوش در چهار زمان مختلف برای بهبود مقاومت خاک شن‌لومی در برابر فرسایش بادی بود. به همین منظور شاخص‌های پایداری خاک و تاثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقدار فرسایش خاک در حضور خاکپوش‌ها، در زمان‌های مختلف به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فاکتورها شامل خاکپوش شامل هیدروژل سلولز کاه گندم، زغال زیستی اسیدی کاه گندم، پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت موریلونایت، غلظت خاکپوش شامل نانورس: ۰، ۱۶ و ۳۲، پلیمر پلی-وینیل‌استات: ۰، ۸ و ۱۶ و زغال زیستی و هیدروژل سلولز: ۰، ۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع و زمان به تعادل رسیدن اصلاحگرها با خاک شامل ۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز بودند. اثر خاکپوش‌ها بر کنترل فرسایش بادی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در چهار زمان بررسی شد. برای بررسی اثر تر و خشک شدن بر کارایی و دوام خاکپوش‌ها در خاک، در پایان زمان‌های مورد بررسی، چهار مرحله چرخه تر و خشک شدن روی تیمارها اعمال شد. خاک مورد نیاز برای این مطالعه از جنوب شرق اهواز (منطقه بحرانی و غبارخیز استان خوزستان، کانون شماره ۴) به صورت دست‌خورده از عمق ۰ تا ۵ سانتی متری با بیله جمع‌آوری شد. کانون ریزگرد جنوب شرق اهواز با مساحت ۱۱۲۶۳۶ هکتار، از فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر اهواز آغاز و در امتداد بزرگراه اهواز-ماهشهر در مختصات جغرافیایی ۴۷°، ۴۸' تا ۱۷°، ۴۹' طول شرقی و ۳۰° تا ۱۵'، ۳۱° عرض شمالی ادامه می‌یابد. هدایت الکتریکی خاک در سوسپانسیون ۲:۱ (خاک:آب) به ترتیب با استفاده از pH متر و EC سنج و درصد کربن آلی از روش والکی بلک (Sun et al., 2004) اندازه‌گیری شد. پایداری خاکدانه به روش الک خشک، چگالی حقیقی خاک به روش پیکنومتر و چگالی ظاهری خاک به روش حجمی اندازه‌گیری شد. پس از تعیین چگالی حقیقی و ظاهری خاک، تخلخل کل خاک محاسبه شد.

روش تهیه خاکپوش‌ها

پلیمر پلی‌وینیل‌استات با ترکیب شیمیایی $(C_4H_6O_2)_n$ ، چگالی یک گرم بر سانتی‌متر مکعب و محلول در آب از پژوهشگاه پتروشیمی ایران و نانورس مونت‌موریلونایت با ضخامت صفحات ذرات نانورس: ۱/۱۸ نانومتر از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان خریداری شد. زغال زیستی و هیدروژل سلولز مورد استفاده در این پژوهش از کاه گندم تهیه شدند.

پلیمرهای زیستی سازگار با محیط زیست که از اجزای زیست توده ساخته شده‌اند می‌توانند به عنوان منابعی پایدار برای کاهش فرسایش بادی در نظر گرفته شوند (Johannes and Verbeek 2012). مزیت مهم این مواد تجزیه‌پذیری و سازگاری با محیط زیست است و از این رو می‌توانند جایگزین پلیمرهای مصنوعی یا نمک‌های غیر آلی شوند که به طور مشابه برای مهار گرد و غبار استفاده می‌شوند. پلیمرهای زیستی علاوه بر افزایش مقاومت خاک، ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهند و شرایط لازم را برای تثبیت زیستی فراهم می‌کنند (Jamshidsafa et al., 2015). یکی از روش‌های معمول افزایش پایداری خاکدانه‌ها در برابر نیروهای طبیعی افزودن مواد آلی و بقایای گیاهی می‌باشد (Oades, 1984). پایداری خاکدانه‌ها یک عامل موثر در فرآیند فرسایش خاک است (Falson et al., 2012) و عموماً به عنوان شاخص فرسایش‌پذیری خاک در نظر گرفته می‌شود (Barthes and Roose, 2002).

نتایج گزارش شده توسط خاکشناسان، حاکی از قابلیت و پتانسیل نظریه فراکتال در مدل‌سازی و تخمین فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن است (Ataee et al., 2014). پژوهشگران متعددی از مدل‌های فرکتالی برای مطالعه و کمی‌سازی ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها در کاربری‌های مختلف استفاده کرده‌اند (Ding and Ding 2005; Huang and Zhang, 2005; Pirmoradian et al., 2007). نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده که بعد فرکتال محاسبه شده ساختمان خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری با عامل فرسایش‌پذیری، فرسایش پاشمانی و فرسایش بین‌شیاری داشته، به نحوی که پیش‌بینی فرسایش با استفاده از ابعاد فراکتالی با دقت خوبی امکان‌پذیر است (Ahmadi et al., 2011; Cantón et al., 2009). همچنین نتایج عطایی و همکاران (Ataee et al., 2014) نشان داد که بعد فراکتالی خاکدانه‌ها عامل گویایی در انعکاس تأثیر اقدامات مدیریتی بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌باشد. خاکدانه‌های پایدار با بعد فراکتالی کمتر در مزارعی مشاهده شدند که در آنها مدیریت‌های مناسب همانند افزودن کود دامی، کاهش عملیات خاکورزی و مدیریت نظام تناوب حاکم بود. در مقابل خاکدانه‌های ناپایدار و با بعد فراکتالی بزرگتر منعکس‌کننده شرایط نادرست مدیریتی همانند خاکورزی متراکم و شدید، شخم در جهت شیب و مدیریت نادرست بقایای گیاهی بودند.

چرخه‌های تر و خشک شدن از عوامل محیطی شناخته شده است که بر فرآیند خاکدانه‌سازی در برخی خاک‌ها اثر می‌گذارد (Cosentino et al., 2007; Ma et al., 2015; Pires et al., 2006). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در اثر اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن کاهش می‌یابد (Bravo-Garza et al., 2009; Xu et al., 2017). تغییر در پایداری خاکدانه‌ها در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن، می‌تواند ویژگی‌های خاک به ویژه حساسیت نسبت به فرسایش را تحت تاثیر قرار دهد

تهیه زغال زیستی

گوارگام با ۱۰ گرم از حلال ۱-آلیل ۳ متیل ایمیدازولیوم کلرید در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۸ ساعت حرارت داده شد تا انحلال کامل انجام شده و ماده چسبناک همگن تولید شود. پس از اتمام واکنش، مخلوط در دمای اتاق خنک شده و هیدروژل به دست آمده چند مرتبه با آب مقطر شسته شد. pH و EC زغال زیستی و هیدروژل سلولز در نسبت ۱:۲۰ (آب: زغال زیستی/هیدروژل) و جرم مخصوص ظاهری طبق روش ASTM D-285 اندازه گیری شد.

آزمایش تونل باد

در این پژوهش جهت ارزیابی خاکپوش‌ها در کنترل فرسایش بادی از تونل باد آزمایشگاهی از نوع مدار باز استفاده شد. جریان باد در این نوع تونل، از مسیری مستقیم عبور کرده و هوا هیچ‌گونه برگشتی به داخل تونل ندارد. در واقع فن موجود در تونل‌های مدار باز، هوا را مستقیماً از محیط اطراف مکیده و پس از عبور از منطقه آزمایش از انتهای تونل خارج می‌سازد. همچنین به علت باز بودن قسمت‌های ورودی و خروجی، نیاز به در نظر گرفتن تمهیداتی جهت تمیز نمودن تونل نمی‌باشد (شکل ۱).

سینی‌های تونل باد با ابعاد ۵۰×۳۰×۵ (سانتی‌متر) با خاک مورد مطالعه (بافت شن لومی) تا لبه پر شد. خاکپوش نانورس (۱۸ و ۳۲ گرم بر متر مربع) و پلیمر پلی‌وینیل استات (۸ و ۱۶ گرم بر متر مربع) روی سینی‌های تونل باد به صورت یکنواخت اسپری شد. خاکپوش زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم (۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع) ابتدا با خاک مخلوط شد سپس با اسپری آب روی سطح خاک رطوبت در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی ثابت نگهداشته شد (شکل ۲).

پس از گذشت مدت زمان مورد نظر (۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز) سینی‌ها در تونل با سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه (در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری سطح نمونه) به مدت ۵ دقیقه قرار داده شد. حداکثر سرعت باد در منطقه طبق گزارشات سازمان هواشناسی استان، به طور میانگین ۱۹/۲ متر بر ثانیه است (Mehrabi et al., 2015). برای شبیه‌سازی یک سرعت باد همگن و ثابت که بیشتر از سرعت باد منطقه مورد مطالعه است، سرعت باد توسط یک بادسنج دیجیتال کنترل شد. مقدار فرسایش مربوط به هر نمونه با وزن کردن نمونه قبل و بعد از قرار گرفتن در تونل باد محاسبه و بر حسب گرم بر متر مربع در ثانیه گزارش شد.

پیش از گرماکافت، کاه گندم در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و سپس به منظور تسهیل فرآیند تجزیه به قطعات کوچک (کمتر از ۲ سانتی‌متر) خرد شد. سپس نمونه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در کوره الکتریکی تحت گاز نیتروژن (شرایط بدون اکسیژن) با نرخ افزایش ۵ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه به مدت ۳ ساعت پیرولیز شد (Jien and Wang, 2013). زغال زیستی تولید شده در محفظه های بسته در دمای اتاق برای مراحل بعدی نگهداری شد (Mandal and Singh, 2017).

