

Effects of metal salts on some characteristics of cotton stalk derived biochar

Ebrahim Mahmoudi¹, Hamid Niknahad - Gharmakher^{*2}, Susan Khosroyar³,
Mohammad Rahim Forouzeh⁴

1. Ph.D. Student, Dept. of Rangeland Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: em.mahmoudi@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Rangeland Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: niknahad@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Ghouchan Branch, Islamic Azad University, Ghouchan, Iran. E-mail: susankhosroyar@yahoo.com
4. Associate Prof., Dept. of Rangeland Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: forouzeh@gau.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: The use of fossil fuels and land use change has caused a catastrophic increase in carbon in the atmosphere, which has led to a decrease in soil quality, global warming, and climate change. The deficiency of organic matter, salinity and alkalinity of the soil are three important limitations of the soils of winter rangelands in Iran. Biochar is a carbon-rich material that is produced during the pyrolysis process from raw materials containing carbon at high temperature and under almost oxygen-free conditions. It is used to improve soil quality, carbon sequestration and remove pollutants from the environment. Biochar can be engineered/ designed for specific applications or to achieve specific results. Increasing the percentage of stable carbon and improving the physico-chemical properties of engineered biochars can play an important role in carbon sequestration and improving the properties of winter rangelands soils.
Article history: Received: 07.11.2023 Revised: 10.12.2023 Accepted: 01.08.2024	
Keywords: Biochar, Carbon sequestration, Cotton stalk, Metal salts	Materials and Methods: After washing and drying, the cotton stalk was cut into pieces of less than 2 cm. Then it was immersed for 4 hours in a solution with a concentration of 20% metal salts of calcium chloride, magnesium chloride and iron chloride, and dried again. Then, in the electric furnace, at various temperatures of 300, 400, 500, 600 and 700 degrees centigrade, within two hours, 20 biochars (control and engineered) were produced from treated cotton stalks with different metal salts and untreated cotton stalks. Finally, properties of produced biochars including yield percent, organic carbon percentage, stable carbon percentage, acidity and salinity were measured. Statistical analysis was performed in SPSS ₁₆ software using one-way analysis of variance and Tukey's test.
	Results: The yield of produced biochars (control and engineered) significantly decreased with increasing temperature, so that the highest percentage of their yield was observed at pyrolysis temperatures of 300 °C. The highest percentage of yield (50.20%) was obtained in biochar treated with iron chloride produced at 300 °C. The highest organic carbon (50.97%) and stable carbon (99.57%) were obtained in control biochar produced at 500 °C and biochar treated with iron chloride produced at 700 °C, respectively. The highest increase in the ratio of the weight of stable carbon to the weight of the feed stock was observed in biochar

treated with iron chloride produced at 300 °C. The lowest and highest electrical conductivity (1.1 and 7.43 dSm) were obtained in control biochar produced at 300 °C and calcium chloride treated biochar produced at 700 °C. The highest and lowest acidity (9.83 and 5.60) were observed in control biochar produced at 700 °C and iron chloride treated biochar produced at 300 °C.

Conclusion: Considering the limitations in the soil of Iran's winter rangelands and the characteristics of control and engineered biochars along with the energy required for their production, Biochar produced from cotton stalks treated with iron chloride salt at 300°C has the highest performance and high stable carbon, the lowest acidity and acceptable electrical conductivity, therefore, it is recommended to use in carbon sequestration and plantation projects in winter rangelands of Iran.

Cite this article: Mahmoudi, Ebrahim, Niknahad - Gharmakher, Hamid, Khosroyar, Susan, Forouzeh, Mohammad Rahim. 2024. Effects of metal salts on some characteristics of cotton stalk derived biochar. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (1), 153-170.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/jwsc.2024.21551.3666](https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.21551.3666)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی اثر نمک‌های فلزی بر برخی خصوصیات بیوجار ساقه پنبه

ابراهیم محمودی^۱، حمید نیک‌نهاد قرماخر^{۲*}، سوسن خسرویاری^۳، محمدرحیم فروزه^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: em.mahmoudi@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: niknahad@gau.ac.ir
۳. دانشیار واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران. رایانامه: susankhosroyar@yahoo.com
۴. دانشیار گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: forouzeh@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: کاربرد سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی سبب افزایش فاجعه بار کربن در اتمسفر شده است و کاهش کیفیت خاک، گرمایش جهانی و تغییر اقلیم را به دنبال داشته است. کمبود ماده آلی، شوری و قلیایی بودن خاک، سه محدودیت مهم خاک‌های مراتع قشلاقی ایران است. بیوجار، یک ماده غنی از کربن است که طی فرایند پیرولیز از مواد اولیه حاوی کربن در دمای بالا و شرایط تقریباً بدون اکسیژن تولید می‌شود و به‌منظور بهبود کیفیت خاک، ترسیب کربن و حذف آلاینده‌ها از محیط‌زیست استفاده می‌شود. بیوجار را می‌توان به‌منظور کاربردهای خاص یا نیل به نتایج به‌خصوص، مهندسی طراحی نمود. افزایش درصد کربن پایدار و بهبود خصوصیات فیزیکی- شیمیایی بیوجارهای مهندسی شده می‌تواند نقش مهمی در ترسیب کربن و اصلاح خصوصیات خاک مراتع قشلاقی ایفا نمایند.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۰ تاریخ ویرایش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸	
واژه‌های کلیدی: بیوجار، ترسیب کربن، ساقه پنبه، نمک‌های فلزی	مواد و روش‌ها: ساقه پنبه پس از شستشو و خشک شدن به قطعات کم‌تر از ۲ سانتی‌متر خرد گردید. آن‌گاه به مدت ۴ ساعت در محلول با غلظت ۲۰ درصد نمک‌های فلزی کلرید کلسیم، کلرید منیزیم و کلرید آهن غوطه‌ور شده، دوباره خشک گردید. سپس، در کوره الکتریکی و در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و با زمان ماندگاری دو ساعت، ۲۰ بیوجار شاهد و مهندسی‌شده از ساقه‌های پنبه تیمار شده با نمک‌های فلزی مختلف و تیمارنشده تولید شده، درصد عملکرد، درصد کربن آلی، درصد کربن پایدار، اسیدیته، و هدایت الکتریکی آن‌ها اندازه‌گیری شد و نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه نیز، محاسبه گردید. تجزیه و تحلیل آماری در نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ با استفاده از روش تجزیه واریانس واریانس یک‌طرفه و آزمون توکی انجام شد.

یافته‌ها: با افزایش دمای پیرولیز در تمامی بیوچارها (مهندسی شده و شاهد) روند کاهشی عملکرد مشاهده گردید به طوری که بیشترین درصد عملکرد آن‌ها در دما پیرولیز ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. بالاترین درصد عملکرد (۵۰/۲۰ درصد) در بیوچار تیمارشده با کلرید آهن تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. بیشترین میزان کربن آلی (۵۰/۹۷ درصد) و کربن پایدار (۹۹/۵۷ درصد) به ترتیب در بیوچارهای شاهد تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و بیوچار تیمارشده با کلرید آهن تولیدشده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. بیشترین افزایش در نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه در بیوچار تیمارشده با کلرید آهن تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. کمترین و بیشترین قابلیت هدایت الکتریکی (۱/۱ و ۷/۴۳ دسی‌زیمنس بر متر) در بیوچار شاهد تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و بیوچار تیمارشده با کلرید کلسیم تولیدشده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. بیشترین و کمترین اسیدیته (۹/۸۳ و ۵/۶۰) در بیوچار شاهد تولیدشده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و بیوچار تیمارشده با کلرید آهن تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به محدودیت‌های موجود در خاک مراتع قشلاقی ایران و خصوصیات بیوچارهای شاهد و اصلاح شده به همراه انرژی لازم برای تولید آن‌ها، بیوچار تولیدشده از ساقه پنبه تیمارشده با نمک کلرید آهن در دما ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین عملکرد و کربن پایدار بالایی بوده، پایین‌ترین اسیدیته و هدایت الکتریکی قابل‌قبولی دارد. بنابراین، به‌منظور استفاده در پروژه‌های ترسیب کربن و بوته‌کاری در مراتع قشلاقی ایران توصیه می‌شود.

