Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

The role of biochar on soil fertility and crop productivity in arid and semi-arid regions: Challenges and opportunities

Yaser Azimzadeh[1]✉

1. Natural Resources Management Research, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran. E-mail: yaser.azimzadeh@gmail.com

Article Info

Article type: Review Article

Article history:

Received: July. 8, 2023

Revised: Sep. 4, 2023

Accepted: Sep. 18, 2023

Published online: Nov. 22, 2023

Keywords:
Carbon Sequestration,
Organic Carbon,
Rainfall,
Soil Organic Matter.

ABSTRACT

More than 80% of Iran's area is arid and semi-arid. Arid and semi-arid soils have various problems and limitations. One of the most important factors limiting soil fertility and crop production in these areas is the lack of soil organic matter (SOM). In more than 60% of Iran's agricultural lands, the amount of SOM is less than 1%; While its optimal level in soils should be 2-3%. SOM, as one of the most important indicators of soil health, plays a vital role in soil fertility and crop production; So, by increasing the amount of SOM, the physical, chemical, and biological characteristics of the soil and crop yield can be improved. However, the stability and residual effects of the fertilizers and organic wastes in the soil are low. Nowadays, converting organic wastes and residues into biochar and adding them to the soil is one of the new methods of increasing soil organic carbon, which enhance soil fertility and crop yield and has high residual effects due to its high stability. However, due to the specific characteristics of the soils of arid and semi-arid regions, using biochar in these regions is associated with challenges and has received less attention. In this review article, while reviewing the positive effects of biochar on soil quality indicators and crop production, the challenges of using biochar in the soils of arid and semi-arid areas, especially in drylands, and the solutions to overcome these challenges have been reviewed.

Cite this article: Azimzadeh, Y. (2023). The role of biochar on soil fertility and crop productivity in arid and semi-arid regions: Challenges and opportunities, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (9),1337-1362. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361817.669530

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361817.669530

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۹ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

نقش بیوچاردر حاصلخیزی خاک و بهره‌وری محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک: چالش‌ها و فرصت‌ها

یاسر عظیم‌زاده[۱]✉

۱. بخش تحقیقات مدیریت منابع، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران.

رایانامه: yaser.azimzadeh@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۶/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۹/۱

واژه‌های کلیدی:
ترسیب کربن،
دیم،
کربن آلی،
مواد آلی خاک.

چکیده

بیش از ۸۰ درصد از مساحت ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند. خاک‌های خشک و نیمه‌خشک دارای مشکلات و محدودیت‌های متعددی هستند. یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده حاصلخیزی خاک و تولید محصول در این مناطق، کمبود مواد آلی خاک است. در بیش از ۶۰ درصد از اراضی کشاورزی ایران، میزان کربن آلی خاک کمتر از یک درصد است؛ در حالی که حد مطلوب آن در خاک ۳-۲ درصد می‌باشد. مواد آلی خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سلامت خاک، نقش محوری در حاصلخیزی خاک و تولید محصول دارند؛ به‌طوری که با افزایش میزان مواد آلی خاک می‌توان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را بهبود بخشید و عملکرد گیاه را افزایش داد. با این حال، پایداری و اثر باقی‌مانده کودها و مواد زائد آلی در خاک کم است. امروزه تبدیل انواع بقایای آلی به بیوچار و افزودن آن به خاک، از روش‌های نوین افزایش کربن آلی خاک به شمار می‌رود. این روش، علاوه‌بر افزودن کربن آلی و بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش عملکرد محصول، به‌دلیل پایداری بسیار زیاد، دارای اثرهای باقی‌مانده زیادی در خاک می‌باشد. با این حال، به‌دلیل ویژگی‌های خاص خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، به کار بردن بیوچار در این مناطق با چالش‌هایی همراه بوده و کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، ضمن مرور اثرات مثبت بیوچار بر شاخص‌های کیفی خاک و تولید محصول، چالش‌های کاربرد بیوچار در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه دیم‌زارها و راهکارهای برطرف نمودن این چالش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

استناد: عظیم زاده، یاسر (۱۴۰۲). نقش بیوچاردر حاصلخیزی خاک و بهره‌وری محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک: چالش‌ها و فرصت‌ها، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۹)، ۱۳۶۲-۱۳۳۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361817.669530

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361817.669530

مقدمه

بیش از ۴۰ درصد از کل اراضی دنیا را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد (Shi *et al.*, 2019). این مناطق بیشتر در بخش‌هایی از شمال و جنوب آفریقا، منطقه خاورمیانه و شمال و جنوب آمریکا و استرالیا گسترده شده‌اند و از این میان، بیش از ۹۵ درصد از خاک‌های نواحی خشک و نیمه‌خشک در آفریقا و منطقه خاورمیانه واقع شده‌اند (Sirjani *et al.*, 2019). با توجه به این که کشور ایران در منطقه خاورمیانه و کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده است، بیش از ۸۰ درصد از مساحت آن را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد (رضیئی، ۱۳۹۴). مناطق با میانگین بارندگی سالیانه بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر جزء نواحی خشک و مناطق با میانگین بارندگی سالیانه ۲۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر جزء نواحی نیمه‌خشک محسوب می‌شوند (D'Odorico *et al.*, 2019). در خاک‌های اراضی خشک و نیمه‌خشک چالش‌های زیادی منجر به کاهش تولید می‌شود؛ از جمله این که در این نواحی، معمولاً خاک‌ها دارای بافت سبک و شنی با مواد آلی و عناصر غذایی کم بوده و فعالیت زیستی خاک و خاکدانه‌سازی ضعیف بوده و خاک مستعد فرسایش آبی و بادی می‌باشد (Sirjani *et al.*, 2019). همچنین، مواد معدنی ثانویه مانند کلسیت و جیپسیت در این خاک‌ها معمولاً زیاد بوده و وجود این مواد معدنی در مقادیر زیاد می‌تواند حاصلخیزی خاک را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (Marques *et al.*, 2020). مواد مادری کربناته و سولفاته و آبشویی کم منجر به تجمع کربنات‌ها، سولفات‌ها و سایر نمک‌های محلول شده و منجر به شور شدن این خاک‌ها می‌شود (Parida & Das, 2005). از دیگر محدودیت‌های خاک‌های اراضی خشک و نیمه‌خشک می‌توان سدیمی بودن، شور و سدیمی بودن، عمق و تکامل کم، وجود سخت لایه‌های محدودکننده و کمبود رطوبت خاک را نام برد. با این حال، از میان تمام این چالش‌ها، فقر مواد آلی به‌ویژه در خاک‌های با درصد رس کم را می‌توان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین محدودیت‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک در نظر گرفت (ملکوتی و همائی، ۱۳۸۲)؛ زیرا مواد آلی خاک به‌عنوان دروازه حاصلخیزی خاک شناخته می‌شوند و با افزایش میزان مواد آلی، می‌توان فعالیت زیستی را بهبود داده و بستر را برای افزایش حاصلخیزی خاک فراهم کرد.

امروزه از روش‌های مختلفی برای افزایش مواد آلی خاک استفاده می‌شود که از آن‌جمله می‌توان به برگرداندن بقایای گیاهی به خاک، استفاده از تناوب زراعی مناسب، خاک‌ورزی حداقل یا بی‌خاک‌ورزی، افزودن انواع کودهای آلی مانند کودهای دامی و مرغی، کمپوست، لجن فاضلاب و یا کود سبز اشاره کرد. مواد آلی بعد از افزوده شدن به خاک، دارای اثرات مثبت مستقیم و غیرمستقیم بوده و ضمن افزودن مستقیم برخی از عناصر غذایی، با افزایش کربن آلی، حاصلخیزی خاک را بهبود می‌بخشند. با این حال، بسیاری از مواد آلی به دلیل سرعت تجزیه و تخریب زیاد، دارای عمر و ماندگاری چندانی نبوده و اثرات باقی‌مانده کمی دارند و برای حفظ اثرات مثبت آنها، باید به‌طور مداوم به خاک افزوده شوند. علاوه‌برآن، برخی از این مواد آلی دارای بذور علف‌های هرز و برخی دیگر دارای عوامل بیماری‌زای زنده (انواع میکروب‌ها) و غیرزنده (انواع آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین) هستند. بوی نامطبوع برخی از این ترکیبات نیز کاربرد آنها را با محدودیت مواجه می‌سازد (قربانپور و همکاران، ۱۳۹۹).

در سال‌های اخیر فناوری تبدیل انواع مواد زاید آلی به نوعی ماده جامد زغال‌مانند غنی از کربن به نام بیوچار توجه دانشمندان علوم کشاورزی و زیست‌محیطی را به خود جلب کرده است. بیوچار از حرارت دادن زیست‌توده‌های آلی در شرایط عدم حضور اکسیژن و یا اکسیژن محدود در دماهای ۳۰۰ الی ۷۰۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود و به‌دلیل داشتن کربن آروماتیک، برای صدها تا هزاران سال در خاک پایدار می‌ماند. همچنین، به‌دلیل داشتن ساختمان متخلخل، سطح ویژه زیاد و انواع گروه‌های عاملی، دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که بر مزایای کاربرد آن در خاک می‌افزاید (Xie *et al.*, 2022). فناوری تبدیل زیست‌توده به بیوچار، گرماکافت نامیده می‌شود. سرعت افزایش و میزان حداکثر دما و مدت زمان حرارت‌دهی با دمای حداکثر، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل دمایی گرماکافت به شمار می‌روند که همراه با نوع زیست‌توده مورد استفاده، ویژگی‌های بیوچار تولیدی را تعیین می‌کنند. در فرآیند گرماکافت هرچه میزان اکسیژن مخزن زیست‌توده کمتر و خروج گازهای تولید شده بیشتر باشد، کیفیت بیوچار تولید شده نیز بیشتر خواهد بود. در صورتی که برای حرارت دادن زیست‌توده به جای فرآیند گرماکافت از فرآیند کربونیزه شدن گرمآبی استفاده شود، محصول تولیدی هیدروچار نامیده می‌شود که یک ماده جامد کربنی بوده و بیشتر دارای مصارف صنعتی و زیست‌محیطی است. در این فرآیند، زیست‌توده به صورت مخلوط با آب در داخل یک مخزن آب‌بندی‌شده حرارت داده می‌شود. با افزایش دما، فشار نیز به‌تدریج افزایش یافته و در یک دما و فشار مشخص و ثابت، حرارت‌دهی برای چند ساعت ادامه می‌یابد. میزان حداکثر دما و فشار، مدت زمان حرارت‌دهی با دمای حداکثر، نسبت زیست‌توده به آب و نوع زیست‌توده، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ویژگی‌های هیدروچار تولید شده هستند (عظیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹). بیوچار می‌تواند ضمن افزودن مستقیم برخی از عناصر غذایی، با تحت‌تأثیر قرار دادن ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، حاصلخیزی را بهبود داده و رشد و عملکرد محصول را افزایش

دهد (Abed Hussein *et al*., 2022). به‌عنوان مثال، کریمی و همکاران (۱۳۹۹) گزارش کردند که افزودن بیوچار تولید شده از باگاس نیشکر در دماهای ۲۰۰ الی ۵۰۰ درجه سلسیوس به مقدار ۱ و ۲ درصد وزنی به یک خاک آهکی، سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC[1])، کربن آلی و فسفر و پتاسیم قابل‌جذب خاک شد. همچنین، تنفس میکروبی، تنفس برانگیخته با سوبسترا، کربن زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و کاتالاز را نیز افزایش داد و شدت این تغییرات با افزایش مقدار بیوچار مورد استفاده افزایش یافت. علاوه‌بر آن، طی فرآیند گرماکافت، زیست‌توده تقریباً به یک ماده استریل (بیوچار) تبدیل شده و بذور علف‌های هرز، عوامل بیماری‌زا و حتی بوی نامطبوع برخی از زیست‌توده‌ها از بین می‌رود (Chang *et al*., 2020).