اصلاح شیمیایی زغال زیستی

نتایج پژوهش چو و همکاران (Chu et al., 2018) نشان داد که اصلاح اسیدی زغال زیستی باعث افزایش سطح ویژه و تخلخل زغال زیستی خواهد شد. به منظور اصلاح اسیدی زغال زیستی از روش پنگ و همکاران (Murphy, 2015) استفاده شد. زغال زیستی در محلول ۴۲/۵ درصد اسید فسفریک با نسبت ۱:۲ (اسید:زغال زیستی) به مدت ۱۲ ساعت غوطه‌ور شد. مخلوط زغال زیستی و اسید در آن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه پیرولیز شد. پس از سرد شدن در دمای اتاق، به منظور حذف اسید فسفریک اضافی، زغال زیستی اصلاح شده با آب دیونیزه شسته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آن خشک شد.

استخراج سلولز از کاه گندم

استخراج سلولز از کاه گندم به روش سان و همکاران (Sun et al., 2004) انجام شد. ابتدا ۲۰ گرم کاه گندم کاملاً خشک عبوری از مش ۶۰ (۰/۲۵ میلی‌متر) و باقیمانده روی مش ۸۰ (۰/۱۸ میلی‌متر)، درون ارلن با ۴۰۰ میلی‌لیتر محلول یک درصد سدیم هیدروکسید به مدت یک ساعت جوشانده شد و پس از صاف کردن و شستشو با آب مقطر، در داخل ارلن به همراه ۴۴۰ میلی‌لیتر مخلوط استیک اسید (۸۰ درصد) و نیتریک اسید (۶۷ درصد) با نسبت ۱۰ به ۱ به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس جوشانده شد. پس از پایان زمان واکنش و سرد شدن نسبی مخلوط، خمیرهای سلولزی به دست آمده صاف شد و تا خنثی سازی کامل با آب مقطر شستشو داده شدند و در آن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت به طور کامل خشک شدند.

تهیه هیدروژل سلولز کاه گندم

هیدروژل سلولز کاه گندم با استفاده از روش کادوکاوا و همکاران (Kadokawa et al., 2009; Kadokawa et al., 2008) و لی و همکاران (Li et al., 2009) تهیه شد. مخلوطی از سلولز کاه گندم و



شکل ۱- تونل باد مورد استفاده در پژوهش
Figure 1- Wind tunnel used in the research

فرسایش محاسبه شد.

بررسی اثر خاکپوش‌ها بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک

در این پژوهش همچنین اثر خاکپوش‌ها بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، شامل چهار خاکپوش با دو غلظت و چهار زمان مختلف ۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز مورد بررسی قرار گرفت. خاک مورد مطالعه (بافت شن‌لومی) در ظروف پلاستیکی با ابعاد $۱۳ \times ۵ \times ۲۲$ سانتی‌متر ریخته شد. خاکپوش نانورس مونت‌موریلونایت (۱۶ و ۳۲ گرم بر متر مربع) و پلیمر پلی‌وینیل‌استات (۸ و ۱۶ گرم بر متر مربع) روی خاک به صورت یکنواخت اسپری شد. خاکپوش زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم (۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع) ابتدا با خاک مخلوط شد سپس با اسپری آب روی سطح خاک رطوبت در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی ثابت نگهداشته شد (شکل ۲).

بررسی دوام خاکپوش‌ها در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن برای درک عمیق‌تر در مورد دوام خاکپوش‌ها در خاک، یک روش آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی چرخه‌های تر و خشک شدن در خاک‌های تیمار شده استفاده شد (Ayeldeen et al., 2016). پس از انجام آزمایشات تونل باد، در هر زمان بهترین تیمار از هر خاکپوش، از نظر کاهش فرسایش بادی، انتخاب شده و تحت چرخه تر و خشک شدن قرار گرفت. پس از تهیه نمونه‌های خاک تیمار شده، با اسپری آب و نگهداشت رطوبت هر نمونه تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی (چرخه تر شدن)، نمونه‌ها به مدت یک هفته در هوای آزاد نگهداری شدند (چرخه خشک شدن) و سپس در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از اتمام مرحله قبل، نمونه‌ها بعد از مرطوب شدن، برای یک هفته دیگر در هوای آزاد نگهداری شدند (دومین مرحله خشک شدن). چرخه‌های تر و خشک شدن (۴ مرتبه) برای همه خاکپوش‌ها در همه زمان‌ها انجام شد. هر بار نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش تونل باد وزن شده و مقدار



شکل ۲- ظروف پلاستیکی حاوی خاک پس از اعمال تیمارها (الف)، سینی‌های حاوی خاک پس از اعمال تیمارها (ب)
Figure 2- Plastic containers containing soil after treatments (a), Trays containing soil after treatments (b)

فاکتورهای مورد مطالعه شامل نوع خاکپوش، غلظت خاکپوش و زمان بودند. تمام داده‌ها در Microsoft Office Excel طبقه‌بندی شده و برای رسم نمودارها مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. همان طوری که ملاحظه می‌گردد مقدار pH، EC و جرم مخصوص ظاهری زغال زیستی به ترتیب $4/45$ (dS m^{-1}) و $15/55$ (g cm^{-3}) و $0/13$ است. مقدار pH، EC و جرم مخصوص خاکپوش هیدروژل سلولز مورد استفاده به ترتیب، $5/65$ (dS m^{-1}) و $0/377$ و $0/16$ g cm^{-3} است. پلیمر پلی‌وینیل استات با ترکیب شیمیایی $(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2)_n$ ، دارای چگالی یک گرم بر سانتی‌متر مکعب و محلول در آب است. همچنین نانورس مونت‌موریلونایت با ضخامت صفحات $1/18$ نانومتر مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی اثر خاکپوش‌ها بر مقدار فرسایش خاک

نتایج تجزیه واریانس تاثیر نوع خاکپوش، غلظت خاکپوش و زمان بر مقدار فرسایش خاک (بافت شن‌لومی) نشان داد که تاثیر زمان، خاکپوش و غلظت و همچنین اثر متقابل دوگانه و سه‌گانه تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر فرسایش خاک معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲). اثر دوگانه خاکپوش و زمان بر مقدار فرسایش خاک معنی‌دار شده است زیرا در شرایط طبیعی به دلیل تابش خورشید، اکسیداسیون، فرسایش بادی، شستشو توسط آب باران و سایر عوامل طبیعی ممکن است اجزای شیمیایی مواد تثبیت کننده به شدت تغییر یابد. با گذشت زمان، عوامل محیطی ذکر شده می‌توانند طول عمر مواد تثبیت کننده را در مناطق بیابانی کوتاه کنند (Gong et al., 2016). همچنین اثر دوگانه خاکپوش و غلظت آن بر مقدار فرسایش خاک معنی‌دار شده است زیرا با افزایش غلظت خاکپوش‌ها امکان تماس ذرات خاک و خاکپوش بیشتر شده و این برهمکنش می‌تواند با افزایش خاکدانه‌های پایدار باعث کاهش فرسایش خاک شود.

در پایان دوره آزمایش، برای اندازه‌گیری مقاومت برشی لایه سطحی خاک از پره برشی (Eijkelkamp 14.10 POCKET VANE TESTER) در شرایط اشباع استفاده شد (Zimbone et al., 1996). مقاومت فروروی خاکپوش‌ها نیز با استفاده از فروسنج دستی که قادر به اندازه‌گیری مقاومت فروروی از صفر تا 6000 کیلوپاسکال بود، اندازه‌گیری شد (Das et al., 2012). برای ارزیابی کارایی خاکپوش‌ها برای بهبود پیوند ذرات و تشکیل و ثبات خاکدانه‌ها، پایداری خاکدانه با استفاده از روش الک خشک تعیین شد (Kemper et al., 1986). بدین منظور ابتدا خاک از الک 4 میلی‌متر عبور داده شد سپس 50 گرم خاک روی یک سری الک (به ترتیب از بالا به پایین $3/35$ ، $2/8$ ، 2 ، $1/5$ ، $0/25$ ، $0/15$ ، $0/125$ ، $0/09$ و $0/053$ میلی‌متر) به صورت یکنواخت ریخته شد و در دستگاه شیکر به مدت 2 دقیقه تکانه داده شد و در پایان، خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک توزین شد. در نهایت، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، به عنوان شاخص پایداری خاک (معادله ۱) محاسبه شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

که در آن X_i میانگین قطر خاکدانه‌ها روی هر الک (میلی‌متر) و W_i نسبت جرم خشک خاکدانه‌ها در هر کلاس اندازه بر حسب گرم به وزن کل خاک (50 گرم) می‌باشد. برای محاسبه بعد فرکتال خاکدانه‌ها از روش یانگ و لیو (Yang and Liu, 2006) (معادله ۲) استفاده شد:

$$\frac{M(r < R_i)}{M_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D_m} \quad (2)$$

در این معادله $M(r < R_i)$: جرم تجمعی خاکدانه‌های باقی مانده روی هر الک از کوچکترین قطر تا بزرگترین قطر در سری الک‌ها (گرم)، M_T : جرم کل ذرات (گرم)، R_i : میانگین قطر ذرات (میلی‌متر)، R_{\max} : قطر بزرگترین خاکدانه (میلی‌متر) و D_m : بعد فرکتال ذرات است.