استناد: محمودی، ابراهیم، نیک‌نهاد قرماخر، حمید، خسرویاری، سوسن، فروزه، محمدرحیم (۱۴۰۳). بررسی اثر نمک‌های فلزی بر برخی خصوصیات بیوچار ساقه پنبه. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۱)، ۱۷۰-۱۵۳.

DOI: [10.22069/jwsc.2024.21551.3666](https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.21551.3666)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

کاربرد فزاینده سوخت‌های فسیلی، بهره‌برداری بیش از حد از اکوسیستم‌های طبیعی و تغییر کاربری اراضی سبب تخریب اراضی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، گرمایش جهانی و تغییر اقلیم شده است. بهبود کیفیت خاک اکوسیستم‌های خشکی و ترسب کربن در آن‌ها از طریق افزودن بیوچار، یکی از راهکارهای پیشنهادشده برای مقابله با گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی است (۱). بیوچار نوعی بهساز جامد و متخلخل خاک است که دارای ترکیبات آلی بسیار پایداری است و از سوزاندن مواد آلی لیگنوسلولزی (ضایعات و بقایای گیاهی) و مواد آلی غیرلیگنوسلولزی (فضولات دامی و بخش آلی زباله‌های شهری) در کوره فاقد اکسیژن طی فرایند پیرولیز به‌منظور مدیریت ضایعات آلی، بهبود خصوصیات خاک و مدیریت تغییرات اقلیمی تولید می‌شود (۲ و ۳). با توجه به نوع ماده اولیه و شرایط پیرولیز (سرعت افزایش دمای کوره، دمای نهایی کوره و مدت زمان ماندگاری ماده اولیه در دمای موردنظر)، بیوچارهایی با کمیت (درصد عملکرد) و خصوصیات کیفی متفاوت تولید می‌شود (۴ و ۵). در طی فرآیند پیرولیز، بخش کوچکی از ماده اولیه به گازهای مختلف و روغن سوختی و بخش عمده (فاز جامد) آن به بیوچار تبدیل می‌شود (۶، ۷، ۸ و ۹). بخش پایدار کربن بیوچار در برابر تجزیه شیمیایی و بیولوژیک بسیار مقاوم‌تر از کربن مواد اولیه است (۹ و ۱۰). بنابراین تبدیل ترموشیمیایی مواد اولیه آلی به بیوچار می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای افزایش ماده آلی خاک، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترسب کربن مدنظر قرار گیرد (۴).

عملکرد بیوچار (درصدی از ماده اولیه که در انتهای فرایند پیرولیز به بیوچار تبدیل می‌شود)، در انتخاب آن جهت کاربرد در اکوسیستم‌های خاکی چه

به‌منظور افزایش حاصلخیزی خاک و چه به‌منظور ترسب کربن اهمیت دارد. عملکرد بیوچار با افزایش دما به‌دلیل افزایش سوختن مواد لیگنوسلولزی و تبدیل فاز جامد به گاز، کاهش می‌یابد (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴). درصد کربن آلی بیوچار و مقادیر بخش‌های پایدار و ناپایدار آن به عوامل گوناگونی از جمله نوع ماده اولیه (ساختار فیزیکی و تراکم، ترکیبات شیمیایی و مواد معدنی، میزان کربن آلی آروماتیک)، درجه آروماتیکی (حلقوی) شدن کربن در طی فرایند پیرولیز، شرایط پیرولیز و عوامل محیطی مؤثر بر ماده اولیه بستگی دارد (۱۵ و ۱۶). با افزایش دمای فرایند پیرولیز، کربن نامحلول موجود در ماده اولیه (کربن قابل اکسید و تجزیه‌پذیر) کاهش یافته و میزان کربن آروماتیک (پایدار) در بیوچار افزایش می‌یابد (۱۷). بیوچار دارای کربن پایدار بیش‌تر، نرخ معدنی‌شدن بسیار پایینی دارد و جهت کاربرد در طرح‌های ترسب‌کربن مناسب‌تر است (۵). Han و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کرده‌اند که پایداری بیوچار مواد اولیه چوبی بیش‌تر از بقایای محصولات کشاورزی است و پایداری بیوچار تولید شده از کودهای حیوانی از پایداری بیوچارهای تولید شده از سایر مواد اولیه کم‌تر است (۱۵).

اسیدیته (pH) بیوچار، یکی از ویژگی‌های مهم شیمیایی آن است که با در نظر گرفتن کاربرد آن در خاک به‌صورت غیرمستقیم بر خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک از جمله کربن آلی، اسیدیته، تجمع و جذب مواد مغذی خاک، فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و هم‌چنین دسترسی ریشه به آب و مواد غذایی و در نهایت کیفیت و سلامت خاک تأثیر می‌گذارد (۱۴). اسیدیته بیوچار از ۵/۹ تا ۱۲/۳ (میانگین ۸/۹) متغیر است (۱۸). کاتیون‌های بازی کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم در بیوچار طی فرایند پیرولیز به مواد قلیایی مانند اکسیدها، هیدروکسیدها و کربنات‌های محلول تغییر می‌کنند. حل‌شدن این مواد سبب

خاصیت قلیایی بیوپچار می‌شود. پتانسیل بیوپچار در تغییر اسیدیته خاک به pH و میزان کاربرد آن وابسته است. اضافه کردن بیوپچار اسیدی به خاک‌های قلیایی ممکن است اسیدیته خاک را بهبود بخشد. نوع ماده اولیه و دمای فرایند پیرولیز نقش مهمی در خصوصیات بیوپچار ایفا می‌کنند. با افزایش دمای پیرولیز بیوپچار تولیدشده حاوی کربنات بیش‌تر و pH قلیایی‌تر می‌شود (۱۸).

هدایت الکتریکی (EC) بیوپچار براساس نوع ماده اولیه و شرایط پیرولیز دارای دامنه وسیعی (۰/۲-۱۲/۰۴ دسی‌زیمنس بر متر) است و از نظر تأثیر بر شوری خاک و فراهمی عناصر غذایی خاک فاکتور مهمی است. عموماً EC بیوپچار به دلیل دارا بودن نمک‌های محلول از EC خاک بیش‌تر است (۳)، بنابراین افزودن بیوپچار به خاک معمولاً موجب افزایش EC خاک می‌شود (۲، ۱۹ و ۲۰).

افزایش کربن آلی خاک، افزایش فراهمی مواد مغذی خاک، پایداری خاکدانه‌ها، افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک و غیره از پیامدهای افزودن بیوپچار به خاک اکوسیستم‌های طبیعی است که از دیدگاه اکوسیستمی منجر به افزایش کیفیت خاک، ترسیب کربن، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و متعاقب آن، منافع اقتصادی می‌گردد (۴، ۵، ۲۱ و ۲۲)، بنابراین در سال‌های اخیر به اصلاح خصوصیات بیوپچار به منظور افزایش کارایی و فواید حاصل از آن توجه خاصی شده است و تولید بیوپچار اصلاح شده دارای عملکرد بالاتر و حاوی کربن پایدار بیش‌تر، موضوع پژوهش بوده است (۵، ۹ و ۲۳). به بیوپچارهای اصلاح‌شده به منظور کاربردی خاص یا نیل به نتیجه‌ای به‌خصوص، بیوپچار مهندسی/طراحی‌شده (Engineered/designer biochar) گفته می‌شود. به منظور اصلاح خصوصیات بیوپچارها روش‌های مختلفی مانند تیمارهای اسیدی و بازی، آمیناسیون

(amination)، افزودن مواد فعال سطحی (surfactant)، اشباع با مواد جاذب معدنی، فعال‌سازی با بخار و اصلاح مغناطیسی به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۲۴). Nan و همکاران (۲۰۲۰) گزارش نمودند که افزودن نمک‌های معدنی KCl، NaCl، CaCl₂ و MgCl₂ به ماده اولیه، تثبیت کربن در بیوپچار تولیدشده از بیوماس گیاهی را افزایش می‌دهند (۲۳). Xiao و همکاران (۲۰۱۸) دریافتند که نمک‌های معدنی قلیایی CaCl₂ و MgCl₂ به همراه نمک معدنی اسیدی FeCl₃ باعث افزایش درصد عملکرد، کربن آلی و پایداری بیوپچار تولید شده از کود مرغی می‌شوند (۱۰). برخی مواد افزودنی شیمیایی دیگر از جمله ماده معدنی CaOH₂ (۱۷)، کلسیم‌دی‌هیدروژن فسفات (۲۵)، اسید فسفریک (۲۶ و ۲۷) و نمک آلی استات پتاسیم (۹) نیز باعث افزایش تثبیت کربن در بیوپچار می‌شوند. خواجوی شجاعی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که اصلاح بیوپچار با کلرید آهن، عملکرد، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت تبادل آنیونی و سطح ویژه آن را افزایش داده و pH آن را کاهش می‌دهد (۲۸).

