

Investigation of the effect of nano scale and organic polymers amendments on some sandy soil properties

Zahra Abbasnasab¹, Navazallah Moradi^{2*}, Yahya Esmacilpour³, Hamid Gholami⁴
and Mahdi Biniaz⁵

1-PhD Student of Desert Control Management, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2*- Corresponding author, Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir

3-Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

4-Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

5-Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

Received:10/17/2024

Revised:03/05/2025

Accepted: 03/11/2025

Published: 03/21/2025

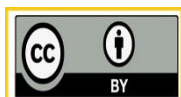
Abstract

Background and Objectives

Applying organic and eco-friendly additives for soil protection and wind erosion control offers an economical and practical solution. Among these, nanoparticles have emerged as an effective soil stabilization method. Chitosan, a natural, non-toxic, and biodegradable polymer, shows promise for mitigating wind erosion, and its composites have attracted considerable research interest. In Iran, large quantities of agricultural waste are generated daily, and their uncontrolled release into the environment not only represents a waste of resources but also contributes to pollution. Converting this waste into biochar presents an optimal strategy for enhancing environmental protection. This study evaluates the efficacy of four bio-amendments: (1) nanobiochar from palm tree stems (NBS), (2) nanobiochar from date palm kernels (NBK), (3) a chitosan-biochar composite from palm stems (ComS), and (4) a chitosan-biochar composite from date kernels (ComK), applied at three levels (0%, 1%, and 2% by weight). Their effects on key soil aggregate stability indicators were assessed.

Materials and Methods

Four amendment materials were produced: nano-biochar from palm stems, nano-biochar from date kernels, chitosan-nano-biochar stem composite (ComS), and chitosan-date kernel composite (ComK). Palm biomass residues (stems and kernels) were collected from Minab villages and ground and pyrolyzed at 300–350°C for 3.5 hours. The resulting biochar was converted into nano-biochar using a planetary ball mill. Chitosan was extracted from shrimp shells obtained from Bandar Tiab's shrimp farms. The chitosan-nano-biochar composite was synthesized using acetic acid and NaOH solutions in laboratory conditions at Hormozgan University. For the experiment, each amendment was mixed with sandy soil at 0%, 1%, and 2% (w/w) in a completely randomized design with three replicates. The treated soils were maintained in plastic pots under greenhouse



conditions (field capacity and 50% moisture) for 90 days. Post-incubation, soil samples were analyzed for physical and chemical properties at Hormozgan University's Soil and Water Laboratory. Data were analyzed using R software (v3.2.2), with mean comparisons performed via Tukey's HSD test ($p < 0.05$), and graphs were plotted in Excel.

Results

The study utilized a sandy-textured soil with near-neutral pH and salinity (15.04 dS/m), where date kernels showed higher carbon and volatile content but lower moisture and ash compared to palm stems. All amendment materials significantly ($p < 0.05$) improved soil properties, though effects varied by material type and application rate. Specifically, all treatments increased soil pH, aggregate stability, mean weight diameter (MWD) of dry aggregates, and clay-silt dispersion ratio while reducing bulk density and electrical conductivity (EC). Date kernel-derived amendments (NBK, ComK) at higher application rates (2%) were particularly effective, decreasing EC by 18-22% and bulk density by 12-15% while increasing aggregate stability by 30-35% and MWD by 25-28%. In contrast, palm stem-derived amendments (NBS, ComS) showed mixed effects - while increasing MWD by 15-18%, they reduced aggregate stability by 8-10% and increased bulk density by 5-7% at higher application rates. The chitosan-biochar composites demonstrated superior performance compared to nano-biochar alone, with ComK showing the most balanced improvement across all measured parameters. These findings confirm that both nanoscale amendments and organic polymers can effectively modify the physical and chemical properties of erosion-prone soils, with material source and application rate being critical factors determining their efficacy.

Conclusion

All tested amendments enhanced soil quality, underscoring their potential for wind erosion mitigation. Improving soil physicochemical properties is critical for sustainable land management and dust storm control. Implementing technical and management strategies to optimize these amendments could significantly reduce wind erosion, addressing the pressing challenge of dust storms, wind erosion

Keywords: Aggregate stability, biochar, chitosan, soil amendments, sustainable land management.

بررسی تأثیر بهسازهای نانو و پلیمرهای آلی بر برخی از خصوصیات خاک شنی

زهرا عباس نسب^۱، نوازاله مرادی^{۲*}، یحیی اسماعیل پور^۳، حمید غلامی^۴ و مهدی بی نیاز^۵

۱- دانشجوی دکتری، مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،

پست الکترونیک: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴- استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۵- استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

چکیده

سابقه و هدف

استفاده از افزودنی‌های آلی و سازگار با محیط‌زیست، با اهداف حفاظت کمی و کیفی خاک و کنترل فرسایش بادی، راهکاری اقتصادی و کاربردی است. استفاده از نانوذرات، به عنوان یک روش حفاظت خاک معرفی شده است. کیتوزان پلیمر طبیعی، غیر سمی، قابل تجزیه و سازگار با محیط است که می‌تواند در کاهش فرسایش بادی تأثیر داشته باشد. کیتوزان و کامپوزیت‌های پلیمری آن توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب نموده است. در ایران روزانه حجم زیادی ضایعات کشاورزی تولید می‌شود. رهاسازی غیراصولی این مواد در محیط باعث هدررفتن این منابع و آلودگی محیط‌زیست می‌گردد. هدف این پژوهش، بررسی اثربخشی کاربرد ۴ نوع بهساز زیستی شامل نانوبیوچار تولید شده از ساقه‌های درخت نخل، نانوبیوچار هسته خرما، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه و کامپوزیت کیتوزان- هسته خرما در سه سطح بر برخی از شاخص‌های ارزیابی پایداری خاکدانه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا ۴ نوع بهساز زیستی شامل نانوبیوچار حاصل از ساقه‌های درخت نخل، نانوبیوچار هسته خرما، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه و کامپوزیت کیتوزان- هسته خرما تولید شد. به منظور تولید بیوچار، بقایای زیست‌توده نخل شامل بقایای ساقه درختان نخل و هسته خرما از روستاهای میناب جمع‌آوری و آسیاب شد. سپس درون کوره با دمای ۳۵۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت و ۳۰ دقیقه فرایند پیرولیز انجام شد. پس از تولید، بیوچار به وسیله آسیاب گلوله‌ای- سیاره‌ای، به نانوبیوچار تبدیل گردید. استخراج کیتوزان با استفاده از پوسته‌های میگو جمع‌آوری شده از محل پرورش میگو واقع در بندر تباب شهرستان میناب انجام شد. در نهایت تولید کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار با استفاده از محلول استیک اسید و NaOH طی مراحل در آزمایشگاه دانشگاه هرمزگان تولید گردید. برای اعمال تیمار، هریک از بهسازها به طور جداگانه به صورت فاکتوریل در سه سطح ۲، ۱، ۰ درصد وزنی مواد بهساز در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی با خاک با بافت شنی مخلوط شده و به گلدان‌های پلاستیکی اضافه شد و به مدت ۹۰ روز در شرایط ظرفیت زراعی و ۵۰ درصد آن در شرایط گلخانه نگهداری گردید. بعد از گذشت دوره زمانی بیان شده، پس از نمونه‌برداری از خاک گلدان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد نظر در آزمایشگاه آب و خاک دانشگاه هرمزگان اندازه‌گیری شد. در نهایت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار R نسخه 3.2.2 انجام شد. به منظور مقایسه میانگین اثر بهسازها از آزمون توکی (HSD) در سطح احتمال ۹۵ درصد و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج

خاک مورد استفاده در این پژوهش، براساس نتایج آزمون خاک، دارای درصد زیادی شن بوده و در طبقه بافت شنی قرار دارد. همچنین