تجزیه و تحلیل آماری

اثر خاکپوش‌ها بر فرسایش بادی و خصوصیات خاک بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16.0 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the studied soil

فرسایش بادی Wind Erosion ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	کربن آلی (%) Organic Carbon (%)	ρ_s (g cm^{-3})	ρ_b (g cm^{-3})	EC (dS m^{-1})	pH	بافت Soil Texture
4.3	0.202	2.5	1.47	18.12	8.35	شن‌لومی loamy sand

ریز و افزایش مقاومت ذرات در برابر تنش برشی باد شد. با گذشت زمان اثر پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت‌موریلونایت در کاهش فرسایش خاک کمتر شد به گونه‌ای که بیشترین تاثیر این دو خاکپوش در زمان اول مشاهده شد. اما با گذشت زمان مقدار فرسایش خاک در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاهش یافت. برهمکنش زغال زیستی و سلولز با ماتریکس خاک تحت تاثیر فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی می‌تواند باعث تشکیل و پایداری خاکدانه‌های درشت‌تر شود (Verheijen et al., 2010) و در نتیجه با گذشت زمان باعث کاهش فرسایش خاک شود. نتایج به دست آمده نشان داد که پلیمر و نانورس تاثیرگذاری سریعی در خاک داشتند و در کوتاهترین زمان آزمایش (۲۱ روز) بیشترین تاثیر را بر ویژگی‌های خاک نشان دادند. زغال زیستی در زمان‌های مورد بررسی بر ویژگی‌های خاک تاثیرگذار بود اما به حداکثر خود نرسید و به تدریج با گذشت زمان در حال افزایش بود بنابراین احتمالاً گذشت زمان باعث افزایش اثرگذاری زغال زیستی در خاک خواهد شد.

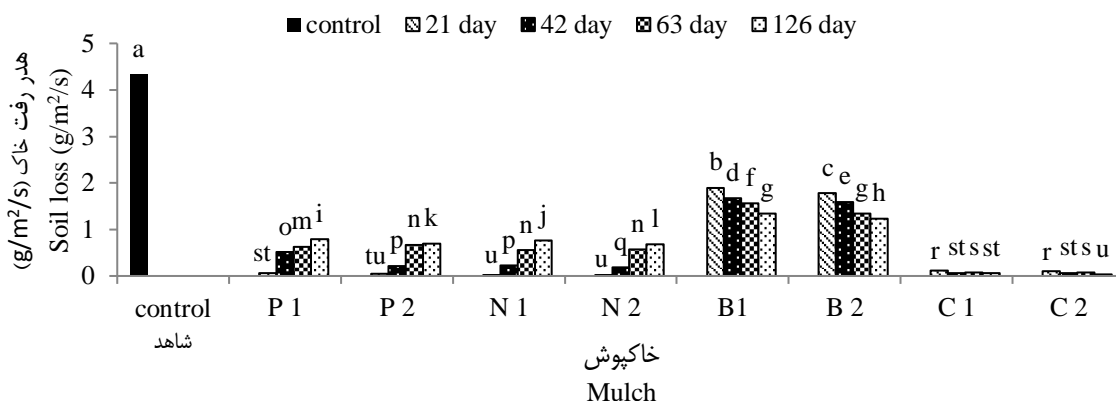
نتایج آزمون مقایسه میانگین اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت خاکپوش بر مقدار فرسایش خاک (شکل ۳) نشان می‌دهد که بین سطوح مختلف غلظت خاکپوش پلیمر در تمام زمان‌ها تفاوت معنی‌دار وجود دارد اما در مورد خاکپوش نانورس در زمان سوم اختلاف معنی‌دار نمی‌باشد؛ در حالی که سطوح مختلف زغال زیستی در هر چهار زمان با هم و با دو خاکپوش دیگر اختلاف معنی‌دار دارند. با توجه به شکل افزایش غلظت خاکپوش‌ها باعث کاهش فرسایش خاک شد. هیدروژل سلولز بیشترین تاثیر را در کاهش فرسایش خاک داشت. به گونه‌ای که مقدار فرسایش خاک از مقدار ۴/۳۳ گرم بر متر مربع بر تائیه برای خاک شاهد، به ۰/۰۳ گرم برای خاک تیمار شده با ۲۰۰ گرم بر متر مربع هیدروژل سلولز رسید. مواد پلیمری محلول در آب پس از پاشیده شدن در سطح خاک، در معرض هوا تشکیل شاخه‌های گسترده پلیمری می‌دهد و می‌تواند با ایجاد پیوند بین ذرات موجب افزایش مقاومت ذرات در برابر فرسایش شود (Movahedan et al., 2013). با توجه به عدم چسبندگی بین ذرات، افزودن خاکپوش نانورس باعث چسبندگی ذرات

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع خاکپوش، غلظت خاکپوش و زمان بر هدر رفت خاک در شنی لومی
Table 2- Analysis the effect of time, mulch and concentration on soil loss in loamy sand soil.

منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean Square				
		هدر رفت خاک Soil loss	مقاومت فروری Penetration resistance	مقاومت برشی Shear Strength	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها MWD	بعد فرکتال Fractal dimension
زمان Time	3	0.131**	23914.764**	513.267**	0.012**	0.235**
خاکپوش Mulch	3	6.697**	1155966.199**	19089.696**	0.024**	1.007**
غلظت خاکپوش Mulch concentration	2	221.808**	1768824.929**	15624.732**	0.996**	4.035**
زمان × خاکپوش Time × Mulch	9	0.288**	6660.502**	470.171**	0.042**	0.290**
زمان × غلظت خاکپوش Time × Mulch concentration	6	0.035**	6672.709**	138.283**	0.004**	0.105**
خاکپوش × غلظت Mulch × Concentration	6	1.685**	291634.451**	4954.517**	0.006**	0.367**
زمان × خاکپوش × غلظت Time × Mulch × Concentration	18	0.076**	1753.693**	128.271**	0.011**	0.138**
خطا Error	96	0	138.688	27.148	5.644×10 ⁻⁵	0.007

** بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد است.

**Significance at 1% level.

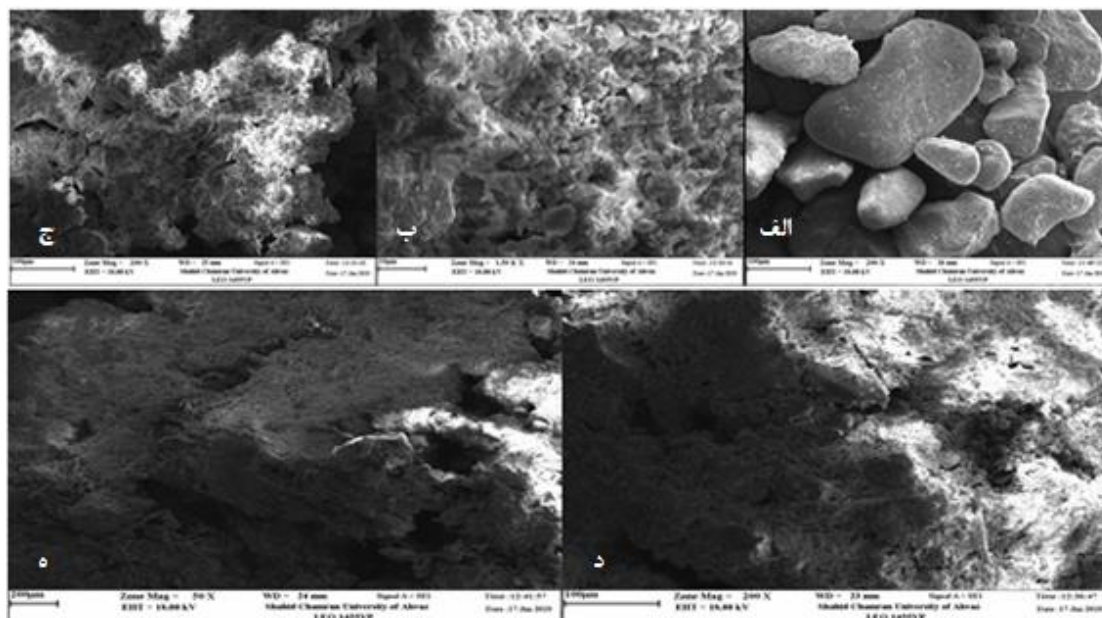


شکل ۳- اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت بر مقدار فرسایش خاک

(P: پلیمر پلی‌وینیل استات، N: نانو رس مونت‌موریلونایت، B: زغال زیستی و C: هیدروژل سلولز، ۱ و ۲: سطح اول و دوم غلظت خاکپوش‌ها).

Figure 3- The effect of time, mulch and concentration on soil erosion

P: Polyvinyl Acetate polymer, N: montmorillonite nanoclay, B: Biochar, C: Cellulose hydrogel, the first and second subscripts are concentration and time, respectively).



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی خاک‌های تیمار شده با خاکپوش‌های مختلف بعد از ۱۲۶ روز

الف: شاهد، ب: خاک تیمار شده با نانورس مونت‌موریلونایت، ج: خاک تیمار شده با پلیمر پلی‌وینیل استات، د: خاک تیمار شده با زغال زیستی کاه گندم و ه: خاک تیمار شده با هیدروژل سلولز کاه گندم.

Figure 4. Scanning electron microscope images of soils treated with different mulches after 126 days

a: Control, b: Soil treated with Montmorillonite nanoclay, c: Soil treated with polyvinyl acetate polymer, d: Soil treated with wheat straw biochar and e: Soil treated with wheat straw cellulose hydrogel.