اگرچه مطالعات اولیه بیوچار در مناطق مرطوب و در خاک‌های هوازده انجام شده است ولی این ماده قابلیت کاربرد در طیف وسیعی از خاک‌ها و اقلیم‌های مختلف ازجمله مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (Arfaoui *et al*., 2019). به‌عنوان مثال، مصباح و همکاران (۱۴۰۰) با افزودن ۴ و ۸ تن در هکتار بیوچار به خاک، عملکرد کمی و کیفی گیاه توتون را در شرایط دیم مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که کاربرد ۴ تن بیوچار در هکتار سبب افزایش عملکرد ماده خشک و درصد نیکوتین گیاه توتون شد. همچنین، عباسپور و همکاران (۱۳۹۸) بیوچار تولید شده از چوب گردو در دمای ۴۰۰ الی ۶۵۰ درجه سلسیوس را به مقدار ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار به خاک افزوده و مشاهده کردند که کاربرد بیوچار، نیتروژن کل خاک را کاهش و مواد آلی و کربن زیست‌توده میکروبی را افزایش داد. کاربرد بیوچار همچنین باعث افزایش کارایی مصرف آب و کارایی مصرف کود شیمیایی NPK توسط گیاه سیاهدانه شد. حسن‌پور و همکاران (۱۴۰۱) بیوچارهای تولید شده از مخروط کاج و شلتوک برنج را در مقادیر ۱، ۳ و ۶ درصد وزنی به دو نوع خاک آهکی با بافت‌های متفاوت (شنی و لوم رسی) افزودند و مشاهده کردند بعد از ۶ ماه، هر دو بیوچار توانستند در هر دو نوع خاک، pH را کاهش و قابلیت هدایت الکتریکی، میزان کربن آلی، نیتروژن کل و غلظت فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز قابل‌جذب خاک را افزایش دهند. بیوچار به‌دلیل این که می‌تواند کربن آلی و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش و اثرات منفی خشکی را کاهش دهد، به‌ویژه برای کاربرد در مناطق خشک بسیار حائز اهمیت است. در این رابطه، محدثی و همکاران (۱۴۰۲) بیوچار تولید شده از ضایعات حاصل از هرس درختان انار را به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار به یک خاک آهکی افزوده و خصوصیات مورفولوژیکی گیاه گل مغربی را در سه سطح تنش خشکی شامل ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه بررسی و گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی شدید، کاربرد ۳۰ تن بیوچار در هکتار سبب کاهش نسبت ریشه به اندام هوایی شد. همچنین با کاربرد بیوچار، محتوای نسبی آب برگ افزایش و نشت یونی کاهش یافت. آنان نتیجه گرفتند که بیوچار با افزایش فراهمی عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک، مقاومت گیاه به تنش خشکی را افزایش می‌دهد. پتانسیل اثرات بیوچار بر ویژگی‌های خاک و تولید محصول، به نوع زیست‌توده، شرایط فرآیند گرماکافت و فرآیندهای قبل و بعد از گرماکافت وابسته است (سیدی و همکاران، ۱۴۰۱). بسته به ویژگی‌های بیوچار، مقدار توصیه شده توسط مؤسسه بین‌المللی بیوچار (IBI[2]) ۵ تا ۵۰ تن در هکتار است (Jirka & Tomlinson, 2015). نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که بیوچار به‌دلیل ساختار آروماتیک، در برابر فرآیندهای تجزیه و تخریب زیستی و غیرزیستی پایداری بسیار زیادی دارد؛ بنابراین می‌تواند به‌عنوان یک مخزن برای کربن عمل کرده و کربن اتمسفر را برای سالیان زیادی در خاک تثبیت نماید (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۶). علاوه‌بر آن، بیوچارمی‌تواند عناصر غذایی را جذب و نگهداری کرده و ضمن جلوگیری از آبشویی و هدررفت، آنها را در اختیار گیاه قرار دهد. همچنین بیوچار به‌دلیل ساختمان متخلخل، سطح ویژه زیاد و گروه‌های عاملی متنوع، با تأمین رطوبت، عناصر غذایی و کربن فراهم، محیط مناسبی برای فعالیت ریزجانداران خاک فراهم کرده و فعالیت زیستی خاک را بهبود می‌دهد (Diatta *et al*., 2020).

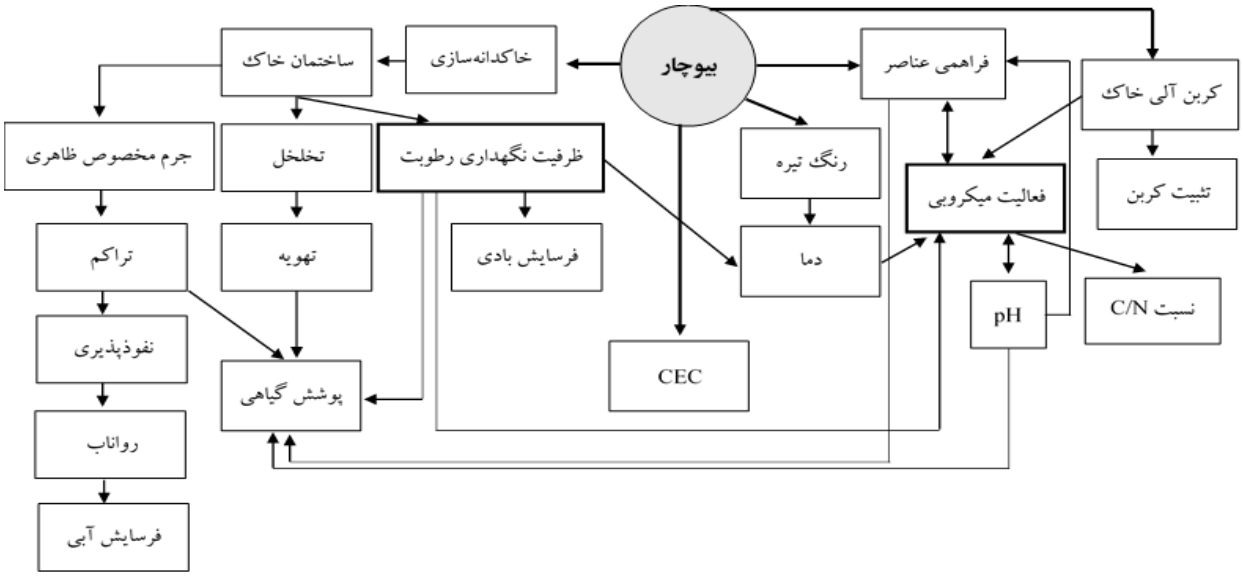
اثر بیوچار بر شاخص‌های کیفی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک

بیوچار اثرهای قابل‌توجهی بر بسیاری از شاخص‌های کیفی خاک دارد. ازجمله تغییرات مهمی که بیوچار در شاخص‌های کیفی خاک ایجاد می‌کند شامل افزایش کربن آلی، فعالیت زیستی، pH، CEC و فراهمی و کارایی مصرف عناصرغذایی می‌باشد (شکل ۱). نقش بیوچار در بهبود ویژگی‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک توسط محققان مختلف گزارش شده است (اصولی و همکاران، ۱۴۰۰؛ مصباح و همکاران، ۱۴۰۰؛ حسن‌پور و همکاران، ۱۴۰۱؛ Arfaoui *et al*., 2019). Rasuli *et al*. (2022) بیوچارهای تولید شده از بقایای ذرت و گندم در دمای ۲۵۰، ۴۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس را به میزان ۲۰ گرم در کیلوگرم به یک خاک آهکی افزوده و گزارش کردند که pH، EC، CEC و فراهمی فسفر، پتاسیم، آهن، روی، منگنز و مس خاک افزایش یافت. آنان نشان دادند که بیوچارهای تولید شده در دماهای بیشتر، به‌ویژه

---

1. Cation exchange capacity
2. International Biochar Initiative

بیوچار تولید شده از بقایای گندم، فراهمی عناصر غذایی خاک به‌ویژه پتاسیم را به میزان بیشتری افزایش داد. اصولی و همکاران (۱۴۰۰) کاه گندم، ورمی‌کمپوست و چوب زردآلو را در دمای ۳۳۰ درجه سلسیوس به بیوچارهایی با اندازه ذرات ۰/۵ الی ۲ میلی‌متر تبدیل کرده و آنها را در مقادیر ۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد وزنی به یک خاک آهکی افزودند. نتایج نشان داد که هر سه بیوچار تخلخل کل خاک را افزایش و مقاومت فروروی را کاهش دادند. آنان نتیجه گرفتند که بیوچارها بسته به مقدار، نوع و اندازه ذرات، اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک دارند. تیرگر سلطانی و همکاران (۱۴۰۱) در یک آزمایش گلخانه‌ای مقادیر ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی از بیوچار چوبی تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس را به یک خاک لوم شنی افزوده و با اعمال تنش رطوبتی، ویژگی‌های رشدی گیاه ذرت را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که بیوچار، با افزایش هدایت هیدرولیکی غیراشباع و پتانسیل جریان ماتریک خاک، شاخص برداشت گیاه را در شرایط تنش خشکی افزایش داد. علاوه‌برآن، با کاربرد بیوچار، کارایی مصرف آب دانه بیش از ۴۰ درصد افزایش یافت و تأثیر بیوچار بر بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک گیاهان تحت تنش خشکی در مرحله زایشی بیش‌تر از مرحله رویشی بود. میزان کربن آلی خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های آن است که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بر اساس آمارهای موجود، در بیش از ۶۰ درصد از اراضی کشاورزی ایران میزان کربن آلی خاک کمتر از یک درصد می‌باشد. در حالی که حد مطلوب کربن آلی خاک برای دستیابی به تولید پایدار بایستی ۳-۲ درصد باشد (سماوات، ۱۳۸۹). نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده است که بیوچار می‌تواند کربن آلی خاک را افزایش دهد. بر اساس نتایج مدل ارائه شده توسط Zimmerman *et al.* (2011) کربن بیوچار نیم‌عمر برابر با 10^{7}-10^{2} سال (۱۰۰ تا ۱۰ میلیون سال) دارد. نتایج بررسی مکانیسم‌هایی که بیوچار سبب کاهش تجزیه و تخریب کربن آلی خاک و در نتیجه منجر به افزایش آن می‌شود، نشان می‌دهد که مواد آلی خاک می‌توانند توسط سطوح متخلخل و گسترده بیوچار جذب و از تجزیه و تخریب توسط اکسیدکننده‌های غیرزیستی و آنزیم‌های تولید شده توسط میکروب‌ها محافظت شوند و کربن آلی خاک افزایش یابد (Zimmerman *et al.*, 2011). Liu *et al.* (2017) بیوچار تولید شده از زایدات جامد شهری در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس را به میزان ۲ درصد وزنی به یک خاک افزوده و بعد از ۳۶ هفته مشاهده کردند که بیوچار میزان کربن آلی خاک را ۳۰-۸ درصد افزایش داد و با افزایش مقدار بیوچار افزوده شده به خاک، درصد کربن آلی خاک نیز افزایش یافت. آنان مشاهده کردند که در طول ۲ هفته اول، میزان کربن آلی خاک تیمار شده با بیوچار کاهش یافت و سرعت کاهش آن با گذشت زمان به صورت کاهشی بوده و سپس به تعادل و ثبات رسید ولی در نمونه شاهد این اتفاق رخ نداد. آنان نتیجه گرفتند که بیوچار می‌تواند معدنی‌شدن کربن آلی خاک خشک را تحریک کند و شدت این اثر با زمان کاهش می‌یابد. Shokuhifar *et al.* (2021) با افزودن ۲ درصد وزنی از بیوچار کاه و کلش گندم تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به ۲۱ نمونه خاک با ویژگی‌های مختلف، گزارش کردند که با کاربرد بیوچار، pH، کربن آلی و کربن زیست‌توده میکروبی همه خاک‌ها افزایش یافت. آنان مشاهده کردند که نوع و شدت تغییراتی که بیوچار در خاک ایجاد می‌کند، به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی و همچنین میزان رطوبت خاک بستگی دارد.