ساقه پنبه ترکیب سلولز و لیگنین مناسبی برای تولید بیوپچار داشته، در دماهای پایین، عملکرد بالایی دارد (۷، ۲۱ و ۲۹) و به واسطه کربن ثابت (غیر فرار) بالا و سطح ویژه بزرگ، ماده اولیه مناسبی برای تولید اقتصادی بیوپچار است (۷). در هر هکتار مزرعه پنبه تقریباً ۲-۳ تن ساقه پنبه در سال تولید می‌شود که فاقد ارزش اقتصادی است و معمولاً در کشورهای کم‌تر توسعه‌یافته سوزانده می‌شود و آلودگی زیست‌محیطی را به دنبال دارد (۲۱ و ۳۰). چهار استان در شمال شرق ایران (خراسان‌های رضوی، شمالی، جنوبی و گلستان)، بیش از ۶۰ درصد پنبه کشور را تولید می‌کنند (۳۱). بنابراین ساقه پنبه مزارع این منطقه از کشور می‌تواند منبع ارزان قابل اتکایی برای تولید

بهینه جهت استفاده در پروژه‌های ترسیب کربن و اصلاح خاک مراتع قشلاقی جهت بوته‌کاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

ماده اولیه (ساقه پنبه) از مزارع پنبه خراسان شمالی جمع‌آوری شد و برخی ویژگی‌های آن (جدول ۱) اندازه‌گیری گردید (۲۵).

بیوپار باشد. نظر به وفور ساقه پنبه در منطقه شمال‌شرق ایران از یک طرف و محدودیت‌های اصلی خاک‌های مراتع قشلاقی ایران (کمبود کربن آلی، اسیدیته قلیایی و شوری) از طرف دیگر (۳۲ و ۳۳)، با توجه به اثرات مطلوب استفاده از نمک‌های کلرید کلسیم، کلرید منیزیم و کلرید آهن در بهبود خصوصیات بیوپار و نیز، عدم مطالعه اثر این نمک‌ها بر خصوصیات بیوپار تولید شده از ساقه پنبه در دماهای مختلف، پژوهش حاضر به‌منظور تولید بیوپار

جدول ۱- خصوصیات ماده اولیه (ساقه پنبه).

Table 1. Feed stock (Cotton stalk) properties.

جرم مخصوص ظاهری (g/cm ^۳) Bulk density (g/cm ^۳)	اسیدیته (۱:۲۰) pH (1:20)	لیگنین (%) Lignin (%)	همی سلولز (%) Hemicells (%)	سلولز (%) Cellulose (%)	ساقه پنبه Cotton stalk
0.21	7.63	22.60	37.70	35.30	

درصد عملکرد بیوپارهای تولیدشده با استفاده از رابطه ۱ به‌دست آمد:

$$Y=100 \cdot W_b \cdot W^{-1} \quad (1)$$

که در آن، W_b وزن بیوپار و W وزن ماده اولیه (ساقه پنبه) قبل از پیرولیز (۱۴).

کربن آلی بیوپارهای تولید شده به روش والکلی- بلک اندازه‌گیری شد. پایداری کربن بیوپار در برابر معدنی شدن با استفاده از روش اکسید شدن با دی‌کرومات‌پتاسیم مورد بررسی قرار گرفت. در این روش، تیتراسیون نهایی، میزان کربن ناپایدار بیوپار را که طی آزمایش، معدنی و اکسید شده است، مشخص می‌کند. بنابراین کربن آلی پایدار بیوپار از تفاوت بین کربن آلی کل و کربن آلی ناپایدار به‌دست آمد (۵ و ۱۳).

ماده اولیه تولید بیوپار پس از شستشو در آون (°C ۲۴/۶۰ ساعت) خشک شده (۱۴)، با دستگاه خردکن به قطعات کم‌تر از ۲ سانتی‌متر خرد گردید. سپس، در محلولی از آب مقطر و نمک‌های فلزی قلیایی کلرید کلسیم ($CaCl_2$) و کلرید منیزیم ($MgCl_2$) و نمک فلزی اسیدی کلرید آهن ($FeCl_3$) با غلظت ۲۰ درصد، به‌مدت ۴ ساعت غوطه‌ور شد و مجدداً به روش استاندارد خشک گردید (۱۰ و ۲۳). ساقه‌های پنبه تیمار شده با ۳ نمک‌فلزی به‌همراه ساقه‌های تیمار نشده (شاهد)، در ۵ دمای ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی در ظرف‌های مخصوص در بسته تحت شرایط بدون اکسیژن، با سرعت افزایش دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و مدت زمان ماندگاری ۲ ساعت در دمای موردنظر (روش پیرولیز آهسته) پیرولیز شدند (۸ و ۲۳).

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی ماده اولیه نقش مستقیمی در خصوصیات بیوچار تولیدی دارد. مواد آلی ماده اولیه (سلولز، همی سلولز و لیگنین) در دمای بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت تجزیه حرارتی قرار می‌گیرند. بنابراین مقدار این ترکیبات در ماده اولیه بر چگونگی شکل‌گیری خصوصیات بیوچار تولیدشده تأثیرگذار می‌باشد (۱۴). نتایج (جدول ۱) بیانگر آن است که درصد قابل‌ملاحظه‌ای از ساقه پنبه مورد استفاده را سلولز (۳۵/۳۰ درصد) و لیگنین (۲۲/۶۰ درصد) تشکیل می‌دهند که نشانگر مناسب بودن این ماده اولیه برای تولید بیوچار است (۲۱ و ۲۹). ساقه پنبه غنی از سلولز است و به ساختار فیبری چوب‌های سخت، نزدیک است (۳۴).

برای اندازه‌گیری اسیدیته و هدایت الکتریکی بیوچارهای تولیدشده، محلول یک به بیست بیوچار به آب مقطر تهیه شد و پس از یک ساعت هم زدن با دستگاه شیکر، این پارامترها توسط pH متر و EC متر قرائت شد (۱۰، ۱۷ و ۲۳).

اندازه‌گیری مقادیر سلولز و همی سلولز ساقه پنبه به روش اسید نیتریک و اندازه‌گیری مقدار لیگنین آن از طریق استاندارد T222om-98 انجام شد (۱۴).

جهت رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۰۳ و به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد. مقایسه میانگین خصوصیات مورد مطالعه از طریق تجزیه واریانس واریانس یک‌طرفه و با استفاده از آزمون توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام گردید.

جدول ۲- برخی خصوصیات بیوچارهای شاهد و مهندسی شده در دماهای مختلف.