بررسی تاثیر خاکپوش‌ها بر مقاومت برشی و مقاومت فروری خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر زمان، نوع خاکپوش و غلظت خاکپوش، اثر دوگانه و سه‌گانه فاکتورها بر مقاومت فروری و مقاومت برشی خاک در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۲). با

برای درک مقاومت خاک تیمار شده با خاکپوش‌های مختلف در برابر فرسایش بادی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از خاک شاهد و خاک‌های تیمار شده عکس‌برداری شد (شکل ۴). تجمع خاکپوش‌ها در اطراف و بین ذرات خاک باعث افزایش انسجام بین ذرات خاک و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر فرسایش می‌شود.

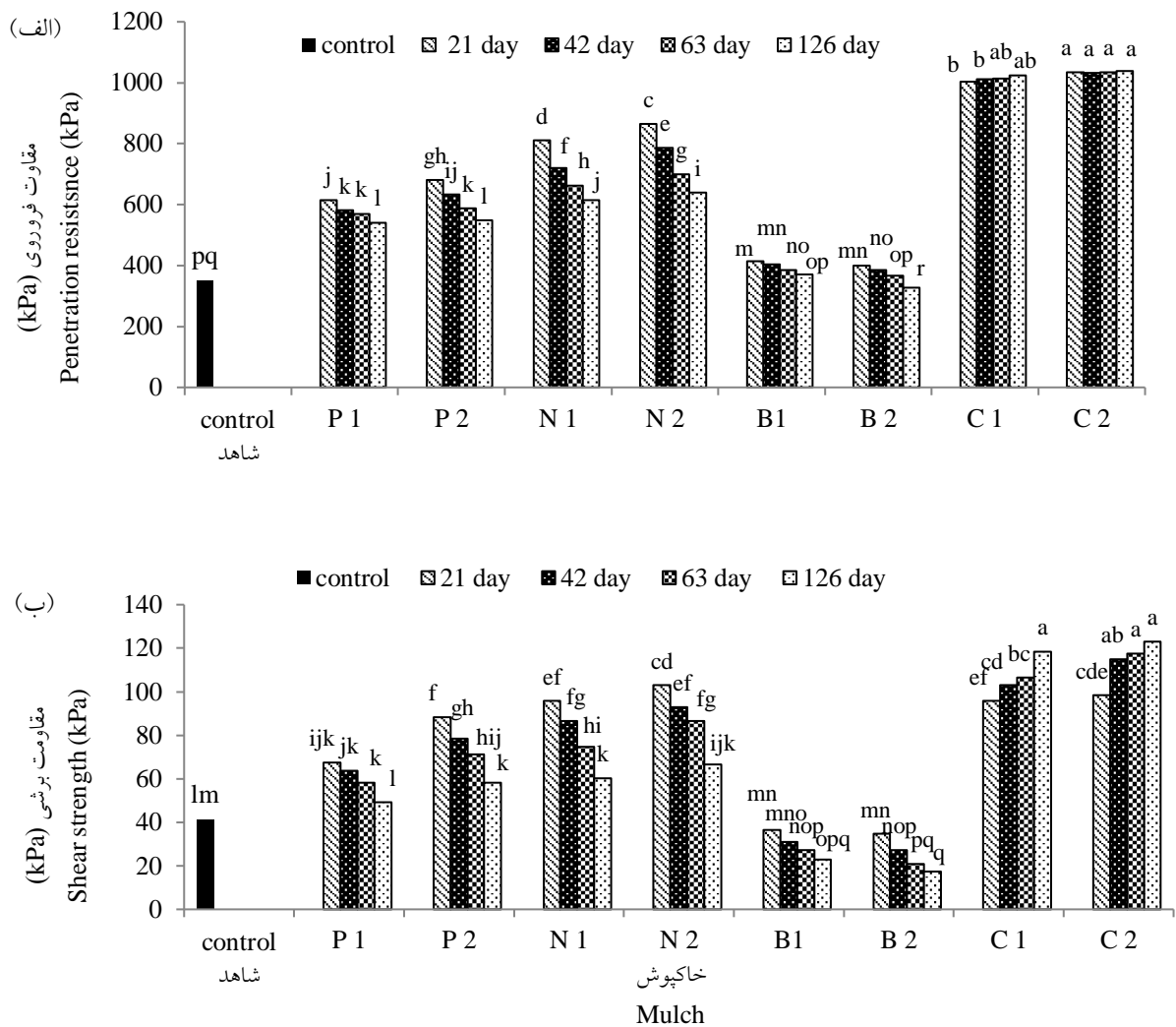
بر اساس نتایج پژوهش چانگ و چو (Chang and Cho, 2016) سطح ویژه بالای بیوپلیمرها واکنش آنها را با ذرات ریز خاک تقویت می‌کند و ارتباطی بسیار قوی بین ذرات خاک ایجاد می‌کند. استحکام ایجاد شده همراه با افزایش اصطکاک در حد فاصل ذرات درشت و خاکدانه‌ها باعث تقویت مقاومت خاک می‌شود. مقاومت برشی سطح خاک حاصل پیوند بین ذرات خاک و نشانگر مقاومت خاک در برابر حرکت ذرات است (Amiri Khaboushan et al., 2018). افزایش مقاومت برشی می‌تواند بر مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی تأثیرگذار باشد (Ayeldeen et al., 2016). با گذشت زمان زغال زیستی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش نگهداشت رطوبت در خاک می‌شود همین عامل می‌تواند سبب کاهش مقاومت فروروی و برشی در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی شود. برهمکنش سلولز با ماتریکس خاک تحت تاثیر فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی می‌تواند باعث تشکیل و پایداری خاکدانه‌های درشت‌تر و افزایش مقاومت برشی و فروروی شود. با گذشت زمان، عوامل محیطی مانند تابش خورشید، اکسیداسیون، فرسایش بادی، شستشو توسط آب باران و سایر عوامل طبیعی می‌توانند طول عمر مواد تثبیت کننده را در مناطق بیابانی کوتاه کنند.

بررسی تاثیر خاکپوش‌ها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر عامل‌های زمان، خاکپوش، غلظت، اثر دوگانه و سه‌گانه فاکتورها در سطح احتمال یک درصد بر پایداری خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. هر چهار خاکپوش باعث افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه نسبت به خاک شاهد شدند (شکل ۶-الف). به‌طور کلی هرچه اندازه خاکدانه‌ها بزرگتر باشد مقدار فرسایش کمتر خواهد بود (Shahabinejad et al., 2020). با گذشت زمان میانگین وزنی قطر خاکدانه در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز افزایش یافت و بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر ذرات در زمان چهارم مشاهده شد در حالی که گذشت زمان باعث کاهش کارایی خاکپوش‌های پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت‌موریلونایت در خاک شد. یکی از دلایل اختلاف نسبی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در خاک شاهد و خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی را می‌توان به هدایت الکتریکی زغال زیستی نسبت داد (Burrell et al., 2016). زغال زیستی به علت هدایت الکتریکی بالا (۱۵/۵۵ ds/m) مقدار قابل توجهی از نمک‌های محلول را با خود به خاک اضافه می‌کند. افزایش غلظت الکترولیت باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و افزایش هم‌آوری شدن ذرات خواهد شد.

توجه به نتایج مقایسه میانگین (شکل ۵-الف) خاکپوش‌های کاربردی باعث افزایش معنی‌دار مقاومت فروروی خاک در مقایسه با خاک شاهد شدند. بیشترین مقدار مقاومت فروروی در خاکپوش هیدروژل سلولز مشاهده شد که با گذشت زمان افزایش یافت اما این افزایش در غلظت بالای آن (C₂) در زمان‌های مختلف از نظر آماری معنی‌دار نبود. حال آن‌که در غلظت کم آن (C₁) بین زمان‌های اول و دوم با سوم و چهارم تفاوت معنی‌داری وجود دارد. در سه خاکپوش دیگر با افزایش زمان مقاومت فروروی کاهش یافت. هنگامی که محلول پلیمر آلی به خاک اضافه می‌شود غشاهای پلیمری که با مخلوط پلیمر و آب تشکیل شده اند، ذرات خاک را محصور کرده و آنها را به هم متصل می‌کنند تا یک ساختار پایدار ایجاد کنند. هرچه غلظت پلیمر بالاتر باشد، مقدار غشاهای پلیمری برای پر کردن حفره‌های ذرات خاک برای حفظ ساختار خاک بیشتر شده و نیروهای پیوند دهنده قوی بین ذرات خاک مشاهده می‌شود (Liu et al., 2018). این عامل می‌تواند دلیلی برای افزایش مقاومت برشی و فروروی در خاک‌های تیمار شده با پلیمر پلی‌وینیل-استات باشد. احتمالاً با گذشت زمان در اثر تخریب و شستشو کارایی این پلیمر در خاک کاهش یافته است. خاک تیمار شده با بیوپلاست در مقایسه با سه خاکپوش دیگر کمترین مقدار مقاومت فروروی را نشان داد. زغال زیستی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش نگهداشت رطوبت در خاک می‌شود همین عامل می‌تواند سبب کاهش مقاومت فروروی و برشی در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی شود (Ahmed et al., 2017).