شکل ۱. نقش بیوچار در تغییرات ویژگی‌های خاک

در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود مواد آلی، پوشش گیاهیِ ضعیف و محدودیت رطوبت، تعداد، تنوع و فعالیت ریزجانداران و به تبع آن، فعالیت زیستی خاک کم است (Torres-Garcia *et al.*, 2022). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که فعالیت میکروب‌های هوازی خاک که فعالیت آنها نیازمند کربن آلی، رطوبت کافی و تهویه مناسب خاک است، در خاک‌های تیمار شده با بیوچار بهبود می‌یابد که دلیل آن، نقش بیوچار در افزایش میزان کربن آلی خاک و بهبود نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک می‌باشد (Zimmerman *et al.*, 2011). به‌عنوان مثال، Heydari *et al.* (2023) برهم‌کنش هم‌افزایی باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR[1]) با بیوچارهای تولید شده از بقایای داروش[2] را گزارش کردند. آنان نشان دادند که مقادیر ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی از بیوچار مورد مطالعه، کارایی باکتری‌های محرک رشد در ریزوسفر نهال‌های بلوط را افزایش و بدین ترتیب، آسیب‌پذیری نهال‌ها در برابر تنش کم‌آبی را کاهش داد. Ahmad *et al.* (2020) کاه و کلش گندم و کود دامی را در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به بیوچار تبدیل و به میزان ۰/۲ درصد وزنی به یک خاک شنی با فعالیت زیستی ضعیف افزودند. سپس بذور ذرت تلقیح شده با باکتری‌های جنس باسیلوس را در آن خاک کاشته و برهم‌کنش بیوچار و باکتری‌های افزوده شده به خاک را بررسی کردند. آنان گزارش کردند که بیوچارها با افزایش کربن آلی، کربن زیست‌توده میکروبی و نیتروژن معدنی (نیترات و آمونیوم) خاک، رشد و عملکرد ذرت را افزایش دادند؛ اما بیشترین تأثیر مثبت بیوچارها در تیمارهایی مشاهده شد که بیوچار و باکتری با هم استفاده شده بودند. البته اثر بیوچار بر فعالیت ریزجانداران خاک معمولاً به نوع و مقدار بیوچار افزوده شده، اقلیم، نوع خاک، سیستم‌های کشاورزی و شرایط منطقه مورد مطالعه بستگی دارد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار به‌شدت تحت‌تأثیر نوع زیست‌توده و شرایط گرماکافت می‌باشد (سیدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Sohi *et al.*, 2010). شمس‌الدین سعید و رمرودی (۱۴۰۰) نشان دادند که با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۶۰۰ درجه سلسیوس، pH و EC بیوچار تولید شده از کود دامی به‌ترتیب به‌میزان ۲۹ و ۳۸ درصد افزایش یافت. عالیپور بابادی و همکاران (۱۳۹۷) نیز گزارش کردند که با افزایش دمای گرماکافت از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سلسیوس، ظرفیت تبادل کاتیونی بیوچار تولید شده از باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و برگ کنوکارپوس به ترتیب به میزان ۱۵۳/۳، ۲۴۱/۱، ۲۸۳/۹ و ۲۱/۲ سانتی‌مول بر کیلوگرم کاهش ولی سطح ویژه آن‌ها به ترتیب به میزان ۱۵۳/۳، ۲۴۱/۱، ۲۸۳/۹ و ۲۱/۲ مترمربع برگرم افزایش یافت. سیدی و همکاران (۱۴۰۱) با تولید بیوچار از مواد آلی مختلف به این نتیجه رسیدند که با افزایش درجه حرارت از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سلسیوس، مقدار عملکرد، ظرفیت تبادل کاتیونی و جرم مخصوص ظاهری بیوچارهای تولید شده از بقایای گندم، بقایای یونجه، بقایای سیب زمینی، خاک اره و لیف درخت خرما کاهش و pH، EC، جرم مخصوص حقیقی، کربن پایدار، نیتروژن کل، تخلخل، سطح ویژه و مقدار خاکستر آن‌ها افزایش یافت. آنان به این نتیجه رسیدند که در فرآیند تولید بیوچار، ماهیت مواد اولیه و درجه حرارت فرآیند گرماکافت نقش بسزایی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار دارند. به‌طورکلی می‌توان گفت که بیوچارهای تولید شده در دماهای کم‌تر، دارای مقادیر بیشتری از ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم هستند که به صورت لایه‌ای بر روی سطوح بیوچار قرار گرفته‌اند. این بیوچارها می‌توانند با افزودن مقادیر بیشتری کربن فراهم به خاک، فعالیت میکروبی را تشدید و معدنی شدن کربن آلی خاک را افزایش دهند (سیدی و همکاران، ۱۴۰۱). بیوچار ممکن است دارای برخی از مواد سمی مانند PAHs[3]، دی‌اکسین‌ها، فلزات سنگین، فوران‌ها و فنول‌ها باشد (به‌ویژه بیوچارهای تولید شده از زیست‌توده‌هایی مانند لجن فاضلاب و مانند آن) که برای فعالیت میکروب‌های خاک محدودکننده بوده و بدین ترتیب ممکن است سبب کاهش جمعیت و فعالیت ریزجانداران خاک شوند. همچنین، بیوچار ممکن است به‌دلیل فراهم کردن کربن، عناصر غذایی، رطوبت و هوا برای ریزجانداران و حفاظت از آن‌ها در برابر شکارچیان طبیعی، فعالیت آنها را تشدید نماید (Liu *et al.*, 2017).

طی فرآیند گرماکافت، عناصری مانند اکسیژن، هیدروژن و کربن به‌صورت گازهای CO_2، CO و CH_4 و بخار آب از ساختمان زیست‌توده خارج و عناصر قلیایی مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم در آن تغلیظ می‌شوند. از این رو بیوچارها غالباً دارای pH قلیایی می‌باشند. نقش بیوچار در افزایش pH خاک می‌تواند در اراضی مناطق خشک و نیمه‌خشک که اغلب دارای pH قلیایی هستند، نامطلوب باشد (Salem, 1989). با این حال، در خاک‌های با قدرت بافری زیاد، اثر قابل‌توجهی بر pH خاک نخواهند داشت. علاوه‌برآن، به‌دلیل پیچیدگی‌های محیط خاک و برهم‌کنش‌های متنوع و متعدد بیوچار با اجزای مختلف خاک، ممکن است با افزودن آن، علی‌رغم افزایش pH، تحرک و فراهمی عناصر غذایی در خاک چندان تحت‌تأثیر قرار نگیرد. به‌عنوان مثال، Arif *et al.* (2017) با افزودن بیوچار تولید

---

[1]. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria

[2]. Loranthus europaeus

[3]. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

شده از کاه و کلش گندم در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به میزان ۱۰ تن در هکتار به یک خاک آهکی با pH قلیایی در یک منطقه نیمه‌خشک، مشاهده کردند که pH خاک افزایش یافت ولی فراهمی‌عناصر غذایی کاهش نیافتند.

ظرفیت تبادل کاتیونی، معیاری از ظرفیت خاک برای نگهداری کاتیون‌های قابل‌تبادل است که می‌تواند تحرک و آبشویی عناصر غذایی خاک را تحت‌تأثیر قرار دهد. خاک‌های مناطق خشک اغلب به دلیل کمبود مواد آلی و رس، دارای ظرفیت تبادل کاتیونی کمتری هستند. بیوچار معمولاً بسته به نوع زیست‌توده اولیه و شرایط فرآیند گرماکافت می‌تواند دارای تخلخل، سطح‌ویژه و گروه‌های عاملی سطحی زیادی باشد؛ علاوه‌برآن، بعد از افزوده شدن به خاک به مرور زمان خرد شده و اندازه ذرات آن کاهش و سطح‌ویژه آن افزایش می‌یابد. همچنین، به‌دلیل اکسیداسیون، فراوانی گروه‌های عاملی باردار سطحی آن با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در نتیجه، بعد از افزودن به خاک با گذشت زمان، ظرفیت تبادل کاتیونی بیوچار افزایش یافته و CEC خاک را نیز افزایش می‌دهد. این افزایش در CEC خاک می‌تواند در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نگهداری عناصر غذایی را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد (Ali *et al.*, 2017). جذب و نگهداری عناصر غذایی توسط کلوئیدهای خاک، می‌تواند از هدررفت آن‌ها از طریق آبشویی و تثبیت جلوگیری کند. بنابراین، به‌دلیل افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، نیاز گیاه به مصرف کود کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، Muhammad *et al.* (2017) گزارش کردند که در یک منطقه خشک، افزودن بیوچار تولید شده از کاه و کلش گندم در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به میزان ۱۰ تن در هکتار به یک خاک با pH قلیایی، با کاهش تثبیت فسفر در خاک، فراهمی آن را افزایش داد. Liu *et al.* (2017) با افزودن بیوچار تولید شده از لجن فاضلاب شهری در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به میزان ۲ درصد وزنی به یک خاک آهکی با pH قلیایی و CEC و مواد آلی کم، بعد از ۳۶ هفته مشاهده کردند که بیوچار، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش داد. Khadem *et al.* (2021) با افزودن بیوچار تولید شده از بقایای ذرت در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به میزان ۵ و ۱۰ گرم بر کیلوگرم به دو نمونه خاک آهکی، مشاهده کردند که تمام بیوچارهای مورد استفاده pH، EC، کربن آلی، نیتروژن کل و فراهمی پتاسیم خاک را افزایش ولی فسفر قابل جذب را کاهش داد. آنان گزارش کردند که اثر بیوچار بر ویژگی‌های خاک به بافت خاک، دمای گرماکافت و مقدار بیوچار مورد استفاده بستگی دارد. Safaei Khorram *et al.* (2018) مخلوط بقایای حاصل از هرس درختان باغی را در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به بیوچار تبدیل کرده و مقدار ۱۰ تن در هکتار از آن را به یک خاک آهکی در منطقه خشک و نیمه‌خشک مشهد افزوده و گزارش کردند که بیوچار با افزایش فراهمی عناصر غذایی و کاهش وزن مخصوص ظاهری، حاصلخیزی خاک را بهبود و کیفیت سیب را افزایش داد.

آبشویی آنیون‌های عناصر غذایی مانند نیترات، سولفات و فسفات در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک تابع عواملی نظیر میزان بارندگی، شیب زمین و بافت خاک است و از آنجایی که خاک دیم‌زارهای شمال‌غرب کشور دارای بافت نسبتاً سنگین می‌باشد، آبشویی عناصر غذایی در این خاک‌ها چندان جدی نیست (فیضی اصل، ۱۳۹۹). با این حال، آبشویی عناصر غذایی از خاک، به‌ویژه در خاک‌های با بافت سبک و در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای مواد آلی کمی هستند حائز اهمیت است. اگر چه تاکنون به ظرفیت تبادل آنیونی (AEC[1]) بیوچار به اندازه ظرفیت تبادل کاتیونی آن توجه نشده است؛ ولی Lawrinenko & Laird (2015) گزارش کردند که بیوچار به‌دلیل داشتن گروه‌های عاملی اُکسونیوم[2] می‌تواند علاوه‌بر CEC، دارای AEC نیز باشد و بدین ترتیب در کاهش آبشویی آنیون‌هایی مانند نیترات، سولفات و فسفات از خاک مؤثر واقع شود. Glaser *et al.* (2002) نشان دادند که به واسطه ظرفیت تبادل آنیونی بیوچار، می‌توان از آن برای جذب فسفات و آمونیوم، از زایدات مایع مانند پساب گاوداری‌ها استفاده کرده و سپس بیوچار غنی‌شده با نیتروژن و فسفر را به‌عنوان کود و اصلاحگر خاک به کار برد. در این رابطه، Azimzadeh *et al.* (2021) از بیوچار اصلاح‌شده با نانوذرات هیدروکسید دوگانه لایه‌ای برای حذف فسفر از آب استفاده کردند و سپس، ترکیب حاصل را به‌عنوان کود فسفر به کار بردند و گزارش کردند که این کود به‌دلیل اثرهای مثبت بیوچار بر ویژگی‌های خاک، برهم‌کنش هم‌افزایی بین بیوچار و فسفر و الگوی رهایش آهسته فسفر از کود، اثر قابل‌توجهی بر عملکرد محصول داشت.