دارای pH نزدیک به خنثی و شوری ۱۵/۰۴ می‌باشد. در بررسی زیست‌توده‌های مورد استفاده، هسته خرما دارای درصد بالاتری از کربن و مواد فرار و درصد کمتری از رطوبت و خاکستر است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد بهسازهای مورد مطالعه، تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد، بر ویژگی‌های مورد ارزیابی دارد و با توجه به مقدار، نوع و ویژگی‌های ماده اولیه تولید شده از آن، اثرهای متفاوتی بر ویژگی‌های خاک دارند. همه بهسازها در سطوح مختلف به‌طور معنی‌داری باعث افزایش pH خاک، افزایش پایداری خاکدانه، افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک و افزایش نسبت پراکنش رس و سیلت و سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری و هدایت الکتریکی خاک شد. افزایش سطوح مصرفی در بهسازهای تولید شده از هسته خرما، باعث کاهش هدایت الکتریکی و جرم مخصوص ظاهری خاک و افزایش پایداری خاکدانه و میانگین وزنی قطر خاکدانه شد. افزایش سطوح مصرفی در بهسازهای تولید شده از ساقه‌های درخت نخل باعث کاهش پایداری خاکدانه و نیز افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه و جرم مخصوص ظاهری خاک شد. یافته‌های این مطالعه نشان داد بهسازهای نانومقیاس و پلیمرهای آلی می‌توانند باعث بهبود ویژگی‌های خاک حساس به فرسایش شوند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد همه بهسازهای مورد مطالعه، باعث بهبود ویژگی‌های خاک شد. بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش مقاومت آن در برابر عوامل فرساینده باد، امری ضروری و راهکاری مؤثر برای دستیابی به هدف توسعه پایدار است. لازم است اقدامات مدیریتی و فنی در راستای بهبود ویژگی‌های مؤثر خاک برای کاهش فرسایش بادی انجام گردد تا ضمن اصلاح خاک، چالش اساسی گردوغبار نیز کنترل شود.

واژه‌های کلیدی: بهسازی زیستی خاک؛ فرسایش بادی؛ کامپوزیت؛ کیتوزان؛ نانوبیوچار

مقدمه

در سال‌های اخیر از بیوچار برای تأمین کربن آلی خاک در جهت ترسیب کربن در خاک‌های مناطق خشک و بیابانی استفاده شده است (Parichehreh et al., 2017). کاربرد بیوچار، راهکاری مناسب برای بازیافت مواد آلی و مدیریت پسماندهای آلی می‌باشد و عاملی است که صرفه اقتصادی دارد و می‌تواند موجب بهبود شرایط خاک شود. ساختار مولکولی گسترده کربن‌های آروماتیک در بیوچار می‌تواند سبب پایداری زیاد آن در خاک و نیز افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک شود (Sohi et al., 2010). این ماده در بسیاری از منابع به عنوان یک اصلاح‌کننده مناسب برای خاک شناخته شده است (Van Zwieten et al., 2010). افزودن بیوچار به خاک باعث تغییر در برخی ویژگی‌های خاک مانند pH، مقدار کربن آلی، قابلیت استفاده برخی عناصر پرمصرف و کم‌مصرف به‌ویژه پتاسیم، کاهش Na، EC، Ca در یک خاک بافت شنی (Moshtaghi et al., 2023)، افزایش ظرفیت زراعی و کاهش تخلخل خاک (Albuquerque et al., 2014) و تغییر در برخی از صفات کارکردی گیاه می‌شود (et

2014) و تغییر در برخی از صفات کارکردی گیاه می‌شود (et al., 2021). همچنین افزودن بیوچار به خاک می‌تواند کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، پایداری خاکدانه‌ها، تخلخل و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش داده و pH و چرخه عناصر غذایی خاک را تغییر می‌دهد (Tang et al., 2023). خاک‌های خشک به دلیل کمبود رطوبت، کمبود مواد آلی و pH زیاد دارای فعالیت زیستی کمتری هستند که بیوچار می‌تواند تنوع، جمعیت و فعالیت میکروبی این خاک‌ها را بهبود داده و حتی فعالیت آنزیمی این خاک‌ها را نیز افزایش دهد. این مسئله در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بسزایی دارد (Zhang et al., 2020). در طی سال‌های اخیر، استفاده از نانو ذرات به عنوان یکی دیگر از روش‌های حفاظت خاک معرفی شده که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله سطح ویژه بسیار بالا و بارهای سطحی، به تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، بهبود خصوصیات مهندسی و پایداری خاکدانه منجر می‌شود. استفاده از فناوری نانو، در زمینه مهندسی و بهسازی خاک کاربرد زیادی داشته

خاکدانه‌های درشت‌تری را ایجاد می‌نمایند و باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شوند. در واقع مواد پلیمری محلول در آب پس از رقیق شدن در آب، بر روی خاک پاشیده شده و در معرض هوا تشکیل شاخه‌های گسترده پلیمری می‌دهند که در نتیجه می‌تواند با ایجاد پیوند بین ذرات خاک، موجب افزایش مقاومت ذرات در مقابل فرسایش بادی شوند (Kavazanjian et al., 2009). 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). همچنین در تحقیقی دیگر نشان داده شد که پلیمرهای زیستی سازگار با محیط‌زیست که از اجزای زیست‌توده ساخته شده‌اند می‌توانند به عنوان منابع پایدار برای کاهش فرسایش بادی در نظر گرفته شوند (Nooralivand et al., 2023). مطالعات نشان می‌دهند پلیمرهای زیستی دریچه تازه‌ای برای استفاده از مواد زیستی پایدار برای جایگزینی با مواد مصنوعی باز کرده‌اند. در کشور ایران روزانه حجم زیادی از ضایعات کشاورزی تولید می‌شود. رهاسازی غیراصولی این مواد در محیط نه تنها منجر به آلودگی محیط‌زیست می‌گردد، بلکه باعث هدررفت این منابع ارزشمند نیز می‌شود. با بهره‌گیری از پسماندهای آلی می‌توان امکان بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی و حفظ حاصل‌خیزی خاک را فراهم کرد. از این رو، برای مدیریت پسماند محصولات باغی و دریایی استان هرمزگان و با توجه به اهمیت اصلاح خاک‌های مشکل‌دار، هدف اصلی این پژوهش بررسی اثربخشی کاربرد چهار نوع بهساز زیستی شامل ۱) نانوبیوپچار ساقه نخل (ComS) و ۲) درخت نخل (NBS)، ۳) نانوبیوپچار هسته خرما (NBK)، ۴) کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوپچار ساقه نخل (ComK) در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی) بر برخی از شاخص‌های ارزیابی پایداری خاکدانه در یک خاک شنی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی خاکی با بافت شنی بندرعباس

است (Khalid et al., 2015; Rizehbandi et al., 2020). بسیاری از خصوصیات مواد در مقیاس نانو متفاوت از ویژگی‌های آنها در مقیاس میکرو و ماکرو است. تبدیل بیوپچار به نانو باعث تغییر برخی خصوصیات آن مانند افزایش ظرفیت جذب، بهبود خواص مکانیکی، افزایش گروه‌های عاملی، افزایش حجم کل منافذ، افزایش نسبت سطح به حجم و افزایش کارایی آن خواهد شد (Chausali et al., 2021). قابلیت‌های موجود در فناوری نانو برای اصلاح خصوصیات فیزیکی و کاهش فرسایش‌پذیری خاک با به کارگیری انواع مختلف اصلاح‌کننده‌ها در مقیاس نانو مورد توجه قرار گرفته است. اصلاح خصوصیات خاک از جمله ظرفیت نگهداری آب در خاک به کمک نانو ژئولیت‌ها، مواد نانومتخلخل طبیعی و مصنوعی گزارش شده است (Jatav and De, 2013). پیرامون کیتوزان گزارش شده که این ماده می‌تواند در کاهش تنش در گیاهان، افزایش تولید و تحریک ایمنی گیاه، بهبود رشد و عملکرد گیاهان و در حذف آلودگی از منابع آبی و خاکی مؤثر باشد (Harish et al., 2007; Rizehbandi et al., 2020). همچنین گزارش شده است که کیتوزان در کاهش فرسایش بادی تأثیر داشته است (Kavazanjian et al., 2009). کیتوزان پلیمری طبیعی، غیرسمی، قابل تجزیه و سازگار با محیط است که از کیتین موجود در اسکلت خارجی بندپایان مانند حشرات، خرچنگ‌ها، میگوها، لابسترها و دیواره سلولی نوع خاصی از جلبک‌ها مشتق شده که می‌تواند باعث افزایش پایداری خاکدانه و نگهداشت آب خاک شود (Adamczuk et al., 2021). در سال‌های اخیر کیتوزان و کامپوزیت‌های پلیمری آن توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب نموده است (Abdollahi and Golchin, 2018). ظرفیت بالای این ترکیب‌ها برای پیوند با فلزات، به دلیل حضور گروه‌های عاملی بسیار واکنش‌پذیر مانند آمین و هیدروکسیل و نیز ارزانی آن موجب شده است که از این بیوپلیمر و کامپوزیت‌های تهیه‌شده از آن، برای حذف فلزات سنگین از منابع آلوده استفاده گردد (Mohanasrinivasan et al., 2014). یکی از ویژگی‌های بارز پلیمرهای زیستی مانند کیتوزان این است که باعث اتصال ذرات به یکدیگر شده و