نتایج مقایسه میانگین (شکل ۵-ب) نشان می‌دهد که هیدروژل سلولز در مقایسه با سایر خاکپوش‌ها بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت برشی خاک داشت. کمترین مقدار مقاومت برشی مربوط به خاکپوش زغال زیستی بود که کاهش آن در هر دو سطح غلظت آن، در زمان‌های دوم، سوم و چهارم نسبت به شاهد معنی‌دار بود. با گذشت زمان مقاومت برشی در خاک‌های تیمار شده با هیدروژل سلولز افزایش یافت اما در مورد سه خاکپوش دیگر عکس این روند رخ داد. در خاک‌های درشت بافت چسبندگی بین ذرات ضعیف بوده و در نتیجه مقاومت آن‌ها بسیار کم است، از این رو افزودن خاکپوش‌های نانورس مونت‌موریلونایت، پلیمر پلی‌وینیل‌استات، زغال زیستی کاه گندم و هیدروژل سلولز به خاک سبب به وجود آمدن پیوندهای فیزیکی-مکانیکی بین خاکپوش و ذرات خاک می‌شود که نتیجه آن به هم پیوستگی ذرات منفرد و افزایش مقاومت برشی خاک است. نتایج پژوهش زانگ و همکاران (Zong et al., 2014) نشان داد که افزودن زغال زیستی کلس گندم، چوب و لجن فاضلاب باعث کاهش چسبندگی، افزایش معنی‌دار اصطکاک داخلی و در نهایت کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود. این در حالی است که



شکل ۵- اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت بر مقاومت فروری (الف) و مقاومت برشی (ب)

(P): پلیمر پلی‌وینیل استات، N: نانو رس مونت‌موریلونایت، B: زغال زیستی و C: هیدروژل سلولز، ۱ و ۲: سطح اول و دوم غلظت خاکپوش‌ها).

Figure 5. The effect of time, mulch and concentration on penetration resistance(a) and shear strength(b)

P: Polyvinyl Acetate polymer, N: montmorillonite nanoclay B: Biochar, C: Cellulose hydrogel, the first and second subscripts are concentration and time, respectively).

دهنده‌ی ذرات خاک عمل کند (Spaccini *et al.*, 2002)، یا به‌طور غیر مستقیم فعالیت میکروبی خاک را افزایش داده و باعث بهبود خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها در خاک شود (Murphy, 2015). نتایج پژوهش میزوتا و همکاران (Mizuta *et al.*, 2015) نشان داد که در خاک تیمار شده با سلولز خاکدانه‌های درشت در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. در شرایط مرطوب پلیمر می‌تواند ذرات رس پراکند و خاکدانه‌های کوچک را جذب کند، در نتیجه خاکدانه‌های جدید به علت پل‌های کاتیونی (کلسیم و منیزیم) بین گروه‌های عاملی پلیمر و بار لبه‌ای منفی روی سطح کانی‌ها تشکیل می‌شوند (Peng *et al.*, 2017). رس مونت‌موریلونایت می‌تواند به

در حالت هم‌آوری شده، سایر مکانیسم‌های خاکدانه‌سازی می‌توانند با کارایی بیشتری عمل کنند، بنابراین پایداری کل خاک را با وجود شسته شدن نمک‌های محلول در طول زمان حفظ می‌کنند. سطوح زغال زیستی ممکن است مواد آلی ناپایدار را جذب کند، بنابراین بستری برای میکروب‌ها ایجاد می‌شود که به نوبه خود، ممکن است خاکدانه‌های بیشتری را از طریق دفع مخاط ایجاد کنند (Liang *et al.*, 2010). بهبود شرایط خاک ممکن است برای قارچ‌های میکوریزا نیز مطلوب باشد (Fletcher *et al.*, 2014). این فرایندهای ثانویه ممکن است پس از فروپاشی اثر افزایش نمک، ثبات کل خاکدانه‌ها را حفظ کنند. مواد آلی می‌تواند به‌طور مستقیم به عنوان عامل اتصال

خاکپوش، زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن و اثر دوگانه و سه‌گانه عامل‌ها بر مقدار فرسایش خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود. با توجه به نتایج مقایسه میانگین (شکل ۷) در همه زمان‌ها، افزایش چرخه بر راندمان خاکپوش‌ها تأثیر منفی داشته و باعث افزایش مقدار فرسایش خاک و در نتیجه افزایش فرسایش بادی شده است. اگرچه چرخه‌های تر و خشک شدن تا حدی باعث کاهش کارایی خاکپوش‌ها شد، اما اثر آن‌ها در کاهش مقدار فرسایش خاک تا پایان چرخه چهارم وجود داشت. بیشترین مقاومت نسبت به تر و خشک شدن در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز مشاهده گردید به طوری که مقدار فرسایش خاک در زمان چهارم بعد از چهار چرخه تر و خشک شدن، در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر و نانو رس به ترتیب ۶۴، ۷۶ و ۸۱ درصد نسبت به خاک شاهد (بدون خاکپوش) کاهش یافت. در خاک شاهد از چرخه اول تا سوم مقدار فرسایش خاک کاهش یافت اما چرخه چهارم باعث افزایش فرسایش خاک شد. نتایج تحقیقات نشان داده است که یک بار تر و خشک شدن باعث افزایش خاکدانه‌سازی می‌شود (Safadoust et al., 2012) اما تر و خشک شدن‌های متوالی، شکسته شدن خاکدانه‌های تولیدی (Utomo and Dexter, 1982) و افزایش ریز خاکدانه‌های فرسایش‌پذیر را به دنبال خواهد داشت. صفادوست و همکاران (Safadoust et al., 2012) علت کاهش پایداری ساختمان در اثر اعمال پنج چرخه تر و خشک شدن را ایجاد ترک‌های ریز در خاکدانه‌ها گزارش کردند. نتایج پژوهش‌های رسلانی (AL Rasslany, 2014) نشان داد چرخه‌های تر و خشک شدن باعث کاهش کارایی بیوپلیمرها در کنترل فرسایش شد اما مقاومت خاک در خاک‌های تیمار شده با نشاسته اصلاح شده حتی پس از چرخه پنجم قابل مشاهده بود. پلیمر پلی‌وینیل‌استات به آرامی در طی ۱۲ تا ۱۸ ماه تخریب می‌شود و سرعت تخریب در شرایط مرطوب تسریع می‌شود. چرخه‌های تر و خشک شدن در رس‌های انبساط‌پذیر (مونت موریلونایت) سبب توقف خاکدانه‌سازی می‌شود زیرا این رس‌ها در هنگام منبسط شدن از سایر ذرات جدا شده و سبب کاهش پایداری خاکدانه می‌شوند. احتمالاً با تخریب و آب شستگی پلیمر پلی‌وینیل استات و نانورس مونت‌موریلونایت در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن به تدریج کارایی آن‌ها در چسبندگی ذرات و پایداری خاکدانه کاهش یافته است در نتیجه مقدار فرسایش خاک افزایش یافت. کاربرد مواد آلی در مناطقی که در معرض تر و خشک شدن قرار دارند می‌تواند برای استحکام بیشتر خاک و جلوگیری از عوامل مخرب ساختمان خاک استفاده شود (Khosravi and Moosavi, 2017).

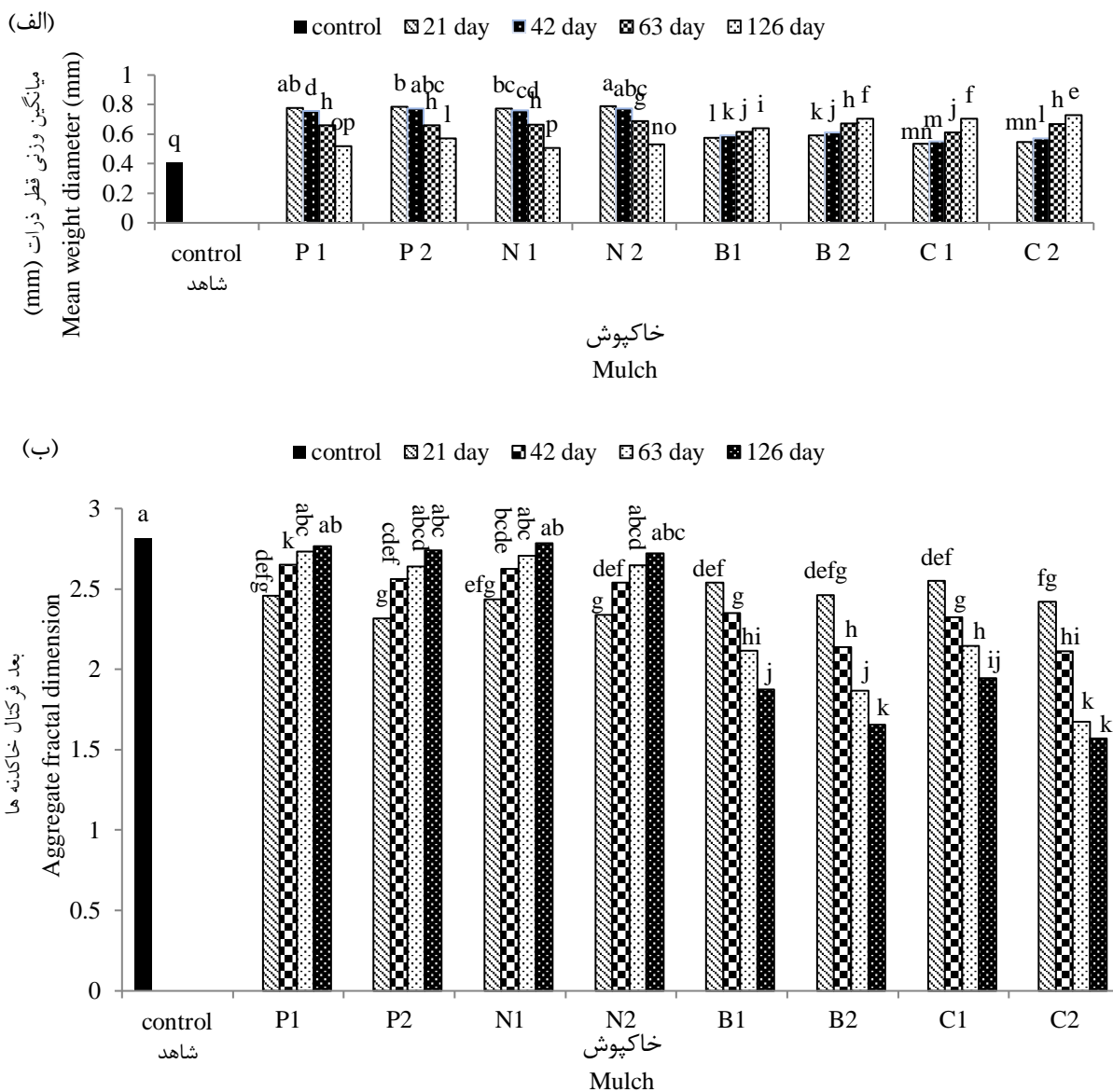
صورت پل بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث اتصال ذرات خاک شده و تولید خاکدانه را افزایش دهد (Nooralivand and Farrokhan, Firouzi, 2020).