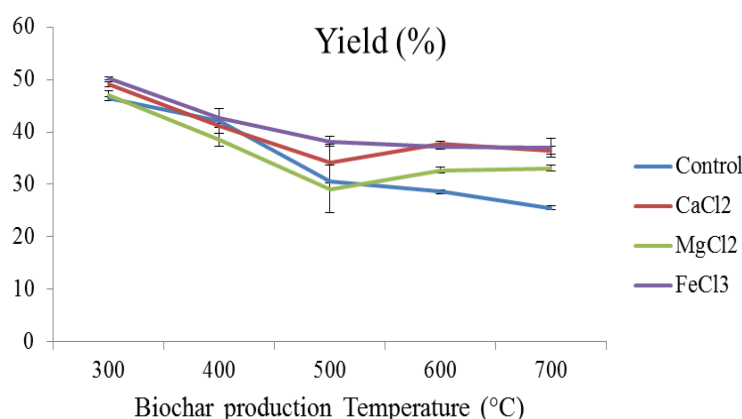
Table 2. Some characteristic of control and engineered biochars at different temperatures.

هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS/m)	اسیدیته Acidity (pH)	نسبت وزن کربن پایدار بیوچار به وزن ماده اولیه Biochar stable carbon ratio to feed stock (%)	کربن پایدار بیوچار Stable carbon (%)	کربن آلی بیوچار Biochar organic carbon (%)	درصد عملکرد Yield (%)	ماده افزودنی Additive	دما Temperature (°C)
1.10 ^a	8.57 ^{def}	36.07 ^{ab}	77.50 ^a	46.53 ^{ed}	46.40 ^{no}	Control	300
6.37 ^{gh}	8.60 ^{def}	32.77 ^a	79.20 ^a	41.37 ^{bcd}	49.07 ⁰	CaCl ₂	
4.20 ^{de}	8.97 ^{ef}	35.60 ^{ab}	77.47 ^a	46 ^{ed}	46.93 ^{no}	MgCl ₂	
3.33 ^{cd}	5.60 ^a	44.17 ^c	91.40 ^{bc}	48.37 ^{efg}	50.20 ^o	FeCl ₃	
1.73 ^a	9.10 ^{ef}	46.73 ^c	91.97 ^{bcd}	50.80 ^g	42.17 ^{hmn}	Control	400
7.10 ^{hm}	8.10 ^{bcd}	38.13 ^b	93.10 ^{bcd}	40.97 ^{bc}	41.20 ^{ghm}	CaCl ₂	
4.70 ^e	9.20 ^{ef}	44.50 ^c	90.70 ^b	49.03 ^{fg}	38.53 ^{ghm}	MgCl ₂	
3 ^c	6.80 ^{ab}	46.10 ^c	95 ^{cde}	48.53 ^{efg}	42.67 ^{mn}	FeCl ₃	
1.70 ^a	9.27 ^{ef}	46.87 ^c	92 ^{bcd}	50.97 ^g	30.50 ^{bc}	Control	500
6.03 ^{fg}	8.43 ^{def}	35.30 ^{ab}	95.80 ^{def}	36.87 ^a	34.17 ^{cdef}	CaCl ₂	
4.30 ^{de}	8.73 ^{ef}	44.60 ^c	97.27 ^{ef}	45.90 ^{ed}	29.10 ^{ab}	MgCl ₂	
3.37 ^{cd}	6.67 ^{ab}	47.03 ^c	99.07 ^f	47.50 ^{efg}	38.13 ^{ghm}	FeCl ₃	
1.83 ^{ab}	9.17 ^{ef}	46.50 ^c	97.17 ^{ef}	47.83 ^{efg}	29.60 ^{ab}	Control	600
6.93 ^{ghm}	8.40 ^{cdef}	35.73 ^{ab}	98.60 ^{ef}	36.27 ^a	37.67 ^{efgh}	CaCl ₂	
5 ^e	9.57 ^{ef}	46.83 ^c	98.97 ^f	47.30 ^{efg}	32.70 ^{bcd}	MgCl ₂	
4.57 ^e	6.90 ^{abc}	46.27 ^c	99.30 ^f	46.60 ^{ed}	37.23 ^{defg}	FeCl ₃	
2.80 ^{bc}	9.83 ^f	47.37 ^c	98.30 ^{ef}	48.20 ^{efg}	25.50 ^a	Control	700
7.43 ^m	9 ^{ef}	37.50 ^b	99.30 ^f	37.70 ^{ab}	36.50 ^{defg}	CaCl ₂	
5.03 ^{ef}	9.50 ^{ef}	44.47 ^c	99.37 ^f	44.77 ^{cde}	33.07 ^{bcd}	MgCl ₂	
4.47 ^e	7.17 ^{bcd}	45.10 ^c	99.57 ^f	45.30 ^{def}	36.93 ^{defg}	FeCl ₃	

۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تفاوت معنی‌داری بین درصد عملکرد بیوپچارهای مهندسی‌شده و شاهد مشاهده نگردید ($P > 0.05$). در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد عملکرد بیوپچار مهندسی‌شده با $MgCl_2$ به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) کم‌تر از بیوپچار شاهد بود اما عملکرد بیوپچار تیمار شده با $FeCl_3$ به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از بیوپچار شاهد بود. در دمای پیرولیز ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد عملکرد بیوپچارهای مهندسی‌شده با $CaCl_2$ و $FeCl_3$ به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از درصد عملکرد بیوپچار شاهد بود اما تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نگردید ($P > 0.05$). در دمای پیرولیز ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد عملکرد بیوپچارهای مهندسی‌شده با هر سه نمک فلزی مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از درصد عملکرد بیوپچار شاهد بود. تیمار کلرید آهن توانست درصد عملکرد بیوپچار را در همه دماها بهبود بخشد. این افزایش درصد عملکرد، در دماهای ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد معنی‌دار بود ($P < 0.05$).

Ververis و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که درصد سلولز ساقه پنبه مورد مطالعه‌شان (بیش از ۴۰ درصد) با درصد سلولز چوب درخت بادام و زیتون برابری می‌کند و درصد سلولز آن از کناف و نی بیش‌تر است (۲۹)، هم‌چنین Liu و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که درصد سلولز و لیگنین ساقه پنبه از کلش گندم و ذرت و هم‌چنین چوب انگور بیش‌تر بوده، درصد عملکرد آن تقریباً در همه دماها از مواد اولیه یادشده بیش‌تر بود (۵). در جدول ۲ نتایج اندازه‌گیری خصوصیات بیوپچارهای شاهد و مهندسی‌شده در دماهای مختلف آورده شده است.

عملکرد بیوپچار: با افزایش دمای پیرولیز در تمامی بیوپچارها (مهندسی‌شده و شاهد) روند کاهشی درصد عملکرد مشاهده شد. به‌طوری‌که با افزایش دما از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد درصد عملکرد بیوپچارهای شاهد از ۴۶/۴۰ به ۲۵/۵۰ درصد کاهش یافت. بالاترین عملکرد (۵۰/۲۰ درصد) در بیوپچار تیمارشده با $FeCl_3$ تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (جدول ۲ و شکل ۱). در دماهای پیرولیز



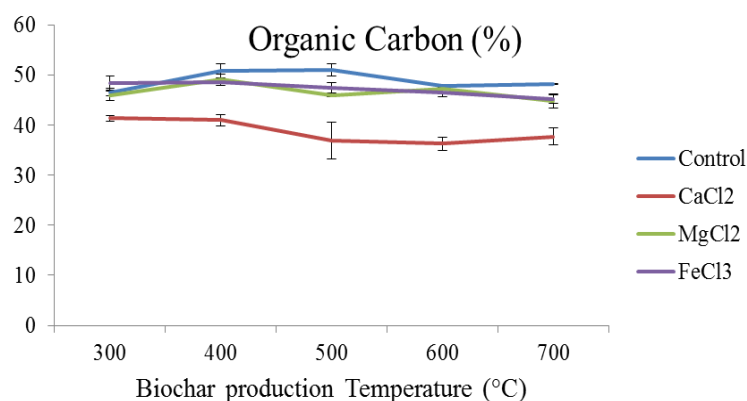
شکل ۱- اثر تغییرات دما بر درصد عملکرد بیوپچارهای شاهد و مهندسی‌شده.