آسیاب و مراحل خالص سازی کیتین، کانی زدایی و فرایند داستیلاسیون انجام شد (Takiguchi, 1991). آنگاه کیتوزان به دست آمده برای انجام آزمایش استفاده گردید.

تهیه کامپوزیت

به منظور تولید کامپوزیت کیتوزان - نانوبیوچار، ابتدا ۳ گرم از کیتوزان به کمک همزن در ۱۸۰ میلی لیتر از محلول اسید استیک ۲ درصد حل شد. سپس ۳ گرم از نانوبیوچار تولید شده نیز به محلول اضافه و محلول بدست آمده توسط همزن به مدت ۳۰ دقیقه همگن شد. پس از سپری شدن مدت زمان ۳۰ دقیقه، سوسپانسیون همگن کیتوزان-نانوبیوچار به صورت قطره قطره به ۹۰۰ میلی لیتر از NaOH ۱/۲ درصد اضافه و بعد محلول تهیه شده به مدت ۱۲ ساعت به حال خود رها شد. سپس برای خروج NaOH اضافی، با آب دیونیزه شست و شو داده شده و در آخر نمونه به مدت ۲۴ ساعت، در آون و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شد (Zhou et al., 2013).

اندازه گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

بعد از گذشت یک دوره ۹۰ روزه، پس از نمونه برداری از خاک گلدان، نمونه ها به آزمایشگاه آب و خاک دانشگاه هرمزگان منتقل و بعد طی ۲۴ ساعت هوا خشک شدند. در ادامه بافت خاک، درصد اجزاء رس، سیلت و شن به روش هیدرومتری تعیین گردید. اسیدیته خاک در گل اشباع توسط دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی (Page et al., 1982) و جرم مخصوص ظاهری خاک به روش استوانه مشخص شد (Blake et al., 1986). برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک، از مجموعه الک های ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی متری از دستگاه لرزاننده به مدت ۲ دقیقه استفاده شد و مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت هوا خشک (MWD) مربوط به کل الک ها تعیین گردید (Kemper et al., 1986). در این پژوهش میزان نسبت رس و سیلت قابل پراکنش

(محوطه دانشگاه هرمزگان) که مشخصات آن در جدول ۱ بیان شده، انجام شد. بعد از انتخاب خاک مورد نظر و نمونه برداری بعد از خشک شدن و یکنواخت نمودن خاک، آزمایش به صورت فاکتوریل شامل نوع بهسازها (نانوبیوچار تولید شده از ساقه های درخت نخل (NBS)، نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه نخل (ComS) و کامپوزیت کیتوزان-هسته خرما (ComK) تولید شده در آزمایشگاه که مشخصات آن در جدول ۲ بیان شده است، در سه سطح مصرفی (صفر، ۱ درصد و ۲ درصد) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه انجام شد. برای اعمال تیمار، بهسازهای تولید شده در سطوح مذکور در نسبت وزنی با خاک کاملاً مخلوط شدند، سپس مخلوط خاک و بهساز به گلدان های پلاستیکی به ارتفاع ۱۸ و قطر ۱۶ سانتی متر منتقل شدند و در شرایط ظرفیت زراعی تا ۵۰ درصد آن در یک دوره ۹۰ روزه در گلخانه (در محدوده دمایی ۲۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس) نگهداری شد.

تولید بهسازها

تولید نانوبیوچار

برای تولید بیوچار ابتدا بقایای زیست توده نخل شامل بقایای ساقه درختان نخل و هسته خرما از روستاهای میناب جمع آوری، شست و شو و هوا خشک شد. سپس قطعات بزرگ را به قطعات کوچک خرد کرده و درون کوره در شرایط بدون اکسیژن با دمای ۳۰۰-۳۵۰ درجه سانتی گراد به مدت سه ساعت و ۳۰ دقیقه قرار داده شد (Sadeghi et al., 2016). پس از آن، بیوچار تولید شده، به وسیله آسیاب گلوله ای-سیاره ای، تهیه شده از شرکت فناوری مواد هوشمند نوپان به نانوبیوچار تبدیل گردید.

استخراج کیتوزان

کیتوزان با استفاده از پوسته میگوی بندر تیار واقع در شهرستان میناب، تولید گردید. برای استخراج کیتوزان پس از جداسازی و شست و شوی پوسته میگو، پوسته ها در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت چهار روز خشک و بعد

(DR) با استفاده از شاخص میدلتون (Middleton, 1930)، به روش هیدرومتری در دو حالت آب و محلول پراکنده کننده (هگزا متافسفات سدیم) طبق رابطه (۱) تعیین شد.

رابطه (۱)

$$DR = (\%silt + \%clay)w / (\%silt + \%clay)c$$

c و w در رابطه بالا به ترتیب بیانگر پراکندگی سیلت و رس در آب مقطر و هگزامتافسفات سدیم است (Rasheed, 2016). پارامتر دیگر مورد بررسی در این تحقیق، شاخص پایداری خاکدانه (AS) است که پایداری خاکدانه‌های محدوده

تجزیه و تحلیل آماری

برای بررسی تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار R نسخه ۳.۲.۲ استفاده شد. به منظور مقایسه میانگین اثر بهسازها از آزمون توکی (HSD) در سطح احتمال ۹۵ درصد و برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده گردید.

جدول ۱- برخی از خصوصیات نمونه خاک مورد مطالعه

Table 1- Some properties of the studied soil sample

Soil texture	Clay(%)	Silt(%)	Sand(%)	EC(dS/m)	pH
Sandy	4	6	90	15.04	7.04

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های زیست توده‌های مورد استفاده و بهسازهای تولید شده از آنها

Table 2- Some of the biomass features used and the Amendments produced by them

Amendments	Moisture content%	Volatile content%	Ash content%	Fixed carbon content%	pH	EC(dS/m)
Date palm kernel	3.5	73.67	0.86	21.98		
Date palm stem						
Chitosan	8.4		11.75		7.5	
Date palm kernel nanobiochar	9		1.5		7.06	4.76
Date palm stem nanobiochar		69		10.85		
Chitosan - date palm kernel composite					6.9	8.08
Chitosan- date palm stem composite					7.6	6.48
					7.81	7.76

نتایج

معنی‌داری بر ویژگی‌های مورد ارزیابی مانند pH، شاخص پایداری خاکدانه (AS)، میانگین وزنی قطر خاکدانه (MDW)، نسبت پراکنش سیلت و رس، هدایت الکتریکی و جرم مخصوص ظاهری خاک داشته است (جدول ۳).