بررسی تأثیر خاکپوش‌ها بر بعد فرکتال خاکدانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر عامل‌های زمان، خاکپوش، غلظت، اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه فاکتورها در سطح یک درصد بر بعد فرکتال خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین (شکل ۶-ب) نشان می‌دهد خاکپوش‌ها در زمان‌های مختلف، تأثیرات متفاوتی بر بعد فرکتال خاکدانه داشته‌اند. به‌طور کلی مقدار بعد فرکتال در خاک‌های اصلاح شده با نانو رس و پلیمر بیشتر از مقدار آن در خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز بود. دینگ و دینگ (Ding and Ding, 2007) گزارش کردند که مقادیر بیشتر بعد فرکتالی نشان دهنده‌ی تکه تکه شدن بیشتر ذرات است. بدین معنی که توزیع اندازه‌ی خاک غالباً با تعداد بیشتری از خاکدانه‌های کوچک تشکیل شده است. مقادیر کم بعد فرکتالی، بیان‌کننده‌ی این است که توزیع اندازه‌ی خاکدانه‌ها بیشتر از خاکدانه‌های بزرگتر تشکیل شده است. بعد فرکتالی خاکدانه‌ها عامل گویایی در انعکاس تأثیر اقدامات مدیریتی بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها و بهبود شرایط فیزیکی خاک است. این اقدامات به خوبی در ساختمان خاک نمود یافته و باعث کاهش بعد فرکتالی خاکدانه‌ها می‌شود (Ataee et al., 2014). نتایج به دست آمده برای بعد فرکتال با نتایج میانگین وزنی قطر خاکدانه مطابقت دارد. بعد فرکتال در تیمارهایی که میانگین وزنی بالاتری داشتند کمتر بود. بیشترین کمترین مقدار برای بعد فرکتال در زمان چهارم مشاهده شد که به ترتیب مربوط به تیمار نانورس و هیدروژل سلولز بود. رابطه منفی بین میانگین وزنی قطر ذرات و بعد فرکتال بیانگر آن است که با افزایش خاکدانه‌سازی، بعد فرکتال کاهش می‌یابد (Naghizade Asl et al., 2017).

تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر دوام و پایداری خاکپوش‌ها در خاک

به منظور بررسی تأثیر چرخه‌های طبیعی تر و خشک شدن بر کارایی خاکپوش‌ها در کنترل فرسایش خاک در هر یک از فواصل زمانی مورد مطالعه چهار چرخه تر و خشک شدن روی خاک‌های تیمار شده انجام شد. نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع خاکپوش، زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقدار هدر رفت خاک نشان داد که اثر نوع



شکل ۶- اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت بر پایداری خاکدانه‌ها (الف) و بعد فرکتال خاکدانه‌ها (ب)

(P: پلیمر پلی‌وینیل استات، N: نانو رس مونت‌موریلونایت، B: زغال زیستی و C: هیدروژل سلولز، ۱ و ۲: سطح اول و دوم غلظت خاکپوش‌ها).

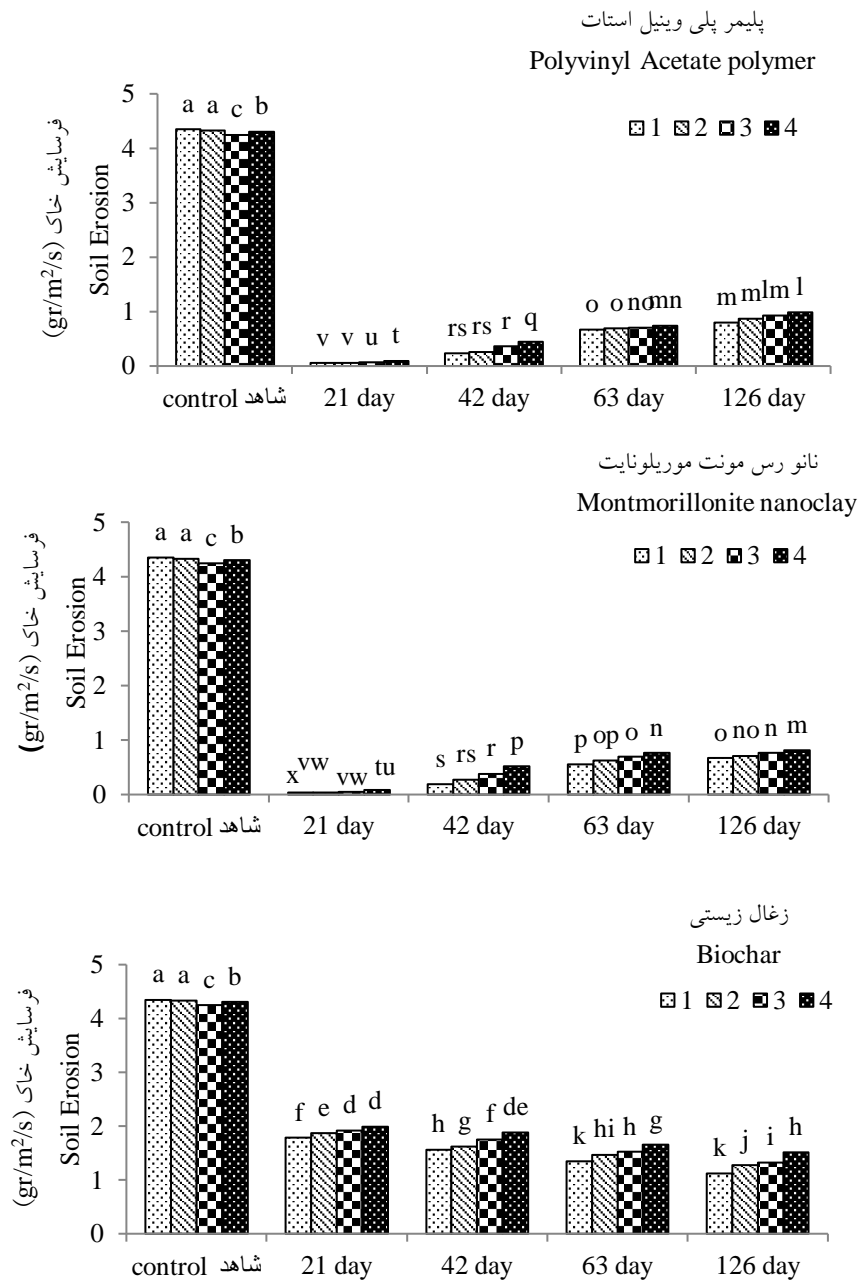
Figure 6- The effect of time, mulch and concentration on aggregate stability (a) and aggregate fractal dimension (b)

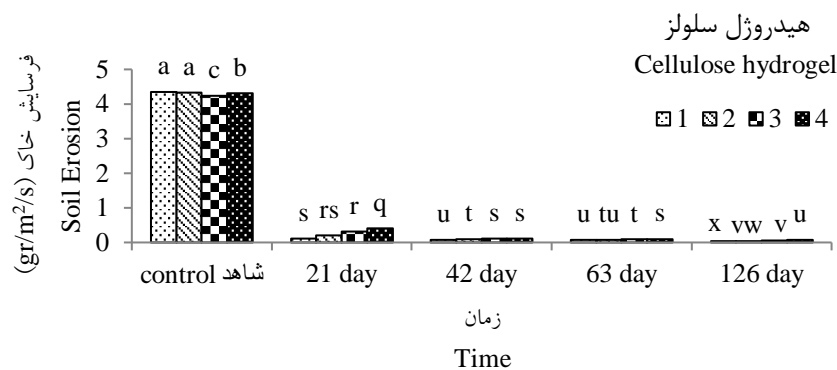
P: Polyvinyl Acetate polymer, N: montmorillonite nanoclay B: Biochar, C: Cellulose hydrogel, the first and second subscripts are concentration and time, respectively).

نتیجه‌گیری

خاک شاهد کاهش یافت. در خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز با گذشت زمان اثر خاکپوش‌ها بر کاهش فرسایش خاک بیشتر شد. اما در پلیمر پلی‌وینیل استات و نانو رس مونت‌موریلونایت عکس این روند رخ داد و بیشترین تاثیر این دو خاکپوش در زمان اول مشاهده شد.