Figure 1. Effect of temperature changes on Yield of control and engineered biochars.

He و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که ساقه پنبه نسبت به بقایای گندم و ذرت درصد عملکرد بیش‌تری دارد که با درصد عملکرد ساقه برنج برابری می‌کند. فاز گازی ناشی از پیرولیز آن نیز، کم‌تر از بقایای گندم، ذرت و ساقه برنج است (۳۵). ترکیبات اصلی ماده اولیه لیگنوسلولزی شامل سلولز، همی‌سلولز و لیگنین است که درصد متفاوت حضور این سه ترکیب در درصد عملکرد و خصوصیات کیفی بیوپچار مؤثر می‌باشد (۱۴). همی‌سلولز، مولکول‌های ساده‌تری دارد و در دمای پایین‌تری نسبت به سلولز و لیگنین تجزیه می‌شود. همی‌سلولز در دمای ۲۰۰-۳۰۰، سلولز در دمای ۳۰۰-۳۸۰ و لیگنین در دمای ۲۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌گردند (۵). درصد عملکرد بیوپچار پس از تیمار با نمک‌های فلزی عمدتاً به دلیل ایجاد اکسید و هیدروکسید فلزات و تشکیل مکان‌های جدید در سطح آن بهبود می‌یابد (۲۸). روند منظم کاهش عملکرد با افزایش دمای پیرولیز گزارش شده است (۱۱، ۱۳ و ۱۴). Al Afif و همکاران (۲۰۲۰) کاهش عملکرد بیوپچار مخلوط ساقه‌پنبه و لجن فاضلاب را با افزایش دما از ۳۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش نمودند و بیان نمودند که به علت عدم تجزیه حرارتی کامل سلولز و لیگنین در دماهای پایین‌تر آزادسازی گازهای فرار کم‌تر رخ می‌دهد، بنابراین بیوپچارهای تولیدشده در دماهای پایین‌تر، درصد عملکرد بالاتری دارند (۱۱). با افزایش دمای پیرولیز، فاز گازی فرایند پیرولیز (گازهای CO_2 ، CO و CH_4) و نیز، تجزیه بخشی از مولکول‌های آلی سنگین به مولکول‌های ساده افزایش می‌یابد و درصد عملکرد بیوپچار تولیدشده کاهش می‌یابد (۷ و ۳۵). دهیدراسیون گروه‌های هیدروکسیل در دماهای بالا و تراکم پایین

ترکیبات آلیفاتیک در بیوپچارهای تولیدشده در دماهای پایین از دلایل بالاتر بودن درصد عملکرد آن‌ها در مقایسه با بیوپچارهای تولیدشده در دماهای بالا است (۱۴). به واسطه گوناگونی نسبت اجزای اصلی مواد اولیه لیگنوسلولزی (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) و تفاوت درجه استحکام پیوندهای مولکول‌های آلی آن‌ها با سایر مولکول‌های غیرآلی، درصد عملکرد بیوپچارهای مواد اولیه مختلف در دماهای متفاوت، مقادیر گوناگونی دارد.

درصد کربن آلی: نتایج (جدول ۲ و شکل ۲) نشانگر آن است که درصد کربن آلی بیوپچار تیمار شاهد تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) کم‌تر از بیوپچارهای شاهد تولیدشده در سایر دماها است اما بین سایر بیوپچارهای شاهد تفاوت معنی‌داری وجود ندارد ($P > ۰/۰۵$). در دمای پیرولیز ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تفاوت معنی‌داری بین درصد کربن بیوپچارهای مهندسی‌شده و شاهد وجود ندارد ($P > ۰/۰۵$). درصد کربن بیوپچارهای تیمار شده با $MgCl_2$ در سایر دماها و بیوپچار تیمار شده با $MgCl_2$ در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) کم‌تر از تیمار شاهد است. بین درصد کربن بیوپچار تیمار شده با $FeCl_3$ و بیوپچار شاهد در هیچ کدام از دماهای مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید ($P > ۰/۰۵$). بیوپچار شاهد تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بالاترین درصد کربن (۵۰/۹۷ درصد) و بیوپچار تیمار شده با $CaCl_2$ تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای کم‌ترین درصد کربن آلی (۳۶/۲۷ درصد) بود.



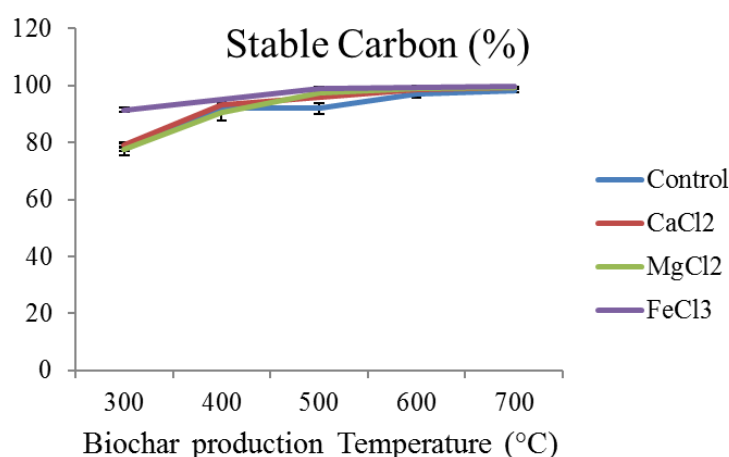
شکل ۲- اثر تغییرات دما بر درصد کربن آلی بیوچارهای شاهد و مهندسی شده.

Figure 2. Effect of temperature changes on OC (%) of control and engineered biochars.

متفاوت را می‌توان به ترکیب مختلف سلولز و لینگین، میزان تجزیه این سه جزء در مواد اولیه مختلف در دماهای گوناگون، میزان مواد فرار و ترکیبات آلی ساده در هر ماده اولیه، میزان مواد غیرآلی و معدنی هر ماده اولیه و همچنین نوع و میزان واکنش‌های بین مواد آلی و غیرآلی مواد اولیه در طی فرایند پیرولیز مرتبط دانست (۵ و ۷).

درصد کربن پایدار: نتایج (جدول ۲ و شکل ۳) نشانگر آن است که درصد کربن پایدار بیوچار تیمار شده با FeCl₃ در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (۹۱/۴۰ درصد) به‌طور معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) بیش‌تر از درصد کربن پایدار بیوچار شاهد (۷۷/۵۰ درصد) و بیوچارهای تیمار شده با سایر نمک‌های فلزی است. درصد کربن پایدار بیوچارهای تیمار شده با MgCl₂ و FeCl₃ در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (به ترتیب، ۹۷/۲۷ و ۹۹/۰۷ درصد) به‌طور معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) بیش‌تر از بیوچار شاهد (۹۲ درصد) تولید شده در آن دما بود. درصد کربن پایدار هیچ‌کدام از بیوچارهای مهندسی‌شده تولیدشده در دماهای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با درصد کربن پایدار بیوچار شاهد تولیدشده در آن دماها تفاوت معنی‌داری نداشت ($P > ۰/۰۵$).