بررسی زیست‌توده‌ها نشان می‌دهد هسته خرما دارای درصد بالاتری از کربن و مواد فرار و درصد کمتری از رطوبت و خاکستر است. نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داده که بهسازهای مورد مطالعه، تأثیر

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس میانگین اثر بهسازها و سطوح مصرفی بر ویژگی‌های خاک

Table 3- The results of variance analysis of the average Amendment and concentration levels on soil properties

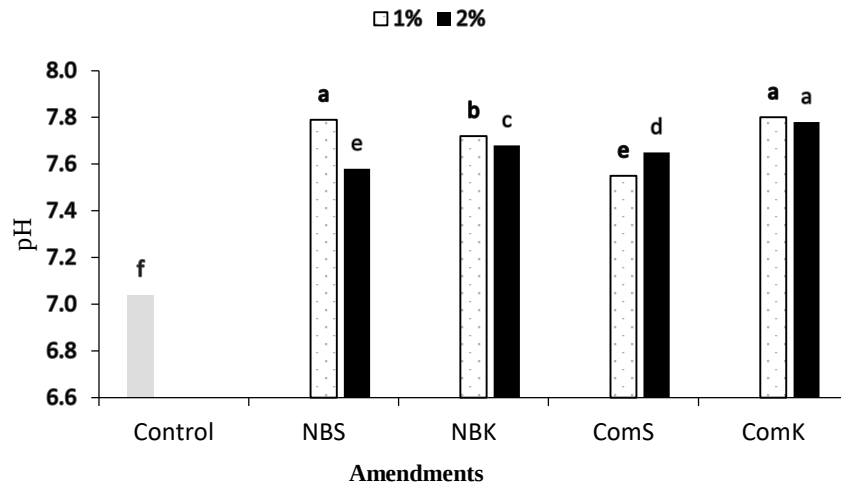
soil parameters	Sources of variation	Degrees of freedom	Mean square	F-value
pH	Amendment(A)	3	0.168**	23.970
	Rate(R)	2	0.002	0.367
	A×R	6	0.021	3.079
EC	Amendment(A)	3	8.406**	53.519
	Rate(R)	2	0.291	1.855
	A×R	6	0.625*	3.981
AS	Amendment(A)	3	339.7**	2732.300
	Rate(R)	2	0.2	1.534
	A×R	6	0.6*	4.929
MWD _d	Amendment(A)	3	0.000**	8.060
	Rate(R)	2	0.000	0.014
	A×R	6	0.000	0.307
DR	Amendment(A)	3	0.011*	5.046
	Rate(R)	2	0.001	0.818
	A×R	6	0.003	1.499
Bulk density	Amendment(A)	3	0.012**	97.039
	Rate(R)	2	0.000	0.159
	A×R	6	0.000	1.048

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، ns: عدم معنی‌داری
*, Significant at $P < 0.05$. **, Significant at $P < 0.01$, ns: Non-significant

تأثیر انواع بهسازها بر اسیدیته (pH) خاک

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد کاربرد بهسازهای مورد مطالعه افزایش معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بر اسیدیته خاک نسبت به تیمار شاهد داشت (شکل ۱). در بین بهسازها، کاربرد سطوح مختلف کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار هسته خرما بالاترین تأثیر را نسبت به سطوح

مختلف سایر بهسازها بر اسیدیته (pH) خاک نشان داد. در نانوبیوچارهای تولید شده از ساقه نخل و هسته خرما با افزایش مقدار مصرف از ۱ به ۲ درصد، pH خاک کاهش پیدا کرد. در حالی که افزایش سطوح مصرف از ۱ به ۲ درصد، در کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه نخل سبب افزایش pH خاک شد.



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر بهسازها با سطوح مختلف بر pH خاک

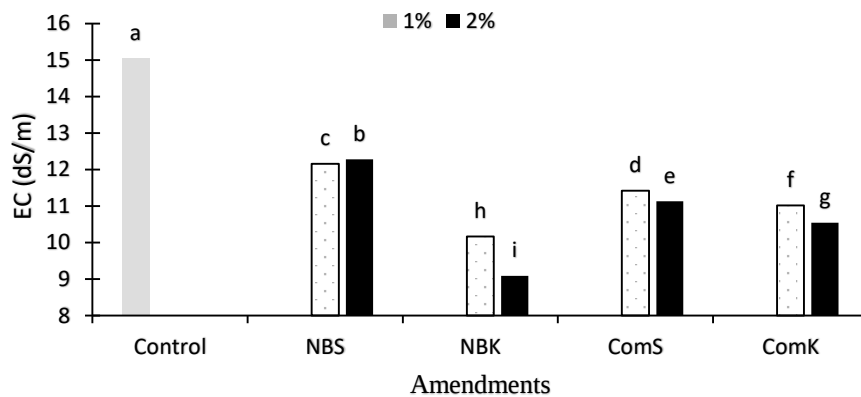
Figure 1- Comparison of the average effect of different levels of Amendments on soil pH.

شاهد (Control)، نانوبیوچار ساقه نخل (NBS)، نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه (ComS)، کامپوزیت کیتوزان- هسته خرما (ComK)

Control, date palm stem nanobiochar (NBS), palm kernel nanobiochar (NBK), chitosan-composite stem nanobiochar (ComS), chitosan-palm kernel composite (ComK)

حروف غیرمشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی دارند.

Unsimilar letters show significant differences at a 95% probability level by HSD test.



شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف بهسازها بر هدایت الکتریکی خاک

Figure 2- Comparison of the average effect of different levels of Amendments on soil EC.

شاهد (Control)، نانوبیوچار ساقه نخل (NBS)، نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه (ComS)، کامپوزیت کیتوزان- هسته خرما (ComK)

Control, date palm stem nanobiochar (NBS), palm kernel nanobiochar (NBK), chitosan-composite stem nanobiochar (ComS), chitosan-palm kernel composite (ComK)

حروف غیرمشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی دارند.

Unsimilar letters show significant differences at a 95% probability level by HSD test.

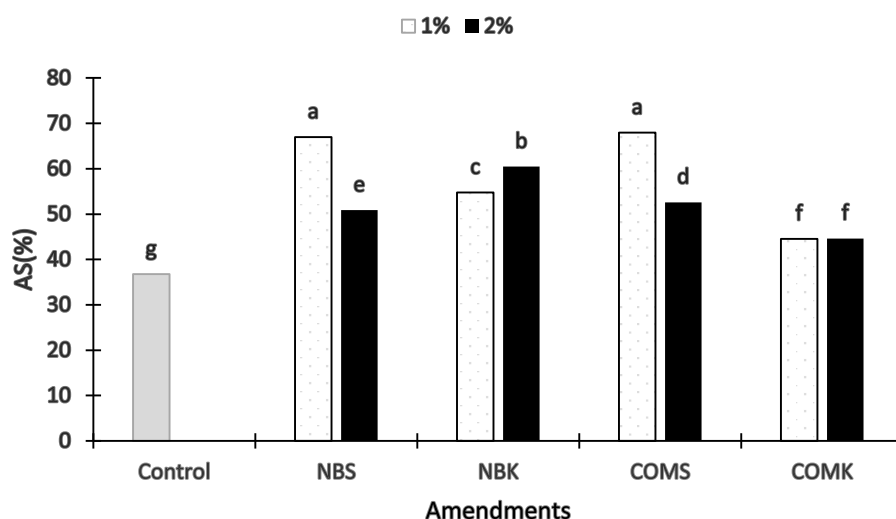
تأثیر انواع بهسازها بر هدایت الکتریکی (EC) خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد افزودن بهسازهای زیستی مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر EC خاک دارد. کمترین میزان شوری خاک در بهساز نانوبیوچار هسته خرما از سطح ۲ درصد تفاوت آماری معنی‌داری با سایر تیمارها داشت (شکل ۲) و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی مربوط به تیمار شاهد با مقدار ۱۵/۰۴ دسی‌زیمنس بر متر و بعد از نانوبیوچار تولیدی از ساقه درخت نخل از سطح مصرف ۲ درصد به دست آمد. مانند نانوبیوچار هسته خرما، افزایش سطوح مصرف در بهسازهای کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه و کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار هسته خرما باعث کاهش شوری خاک شد.