به‌طور کلی بر اساس نتایج این پژوهش کمترین فرسایش خاک در خاک تیمار شده با هیدروژل سلولز مشاهده شد. پس از ۱۲۶ روز مقدار هدر رفت خاک در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر و نانو رس به ترتیب ۹۹، ۷۱، ۸۴ و ۸۵ درصد نسبت به





شکل ۷- تاثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر فرسایش خاک
Figure 7- The effect of wet and drying cycles on soil erosion

خاک و جلوگیری از عوامل مخرب ساختمان خاک استفاده شوند، توصیه می‌شود اثر سایر مواد و اسیدهای آلی بر پایداری و توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک‌های مختلف بررسی شود تا بتوان ترکیبات آلی مناسب برای بهبود ساختمان خاک و در نتیجه جلوگیری از ایجاد فرسایش آبی و بادی و پیامدهای منفی ناشی از آن را پیشنهاد نمود. نتایج پژوهش نشان داد پلیمرهای زیستی سازگار با محیط زیست که از اجزای زیست توده ساخته شده‌اند می‌توانند به عنوان منابع پایدار برای کاهش فرسایش بادی در نظر گرفته شوند. پلیمرهای زیستی درجه‌ی تازه‌ای برای استفاده از مواد زیستی پایدار بجای مواد مصنوعی باز خواهند کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز جهت تأمین هزینه مورد نیاز این تحقیق که قسمتی از قرارداد پژوهانه به شماره AS.SCU99.97 می‌باشد، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

این یافته‌ها نشان می‌دهد هیدروژل سلولز به عنوان یک بیوپلیمر و دوستدار محیط زیست نه تنها فرسایش بادی را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد بلکه با گذشت زمان پایدار بوده و کارایی آن حفظ شده است. لذا آن را می‌توان به عنوان خاکپوشی برای کنترل فرسایش در کانون‌های گرد و غبار پیشنهاد داد. البته شایان ذکر است که نتایج این مطالعه در شرایط تونل باد آزمایشگاهی انجام شده و بررسی کارایی آن در شرایط واقعی مزرعه ضروری است. چرخه‌های تر و خشک شدن نیز در همه‌ی زمان‌ها باعث افزایش فرسایش خاک شد و افزایش چرخه بر راندمان خاکپوشی‌ها تاثیر منفی داشت. اما اثر خاکپوشی‌ها بر کاهش فرسایش بادی تا چرخه چهارم قابل توجه بود. به گونه‌ای که مقدار فرسایش خاک بعد از چهار چرخه تر و خشک شدن، در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر و نانورس به ترتیب ۹۸، ۶۴، ۷۶ و ۸۱ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش یافت. نتایج آزمایش چرخه‌های تر و خشک شدن نیز کارایی هیدروژل سلولز را به عنوان یک خاکپوش پایدار و موثر در کنترل فرسایش بادی نشان می‌دهد. به طور کلی با توجه به اینکه کاربرد مواد و اسیدهای آلی می‌توانند در مناطقی که در معرض تر و خشک شدن هستند برای استحکام بیشتر

منابع

- Abbawi, Z.W.S. (2015). Studying strength and stiffness characteristics of sand stabilized with cement and lime additives. *Engineering and Technology Journal*, 33(8), 1857–1875.
- Ahmadi, A., Neyshabouri, M.R., Rouhipour, H., & Asadi, H. (2011). Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. *Journal of Hydrology*, 400, 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.045>
- Ahmed, A., Garipey, Y., & Raghavan, V. (2017). Influence of wood-derived biochar on the compactibility and strength of silt loam soil. *International Agrophysics*, 31, 149-155. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0044>
- AL Rasslany, I.A., & AL, Z. (2014). Effects of poly vinyl alcohol/starch as Soil conditioners on the physical properties of loamy sand and loam soils following different wetting and drying cycles. *Journal of Natural Sciences Research*, 4(24), 36-41.
- Alipour, A., Tavili, A., Sangoony, H., & Alipouri, E. (2018). Operational, environmental and economic feasibility of using steel slag as mulch for controlling wind erosion. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(18), 15-26. (In Persian with English abstract)

6. Amiri Khaboushan, E., Emami, H., Mosaddeghi, M.R., & Astaraei, A.R. (2018). Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties. *Soil and Tillage Research*, 184, 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.006>
7. Arzaghi, F., Farrokhanian Firouzi, A., Enayatizamir, N., & Khalilimoghaddam, B. (2017). Effect of Polyacrylamide Polymer on Wind Erosion Control of Sandy Soil in Azadegan Plain. *Journal of Water and Soil*, 31(4), 1070-1082. (In Persian with English abstract)
8. Arzaghi, F., Farrokhanian, Firouzi, A., Enayatizamir, N., & Khalilimoghaddam, B. (2015). Consideration the effect of *Thrichoderma harzianum* on windy erosion control of Azadegan plain sandy soil at laboratory and wind tunnel. *Soil Management and Sustainable Production*, 5(2), 239-251. (In Persian with English abstract)
9. Ataei, A., Gorji, M., & Parvizi, Y. (2014). Investigating the capability of fractal dimension of aggregates in evaluating different soil managements. *Iranian Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 28(4), 701-712. (In Persian)
10. Ayseldeen, M., Negm, A., El Sawwaf, M. & Gädda, T. (2016). Laboratory study of using biopolymer to reduce wind erosion. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(3), 228-240. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1264692>
11. Bahari, M. & Shahnazari, A. (2015). Experimental study of the fine-grained earthen bed stabilization using nanoclay. *Journal of Water and Soil Sciences*, 19(72), 107-114. (In Persian)
12. Barthes, B., & Roose, E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels. *Catena*, 47, 133-149. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00180-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00180-1)
13. Bravo-Garza, M.R., Bryan, R.B., & P. Voroney. (2009). Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma*, 151, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.022>
14. Burrell, L.D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>
15. Cantón, Y., Solé-Benet, A., Asensio, C., Chamizo S., & Puigdefábregas, J. (2009). Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion. *Catena* 77: 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.12.011>
16. Cao, Y., Wang, B., Guo, H., Xiao, H. & Wei, T. (2017). The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau. *Ecological Engineering*, 102, 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.043>
17. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 8(3), 1-23. <https://doi.org/10.3390/su8030251>
18. Chu, G., Zhao, J., Huang, Y., Zhou, D., Liu, Y., Wu, M., Peng, H., Zhao, Q., Pan, B., E.W., & Steinberg, C. (2018). Phosphoric acid pretreatment enhances the specific surface areas of biochars by generation of micropores. *Environmental Pollution*, 240, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.003>
19. Cosentino, D., Chenu, C., & Le Bissonnais, Y. (2006). Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 2053-2062. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.12.022>
20. Das, K.C., Steiner, C., Ahmedna, M., Rehrach, D., & Schomberg, H. (2012). Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols. *Soil Science*, 177(5), 310-320. <http://doi.org/10.1097/SS.0b013e31824e5593>
21. Denison, M.R., & Hookham, P.A. (1996). Modeling of dust entrainment by high- speed airflow. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 34, 1392-1402. <https://doi.org/10.2514/3.13245>
22. Ding, Q., & Ding, W. (2007). Comparing stress wavelets with fragment fractals for soil structure quantification. *Soil and Tillage Research*, 93, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.006>
23. Ekhtesasi, M.R., & Hazirei, F. (2016). Investigation of cement mulch on stabilization of windblown. *Journal of Range and Watershed Management*, 68(4), 739-750. (In Persian with English abstract)
24. Falsone, G., Bonifacio, E., & Zanini, E. (2012). Structure development in aggregates of poorly developed soils through the analysis of the pore system. *Catena*, 95, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.02.014>
25. Fletcher, A.J., Smith, M.A., Heinemeyer, A., Lord, R., Ennis, C.J., Hodgson, E.M., & Farrar, K. (2014). Production factors controlling the physical characteristics of biochar derived from phytoremediation willow for agricultural applications. *Bioenergy Research*, 7, 371-380. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9380-x>
26. Gong, W., Zang, Y., Liu, B., Chen, H., Wu, F., Huang, R., & Wang, Sh. (2016). Effect of using polymeric materials in ecological sand-fixing of Kerqin Sandy Land of China. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(43), 1-7. <https://doi.org/10.1002/app.44102>
27. Grossman, J., Neves, E.G., & Luizão, F.J. (2010). Black carbon affects the cycling of nonblack carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 41(2), 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>
28. Hong, C., Chenchen, L., Xueyong, Z., Huiru, L., Liqiang, K., Bo, L., & Jifeng, L. (2020). Wind erosion rate for vegetated soil cover: A prediction model based on surface shear strength. *Catena*, 187, 104398. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104398>