Nan و همکاران (۲۰۲۰) و Xiao و همکاران (۲۰۱۸) افزایش تثبیت کربن در بیوچار کود حیوانی تیمار شده با کلرید کلسیم را گزارش کرده‌اند (۱۰ و ۲۳). با توجه به نتایج پژوهش حاضر، به‌نظر می‌رسد کلرید کلسیم توان جلوگیری از تجزیه و گسستگی پیوندهای آلی کربنی ساقه پنبه را ندارد و حتی به اکسیدشدن و معدنی‌شدن کربن آلی آن و خروج آن‌ها به‌صورت گاز کمک کرده است. علاوه بر این، با توجه به نتایج Nan و همکاران (۲۰۲۰) و Xiao و همکاران (۲۰۱۸) می‌توان چنین استنتاج نمود که کاربرد نمک فلزی کلرید کلسیم در تولید بیوچار از مواد آلی غیرلیگنوسلولزی مناسب‌تر است. روند تغییرات درصد کربن آلی بیوچارهای تولیدشده از مواد اولیه مختلف در دماهای متفاوت متغیر می‌باشد. Liu و همکاران (۲۰۲۰) گزارش نموده‌اند که با افزایش دما، درصد کربن بیوچار تولیدشده از پنج ماده اولیه مختلف افزایش یافته است (۵). محمودیان و همکاران (۲۰۲۰) و بهشتی و همکاران (۲۰۱۶) روند کاهشی منظمی در میزان کربن بیوچار تولید شده بر اثر افزایش دما از ۳۰۰ °C تا ۷۰۰ °C مشاهده کردند و درصد کربن بیوچار ۳۰۰ °C را بیش‌تر از دماهای دیگر گزارش نمودند (۱۲ و ۱۴). این روندهای

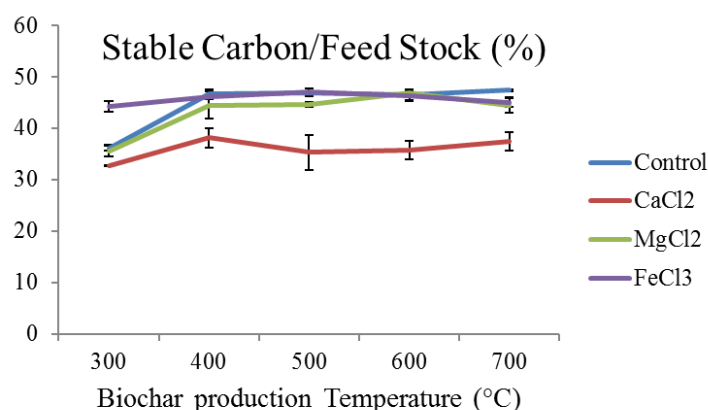


شکل ۳- اثر تغییرات دما بر درصد کربن پایدار بیوچارهای شاهد و مهندسی شده.

Figure 3. Effect of temperature changes on Stable carbon (%) of control and engineered biochars.

بیوچار شاهد تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) کمتر از بیوچارهای شاهد تولیدشده در دماهای بالاتر بود. کم‌ترین نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه (۳۲/۷۷ درصد) در بیوچار تیمارشده با کلرید کلسیم تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و بالاترین نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه (۴۷/۰۳ درصد) در بیوچار تیمارشده با کلرید آهن تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه در بیوچار تیمارشده با کلرید آهن تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (۴۴/۱۷ درصد) به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بالاتر از نسبت فوق‌الذکر در سایر بیوچارهای مهندسی‌شده و شاهد تولیدشده در این دما بود اما با بیوچارهای شاهد و مهندسی‌شده با کلرید آهن یا کلرید منیزیم تولیدشده در دماهای بالاتر تفاوت معنی‌داری نداشت ($P > 0.05$). شایان ذکر است که در تمامی دماهای مورد مطالعه، پایین‌ترین نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه در بیوچار تیمارشده با کلرید کلسیم مشاهده گردید.

برخی مواد معدنی موجود در ساختار شیمیایی بیوچار از جمله آهن و برخی ترکیبات آن از جمله اکسید آهن، باعث محافظت کربن آلی بیوچار در برابر اکسیداسیون می‌شوند. Xiao و همکاران (۲۰۱۸) بیان نموده‌اند که تشکیل اکسیدهای فلزی بر اثر افزودن نمک‌های فلزی به ماده اولیه باعث جلوگیری از اثر اکسیدکننده‌ها (اکسیدانت‌ها) و میکروارگانیسم‌ها برای اکسیدکردن کربن آلی می‌شوند (۱۰). بنابراین نسبت‌های هیدروژن به کربن (بیانگر فرایند آب‌زدایی) و اکسیژن به کربن (نشانگر واکنش‌های کربوکسیل‌زدایی) کاهش می‌یابند. هر دو نسبت شاخص آروماتیکی شدن بیوچار می‌باشند (۱۴). در بیوچارهای مهندسی‌شده با نمک‌های فلزی تجمع پیوندهای آروماتیک در محل حضور یون‌های فلزی مشهود است. این هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای حاوی کربن آلی تثبیت‌شده در بیوچار می‌باشد (۱۵).
نسبت وزن کربن پایدار بیوچار به وزن ماده اولیه: نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه در بیوچارهای شاهد دارای دامنه‌ای از ۳۶/۰۷ (دمای پیرولیز ۳۰۰ سانتی‌گراد) تا ۴۶/۸۷ درصد (دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) بود. این نسبت در

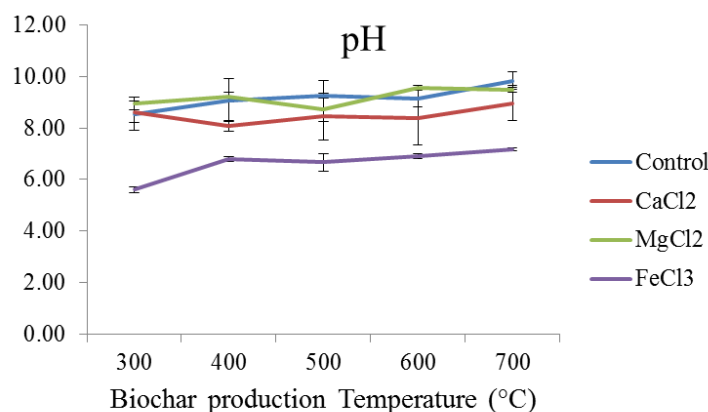


شکل ۴- اثر تغییرات دما بر نسبت وزن کربن پایدار به وزن ماده اولیه در بیوچارهای شاهد و مهندسی‌شده.

Figure 4. Effect of temperature changes on Stable carbon to Feed stock ratio of control and engineered biochars.

(به ترتیب، ۸/۵۷ و ۵/۶۰) و بیش‌ترین اسیدیته آن‌ها در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (به ترتیب، ۹/۸۳ و ۷/۱۷) به‌دست آمد. نتایج پژوهش حاضر نشانگر افزایش اسیدیته بیوچار تولیدشده در مقایسه با ماده اولیه آن (ساقه پنبه) و افزایش اسیدیته بیوچار با افزایش دمای فرایند پیرولیز می‌باشد (جدول ۲).

اسیدیته: تمامی بیوچارهای تولیدشده از ساقه پنبه تیمارشده با نمک اسیدی FeCl₃ در دماهای مختلف در مقایسه با بیوچارهای شاهد اسیدیته کم‌تری داشتند اما تیمار ساقه‌پنبه با نمک‌های قلیایی CaCl₂ و MgCl₂ به تفاوت معنی‌دار در اسیدیته آن‌ها با بیوچارهای شاهد منجر نشد. کم‌ترین اسیدیته بیوچارهای شاهد و مهندسی‌شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵- اثر تغییرات دما بر اسیدیته بیوچارهای شاهد و مهندسی‌شده.

Figure 5. Effect of temperature changes on pH of control and engineered biochars.