تأثیر انواع بهسازها بر شاخص پایداری خاکدانه (AS)

یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک که می‌تواند خاک یک منطقه را در برابر فرسایش و نیروهای فرساینده محافظت

کند، پایداری خاکدانه‌ها است (Zhang et al., 2020). در این تحقیق کاربرد بهسازهای مورد مطالعه با سطوح مختلف باعث افزایش معنی‌دار مقدار شاخص AS نسبت به شاهد شد (شکل ۳). بالاترین میزان AS در تیمار بهساز نانوبیوچار ساقه نخل و کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه مشاهده گردید و کمترین میزان شاخص پایداری خاکدانه نیز مربوط به تیمار شاهد بود. اما در بین انواع بهسازها، کمترین پایداری خاکدانه در کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار هسته خرما مشاهده شد. در مقایسه بین سطوح مختلف مصرفی بهساز، افزایش مصرف در نانوبیوچار ساقه نخل و کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه باعث کاهش و در نانوبیوچار هسته خرما باعث افزایش شاخص پایداری خاکدانه شد. در تیمار ComK افزایش مقدار مصرفی هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر مقدار AS نداشت. افزایش سطح مصرف فقط در بهساز NBK باعث افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه شد.



شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر بهسازها با سطوح مختلف بر شاخص AS

Figure 3- Comparison of the average effect of different levels of Amendments on soil Aggregate stability (AS)

شاهد (Control)، نانوبیوچار ساقه نخل (NBS)، نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه (ComS)، کامپوزیت کیتوزان-هسته خرما (ComK)

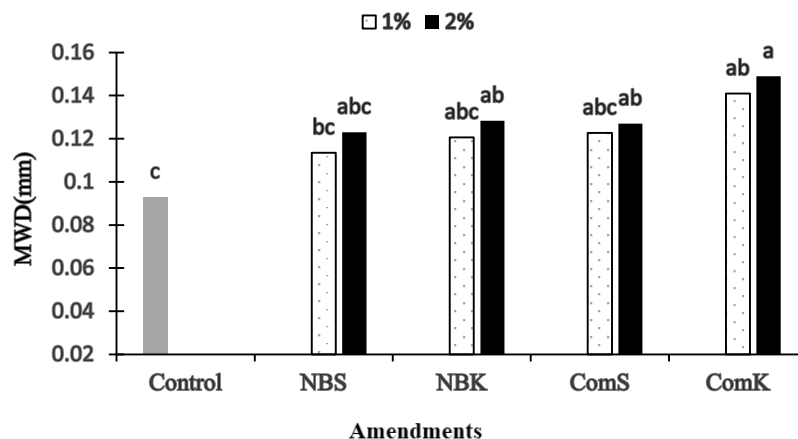
Control, date palm stem nanobiochar (NBS), palm kernel nanobiochar (NBK), chitosan-composite stem nanobiochar (ComS), chitosan-palm kernel composite (ComK)

حروف غیرمشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی دارند.

Unsimilar letters show significant differences at a 95% probability level by HSD test.

مشاهده نشد. در بررسی انواع بهساز، بزرگ‌ترین مقدار MWD در کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما (۰/۱۴ میلی‌متر) در سطح ۲٪ وزنی و کمترین MWD پس از شاهد، در نانوبیوچار ساقه نخل (۰/۱۱ میلی‌متر) در سطح ۱٪ وزنی مشاهده شد. نتایج نشان داد که افزایش سطوح مصرف در همه بهسازها باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه شد.

تأثیر انواع بهسازها بر مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) کاربرد بهسازهای نانوبیوچار و کامپوزیت کیتوزان در خاک، مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه را نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۴). افزایش مقدار MWD فقط در سطح دو درصد تیمارهای ComS و NBS و هر دو سطح مصرفی ComK در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود و از نظر آماری بین همه بهسازها به جز سطح دو درصد ComK تفاوت معنی‌داری



شکل ۴-مقایسه میانگین تأثیر بهسازها با سطوح مختلف بر میانگین وزنی قطر خاکدانه

Figure 4-Comparison of the average effect of different levels of Amendments on MWD.

شاهد (Control)، نانوبیوچار ساقه نخل (NBS)، نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه (ComS)، کامپوزیت کیتوزان- هسته خرما (ComK)، Control, date palm stem nanobiochar (NBS), palm kernel nanobiochar (NBK), chitosan-composite stem nanobiochar (ComS), chitosan-palm kernel composite (ComK)

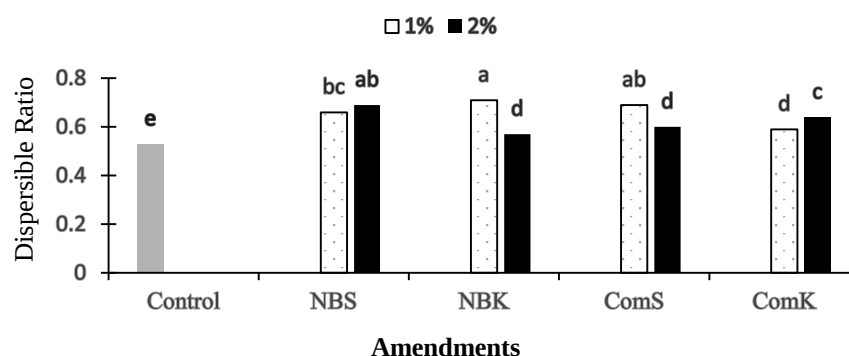
حروف غیرمشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی دارند.

Unsimilar letters show significant differences at a 95% probability level by HSD test.

ممکن است نتایج دیگری حاصل شود. از بین بهسازهای مورد مطالعه بیشترین مقدار نسبت پراکنش سیلت و رس در بهسازهای نانوبیوچار هسته خرما در سطح ۱٪ وزنی با ۰/۷۱، در کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه نخل در سطح ۱٪ وزنی با ۰/۶۹ و نانوبیوچار ساقه نخل در سطح ۲٪ وزنی با ۰/۶۹ مشاهده شد. افزایش بهسازهای مذکور باعث افزایش معنی‌دار میزان نسبت پراکنش شد. این وضعیت با افزایش مصرفی نانوبیوچار هسته خرما و کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه نخل با کاهش میزان نسبت DR همراه گردید.

تأثیر انواع بهسازها بر میزان نسبت پراکنش رس و سیلت (DR)

مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت پراکنش رس و سیلت (DR) در شکل ۵ آورده شده است. نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین داده‌ها حکایت از آن دارد که از نظر آماری بهسازهای مورد مطالعه باعث افزایش معنی‌دار میزان DR در مقایسه با مقدار تیمار شاهد شدند. هر چند این بخش از نتایج با پیش فرض اولیه در رابطه با افزایش پایداری و کاهش پراکنش رس همخوانی ندارد و نیاز به تحقیق بیشتری دارد و



شکل ۵-مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف بهسازها بر نسبت پراکندگی رس و سیلت

Figure 5- Comparison of the average effect of Amendments with different levels on DR

شاهد (Control)، نانوبیوچار ساقه نخل (NBS)، نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه (ComS)، کامپوزیت کیتوزان- هسته خرما (ComK)

Control, date palm stem nanobiochar (NBS), palm kernel nanobiochar (NBK), chitosan-composite stem nanobiochar (ComS), chitosan-palm kernel composite (ComK)

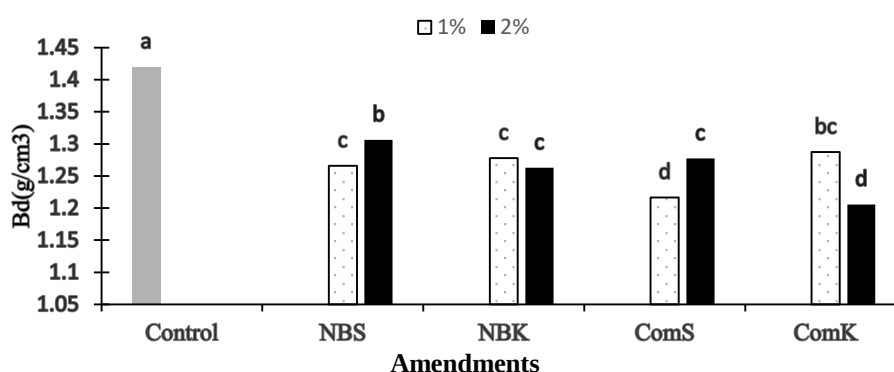
حروف غیرمشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی دارند.