29. Huang, G., & Zhang, R. (2005). Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 127(1-2), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.016>
30. Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J.F., & Ruiz-Sinoga, J.D. (2016). Effects of topsoil treatments on a orestation in a dry Mediterranean climate (southern Spain). *Solid Earth*, 7, 1479–1489.
31. Jamshidsafa, M., Khalili Moghadam, B., Jafari, S., & Ghorbani, SH. (2015). Feasibility investigation of FilterCake using in mulch production for sand dune stabilization in Ahvaz. *Journal of Agricultural Engineering*, 38(1), 29-42. (In Persian with English abstract)
32. Jien, Sh.H., & Wang, C.Sh. (2013). Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.021>
33. Jingkuan, S., Fei, L., Zhongqi, L., Lingyan, Zh., & Zhengguo, S. (2014). Biochars derived from various crop straws: Characterization and Cd(II) removal potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 226-231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.04.042>
34. Johannes, C., & Verbeek, R. (2012). *Production and applications of Biopolymers*, InTech.
35. Kadokawa, J., Murakami, M., & Kaneko, Y. (2008). A facile preparation of gel materials from a solution of cellulose in ionic liquid. *Carbohydrate Research*, 343(4), 769-772. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2008.01.017>
36. Kadokawa, J., Murakami, M., Takegawa, A., & Kaneko, Y. (2009). Preparation of cellulose–starch composite gel and fibrous material from a mixture of the polysaccharides in ionic liquid. *Carbohydrate Polymers*, 75(1), 180-183. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.07.021>
37. Kalkan, E. (2009). Effects of silica fume on the geotechnical properties of fine- grained soils exposed to freeze and thaw. *Cold Regions Science and Technology*, 5, 130-135. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.03.011>
38. Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). *Aggregate stability and size distribution*. (pp: 425-442). In: Klute A, (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. ASA and SSSA, Madison, WI.
39. Khosravi, A., & Moosavi, A.A. (2017). Influence of organic acids and wetting-drying cycles on the aggregate stability and size distribution in a calcareous soil. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 31(2), 263-277. (In Persian with English abstract)
40. Li, L., Lin, Z., Yang, X., Wan, Z., & Cui, S. (2009). A novel cellulose hydrogel prepared from its ionic liquid solution. *Chinese Science Bulletin*, 54(9), 1622-1625. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0207-2>
41. Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S.P., Thies, J.E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Lu, Y., Qian, W., & Kanungo, D.P. (2018). Evaluation of Strength Properties of Sand Modified with Organic Polymers. *Journal Polymers*, 10(5), 499-514. <https://doi.org/10.3390/polym10030287>
42. Ma, R., Cai, C.Z.L., Wang, J., Xiao, T., Peng, G., & Yang, W. (2015). Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based x-ray micro-computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 149, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.016>
43. Majdi, H., Karimian- Eghbal, M., Karimzadeh, H.R., & Jalalian, A. (2006). Effect of Different Clay Mulches on the Amount of Wind Eroded Materials. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(3), 137-149. (In Persian)
44. Mandal, A., & Singh, N. (2017). Optimization of atrazine and imidacloprid removal from water using biochars: Designing single or multi-staged batch adsorption systems. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220(3), 637-645. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.02.010>
45. Mehrabi, sh., Soltani, S., & Jafari, R. (2015). Investigation of the relationship between climate parameters and dust phenomenon (Case study: Khuzestan province). *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, Hydrology and Soil Science*, 19(71), 69-80. (In Persian with English abstract)
46. Memarzadeh, M., Emami, H., & Karimi, A.R. (2019). Evaluation the efficiency of mechanical and biological management practices on wind erosion in in Tal Hamid rail way Station of Tabas. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(3), 113-131. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22069/ejsms.2020.15601.1836>
47. Miri, A., Dragovich, D., & Dong, Z. (2017). Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion. *Scientific Reports*. 7(1): 12831-48. Miri, A., Dragovich, D. & Dong, Z. (2019). Wind-borne sand mass flux in vegetated surfaces–Wind tunnel experiments with live plants. *Catena*, 172, 421-434. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.006>
48. Mizuta, K., Taguchi, S., & Sato, Sh. (2015). Soil aggregate formation and stability induced by starch and cellulose. *Soil Biology and Biochemistry*, 87, 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.04.011>
49. Movahedan, M., Abbasi, N., & Keramati Toroghi, M. (2013). Experimental investigation of Polyvinyl Acetat effect on wind erosion of different soils by impacting sand particles. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(1), 55-75. (In Persian with English abstract)
50. Murphy, B.W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties-a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605–635. <https://doi.org/10.1071/SR14246>
51. Naghizade Asl, F., Asgari, H. R., Emami, H., & Jafari, M. (2017). Stabilization of drifting sands using micro silica-lime- clay as a mulch. *Arabian Journal of Geoscience*, 10(536), 1-7. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3318-0>
52. Naghizade Asl, F., Asgari, H.R., Emami, H., & Jafari, M. (2018). Effect of micro silica (Silica fume) as mulch on

- soil losses of sand dunes. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(3), 139-145. <http://doi.org/10.22069/ejsms.2018.13963.1771>
53. Nooralivand, F., & Farrokhsian Firouzi, A. (2020). Investigation of modified biochar, nanoclay and polyvinyl acetate on soil stabilization and wind erosion control of sandy and loamy sand soils. *51*(4), 923-935. (In Persian with English abstract)
54. Oades, J.M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, 76, 319-337.
55. Olawale, O.J., Abu, S.T., & Dorcas, O.O. (2016). Evaluation of soil aggregate stability under long term land management system. *International Journal of Plant and Soil Science*, 9(2), 1-7. <http://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/19691>
56. Padidar, M., Jalalian, A., Asgari, K., Abdouss, M., Najafi, P., Honarjoo, N., & Fallahzade, J. (2017). The impacts of nanoclay on sandy soil stability and atmospheric dust control. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(4), 193-196.
57. Paluszek, J. (2011). Physical quality of eroded soil amended with gel-forming polymer. *International Agrophysics*, 25, 375-382.
58. Peng, H.B., Gao, P., Chu, G., Pan, B., Peng, J.H., & Xing, B.S. (2017). Enhanced adsorption of Cu(II) and Cd(II) by phosphoric acid-modified biochars. *Environment Pollution*, 229, 846-853. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.004>
59. Pires, L.F., Bacchi, O.O.S., & Reichardt, K. (2007). Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis. *Soil and Tillage Research*, 94, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.10.008>
60. Pirmoradian, N., Sepaskhah, A.R., & Hajabbasi, M.A. (2005). Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystem Engineering*, 90(2), 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.002>
61. Rajabi Agereh, S., Kiani, F., Khavazi, K., Rouhipour, H., & Khormali, F. (2019). Evaluation of the efficiency of biological reformer in controlling wind erosion. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(4), 824-837. (In Persian with English abstract)
62. Rajaram, G., & Erbach, D.C. (1999). Effect of wetting -drying on soil physical properties. *Journal of Terramechanics*, 36, 39-49.
63. Refahi, H. (2009). *Wind Erosion and its Control*. 5th Ed. University of Tehran prees, 320 p. (In Persian)
64. Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., Gharabaghi, B., Voroney, P., Unc, A., & Khodakaramian, G.h. (2012). Significance of physical weathering of twotexturally different soils for the saturated transport of *E. coli* and bromide. *Journal of Environmental Management*, 107, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.007>
65. Shahabinejad, N., Mahmoodabadi, M., Jalalian, A., & Chavoshi, E. (2020). The influence of soil properties on the wind erosion rate at different regions of kerman province. *Journal of Water and Soil Science*, 24(9), 209-222. (in Persian with English abstract)
66. Spaccini, R., Piccolo, A., Mbagwu, J.S.C., Zena Teshale, A., & Igwe, C.A. (2002). Influence of the addition of organic residues on carbohydrate content and structural stability of some highland soils in Ethiopia. *Soil Use and Management*, 18, 404-411. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00259.x>
67. Sun, J.X., Sun, X.F., Zhao, H., & Sun, R.C. (2004). Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. *Polymer Degradation and Stability*, 84(2), 331-339. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.008>
68. Tejedor, M., Jimenez, C., & Diaz, F. (2003). Volcanic materials as mulches for water conservation. *Geoderma*, 117, 283-295. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00129-0)
69. Utomo, W.H., & Dexter, A.R. (1982). Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. *Journal of Soil Science*, 33, 623-637. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01794.x>
70. Vaezi, A. (2011). *Application of Petroleum mulches in controlling wind erosion and stabilization of Windblown*. 2th Conference National Wind Erosion and Dust Storms, 16-17 Feb, Yazd University, Yazd, Iran. (In Persian with English abstract)
71. Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., van der Velde, M., & Diafas, I. (2010). *Biochar application to soils a critical scientific review of effects on soil properties processes and functions*. EUR 24099 EN. Office for the Official Publications of the European Communities. Luxembourg, 149 pp.
72. Vidal, V.E., Vivas Miranda, J.G., & Paz Gonzalez, A. (2005). Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. *Ecology Modeling*, 182, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.012>
73. Walkly, A., & Black, I.A. (1934). An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Science Society of America Journal*, 37, 29-38.
74. Wang, B., Zheng, F.L., Römken, M.J., & Darboux, F. (2013). Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, 187, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.018>

75. Xu, J., Tang, Y., & Zhou, J. (2017). Effect of drying–wetting cycles on aggregate breakdown for yellow–brown earths in karst areas. *Geoenvironmental Disasters*, 4, 1–13.
76. Yang, Y. & Liu, X. (2006). Effect of different mulch materials on winter wheat production in desalinized soil in Heilongjiang region of North China. *Soil Tillage and Research*, 38, 231–243. <http://doi.org/10.1631/jzus.2006.B0858>
77. Zimbone, S.M., Vickers, A., Morgan, R.P.C., & Vella, P. (1996). Field investigation of different techniques for measuring surface soil shear strength. *Soil Technology*, 9, 101-111. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(96\)00002-5](https://doi.org/10.1016/0933-3630(96)00002-5)
78. Zong, Y., Chen, D., & Lu, S. (2014). Impact of biochar on swell-shrinkage behavior, mechanical strength and surface cracking of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(6), 920-926. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300596>