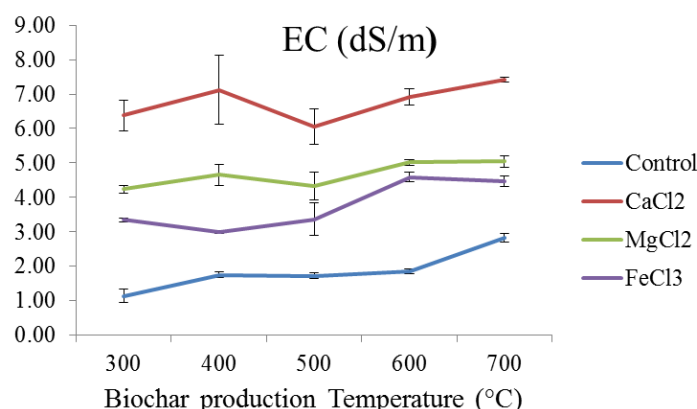
pH بیوچار تولیدشده از بقایای محصولات کشاورزی از pH بیوچار تولیدشده از مواد اولیه چوبی بیش‌تر است (۳۰). در دماهای بالاتر فرایند پیرولیز، اسیدیته بیوچار تولیدشده افزایش می‌یابد (۴). زلفی‌باوریانی و

Sun و همکاران (۲۰۲۲) دامنه تغییرات اسیدیته بیوچارهای مختلف را ۵/۹۰ تا ۱۲/۳۰ (میانگین ۸/۹۰) ذکر کرده‌اند (۱۸). Wang و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که به‌دلیل حضور عناصر قلیایی (Na و K)،

شایان ذکر است که کمبود آهن (عنصر بسیار کلیدی در ساخت کلروفیل و فرایندهای بیوشیمیایی گیاهان مانند فتوسنتز، تنفس سلولی، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و تشکیل آنزیم‌ها) در خاک یک مشکل جهانی است که بیش‌تر در خاک‌های آهکی و قلیایی ظاهر می‌شود (۲۵). بیوچار مهندسی‌شده با نمک کلرید آهن می‌تواند سبب افزایش فراهمی ترکیبات آهن‌دار در محیط ریشه گیاه و بهبود فرایندهای فیزیولوژیک در گیاه گردد.

هدایت الکتریکی: تیمار ساقه پنبه با نمک‌های قلیایی و اسیدی به افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) EC بیوچارهای تولیدشده در دماهای مختلف منجر شد (جدول ۲ و شکل ۶). بیش‌ترین افزایش EC در بیوچارهای تیمارشده با CaCl_2 و کم‌ترین افزایش EC در بیوچارهای تیمارشده با FeCl_3 مشاهده گردید. دامنه تغییرات EC بیوچارهای شاهد از ۱/۱ (دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) تا ۲/۸۰ dS/m (دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) و دامنه تغییرات EC بیوچارهای تیمارشده با FeCl_3 از ۳ (دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) تا ۴/۵۷ (دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) بود.

همکاران (۲۰۱۶)، کم‌تر بودن pH بیوچار تولیدشده در دماهای پایین‌تر را به تولید اسیدهای آلی و ترکیبات منفی ناشی از تجزیه اولیه سلولز و همی‌سلولز مربوط می‌دانند (۲۲). از سوی دیگر، با افزایش دما افزایش نسبی فلزات قلیایی و کربنات‌ها و کاهش محتوی اسیدهای آلی شامل گروه‌های اسیدی اکسیژن‌دار سطحی (شامل اسید فنولیک، اسید کربوکسیلیک و اسید لاکتونیک) اتفاق می‌افتد (۳۶). پریچره و همکاران (۲۰۱۷) توانستند با اسیدی‌کردن بیوچارهای کلش برنج و چوب نراد، اسیدیته آن‌ها را به میزان ۳/۲ و ۱/۹ واحد کاهش دهند و از آن‌ها جهت اصلاح خاک‌های شور- سدیمی استفاده نمایند (۲۰). Zhao و همکاران (۲۰۱۷) توانستند با افزودن اسید فسفریک به ضایعات درخت کاج، بیوچار مهندسی‌شده‌ای تولید کنند که علاوه بر درصد کربن پایدار، pH آن را از ۷/۱۲ به ۶/۵۰ تا ۶ (در دماهای مختلف) کاهش دهند (۲۷). با توجه به قلیایی بودن اغلب خاک‌های مراتع قشلاقی در ایران، بالا بودن pH بیوچار می‌تواند نقطه ضعف مهمی در راستای کاربرد آن در مراتع قشلاقی محسوب شود. تولید بیوچارهای مهندسی‌شده با pH پایین‌تر از طریق تیمار مواد اولیه با نمک‌های فلزی مانند کلرید آهن می‌تواند راه‌حل این مشکل باشد.



شکل ۶- اثر تغییرات دما بر هدایت الکتریکی بیوچارهای شاهد و مهندسی‌شده.

Figure 6. Effect of temperature changes on EC of control and engineered biochars.

تقدیر و تشکر

از آزمایشگاه خاک‌ها و بذور مرتعی دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تشکر و قدردانی می‌شود.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این مقاله مستخرج از رساله دکتری آقای ابراهیم محمودی بوده و در سال ۱۴۰۱ در آزمایشگاه خاک‌ها و بذور مرتعی دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تولید شده‌اند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان مقاله در تمامی مراحل تهیه آن از ایده‌پردازی تا تجزیه و تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله شرکت داشته‌اند.

اصول اخلاقی

همه نویسندگان مقاله در انجام و انتشار پژوهش حاضر، رعایت اصول اخلاقی را نموده‌اند.

حمایت مالی

پژوهش حاضر، با استفاده از گرنت دانشجویی آقای ابراهیم محمودی انجام شده است.

Almutairi و همکاران (۲۰۲۳) دامنه تغییرات

EC بیوچارهای مختلف را ۰/۲ تا ۱۲/۰۴ دسی‌زیمنس بر متر گزارش نمودند (۱۹). به‌طورکلی تبدیل مواد آلی به بیوچار، بسته به نوع ماده اولیه موجب افزایش شوری آن‌ها می‌شود. افزایش EC بیوچار نسبت به ماده اولیه آن با افزایش دمای تولید به‌دلیل تشدید تخریب ساختارهای مواد اولیه و آزاد شدن برخی از عناصر ساختمانی و خروج مواد فرار رخ می‌دهد (۳۷).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به محدودیت‌های موجود در خاک مراتع قشلاقی ایران (کمبود ماده آلی، شوری و قلیایی بودن خاک) و خصوصیات بیوچارهای شاهد و مهندسی شده به همراه انرژی لازم (دمای فرایند پیرولیز) برای تولید آن‌ها، بیوچار تولید شده از ماده اولیه آغشته به نمک کلرید آهن در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین درصد عملکرد را داشته و پایداری بالایی در برابر اکسیدکننده‌ها دارد و بنابراین، به‌منظور استفاده در پروژه‌های ترسیب کربن در مراتع قشلاقی ایران توصیه می‌شود. علاوه بر آن pH آن نیز اسیدی بوده، می‌تواند اثرات مثبتی در بهبود اسیدیته خاک‌های قلیایی و افزایش فراهمی عناصر غذایی داشته باشد. EC بیوچار فوق‌الذکر نیز کم‌تر از حد بحرانی ۴ dS/m است و بنابراین مضاف بر ترسیب کربن، استفاده از آن در اصلاح خصوصیات خاک مراتع قشلاقی به‌منظور بوته‌کاری نیز پیشنهاد می‌گردد.