Unsimilar letters show significant differences at a 95% probability level by HSD test.

مخصوص ظاهری از تیمار شاهد (۱/۴۲ گرم بر سانتی متر مکعب) به دست آمد. در بهسازهای نانوبیوچار ساقه نخل و کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه نخل، افزایش سطوح مصرفی بهساز باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری و در کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما افزایش سطح مصرف باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک گردید.

تأثیر انواع بهسازها بر جرم مخصوص ظاهری خاک (BD)

نتایج مقایسه میانگین ها داده ها نشان داده که افزودن بهسازها سبب کاهش معنی دار مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک در سطح ۵ درصد نسبت به تیمار شاهد شده است (شکل ۶). بر همین اساس، کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک مربوط به تیمارهای کامپوزیت بود و بیشترین مقدار جرم



شکل ۶- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف بهسازها بر جرم مخصوص ظاهری خاک

Figure 6- Comparison of the average effect of Amendments with different levels on Bulk density.

شاهد (Control)، نانوبیوچار ساقه نخل (NBS)، نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه (ComS)، کامپوزیت کیتوزان- هسته خرما (ComK)

Control, date palm stem nanobiochar (NBS), palm kernel nanobiochar (NBK), chitosan-composite stem nanobiochar (ComS), chitosan-palm kernel composite (ComK)

حروف غیرمشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی دارند.

Unsimilar letters show significant differences at a 95% probability level by HSD test.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داده که بهسازیهای مورد مطالعه، اثرهای متفاوتی بر ویژگیهای خاک داشته است. بر همین اساس، کاربرد مواد بهساز نانوبیوچار و کیتوزان سبب افزایش pH خاک شده است. به نظر می‌رسد دلیل افزایش pH خاک در اثر افزایش بیوچار به علت ماهیت قلیایی بیوچار که ناشی از کاتیون‌های مانند کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در ساختمان زیست‌توده بوده که در اثر فرایند پیرولیز به ترکیبات حاوی اکسیدها، هیدروکسیدها و کربنات‌ها تبدیل شده که منجر به افزایش pH خاک شده است. به نحوی که در این زمینه کاربرد بیوچار گندم و اکالیپتوس pH خاک را افزایش داده است و دلایل بیان شده مورد تأیید قرار گرفته است (Farrell *et al.*, 2013). در بررسی دیگر، افزایش pH خاک در اثر کاربرد سطوح ۵/۰ و ۱ درصد وزنی بیوچار تهیه شده از ذرت در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد یک خاک آهکی مشاهده شده است (Khadem *et al.*, 2018). در برخی مطالعات تغییر فعالیت میکروارگانیسم‌های درون خاک را به علت افزایش pH خاک در اثر کاربرد بیوچار دانسته‌اند (Al-Iren and Ediene, 2021; Wabel *et al.*, 2017). علاوه بر این، مطالعات مشابه دیگری حکایت از افزایش pH خاک در اثر کاربرد بیوچار داشته‌اند (Chan *et al.*, 2007; ZolfiBavariani *et al.*, 2015) که با نتایج این بررسی همخوانی داشته است. از سویی، افزودن کیتوزان به دلیل اسیدیته قلیایی در خاک شنی در این بررسی سبب شد که اسیدیته خاک بیشتر به سمت قلیایی تمایل داشته باشد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، نشان داده که کاربرد نانوبیوچار و کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه و هسته خرما در شرایط آزمایش سبب کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک شده است. بنابراین می‌توان بیان کرد که کاهش هدایت الکتریکی خاک متأثر از نوع ماده اولیه‌ای است که بهسازیها از آن تولید شده است. دلیل کاهش هدایت الکتریکی خاک پس از کاربرد بیوچار بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک است. به‌طوری‌که بیوچار سبب افزایش pH (شکل ۱) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شده که منجر به افزایش ظرفیت جذب

یون‌های محلول و کاهش غلظت نمک‌های محلول و هدایت الکتریکی شده است. علاوه بر این، بیوچار باعث تشکیل کمپلکس‌های فلزی و آلی می‌شود که تحرک فلزات را در محلول خاک کاهش داده و این کاهش یونهای آزاد سبب کاهش کلی هدایت الکتریکی شده است (Stoykova *et al.*, 2024). بنابراین وجود سطح ویژه بسیار بالای نانوبیوچار سبب افزایش جذب و نگهداری کاتیون‌ها بر روی سطح شده که این ویژگی سبب شده نمک‌های محلول جذب ذرات شده و هدایت الکتریکی محلول خاک کاهش یابد. یکی دیگر از دلایل احتمالی کاهش شوری خاک در این بررسی، انتقال املاح در فرایند مرطوب و خشک شدن در طول دوره آزمایش است که از سطح به عمق گلدان و یا خارج گلدان داشته است. با این حال، چون شرایط رطوبتی برای همه تیمارها یکسان بوده اثرهای تیمارها نمود پیدا کرده است. در همین راستا، در مطالعه‌ای نشان داده شد که کاربرد بیوچار بادمجان و میگو باعث کاهش هدایت الکتریکی خاک شنی شده است (Moshtaghi *et al.*, 2023) که با این پژوهش همخوانی داشته است. کاربرد هر دو ماده اصلاح‌کننده نانو بیوچار و کامپوزیت کیتوزان در خاک منجر به افزایش مقدار AS و MWD شده است، به نظر می‌رسد این افزایش به دلیل ساختار ویژه ماده آلی بیوچار و کیتوزان بوده، به‌طوری‌که به دلیل سطح ویژه بالا به عنوان یک عامل پیوند دهنده شیمیایی بین ذرات خاک سبب افزایش خاکدانه‌سازی و خاکدانه‌های پایدار (شکل ۳) و در نتیجه منجر به افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (شکل ۴) شده است. پیرامون افزایش پایداری خاکدانه می‌توان گفت که پلیمر آلی یک پوسته را روی سطح شن ایجاد می‌کند که باعث افزایش ثبات خاکدانه‌ها، کاهش تبخیر آب و بهبود توانایی خاک در برابر فرسایش بادی می‌شود (Liu *et al.*, 2012). سطح ویژه بالای پلیمرهای آلی 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 (Chang and Cho, 2016). هرچه خاکدانه‌ها بزرگتر باشد مقدار فرسایش