در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در دیم‌زارهای ایران معمولاً مصرف کودهای شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف و کودهای آلی چندان مرسوم نیست و کشت گیاهان به‌تدریج منجر به تخلیه خاک از عناصر غذایی به‌ویژه عناصر غذایی کم‌مصرف شده است. علاوه‌بر آن، فقر مواد آلی، عدم تکامل پروفیلی خاک، حضور کربنات‌ها، pH قلیایی و فعالیت زیستی کم و همچنین عدم رعایت تناوب زراعی مناسب، عدم برگرداندن بقایای گیاهی به خاک و خاکورزی زیاد منجر به کاهش عناصر غذایی فراهم موجود در خاک شده

---

[1]. Anion exchange capacity

[2]. Oxonium

است (فیضی اصل، ۱۳۹۹). بیوچار در کنار اثرهای مثبتی که بر ویژگی‌های خاک دارد، بسته به نوع زیست‌توده اولیه و شرایط تولید، می‌تواند مستقیماً مقادیری از عناصر غذایی را در اختیار گیاه قرار دهد. در این رابطه، Chan & Xu (2009) با بررسی میزان عناصر غذایی موجود در بیوچارهای مختلف، دامنه تغییرات غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در بیوچارهای مختلف را به ترتیب برابر ۷۸/۲–۱/۷، ۷۳/۰–۰/۲ و ۵۸/۰–۰/۱ گرم بر کیلوگرم گزارش کردند و بیان کردند که بخشی از این عناصر بلافاصله بعد از افزودن بیوچار وارد خاک شده و بخشی دیگر بر اثر فرآیندهای اکسیداسیون و به‌تدریج به خاک افزوده می‌شوند.

بیوچار می‌تواند علاوه‌بر این که مقداری از عناصر غذایی را مستقیماً به خاک اضافه کند، به‌طور غیرمستقیم و با تحت‌تأثیر قرار دادن ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، فراهمی‌عناصر غذایی را در این خاک‌ها بهبود دهد (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۵). به‌عنوان مثال، بیوچار به‌دلیل ساختار متخلخل و سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد می‌تواند با جذب و نگهداری عناصر غذایی کود، کارایی مصرف کودها را افزایش و میزان مصرف و اثرهای منفی ناشی از مصرف زیاد و مداوم آن‌ها را کاهش دهد. همچنین، 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 که این مسئله در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بسزایی داشته و تحرک و فراهمی عناصر غذایی را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Zhang *et al.*, 2020). علاوه‌بر آن، بیوچار به‌دلیل داشتن انواع گروه‌های عاملی می‌تواند یون‌هایی مانند نیترات و آمونیوم را جذب و نگهداری کند و از هدررفت آنها به صورت تصعید آمونیاک و آبشویی عمقی و سطحی نیترات جلوگیری کرده و کارایی مصرف نیتروژن را افزایش دهد (Xie *et al.*, 2022). Singh *et al.* (2020) به این نتیجه رسیدند که بیشترین کارایی بیوچار پوسته برنج زمانی است که همراه با کودهای دامی یا شیمیایی به‌صورت همزمان مصرف شود. علاوه‌بر آن، بیوچار می‌تواند فراهمی آلاینده‌های آلی و غیرآلی خاک و آب آبیاری مانند دی‌اکسین‌ها، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین را کاهش دهد. در این رابطه، Abid *et al.* (2017) بیوچار تولید شده از بقایای گیاه پنبه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس را به میزان یک درصد وزنی به یک خاک افزوده و گیاه گوجه‌فرنگی کشت شده در آن خاک را با آب حاوی ۰/۱۳ و ۲ میلی‌گرم بر لیتر کادمیم آبیاری کردند. آنان مشاهده کردند که بیوچار غلظت کادمیم شاخساره گوجه‌فرنگی را در تیمارهای ۰/۱۳ و ۲ میلی‌گرم بر لیتر کادمیم به‌ترتیب به اندازه ۳۳ و ۱۰۰ درصد کاهش داد.

بیوچار می‌تواند با تأثیر بر محتوای آب خاک، تحت‌تأثیر قرار دادن جمعیت میکروبی خاک و با اتصال به کلوئیدهای خاک، خاکدانه‌سازی و ساختمان خاک را بهبود داده و با افزایش تخلخل، نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، کارایی مصرف آب را افزایش دهد (Cen *et al.*, 2021) و این مسئله در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، ازجمله در دیم‌زارهای ایران که کمبود رطوبت محدودکننده‌ترین عامل رشد است، حائز اهمیت بسیار زیادی است. Cen *et al.* (2021) گزارش کردند که افزودن بیوچار کلش گندم در مقادیر ۱۰ تا ۵۰ تن در هکتار به یک خاک آهکی با میزان مواد آلی کم و ساختمان ضعیف، با افزایش میزان مواد آلی خاک، تعداد و اندازه خاکدانه‌های پایدار در آب را افزایش داد و با بهبود نفوذپذیری، ضمن کاهش رواناب و فرسایش، کارایی مصرف آب را افزایش داد. خشک شدن خاک سطحی و کاهش پوشش گیاهی از نتایج کمبود رطوبت است که خاک را مستعد فرسایش بادی می‌نماید. اندازه خاکدانه‌ها و پایداری آنها نقش اساسی در حفاظت از خاک و به حداقل رساندن خسارات ناشی از فرسایش آبی و بادی و فعالیت‌های بشری دارد (Ghosh *et al.*, 2016). خاکدانه‌های کوچکتر از ۰/۸۴ میلی‌متر کاملاً قابل‌فرسایش با باد هستند و میزان حضور آنها در ۲۵/۴ میلی‌متری سطح خاک به‌عنوان بخش قابل فرسایش بادی خاک‌دانه‌های خاک در نظر گرفته می‌شود (Colazo & Buschiazzo, 2010). Sadeghi *et al.* (2020) پسماند کارخانه صنایع غذایی را در دمای ۳۵۰–۳۰۰ درجه سلسیوس به بیوچار تبدیل کرده و به میزان ۸۰۰ گرم در متر مربع به یک خاک مستعد به فرسایش افزوده و و تا عمق ۳۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط و مشاهده کردند که بیوچار حجم و ضریب رواناب و مقدار فرسایش خاک را کاهش داد. عباس و همکاران (۲۰۱۹) با افزودن بیوچار تولید شده از برگ‌های توت، کود مرغی، باگاس نیشکر و بقایای گیاهی و مخلوط آنها در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به مقدار ۱ درصد به خاک، گزارش کردند که بیشترین مقدار کربن آلی در تیمار بیوچار و تیمار بقایای گیاهی مشاهده شد و خاکدانه‌های درشت[۱] در تیمار کود مرغی بیشتر بود. بیشترین رطوبت قابل‌استفاده گیاه در تیمار بیوچار+باگاس مشاهده شد. با این حال بیشترین عملکرد گیاه (*Vigna radiata* L.) در تیمار بیوچار+کود مرغی و بیشترین ارتفاع گیاه در تیمار بیوچار مشاهده شد. آنان نتیجه گرفتند که کاربرد بیوچار همراه با بقایای گیاهی می‌تواند برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های خشک و نیمه‌خشک مؤثر واقع شود.

---

۱. Macroaggregates

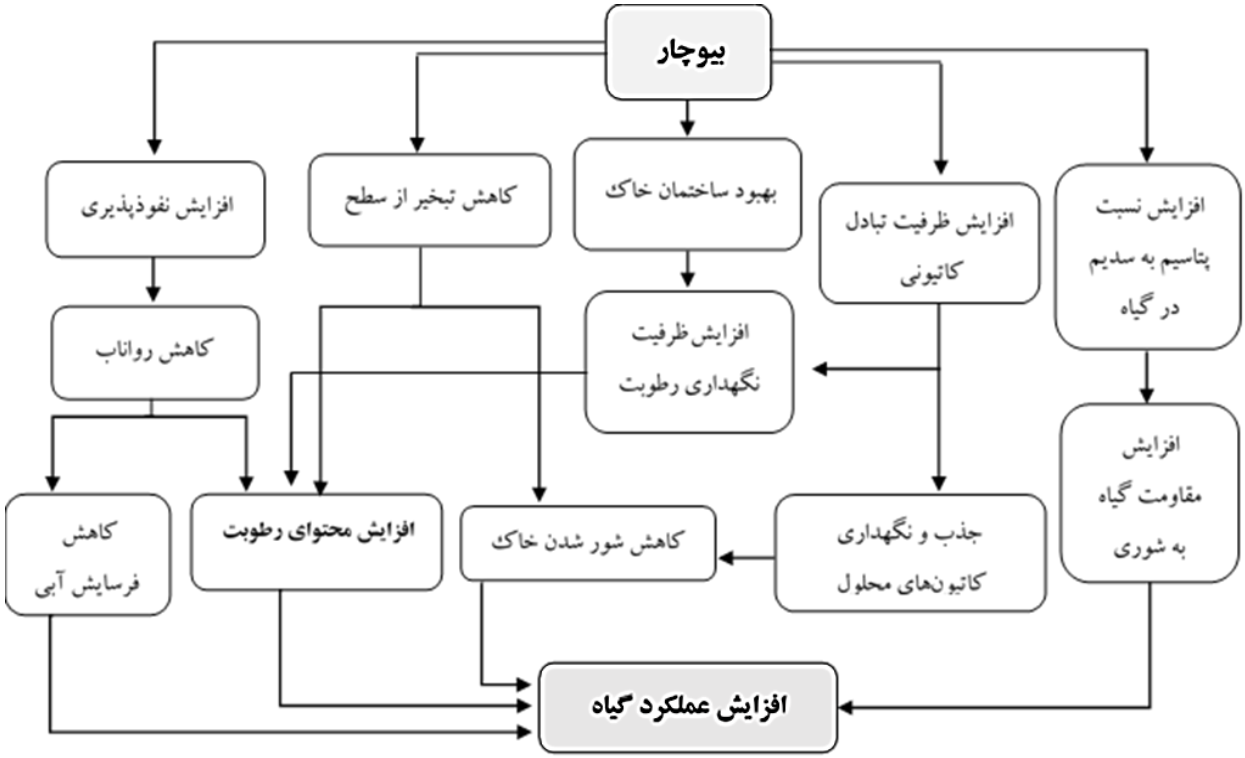
همانطور که بیوچار می‌تواند کارایی مصرف آب و کودها را بهبود دهد، مدیریت مناسب آبیاری و مصرف کود نیز می‌تواند کارایی بیوچار را در خاک ارتقا بخشد. در این رابطه، Alburquerque *et al.* (2013) مشاهده کردند که کاربرد بیوچار بدون مصرف کود، اثر قابل‌توجهی بر رشد گندم رشد یافته در یک خاک کم‌حاصلخیز نداشت ولی وقتی بیوچار همراه با کودهای شیمیایی مصرف شد، نسبت به مصرف بیوچار و کودهای شیمیایی به صورت تنها، عملکرد گندم را ۳۰–۲۰ درصد افزایش داد که به‌دلیل برهم‌کنش‌های هم‌افزایی بیوچار با کودهای شیمیایی بود. رنجبر و همکاران (۱۴۰۱) یک درصد وزنی از بیوچارهای باگاس نیشکر، پوسته برنج، کاه برنج، کاه گندم و چوب نراد تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس را به یک خاک آهکی افزوده و برهم‌کنش آن‌ها را با کودهای شیمیایی NPK بررسی کردند. آنان بیشترین ارتفاع و وزن تر گیاه نیشکر را از کاربرد توأمان بیوچار و کود شیمیایی به‌دست آوردند. Zhang *et al.* (2020) اثر بیوچار تولید شده از شاخه و برگ درخت خرما همراه با کود شیمیایی NPK را بر شاخص‌های کیفی و رشد گیاه در یک خاک قلیایی در منطقه نیمه‌خشک در مدت دو سال بررسی و گزارش کردند که بیوچار با افزایش محتوای آب، فسفر فراهم و کربن زیست‌توده میکروبی خاک و همچنین با کاهش pH خاک و نماتدهای بیماری‌زای گیاه، سبب بهبود کیفیت خاک (ارتقای شاخص‌های کیفی خاک) شد. همچنین شاخص‌های کیفی خاک با زیست‌توده گیاه و عملکرد گیاه همبستگی قوی نشان داد. علاوه‌بر آن، کاربرد بیوچار همراه با کود شیمیایی NPK نه تنها بیشترین شاخص کیفیت خاک و بیشترین عملکرد گیاه، بلکه بیشترین کارایی مصرف آب را نیز در پی داشت. آنان نتیجه گرفتند که مصرف توأمان بیوچار و کودهای شیمیایی می‌تواند برای بهبود عملکرد گیاه در خاک‌های قلیایی مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر باشد. Akmal *et al.* (2019) بیوچار تولید شده از پوشال برنج را همراه با کمپوست به خاک افزوده و اثر آن را بر زیست‌توده میکروبی، فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، فسفاتاز قلیایی و دهیدروژناز و فراهمی عناصر NPK در خاک بررسی و نشان دادند که افزودن بیوچار به خاک، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم دهیدروژناز را در مقایسه با شاهد (بدون بیوچار و کمپوست) افزایش داد. همچنین با مصرف همزمان بیوچار و کمپوست، فسفر و پتاسیم فراهم خاک به‌ترتیب به میزان ۳۴ و ۷۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. علاوه‌برآن، بیشترین مقدار شاخص‌های رشد گیاه (ارتفاع و وزن تر و خشک گیاه) در تیمار مصرف همزمان بیوچار و کمپوست به‌دست آمد.