منابع

1. Ehsani, S. M., Niknahad-Gharmakher, H., Motamedi, J., Akbarlou, M., & Karkaj, E. S. (2021). Effect of Wheat Straw Biochar and Lignite on Nutritional Value of *Nitraria schoberi* and *Astragalus podolobus* in Greenhouse Condition. *Journal of Rangeland Science*. 11 (1), 44-53.
2. El-Naggar, A., El-Naggar, A. H., Shaheen, S. M., Sarkar, B., Chang, S. X., Tsang, D. C. W., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2019). Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: a review. *Journal of environmental management*. 241, 458-467.
3. Hossain, M. Z., Bahar, M. M., Sarkar, B., Donne, S. W., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Kirkham, M. B., Chowdhury, S., & Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*. 2, 379-420.
4. Khademi, F. M., & Mahmoudabadi, M. (2018). The Effect of Different Pistachio Wastes Biochar Application on Some Fertility Properties of a Loam Soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50 (1), 231-246. [In Persian]
5. Liu, B., Liu, Q., Wang, X., Bei, Q., Zhang, Y., Lin, Z., Liu, G., Zhu, J., Hu, T., Jin, H., Wang, H., Sun, X.M., Lin, X., & Xie, Z. (2020). A fast chemical oxidation method for predicting the long-term mineralization of biochar in soils. *Science of the Total Environment*. 718, 137390.
6. Chu, G., Zhao, J., Huang, Y., Zhou, D., Liu, Y., Wu, M., & Steinberg, C. E. (2018). Phosphoric acid pretreatment enhances the specific surface areas of biochars by generation of micropores. *Environmental Pollution*. 240, 1-9.
7. Chen, L., Wang, X., Yang, H., Lu, Q., Li, D., Yang, Q., & Chen, H. (2015). Study on pyrolysis behaviors of non-woody lignins with TG-FTIR and Py-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 113, 499-507.
8. Li, F., Gui, X., Ji, W., & Zhou, C. (2020). Effect of calcium dihydrogen phosphate addition on carbon retention and stability of biochars derived from cellulose, hemicellulose, and lignin. *Chemosphere*. 251, 126335.
9. Mašek, O., Buss, W., Brownsort, P., Rovere, M., Tagliaferro, A., Zhao, L., Gao, X., & Xu, G. (2019). Potassium doping increases biochar carbon sequestration potential by 45%, facilitating decoupling of carbon sequestration from soil improvement. *Scientific reports*. 9 (1), 1-8.
10. Xiao, R., Wang, J. J., Gaston, L. A., Zhou, B., Park, J. H., Li, R., Dodla, S. K., & Zhang, Z. (2018). Biochar produced from mineral salt-impregnated chicken manure: Fertility properties and potential for carbon sequestration. *Waste Management*. 78, 802-810.
11. Al Afif, R., Anayah, S. S., & Pfeifer, C. (2020). Batch pyrolysis of cotton stalks for evaluation of biochar energy potential. *Renewable Energy*. 147, 2250-2258.
12. Beheshti, M., Alikhani, H., Motesharezade, B., & Mohammadi, L. (2016). Quality Variations of Biochar Produced from Cow Manure during Slow Pyrolysis Process and at Different Temperatures. 47 (2), 259-267.
13. Beheshti, M., & Alikhani, H. (2016). Changes in quality of wheat straw produced during slow pyrolysis process at different temperatures. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 26 (2), 189-201.
14. Mahmoudian Choplou, A., Niknahad Gharmakher, H., & Yousefi, H. (2020). Biochar production from peach trees pruned foliage and its qualitative properties at different temperatures. *Journal of Water and Soil Conservation*. 27 (3), 105-124. [In Persian]
15. Han, L., Sun, K., Yang, Y., Xia, X., Li, F., Yang, Z., & Xing, B. (2020). Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon. *Geoderma*. 364, 114184.
16. Leng, L., & Huang, H. (2018). An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresource Technology*. 270, 627-642.

17. Ren, N., Tang, Y., & Li, M. (2018). Mineral additive enhanced carbon retention and stabilization in sewage sludge-derived biochar. *Process Safety and Environmental Protection*. 115, 70-78.
18. Sun, Z., Hu, Y., Shi, L., Li, G., Pang, Z., Liu, S., Chen, Y., & Jia, B. (2022). Effects of biochar on soil chemical properties: A global meta-analysis of agricultural soil. *Plant, Soil and Environment*. 68 (6), 272-289.
19. Almutairi, A. A., Ahmad, M., Rafique, M. I., & Al-Wabel, M. I. (2023). Variations in composition and stability of biochars derived from different feedstock types at varying pyrolysis temperature. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 22 (1), 25-34.
20. Parichehreh, M., SadeghZadeh, F., Bahmanyar, M., & Ghajar Sepanlu, M. (2017). Effects of Rice Straw and Dicer Biochars on Chemical Characteristics of Clay-Loam, Saline- Sodic soil. *Water and Soil Science*. 27 (4), 49-61.
21. Schaffer, S., Pröll, T., Al Afif, R., & Pfeifer, C. (2019). A mass-and energy balance-based process modelling study for the pyrolysis of cotton stalks with char utilization for sustainable soil enhancement and carbon storage. *Biomass and Bioenergy*. 120, 281-290.
22. Zolfi Bavariani, M., Ronaghi, N., Karimian, N., & Yasrebi, J. (2016). Effect of Poultry Manure Derived Biochars at Different Temperatures on Chemical Properties of a Calcareous Soil. *Water and Soil Science*. 20 (75), 73-86. [In Persian]
23. Nan, H., Zhao, L., Yang, F., Liu, Y., Xiao, Z., Cao, X., & Qiu, H. (2020). Different alkaline minerals interacted with biomass carbon during pyrolysis: Which one improved biochar carbon sequestration. *Journal of Cleaner Production*. 255, 120162.
24. Rajapaksha, A. U., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., Gao, B., Bolan, N. S., & Ok, Y. S. (2016). Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: Potential and implication of biochar modification, *Chemosphere*. 148, 276-291.
25. Khallizadeh, J., Dordipour, E., Baranimotlagh M., & Gharanjiki A. (2020). Effect of iron impregnated wheat straw and particleboard biochar on the iron uptake and growth of two soybean cultivars in a calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable*. 10 (1), 83-100. [In Persian]
26. Cheng, J., Hu, S. C., Sun, G. T., Geng, Z. C., & Zhu, M. Q. (2021). The effect of pyrolysis temperature on the characteristics of biochar, pyroligneous acids, and gas prepared from cotton stalk through a polygeneration process. *Industrial Crops and Products*. 170, 113690.
27. Zhao, L., Zheng, W., Mašek, O., Chen, X., Gu, B., Sharma, B. K., & Cao, X. (2017). Roles of phosphoric acid in biochar formation: synchronously improving carbon retention and sorption capacity. *Journal of environmental quality*. 46 (2), 393-401.
28. Khajavi-Shojaei, Sh., Moezze, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi-Zahedkolaei, M. (2020). Evaluation of Nitrate Sorption Potential from Aqueous Solution Using Common Reed-Iron Modified Biochar. *Journal of Water and Soil Conservation*. 51 (11), 2853-2864. [In Persian]
29. Ververis, C., Georghiou, K., Christodoulakis, N., Santas, P., & Santas, R. (2004). Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial crops and products*. 19 (3), 245-254.
30. Wang, Z., Xie, L., Liu, K., Wang, J., Zhu, H., Song, Q., & Shu, X. (2019). Co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. *Waste Management*. 89, 430-438.
31. Sakhi, F., Mohammadi, H., & Fatahi Ardakanii, A. (2020). Effective factors on the type of sale contract of agricultural products (case study: cotton product of Gonbad Kavous city). *Journal of Agricultural Economics Research*. 12 (45), 1-24. [In Persian]

32. Arrekhi, A., Niknahad Gharmakher, H., Bachinger, J., Bloch, R., & Hufnagel, J. (2021). Forage Quality of *Salsola turcomanica* (Litv) in Semi-arid Region of Gomishan, Golestan Province, Iran. *Journal of Rangeland Science*. 11 (1), 76-88.
33. Niknahad Gharmakher, H., & Sharifiyan Bahraman, A. (2017). The impacts of Atriplex plantation from the viewpoint of stockholders. *Environmental Resources Research*. 5 (1), 89-99.
34. Ahmed, F. A., Abdel-Moein, N. M., Mohamed, A. S., & Ahmed, S. E. (2010). Biochemical studies on some cotton by products Part I-Chemical constituents and cellulose extraction of Egyptian cotton stalks. *Journal of American Science*. 6 (12), 1306-1313.
35. He, X., Liu, Z., Niu, W., Yang, L., Zhou, T., Qin, D., Niu, Z., & Yuan, Q. (2018). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of gas and biochar obtained from pyrolysis of crop residues. *Energy*. 143, 746-756.
36. Wang, Y., Hu, Y., Zhao, X., Wang, S., & Xing, G. (2013). Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times. *Energy and Fuels*. 27 (10) 5890-5899.
37. Tavakoly, E., Ghasemi, A., & Motaghian, H. (2023). The Effect of Walnut Wood Biochar and Bentonite on Electrical Conductivity and Soil Permeability. *J. of New Researches in Sustainable Water Engineering*. 1 (2), 145-157. [In Persian]