باشد. به طوری که نوع و میزان ماده آلی یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر پراکندگی ذرات رس بیان شده است (Nelson *et al.*, 1999). از سوی، Gillman (۱۹۷۴) در بررسی خود بیان کرده که وجود بار خالص سطحی روی مواد آلی به دلیل نیروهای دافعه مشترک با ذرات رس پراکندگی کلئیدهای خاک را افزایش می دهد. به نظر می رسد دلایل بیان شده می تواند در میزان نسبت پراکندگی سیلت و رس خاک نقش داشته باشد. از سوی، شوری و نسبت ذرات معدنی موجود در خاک نیز می تواند در پراکندگی و چسبندگی ذرات نقش داشته باشد. براساس نتایج به دست آمده، افزودن نانوبیوچار و کامپوزیت کیتوزان نانوبیوچار سبب کاهش هدایت الکتریکی خاک شده است (شکل ۲)، به ویژه زمانی که کاتیون های کلسیم و منیزیم که عامل پیوند دهنده ذرات باشد کاهش پیدا کرده و پیوند بین ذرات معدنی به ویژه رس که دارای بار منفی بوده ضعیف تر شده و منجر به پراکنش بیشتر سیلت و رس در آب شده، در نتیجه نسبت پراکنش در تیمارهای مورد مطالعه بیشتر شده است. بنابراین غلیظ شدن محلول خاک سبب همافزایی ذرات و رقیق شدن محلول خاک سبب پراکنده شدن ذرات رس شده است. در پژوهشی Naroui و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که بکارگیری بیوچار ضایعات محصول پسته، به ترتیب موجب افزایش حدود ۴۳ و ۱۱۴ درصدی پراکندگی رس در خاک شنی و لوم شنی شد. افزایش نانوبیوچار هسته و ساقه خرما و کیتوزان تولیدی با تشکیل MWD بزرگ تر (شکل ۴) و درصد خاکدانه های پایدارتر (شکل ۳) سبب تولید منافذ درشت و افزایش حجم خاک شده، بنابراین جرم واحد حجم ذرات کاهش پیدا کرده، در نتیجه جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش پیدا کرده است. در اینجا بایستی متذکر شد که میزان کاهش جرم مخصوص ظاهری بیش از حد انتظار است که می تواند ناشی از عوامل دیگری از جمله خطای آزمایشی باشد. از سوی، افزایش نانوبیوچار و کیتوزان به عنوان ماده آلی به خاک خود نیز یکی از عوامل کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک است. کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک ناشی از افزودن مواد آلی بود که با نتایج Harish و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی داشت. نتایج مطالعه تأثیر کاربرد

کمتر خواهد بود (Shahabinejad *et al.*, 2020). از افزودن پلیمر پلی اکریل آمید و مخلوط پلیمر و بیوچار خرما به نوعی خاک شنی لومی، چنین نتیجه شد که این ترکیبات به طور قابل توجهی درصد پایداری خاکدانه ها را افزایش داده است (Alkhasha *et al.*, 2018). بیوچار می تواند با افزایش کربن آلی، تخلخل، سطح ویژه خاک و بهبود فعالیت میکروبی خاک، خاکدانه سازی را تحت تأثیر قرار دهد (Chan *et al.*, 2007; Downie *et al.*, 2009). خاکدانه سازی با افزایش تخلخل می تواند باعث بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک شود (Cen *et al.*, 2021). همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، علت افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در حالت خشک (MWD) در اثر اضافه شدن پلیمرها به خاک این است که با بروز واکنش های شیمیایی و ایجاد پیوندهای یونی بین پلیمر و ذرات خاک همانند پلی ذرات کوچک خاکدانه ها را به هم متصل کرده و آنها را تبدیل به مولکول های درشت تری کرده است (Nasimi *et al.*, 2020). بنابراین با افزایش مقدار پلیمر، غشاهای پلیمری برای پر کردن حفره های ذرات خاک برای حفظ ساختار خاک بیشتر شده و نیروهای پیوند دهنده قوی تری بین ذرات خاک ایجاد کرده است (Liang *et al.*, 2018). چنین مشاهده ای در تحقیق کاربرد پلیمر آنیونی پلی اکریل آمید به طور معنی داری باعث افزایش میانگین وزنی قطر ذرات در خاک لومی رسی شد (Chang and Cho, 2016). اضافه کردن بیوچار تهیه شده از شلتوک برنج در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد، با مقادیر صفر، ۱ و ۳ درصد موجب بهبود میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاکدانه ها و پایداری خاکدانه ها در خاک رسی شد (Ghorbani *et al.*, 2019).

افزودن نانو بیوچار ساقه و هسته و کامپوزیت کیتوزان به خاک سبب افزایش معنی دار نسبت پراکنش سیلت و رس شده است (شکل ۵). اگرچه در بسیاری از موارد کاربرد ماده آلی سبب بهبود شرایط خاک و کاهش نسبت پراکنش سیلت و رس شده است. در این بررسی برخلاف انتظار نسبت پراکنش رس افزایش پیدا کرده که به نظر می رسد وجود عوامل دیگر از جمله خطای آزمایشی بر پراکندگی خاک می تواند اثرگذار

بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش مقاومت آن در برابر عوامل فرساینده آب و باد، موضوعی ضروری و راهکاری مؤثر برای دستیابی به هدف توسعه پایدار است. از سوی دیگر، ماده آلی ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و نقش مهمی در تشکیل و پایداری خاکدانه دارد. پوشاندن سطح خاک به وسیله خاک‌پوش‌های آلی با بهبود ویژگی‌های خاک می‌تواند از فرسایش و تخریب خاک جلوگیری کند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد استفاده از ضایعات طبیعی که به فراوانی در کشور قابل تهیه هستند، می‌تواند پس از فراوری برای کنترل فرسایش خاک و جذب آب به‌ویژه در مناطق بیابانی کاربرد داشته باشند. بنابراین پیشنهاد می‌شود در ادامه پژوهش‌های مشابهی با درجات مختلف کاربرد انواع بهسازهای دوست‌دار طبیعت برای ارزیابی‌های مقایسه‌ای و ارائه تصمیم‌گیری‌های نهایی بررسی شود.

بیوچار حاصل از زغال درخت کاج در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در چهار بافت لوم شنی، لومی، لوم سیلتی و لوم رسی سیلتی، در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد وزنی به خاک‌ها اضافه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش حجم منافذ خاک در اثر افزودن بهساز آلی در تمام بافت‌ها چگالی ظاهری کاهش پیدا کرده است (Peake et al., 2014). در مطالعه دیگری اثر غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر بیوچار ضایعات میگو و بادمجان در یک خاک با بافت شنی بررسی گردیده و چنین نتیجه شده که بیوچار به عنوان ماده آلی سبب تغییر میزان و توزیع منافذ و تخلخل خاک شنی شده و موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری گردید (Moshtagh et al., 2023). از آنجا که شرایط کار مشابه این مطالعه بوده، تأییدکننده نتایج این بررسی در رابطه با کاهش جرم مخصوص ظاهری با افزایش نانوبیوچار و کیتوزان مشابه با تحقیق مذکور بود.

References

- Abbasnasab, Z., Abedi, M. and Sadati, S.E., 2021. Effect of biochar on some morphological and physiological traits in *Medicago sativa* and *Bromus tomentellus*. Iranian Journal of Plant Process and Function, 10 (41):145-156 (In Persian).
- Abdollahi, S. and Golchin, A., 2018. Evaluate ability of uptake and translocation of lead in three varieties of cabbage. Iranian Journal of Water Soil Research, 49(1): 145-158 (In Persian). Doi: 10.22059/ijswr.2017.230511.667654.
- Adamczuk, A., Kercheva, M., Hristova, M. and Jozefaciuk, G., 2021. Impact of Chitosan on Water Stability and Wettability of Soils. Materials, 14(24): 7724. <https://doi.org/10.3390/ma14247724>.
- Albuquerque, J.A., Calero, J.M., Barrón, V., Torrent, J., Campillo, M.C.D., Gallardo, A. and Villar, R., 2014. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 177(1): 16–25. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200652>
- Alkhasha, A., Al-Omran, A. and Aly, A., 2018. Effects of biochar and synthetic polymer on the hydro-physical properties of sandy soils. Sustainability, 10(12): 4642. <https://doi.org/10.3390/su10124642>
- Al-Wabel, M.I., Hussain, Q., Usman, A.R., Ahmad, M., Abduljabbar, A., Sallam, A.S. and Ok, Y.S., 2017. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. Land Degradation and Development, 29: 2124-2161. <https://doi.org/10.1002/ldr.2829>
- Blake, G.R. and Hartge, K., 1986. Particle density. Methods of soil analysis. Part 1 physical and mineralogical methods, 5.1: 377-382. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
- Cen, R., Feng, W., Yang, F., Wu, W., Liao, H. and Qu, Z., 2021. Effect mechanism of biochar application on soil structure and organic matter in semi-arid areas. Journal of Environmental Management, 286: 112198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112198>
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. and Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. Australian Journal of Soil Research, 45: 629–634.
- Chang, I., Im, J. and 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>
- Chausali, N., Saxena, J. and Prasad, R., 2021. Nanobiochar and biochar based nanocomposites: Advances and applications. Journal of Agriculture and Food Research, 5: 100191. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100191>