اثر بیوچار بر روابط آبی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک

مقدار آب خاک عمدتاً تابع ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و میزان آبیاری یا بارندگی است. در دیم‌زارهای ایران به‌دلیل کمبود و توزیع نامتناسب بارندگی، آنچه که محتوای رطوبت خاک را تعیین می‌کند، ظرفیت نگهداری رطوبت خاک است. مجموع آب مویینه و ثقلی خاک را ظرفیت نگهداری رطوبت خاک می‌گویند و عوامل متعددی مانند تخلخل کل، جرم مخصوص ظاهری، بافت، مواد آلی و تخلخل مویینه خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Yang & Ali, 2019). استفاده از عوامل نگهدارنده رطوبت در خاک مانند انواع مواد آلی، برای بهبود حفاظت از آب خاک یکی از معمول‌ترین روش‌هایی است که به‌طور گسترده برای افزایش تولیدات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Han *et al.*, 2004). بیوچار نیز همانند سایر کودها و اصلاحگرهای آلی می‌تواند ظرفیت نگهداری و محتوای رطوبت خاک را افزایش دهد (شکل ۲). براساس نوع زیست‌توده و شرایط فرآیند گرماکافت، چگالی بیوچار بین ۰/۰۸ تا ۰/۴۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است که بسیار کمتر از چگالی کانی‌های معمول در خاک (۱/۱۶ تا ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. بنابراین، بیوچار اگر به مقدار کافی به خاک افزوده شود، می‌تواند جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش داده و خاکدانه‌سازی، تخلخل و بافت آن را بهبود بخشد (فرخیان فیروزی و همکاران، ۱۴۳۰۲). از این رو، بیوچار می‌تواند با بهبود نفوذپذیری، حرکت آب و ظرفیت نگهداری آب خاک، آب قابل‌دسترس گیاه را افزایش دهد و این ویژگی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در خاک‌های با بافت سبک بسیار مفید و کارآمد است (Karhu *et al.*, 2011). فرخیان فیروزی و همکاران (۱۴۰۲) گزارش کردند که با افزودن ۳ و ۶ تن در هکتار از بیوچار بقایای کنوکارپوس[۱] تولید شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش و تخلخل، ظرفیت نگهداری رطوبت و محتوای رطوبت قابل‌دسترس خاک افزایش یافت. Karhu *et al.* (2011) نشان دادند که با افزودن بیوچار به خاک، می‌توان ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را بیش از ۱۰ درصد افزایش داد. علاوه‌برآن، سطوح بیوچار طی زمان در خاک دچار اکسیداسیون شده و گروه‌های عاملی کربوکسیلی سطح آن افزایش می‌یابد که می‌تواند در افزایش جذب و نگهداری مولکول‌های آب و بهبود ظرفیت نگهداری رطوبت خاک در مقیاس مولکولی مؤثر باشد (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۵).

---

۱. *Conocarpus erectus*



شکل ۲. نقش بیوچار در روابط آبی خاک

اثر بیوچار بر روابط آبی خاک به ساختمان فیزیکی و اندازه ذرات بیوچار و بافت خاک بستگی زیادی دارد. ساختار متخلخل بیوچار که نتیجه از دست رفتن مواد فرّار طی فرایند گرماکافت است، به حرکت آب و بهبود ظرفیت نگهداری آب خاک کمک می‌کند. سرعت نفوذ آب به خاک معمولاً با افزودن بیوچارهای با اندازه ذرات کوچک‌تر از شن کاهش می‌یابد (Liu *et al.*, 2017)؛ اما ظرفیت نگهداری رطوبت خاک حتی در حضور بیوچارهای با اندازه ذرات کوچک‌تر نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، Wang *et al.* (2017) گزارش کردند که بیوچار، نفوذ آب به خاک و میزان تبخیر آب از سطح یک خاک شنی در منطقه خشک چین را کاهش ولی ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش داد. Glaser *et al.* (2002) با مقایسه ویژگی‌های یک خاک تراپرتا[1] (خاک جنگل‌های آمازون با درصد زیادی از بیوچار) با یک خاک بدون بیوچار، نشان دادند که ظرفیت نگهداری رطوبت خاک تراپرتا ۱۸ درصد بیشتر از خاک بدون بیوچار بود. نکته حایز اهمیت این است که با افزایش مقدار بیوچار افزوده شده به خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت خاک نیز لزوماً به همان میزان افزایش نمی‌یابد؛ زیرا بیوچار می‌تواند رفتار آبگریزی داشته باشد و وقتی مقدار بیوچار افزوده شده به خاک از یک حدی فراتر رفت، می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک شود (Dugan *et al.*, 2010). در این شرایط، نفوذپذیری آب به خاک کاهش یافته و آب به جای نفوذ به خاک، در سطح خاک جاری می‌شود و یا به سرعت تبخیر می‌شود.

به طور کلی، اثر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک به نوع بیوچار، نوع خاک، مقدار بیوچار افزوده شده به خاک و اندازه ذرات آن بستگی دارد (Xie *et al.*, 2022). بیوچار بعد از افزوده شدن به خاک، به‌سرعت به ذرات با اندازه سیلت یا رس شکسته و خرد می‌شود. بنابراین، در خاک‌های با بافت درشت و شنی سبب افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت می‌شود و در خاک‌های با بافت متوسط نیز اثرات مثبت بر ظرفیت نگهداری رطوبت دارد؛ ولی در خاک‌های رسی ممکن است اثرهای منفی بر روابط آبی خاک داشته باشد (Sohi *et al.*, 2010). به‌عنوان مثال، توکلی و همکاران (۱۴۰۱) گزارش کردند که با افزودن ۲ و ۳ درصد وزنی از بیوچار چوب گردو تولید شده در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به خاک، نفوذپذیری آن کاهش یافت. با این حال، اثرات مثبت بیوچار بر پایداری خاکدانه و تغییرات مرتبط با نگهداری رطوبت در خاک‌های رسی نیز گزارش شده است (Diatta *et al.*, 2020). بنابراین، افزودن بیوچار به خاک به‌ویژه به خاک‌های با بافت درشت و ماده آلی کم که بیشتر در مناطق خشک و دیم‌زارهای ایران مشاهده می‌شود، می‌تواند رطوبت قابل‌دسترس گیاه را افزایش دهد (Liu *et al.*, 2017). Novak *et al.* (2012) با افزودن بیوچارهای تولید شده از گیاه چمن شلاقی[2] و چوب در دمای ۵۰۰ درجه

---

[1]. Terra preta
[2]. Switchgrass

سلسیوس به میزان ۲ درصد وزنی به یک خاک اولتی‌سول شنی با ظرفیت نگهداری رطوبت کم و یک خاک اریدی‌سول با بافت سیلتی‌لوم، گزارش کردند که بیوچار ظرفیت نگهداری رطوبت را در هر دو خاک افزایش داد. آنان همچنین گزارش کردند که وقتی بیوچارها به این خاک‌ها افزوده شدند، هر دو بیوچار اثر مثبت بر ظرفیت نگهداری رطوبت خاک اولتی‌سول داشتند ولی تنها بیوچار چوبی سبب افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک اریدی‌سول شد.

بیوچار با بهبود ساختمان و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، تبخیر آب از خاک را نیزکاهش می‌دهد که منجر به کاهش انتقال نمک‌ها از لایه‌های پایین‌تر به لایه‌های بالاتر خاک شده و شور شدن آن را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، به‌دلیل داشتن بارهای سطحی منفی و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبتاً زیاد، توانایی زیادی در جذب انواع کاتیون‌ها مانند K^+، Na^+، Mg^{2+} و Ca^{2+} داشته و می‌تواند غلظت این کاتیون‌ها و نمک‌های مربوط به آنها را در محلول خاک کاهش دهد و این فرآیند می‌تواند روند شورشدن خاک‌های نواحی خشک و نیمه‌خشک را کند نماید (Arfaoui *et al*., 2019).

آبشویی خاک‌های شور به‌عنوان یکی از راه‌های اصلی برای کاهش شوری خاک‌های شور در نواحی خشک محسوب می‌شود که کارایی آن به عواملی همچون بافت، هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار مواد آلی و تخلخل خاک بستگی دارد و بیوچار می‌تواند این ویژگی‌های خاک را بهبود داده و کارایی آبشویی را افزایش دهد. بنابراین، استفاده از آبشویی همراه با کاربرد بیوچار می‌تواند کارایی آبشویی خاک‌های مناطق خشک را افزایش و مدت نمک‌زدایی را کاهش دهد. یکی از مکانیسم‌های تحمل گیاه در برابر تنش شوری در خاک‌های شور افزایش نسبت K/Na در درون گیاه است. نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده است که بیوچار می‌تواند نسبت K/Na در گیاه و مقاومت گیاه در برابر شوری را افزایش دهد. باید به این نکته توجه شود که با افزودن مقدار بیوچار افزوده شده به خاک، کاهش شوری خاک نیز لزوماً شدت نمی‌گیرد زیرا بیوچار خود حاوی کاتیون‌های بازی بوده و اگر بیوچار غنی از این کاتیون‌ها باشد و یا فراهمی این کاتیون‌ها در بیوچار زیاد باشد و یا مقدار بیوچار افزوده شده به خاک از یک حدی فراتر رود، می‌تواند به تدریج منجر به افزایش شوری و pH خاک شود (Yang & Ali, 2019). Moradi *et al*. (2019) به منظور بررسی برهم‌کنش بیوچار با شوری خاک، مقدار ۲ درصد وزنی از بیوچار تولید شده از بقایای هرس انگور در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس را به یک خاک افزوده و سه سطح شوری ۲، ۴/۵ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر به خاک اعمال و گزارش کردند که بیوچار در هر سه سطح شوری، pH و سدیم محلول خاک را کاهش و نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی قابل‌جذب را افزایش داد. آنان نتیجه‌گیری کردند که بیوچار توانایی کاهش اثرات منفی ناشی از شوری خاک را دارد. با این حال، بیوچار ممکن است شوری خاک را افزایش دهد. شمس‌الدین سعید و رمرودی (۱۴۰۰) با بررسی ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده در دماهای مختلف، به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای گرماکافت، شوری بیوچار افزایش می‌یابد و کاربرد بیوچارهای با شوری زیاد، می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را محدود کند.

اثر بیوچار بر رشد گیاه و تولید محصول

اثر بیوچار بر رشد گیاه و عملکرد محصول به نقش بیوچار در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مربوط می‌شود. با این که بیشتر مطالعات انجام شده در رابطه با اثر بیوچار بر رشد و عملکرد محصول در خاک‌های با حاصلخیزی متوسط تا مطلوب در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب انجام شده است، اما نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که نقش بیوچار در اصلاح و افزایش حاصلخیزی خاک‌های با حاصلخیزی کم تا متوسط در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند پررنگ‌تر باشد. به عنوان مثال، Jeffery *et al*. (2017) در یک فراتحلیل[۱] گزارش کردند که در عرض‌های جغرافیایی معتدل در خاک‌های با حاصلخیزی زیاد، بیوچار اثر قابل‌توجهی بر عملکرد محصول ندارد ولی در عرض‌های جغرافیایی گرمسیری در خاک‌های با حاصلخیزی کم، عملکرد محصول را افزایش می‌دهد که نشان می‌دهد کارایی بیوچار با سطح حاصلخیزی خاک در ارتباط می‌باشد و نقش آن در بهبود حاصلخیزی خاک‌های با سطح حاصلخیزی کم مؤثرتر است. با این حال، Biederman & Harpol (2013) با بررسی ۳۷۱ مقاله گزارش کردند که علی‌رغم تفاوت در اقلیم و خاک، بیوچار به‌طور معمول سبب افزایش عملکرد گیاه می‌شود. یک توضیح احتمالی برای گزارشات متفاوت از اثرهای بیوچار بر رشد محصول این است که کارایی بیوچار می‌تواند با فعالیت‌های کشاورزی نامطلوب (مانند روش‌های ناکارآمد خاک‌ورزی و کوددهی) محدود شود. کوددهی مناسب به‌دلیل اینکه عناصر غذایی را در موقع مناسب و به اندازه کافی در اختیار گیاه قرار می‌دهد، نقش بسیار مهمی در کارایی بیوچار در خاک دارد (Zhang *et al*., 2020). فیروزی و همکاران (۱۴۰۲) گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی، کاربرد بیوچار در مقادیر ۲۰ و ۴۰ گرم بر

---

۱. Meta analysis

کیلوگرم خاک، میزان پوشش سبز چمن اسپورت را افزایش ولی غلظت پتاسیم بافت برگ‌ها را کاهش داد. Safari *et al.* (2022) نشان دادند که وقتی بیوچار پوسته برنج به میزان ۵ و ۱۰ درصد وزنی با خاک مخلوط شد، با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، جذب عناصر غذایی، محتوای آب نسبی برگ، محتوای کلروفیل، کارایی فتوسنتز و تحمل به خشکی را در گیاه چچم چندساله افزایش داد. Arabi *et al.* (2018) بیوچار تولید شده از مخلوط ضایعات چوب صنوبر و چنار را در مقادیر ۲/۵، ۸ و ۱۶ تن در هکتار به خاک افزوده و مشاهده کردند که بیوچار میزان نیتروژن باقیمانده در خاک پس از برداشت، CEC و pH خاک را افزایش داد. همچنین، بیشترین عملکرد دانه و میزان روغن سویا در تیمار ۸ تن در هکتار بیوچار به دست آمد.

نتایج بررسی پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که به طور کلی بیوچار می‌تواند با بهبود ویژگی‌های خاک، رشد و عملکرد گیاهان مختلف را بهبود بخشد (Safari *et al.*, 2022). متأسفانه بیشتر پژوهش‌های انجام شده در رابطه با اثر بیوچار بر رشد و عملکرد محصول در زراعت آبی انجام شده و اطلاعات بسیار محدودی در رابطه با اثر بیوچار بر عملکرد محصولات دیم در دسترس می‌باشد. در جدول ۱ نتایج تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در مورد نقش بیوچار بر عملکرد محصولات مختلف ارائه شده است. با این حال، اثرات منفی بیوچار بر رشد گیاه نیز به‌ویژه در خاک‌های آلی و پیت گزارش شده است (Crane-Droesch *et al.*, 2013).

جدول ۱. اثر بیوچارهای تولیدشده از زیست‌توده‌های مختلف بر رشد و عملکرد گیاهان مختلف

مکان	نوع خاک	گیاه	زیست‌توده اولیه تولید بیوچار	مدت و دمای تولید بیوچار	مقدار بیوچار	پاسخ گیاه در مقایسه با شاهد	دلیل اثر	منبع
ایران	–	ذرت	بقایای کنوکارپوس	۵۵۰ درجه سلسیوس	۳ و ۶ تن در هکتار	افزایش رشد و عملکرد گیاه	افزایش تخلخل و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک	فرخیان فیروزی و همکاران (۱۴۰۲)
ایران	لوم شنی	ذرت	خرده‌های چوب درخت انگور	۳۵۰ درجه سلسیوس	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی	افزایش راندمان مصرف آب	افزایش هدایت هیدرولیکی غیراشباع و پتانسیل جریان ماتریک خاک	تیرگر سلطانی و همکاران (۱۴۰۱)
ایران	لوم رسی سیلتی	نیشکر	باگاس نیشکر, پوسته برنج, کاه برنج, کاه گندم و چوب نراد	۳۰۰ درجه سلسیوس	یک درصد وزنی	افزایش ارتفاع و وزن تر گیاه	برهمکنش مثبت با کودهای شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم	رنجبر و همکاران (۱۴۰۱)
ایران	آزمایش گلدانی	گل همیشه بهار	مخلوط کود گاوری و گوسفندی	۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس	۵ درصد وزنی	افزایش میزان پرولین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز	افزایش غلظت پتاسیم در گیاه	شمس‌الدین سعید و رمرودی (۱۴۰۰)
ایران	–	گندم	کاه و کلش گندم	۵۵۰ درجه سلسیوس	۴۰ و ۸۰ تن بر هکتار	کاهش تراکم طولی ریشه	افزایش شوری خاک	شبان و همکاران (۱۴۰۱)
ایران	شنی و لوم شنی	ذرت	برگ خرما و ضایعات پسته	۲ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس	۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی	کاهش رشد گیاه	افزایش شوری خاک	ناروئی و همکاران (۱۴۰۰)
ایران	خاک آهکی شور	کینوا	بقایای بوته برنج	۲ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس	۲ و ۵ درصد وزنی	افزایش وزن خشک و ارتفاع بوته، شاخص برداشت و وزن هزاردانه	اصلاح pH و افزایش فراهمی عناصر غذایی خاک	بزی عبدلی و همکاران (۱۴۰۲)
ایران	لوم سیلتی	برنج	پوسته دانه برنج	۴ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس	۲۰ و ۴۰ تن در هکتار	افزایش عملکرد و غلظت نیتروژن دانه	برهم‌کنش هم‌افزایی بیوچار با کودهای شیمیایی مورد استفاده	بنی‌هاشمیان و همکاران (۱۴۰۰)
ایران	لوم	ذرت دانه‌ای	کود مرغی	۴ ساعت در ۳۰۰ درجه سلسیوس	۱ و ۲ درصد وزنی	افزایش عملکرد (وزن خشک) و غلظت عناصر غذایی در گیاه	افزایش عناصر غذایی به‌ویژه فسفر به خاک	کاظمی و همکاران (۱۳۹۸)

ایران	لوم شنی	توتون	–	–	۴ و ۸ تن در هکتار	افزایش عملکرد و درصد نیکوتین گیاه	افزایش فراهمی عناصر غذایی خاک	مصباح و همکاران (۱۴۰۰)
ایران	لوم رسی سیلتی	ذرت علوفه‌ای	برگ خرما	۲ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس	۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴/۵ درصد وزنی	افزایش ارتفاع، وزن تر و خشک اندام هوایی و وزن و حجم ریشه	افزایش کارایی مصرف آب توسط گیاه	نسیمی و همکاران (۱۴۰۱)
ایران	لوم سیلتی	کاملینا	ورمی‌کمپوست	–	۵ و ۱۰ تن در هکتار	افزایش عملکرد و درصد روغن دانه و زیست‌توده گیاه	افزایش جذب آب و عناصر غذایی	حضرتی و همکاران (۱۴۰۱)
ایران	–	گندم	زیست توده گیاهی و ضایعات کشاورزی	–	۴ و ۸ تن در هکتار	افزایش میزان پروتئین و وزن هزار دانه	برهم‌کنش مثبت بیوچار با ریزجانداران خاک	سبحانی و همکاران (۱۴۰۰)
ایران	لوم	ذرت	باگاس نیشکر	یک ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس	۶ و ۱۲ تن در هکتار	افزایش ارتفاع گیاه	افزایش کارایی مصرف آب	دهقانی احمدآبادی و همکاران (۱۴۰۰)
ایران	آزمایش گلدانی تحت تنش آبی	چچم	پوسته برنج	–	۵ و ۱۰ درصد وزنی	افزایش وزن خشک و تحمل به خشکی	افزایش محتوای عناصر غذایی، محتوای کلروفیل و کارایی فتوسنتزی در گیاه	Safari *et al.* (2022)
ایران	آزمایش گلدانی تحت تنش آبی	نهال بلوط	داروواش	–	۱، ۲ و ۳ درصد وزنی	بهبود رشد و پاسخ‌های اکوفیزیولوژیکی گیاه در مقادیر کم بیوچار	برهم‌کنش مثبت بیوچار با باکتری‌های PGPR برای کاهش اثرات تنش خشکی	Heydari *et al*. (2023)
ایران	لوم و لوم رسی	ذرت	لجن فاضلاب	–	۱۰، ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار	افزایش ارتفاع و عملکرد گیاه	بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک	Khanmohammadi *et al.* (2017)
ایران	لوم رسی سیلتی	سویا	لجن فاضلاب	۳ ساعت در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس	۲۰ تن در هکتار	افزایش ارتفاع و وزن خشک گیاه، عملکرد دانه و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه	بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک	Fathi Dokht *et al.* (2017)
ایران	لوم	گندم	کاه و کلش گندم	–	۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار	کاهش عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه در سطوح ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوچار	افزایش شوری خاک	Rezaei & Razzaghi, (2018)
ایران	شن لومی	تربچه	–	–	۰ و ۲/۵ تن در هکتار	افزایش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی	افزایش فسفر و پتاسیم قابل‌جذب خاک و افزایش غلظت فسفر و پتاسیم گیاه	Nabaviania *et al*, (2015)
هند	لوم سیلتی (دیم)	گندم	پوسته برنج	-	۵ تن در هکتار	افزایش عملکرد دانه در هکتار	افزایش بهره‌وری آب و سرعت فتوسنتز	Singh *et al*. (2020)
مصر	شنی	گندم	–	–	۴ تن در هکتار	افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گیاه	افزایش غلظت و جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم و درصد پروتئین در گیاه و بهبود اجزای عملکرد گیاه	Badr *et al*. (2015)
مصر	رسی	گندم و	مخلوط چوب	–	۲ تن در	افزایش عملکرد ذرت	افزایش تخلخل و CEC	Amer, (2016)