- Downie, A., Crosky, A. and Munroe, P., 2009. Physical properties of biochar. In J. Lehmann and S. Joseph (Ed.). *Biochar for Environmental Management, Science and Technology*. Earthscan: London, UK. 13-32.
- Farrell, M., Kuhn, T.K., Macdonald, L.M., Maddern, T.M., Murphy, D.V., Hall, P.A., Singh, B.P., Baumann, K., Krull, E.S. and Baldock, J.A., 2013. Microbial utilisation of biochar-derived carbon. *Science of the Total Environment*, 465: 288-297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.090>
- Ghorbani, M., Asadi, H. and Abrishamkesh, S., 2019. Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3): 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.005>
- Gillman, G.P., 1974. The influence of net charge on water dispersible clay and sorbed sulphate. *Soil Research*, 12(2): 173-176. <https://doi.org/10.1071/SR9740173>
- Harish, P. K.V., Dharmesh, S.M., Jagannatha Rao, K.S. and Tharana than, R.N., 2007. Free radical-induced chitosan depolymerized products protect calf thymus DNA from oxidative damage. *Carbohydrate Research*, 342: 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.11.010>
- Jatav, G. K. and De, N., 2013. Application of nano-technology in soil-plant system. *An Asian Journal of Soil Science*, 8(1): 176-184.
- Iren, O. and Ediene, V., 2021. Soil pH and microbial properties as affected by integrated use of biochar, poultry manure, and urea. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 24(1): 90-98. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2021.90.98>
- Jamshidsafa, M., Khalili Moghadam, B., Jafari, S. and Ghorbani, S.H., 2015. Feasibility investigation of filter cake using in mulch production for sand dune stabilization in Ahvaz. *Journal of Agricultural Engineering*, 38(1): 29-42. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/agen.2015.11273>
- Khadem, A., Raiesi, F. and Besharati, H., 2018. The effects of corn biochar on the chemical and microbiological characteristics of two calcareous clay and sandy soils. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(1): 25-47. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/ejsms.2018.13172.1740>
- Kavazanjian Jr, E., Iglesias, E. and Karatas, I., 2009. Biopolymer soil stabilization for wind erosion control. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1-4: 881-884. IOS press.
- Kemper, W. D. and Rosenau, R. C., 1986. Size distribution of aggregates. In Klute, A. (Ed). *Methods of Soil Analysis Part 1*, second ed., Agron. Monogr. 9. American Society of Agronomy -SSSA. Madison, WI, 425-442.
- Khalid, N., Mukri, M., Kamarudin, F., Abdul Ghani, A. H., Fadzil Arshad, M., Sidek, N., Ahmad-Jalani, A. Z. and Bilong, B., 2015. Effect of nanoclay in soft soil stabilization. *Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference*, Springer, Singapore, 905-914.
- 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. and Kanungo, D.P., 2018. Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers. *Polymers*, 10(5): 499-514. <https://doi.org/10.3390/polym10030287>
- Liu, J., Shi, B., Lu, Y., Jiang, H., Huang, H., Wang, G. and Kamai, T., 2012. Effectiveness of a new organic polymer sand-fixing agent on sand fixation. *Environment Earth Science*, 65: 589-595. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1106-9>
- Middleton, H. E., 1930. Properties of soil which influence soil erosion. *USDA Tech. Bull*, 178: 6-1.
- Mohanasrinivasan, V., Mishra, M., Paliwal, J.S., Singh, S.K., Selvarajan, E., Suganthi, V. and Devi, C.S., 2014. Studies on heavy metal removal efficiency and antibacterial activity of chitosan prepared from shrimp shell waste. *Biotech*, 4: 167-175. <https://doi.org/10.1007/s13205-013-0140-6>
- Moshtaghi, R., Moradi, N. and Gholami, H., 2023. The Effect of using of the two types of agricultural and marine waste biochar on some characteristics of a sandy soil. *Iranian Scientific Association of Desert Management and Control*, 10(4): 81-92. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.563479.1398>
- Naroui, A., Zamani, J., Koohestani, S. and Abbaszadeh Afshar, F., 2023. The Effect of two types of agricultural waste biochar on some physical properties and water repellency of soil. *Journal of Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)*, 4(52): 55-65. (In Persian). <https://doi.org/10.30495/wsrcj.2023.74395.11396>
- Nasimi, P., Karimi, A. and Motaghian, H., 2020. Effects of biochar produced from date palm's leaves on saturated hydraulic conductivity and soil moisture coefficients of sandy clay loam soil. *Iranian Water Research*, 13(3): 161-171. (In Persian).
- Nelson, P.N., Baldock, A., Clarke, P., Oades, J.M. and Churechman, G.J., 1999. Dispersed clay and organic matter in soil: their nature and associations. *Australian Journal of Soil Research*, 37(2): 289-316. <https://doi.org/10.1071/S98076>
- Nooralivand, F. and Farrokhan 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). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.74277.1127>
- Page, A., Miller, R.H. and Keeney, D.R., 1982. *Methods of soil analysis" Part 2: chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy., Madison Wisconsin. USA.
 - parichehre, M., SadeghZadeh, F., Behmanyar, M.A. and Ghajar Sepanlu, M., 2017. Effects of rice straw and dicer biochars on chemical characteristics of clay-loam, saline-sodic soil. *Journal of Water and Soil Science*, 27(4): 1-49. (In Persian).
 - Peake, L.R., Reid, B.J. and Tang, X., 2014. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*, 235: 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.002>
 - Rasheed, S. M. K., 2016. The Effect of clay content and land use on dispersion ratio at different locations in Sulaimani Governorate Kurdistan region Iraq. *Open Journal of Soil Science*, 6: 1-8. <https://doi.org/10.4236/ojss.2016.61001>
 - Rizehbandi, E., Khademalrasoul, A. and Taghavi-Zahedi, M., 2020. Production of organic and mineral recombinant mulches and their effects on volumetric moisture of erodible soils. *Iranian Journal of Research of Water and Soil*, 51(8): 2023-2037. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.302174.668599>
 - Shahabinejad, N., Mahmoodabadi, M., Jalalian, A. and 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). <https://doi.org/10.47176/jwss.24.3.6911>
 - Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z. and Kiani Harchegani, M., 2016. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. *Science of the Total Environment*, 541: 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.068>
 - Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E. and Bol, R., 2010. A review of biochar and its use and function in soil. Elsevier Academic Press, 105: 47-82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
 - Stoykova, M., Atanassova, I., Benkova, M., Simeonova, T., Nenova, L., Harizanova, M. and Atsenova, M., 2024. Positive effect of biochar application on soil properties: solubility and speciation of heavy metals in non-acidic contaminated soils near a steel metallurgical plant in southeastern Europe. *Sustainability*, 16(16): 6891. <https://doi.org/10.3390/su16166891>
 - Tang, H., Chen, M., Wu, P., Faheem, M., Feng, Q., Lee, X. and Wang, B., 2023. Engineered biochar effects on soil physicochemical properties and biota communities: A critical review. *Chemosphere*, 311: 137025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137025>
 - Takiguchi, Y., 1991. Chitosan-Jikken Manual, *Advances in chitin science, proceedings from the Asia-Pacific*. In: Chen R.H. and Chen H. C. *Physical properties of chitinous material chitin*. Gihodou Shupan Kabushki Kaisha, Japan, 1-7.
 - Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K., Downie, A., Rust, J., Joseph, S. and Cowie, A., 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327: 235-246. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>
 - Zhang, X., Qu, J., Li, H., La, S., Tian, Y. and Gao, L., 2020. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. *Geoderma*, 363(1): 114170. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114170>
 - Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A.R., Fang, J., Sun, Y. and Cao, X., 2013. Sorption of heavy metals on chitosan-modified biochars and its biological effects. *Chemistry Engineering Journal*, 231: 512-51.