		ذرت	نرم و کلش برنج		هکتار	و گندم	خاک، فراهمی عناصر غذایی، کارایی مصرف آب، جذب NPK و اجزای عملکرد گیاه	
مصر	لوم شنی	گندم و ذرت	–	–	۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار	افزایش عملکرد دانه ذرت و گندم	کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، pH، EC، هدایت هیدرولیکی، سدیم محلول، SAR و ESP و افزایش CEC، کربن آلی خاک، نیتروژن کل و فراهمی فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، مس و روی در خاک	Mousa, (2017)
دانمارک	لوم شنی – گلخانه	گندم	مخلوط چوب نرم و سخت	-	۰ و ۵ درصد وزنی	افزایش رشد و عملکرد گیاه	کاهش میزان جذب سدیم و کاهش تنش شوری و رهایش عناصر پتاسیم، کلسیم و منیزیم به خاک	Akhtar *et al.* (2015b)
چین	اینسپتی سول آهکی	ذرت	کلش گندم	۴۵۰ درجه سلسیوس	۰، ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار	افزایش عملکرد گیاه	افزودن عناصر غذایی به خاک، بهبود ساختمان خاک و بهبود وضعیت رطوبتی خاک	Zhang *et al.* (2016)
چین	لوم شنی	خیار	برگ درخت خرما	۳۰ دقیقه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس	۱۰ تن در هکتار	افزایش رشد و عملکرد	کاهش نماتدهای انگلی و افزایش بهره‌وری آب و کود	Zhang *et al.* (2020)
چین	خاک قلیایی ضعیف	ذرت	کاه و کلش گندم	–	۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ تن در هکتار	بهبود رشد گیاه	افزایش کربن آلی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک	Cen *et al.* (2021)
چین	انتی سول	ذرت	کلش گندم	۴۸۰ درجه سلسیوس	۱۲ تن در هکتار	افزایش عملکرد گیاه	کاهش غلظت سدیم و کلر و افزایش غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه و در گیاه و کاهش اثرهای منفی ناشی از شوری	Lashari *et al.* (2015)
عربستان	شنی	گوجه فرنگی	چوب	۱۵۰ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس	۰، ۴ و ۸ درصد وزنی	۱۴ تا ۴۳ درصد افزایش در عملکرد گیاه	کاهش اثرهای منفی ناشی از شوری	Usman *et al.* (2016)
پاکستان	آزمایش گلدانی	ماش	–	–	۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار	افزایش عملکرد دانه به اندازه بیش از ۴ گرم بر گلدان	بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی رشد گیاه	Rab *et al.* (2016)
پاکستان	لوم شنی	ذرت	کاه و کلش گندم، اقاقیای مصری و کود دامی	۴۵۰ درجه سلسیوس	۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی	افزایش وزن تر و خشک گیاه و عملکرد دانه و وزن هزاردانه	افزایش مواد آلی خاک، کربن زیست توده میکروبی و نیتروژن خاک	Ahmad *et al.* (2020)
کره	لوم	سویا	چوب نارون	–	۰ و ۱۰ تن در هکتار	افزایش وزن خشک گیاه	افزایش قطر ساقه و عملکرد گیاه	Lee *et al.* (2013)
دانمارک	لوم شنی –گلخانه	سیب زمینی	مخلوط چوب نرم و سخت	۵۰۰ درجه سلسیوس	۰ و ۵ درصد وزنی	کاهش اثر منفی شوری و افزایش عملکرد غده ها	کاهش غلظت Na^+ و نسبت Na^+/K^+ و افزایش غلظت K^+ در آوند آبکش، کاهش هورمون	Akhtar *et al.* (2015a)

						آبسیزیک‌اسید در برگ و آوند آبکش، افزایش زیست‌توده هوایی و طول و حجم ریشه		
کره	-	ذرت	کلش برنج	۵۰۰ درجه سلسیوس	۱، ۲ و ۵ درصد وزنی	افزایش عملکرد ذرت	افزایش کربن آلی خاک، افزایش درصد خاکدانه‌های پایدار در آب، کاهش ESP، کاهش جذب سدیم به دلیل افزایش جذب پتاسیم، کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانتی APX و GR	Kim *et al.* (2016)
جنوب سودان	ورتی سول	سورگوم	آکاسیا	–	۰ و ۱۰ تن در هکتار	بدون تأثیر معنی‌دار بر رشد	افزایش کلسیم قابل‌تبادل خاک و CEC مؤثر، بدون اثر معنی‌دار بر pH خاک	Deng *et al.* (2017)
پاکستان	لوم شنی	گوجه فرنگی	چوب اوکالیپتوس	–	۰ و ۵ تن در هکتار	بدون تأثیر معنی‌دار بر رشد و عملکرد	کاهش وزن خشک ریشه، کاهش غلظت فسفر برگ، بدون اثر معنی‌دار بر غلظت و جذب کلسیم، بر، مس، منگنز، سدیم و روی در گیاه	Nzanza *et al.* (2012)

یک دلیل اثر منفی بیوچار بر رشد گیاه در برخی از موارد به افزایش نسبت C/N خاک مربوط می‌شود که در ابتدای افزوده شدن به خاک، منجر به بی‌تحرک شدن و کمبود موقتی نیتروژن خاک می‌شود. علاوه‌برآن، بیوچار بسته به نوع زیست‌توده و دمای تولید، ممکن است حاوی مقادیری از فلزات سنگین و یا برخی از انواع مواد سمی آلی باشد که می‌تواند برای گیاهان محدودکننده باشد. منشأ آلودگی‌های غیرآلی بیوچار (مانند فلزات سنگین) زیست‌توده اولیه می‌باشد. درحالی‌که بسیاری از آلودگی‌های آلی بیوچار نتیجه فرآیند گرماکافت است (عظیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین، بیوچار می‌تواند با جذب و نگهداری عناصر کم مصرف و کاهش فراهمی‌آنها منجر به کاهش رشد گیاه شود. به‌عنوان مثال، Kloss *et al.* (2014) گزارش کردند که بعد از افزودن بیوچار به خاک، به‌دلیل کاهش معنی‌دار غلظت روی، آهن، مس و منگنز و افزایش مولیبدن در بافت‌های گیاه، عملکرد خردل و جو در مقایسه با تیمار شاهد به اندازه ۶۸ درصد کاهش یافت. بخشی از کاهش غلظت عناصر کم‌مصرف در بافت‌های گیاه به اثر رقت[۱] و بخشی دیگر به جذب و نگهداری آن‌ها توسط بیوچار مربوط می‌باشد.

کارایی بیوچار در بهبود رشد گیاه متغیر بوده و به عواملی مانند اقلیم، ویژگی‌های خاک، گونه گیاه و شرایط آزمایش بستگی دارد. به‌عنوان مثال، گزارش شده است که اثرات مثبت بیوچار بر عملکرد گیاه و تولید محصول در آزمایشات گلدانی بیشتر از آزمایشات مزرعه‌ای و در خاک‌های شنی بیشتر از خاک‌های لومی و سیلتی می‌باشد. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که بیوچار می‌تواند با تحت‌تأثیر قرار دادن ویژگی‌های خاک‌های شور که در مناطق خشک و نیمه‌خشک غالب هستند، رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، Kanwal *et al.* (2018) گزارش کردند که بیوچار با افزایش پتانسیل آب برگ و کاهش نشانگرهای تنش مانند میزان پرولین، قندهای محلول و آنزیم سوپراکسیددیسموتاز در گیاه گندم، تنش شوری را در این گیاه کاهش و رشد و عملکرد آن را بهبود داد. همچنین، افزودن بیوچار به خاک شور می‌تواند قابلیت هدایت الکتریکی خاک را کاهش و نسبت جذب پتاسیم به سدیم توسط گیاه را افزایش دهد و بدین ترتیب مقاومت گیاه به تنش شوری نیز افزایش می‌یابد (Hammer *et al.*, 2015). شبان و همکاران (۱۴۰۱) بیوچار کلش گندم تولید شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس را به میزان ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار به خاک افزوده و گزارش کردند که بیوچار با بهبود هدایت روزنه‌ای و کاهش دمای پوشش سبز و تبخیر و تعرق، عملکرد گندم تحت تنش شوری را افزایش داد. با این حال، بیوچار بسته به مقدار مصرف و درصد عناصر معدنی موجود در آن ممکن است سبب افزایش شوری خاک‌های غیرشور شود. به‌عنوان مثال، توکلی و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند که با

۱. Dilution effect

افزودن ۳ درصد وزنی از بیوچار چوب گردو تولید شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به چند نمونه خاک با ویژگی‌های مختلف، شوری همه خاک‌های مورد مطالعه افزایش یافت. ناروئی و همکاران (۱۴۰۰) برگ خرما و ضایعات پسته را در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به بیوچار تبدیل کرده و در مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی به دو نمونه خاک با بافت‌های شنی و لوم شنی افزودند. آنان گزارش کردند که با افزایش مقدار بیوچار استفاده شده، شوری هر دو خاک مورد مطالعه افزایش و وزن خشک و ارتفاع گیاه ذرت در هر دو خاک کاهش یافت و این اثر منفی در خاک شنی بیشتر بود.

فرصت‌ها و چالش‌های کاربرد بیوچار در اراضی نواحی خشک و نیمه‌خشک

علی‌رغم فواید زیاد و نقش‌های مثبت و ثابت شده بیوچار در بهبود ویژگی‌های خاک و تولید محصول در نواحی مرطوب و کشت‌های آبی (Diatta *et al.*, 2020)، کاربرد آن در نواحی خشک و نیمه‌خشک و کشت‌های دیم با محدودیت همراه است. با این حال، با توجه به فقر مواد آلی، کمبود رطوبت، pH قلیایی، حاصلخیزی کم و سایر مشکلات خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاربرد بیوچار در این خاک‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و می‌تواند اثرات اصلاحی مطلوبی بر این خاک‌ها داشته باشد. در ادامه به برخی از چالش‌ها و فرصت‌های کاربرد بیوچار در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک و با تأکید بر خاک‌های دیم اشاره شده و راهکارهای مقابله با برخی از این چالش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد (قربان‌پور و همکاران، ۱۳۹۹).

چالش‌ها

در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً به‌دلیل کمبود رطوبت و بارندگی، کربنات‌ها و نمک‌های فلزات قلیایی در خاک تجمع یافته و منجر به افزایش pH خاک می‌شود. از طرف دیگر، بیوچار نیز به‌دلیل غالبیت عناصر قلیایی مانند کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم، دارای pH قلیایی می‌باشد که کاربرد آن را در خاک‌های آهکی با pH قلیایی با مشکل مواجه می‌سازد. یکی از راهکارهای حل این چالش، بهینه کردن ترکیب زیست‌توده‌های مختلف و شرایط فرآیند گرماکافت برای دستیابی به بیوچار با pH نزدیک به pH طبیعی خاک و با ظرفیت نگهداری رطوبت کافی است. بیوچارهای تولید شده از برخی از زایدات با غلظت عناصر زیاد مانند کودهای دامی و پسماندهای غنی از کاتیون ممکن است برای تأمین عناصر غذایی مفید باشند اما می‌توانند منجر به افزایش pH و شوری خاک شوند که در برخی از موارد برای رشد گیاه محدودیت ایجاد می‌کند. در حالی که با استفاده از گرماکافت در دمای کمتر، می‌توان بیوچارهای با غلظت عناصر کمتر و pH کم‌تری تولید کرد که البته کربن این نوع بیوچارها پایداری کمتری داشته و مواد فرار زیاد آن ممکن است منجر به افزایش آب‌گریزی بیوچار شود که اثر منفی بر قابلیت نگهداری رطوبت آن خواهد داشت. یکی دیگر از راهکارهای تولید بیوچارهای با pH و سایر شرایط دلخواه، پیش‌تیمار کردن زیست‌توده‌های مورد نظر و یا پس‌تیمار کردن بیوچارهای تولید شده با مواد معدنی، آلی و شیمیایی مختلف است. به‌عنوان مثال، غوطه‌ور کردن بیوچارهای تولید شده در محلول رقیق اسید می‌تواند pH آن را کاهش دهد.

بیوچار معمولاً صرف نظر از نوع زیست‌توده اولیه، دارای میزان قابل‌توجهی از عناصر قلیایی نظیر کلسیم، منیزیم و پتاسیم می‌باشد و در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز این عناصر به وفور وجود دارند. لذا با کاربرد بیوچار در این خاک‌ها ممکن است به‌دلیل افزایش غلظت این عناصر در خاک، تعادل عناصر غذایی به هم خورده و فراهمی و جذب برخی از عناصر غذایی دچار مشکل شود. بنابراین، قبل از افزودن بیوچار به خاک بهتر است ابتدا برخی از ویژگی‌های مهم بیوچار و خاک نظیر pH، EC، کربن آلی و عناصر غذایی تعیین شود تا تعیین مقدار مناسب بیوچار با دقت بیشتری صورت گیرد. حتی ممکن است برای دستیابی به کارایی بهتر بیوچار در خاک مورد نظر، مقادیر مشخص و محاسبه شده‌ای از دو یا چند نمونه بیوچار با ویژگی‌های متفاوت با هم ترکیب شود. البته با انتخاب زیست‌توده مناسب و مدیریت دلخواه شرایط دمایی گرماکافت، تاحدودی می‌توان بیوچارهای با ویژگی‌های مورد نظر را تولید کرد.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک غالباً انرژی تابشی خورشید و دمای هوا زیاد است. بیوچار به‌دلیل رنگ بسیار تیره‌ای که دارد،دارای ضریب بازتاب کمی بوده و اشعه دریافتی را منعکس نمی‌کند؛ بلکه این اشعه صرف گرم شدن بیوچار شده و در صورت افزایش دما می‌تواند منجر به بروز آتش‌سوزی شود. کاربرد سطحی بیوچار در این شرایط می‌تواند منجر به ایجاد آتش‌سوزی شود. برای جلوگیری از این رخداد، بیوچار باید بعد از افزوده شدن، با خاک مخلوط شود.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل حاصلخیزی کم خاک، پوشش گیاهی نیز ضعیف است. علاوه‌بر آن، خاک به‌دلیل مواد آلی کم و ساختمان ضعیف مستعد تراکم می‌باشد. از این رو، این خاک‌ها معمولاً در برابر فرسایش آبی حساسیت بیشتری دارند. همچنین، به‌دلیل پوشش گیاهی ضعیف و خشک بودن خاک، فرسایش بادی نیز در این خاک‌ها مشکل‌آفرین است.درنتیجه، در صورتی که بیوچار به این

خاک‌ها افزوده شود، ممکن است از طریق فرسایش آبی یا بادی از دسترس خارج شود. برای رفع این چالش، بهتر است از پودر کردن بیش از حد بیوچارهای تولید شده اجتناب شود و یا بیوچارها به صورت گرانول یا پلیت شده به خاک افزوده شوند. همچنین، برای جلوگیری از بادبردگی ذرات بیوچار در حین افزودن به خاک، می‌توان بیوچارهای تولید شده را کمی مرطوب کرد. با این حال، مخلوط کردن کامل بیوچار با خاک نقش بسیار مهمی در جلوگیری از هدررفت بیوچار دارد.

در خاک‌های کم‌حاصلخیز مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل فعالیت زیستی ضعیف و حاصلخیزی کم خاک، ممکن است بیوچار کارایی کمی داشته باشد. برای رفع این مشکل بهتر است اولاً از بیوچارهای تولید شده از مواد آلی با درصد عناصر غذایی زیاد مانند کودهای دامی و مرغی استفاده شود و ثانیاً بیوچار همراه با کودهای شیمیایی، آلی و زیستی به کار برده شود.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در دیم‌زارها به دلیل این که ذاتاً تولید و پوشش گیاهی کم می‌باشد، تأمین زیست‌توده مورد نیاز برای تبدیل به بیوچار در مقیاس زیاد و مزرعه‌ای مشکل است. علاوه‌بر آن، به دلیل ارزش اقتصادی برخی از بقایای گیاهی تولید شده (مانند کاه و کلش)، کشاورزان ترجیح می‌دهند بقایای تولید شده را به جای تبدیل کردن به بیوچار و افزودن به خاک، به مصرف دام و یا به فروش برسانند. با این حال، باید توجه کرد که بیوچار دارای اثرهای مثبت و مفید بسیاری بوده و به‌دلیل پایداری بسیار زیاد در خاک، دارای اثرهای باقی‌مانده زیاد و بسیار طولانی هستند. بنابراین، حتی افزودن مقادیر اندکی از بیوچار به خاک نیز پیامدها و اثرهای مثبت و پایداری را به دنبال خواهد داشت. علاوه‌بر آن، مواد اولیه برای تولید بیوچار بسیار متنوع بوده و از انواع مختلفی از زیست‌توده‌های آلی نظیر زایدات گیاهی، باغی، گلخانه‌ای، شهری و صنعتی می‌توان استفاده کرد. همچنین، در مناطقی که به‌دلیل عدم دسترسی به منابع آلی و انرژی، تولید بیوچار با محدودیت مواجه است، می‌توان با راهکارهایی نظیر مصرف ردیفی، نواری، گودالی و یا نقطه‌ای، مقدار مصرف بیوچار در واحد سطح را کاهش داد.

فرصت‌ها

کمبود رطوبت در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از عوامل محدودکننده بوده و در خاک‌های اراضی دیم ایران به‌عنوان محدودکننده‌ترین عامل رشد و عملکرد محصول شناخته می‌شود. در حالی که با افزایش نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک می‌توان عملکرد محصول را افزایش داد و بیوچار با افزایش نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک می‌تواند در مقابله با این چالش مفید واقع شود.

کمبود مواد آلی یکی دیگر از مشکلات خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ازجمله دیم‌زارهای ایران است و بیوچار به دلیل ساختار آروماتیک و پایداری بسیار زیاد، می‌تواند کربن آلی خاک را برای صدها تا هزاران سال افزایش دهد.

فعالیت زیستی خاک وابسته به رطوبت، دما، تهویه و منبع کربن است و در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود رطوبت، نوسانات دمایی شدید و فقدان مواد آلی، فعالیت زیستی خاک ضعیف است. از طرف دیگر، درصد کل عناصر غذایی نظیر کلسیم، منیزیم، فسفر، پتاسیم و عناصر کم‌مصرف غالباً در این خاک‌ها زیاد است؛ چون آبشویی در این خاک‌ها ضعیف است. لذا با کمی تغییر در شرایط ریداکس، pH و فعالیت زیستی خاک می‌توان تحرک و فراهمی این عناصر را در خاک افزایش داد. بنابراین، با بهبود فعالیت زیستی خاک می‌توان زیست‌فراهمی بخشی از عناصر غذایی تثبیت شده در خاک را افزایش و نیاز به مصرف کود شیمیایی را کاهش داد. با افزایش کربن آلی خاک، فعالیت زیستی خاک نیز افزایش می‌یابد و بیوچار نقش پررنگی در افزایش فعالیت زیستی خاک دارد.

بخش زیادی از خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک و به‌ویژه بخش قابل‌توجهی از خاک‌های دیم ایران، به‌دلیل فقر مواد آلی و ضعف فعالیت زیستی، دارای ساختمان مناسبی نیستند. به همین دلیل، خاک مستعد تراکم، کاهش نفوذپذیری، کاهش تخلخل و تهویه و افزایش فرسایش‌پذیری می‌باشد. در حالی که بیوچار با افزایش کربن آلی و بهبود فعالیت زیستی خاک، می‌تواند به‌طور غیرمستقیم، نقش مؤثری در غلبه بر این مشکلات داشته باشد.

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک وابسته به میزان رس و مواد آلی خاک است. در خاک‌های سبک مناطق خشک و نیمه‌خشک، ماده آلی و درصد رس خاک و به تبع آن، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک کم است. در حالی که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نقش مهمی در افزایش کارایی مصرف کودهای شیمیایی و جلوگیری از هدررفت عناصر غذایی دارد. بیوچار به دلیل سطح ویژه زیاد، گروه‌های عاملی و بارهای سطحی زیاد، دارای ظرفیت تبادل کاتیونی قابل‌توجهی بوده و می‌تواند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش دهد.

یکی از مشکلات مهم در همه خاک‌های زراعی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شور شدن خاک است. شوری خاک با این که در خاک‌های دیم ایران مشکل چندان مهمی محسوب نمی‌شود، اما از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در بسیاری از اراضی آبی ایران

است. صعود مویینه آب از عمق به سطح خاک و تبخیر از سطح، یکی از دلایل اصلی شور شدن خاک است و بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، می‌تواند از شور شدن خاک با این سازوکار جلوگیری کند.

نتیجه‌گیری

افزایش مواد آلی خاک می‌تواند در رفع محدودیت‌ها و مشکلات خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش انکارناپذیری داشته باشد. بیوچار با ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود می‌تواند ضمن افزایش کربن آلی خاک، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم شاخص‌های کیفی خاک را بهبود داده و سطح حاصلخیزی را افزایش دهد. خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه دیم‌زارها، دارای مواد آلی و ظرفیت نگهداری رطوبت کمی بوده و به‌دلیل حضور کربنات‌ها، pH قلیایی و فعالیت زیستی کم، دارای ظرفیت زیادی برای تثبیت عناصر غذایی می‌باشند. علاوه‌برآن، در خاک‌های دیم، کمبود رطوبت خاک، محدودکننده‌ترین عامل رشد گیاه محسوب می‌شود. در حالی که بیوچار با افزایش مواد آلی خاک و بهبود ساختمان و تخلخل خاک، نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش داده و با ایجاد شرایط زیستی مناسب، زمینه را برای افزایش فعالیت زیستی و فراهمی عناصر غذایی خاک مساعد می‌سازد. با این حال، تولید و کاربرد بیوچار در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در دیم‌زارها با چالش‌هایی همراه است که از آن جمله می‌توان به کمبود زیست‌توده مورد نیاز برای تولید بیوچار، فقر مواد آلی و ضعف فعالیت زیستی خاک و حساسیت در برابر فرسایش اشاره کرد. با این که برای برخی از این چالش‌ها راهکارهایی ارائه شده است؛ اما به دلیل محدودیت اطلاعات، ظرفیت به‌کارگیری فن‌آوری بیوچار در دیم‌زارهای ایران هنوز به درستی مشخص نشده است. بنابراین، برای هرچه کارآمدتر کردن کاربرد فن‌آوری بیوچار در مناطق خشک و نیمه‌خشک و به‌ویژه در دیم‌زارهای ایران، نیاز به انجام تحقیقات و پژوهش‌های بیشتری است. علاوه‌بر آن، هنوز اطلاعات جامعی از اثرات جانبی و مضر کاربرد بیوچار در بلندمدت بر بوم‌نظام‌های نواحی خشک و نیمه‌خشک در دسترس نیست که باید مشخص شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

اصولی، حسن؛ کریمی، احمد؛ شیرانی، حسین و طباطبائی، سید حسن (۱۴۰۰). اثر نوع، اندازه و مقدار بیوچار بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک آهکی. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۱۱(۱)، ۱۱۳–۱۲۸.

بزی عبدلی، مهری؛ بارانی مطلق، مجتبی؛ بستانی، عبدالامیرو نظری، طالب (۱۴۰۲). اثر کاربرد بیوچار اصلاح شده اسیدی بر رشد رویشی و اجزای عملکرد گیاه کینوا در یک خاک آهکی متاثر از نمک. *مهندسی زراعی*، DOI:10.22055/agen.2023.43166.1657

بنی‌هاشمیان، سیده هاجر؛ افتخاری، علی؛ نصیری، مرتضی و موسوی میرکلایی، سید امیرعباس (۱۴۰۰). بررسی اثر بیوچار و منابع مختلف نیتروژن بر ویژگی‌های رشد و عملکرد گیاه برنج (*Oryza sativa* L.). تحقیقات *آب و خاک ایران*، ۵۲(۱۲)، ۳۰۷۲–۳۰۵۹.

توکلی، الهام؛ قاسمی، احمدرضا و متقیان، حمیدرضا (۱۴۰۱). تأثیر بیوچار چوب گردو و بنتونیت بر هدایت الکتریکی و نفوذپذیری خاک. *پژوهش های نوین در مهندسی آب پایدار*، ۱(۲)، ۱۵۷–۱۴۵.

تیرگرسلطانی، محمدتقی؛ بهرامی، حسینعلی و مختصی بیدگلی، علی (۱۴۰۱). تأثیر بیوچار چوب انگور بر پاسخ ذرت به تنش کمبود آب در شرایط گلخانه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۹)، ۱۹۹۶–۱۹۹۷.

حسن‌پور، ایمان؛ شیروانی، مهران؛ حاج‌عباسی، محمدعلی و مجیدی، محمدمهدی (۱۴۰۱). تأثیر بیوچارهای اسیدی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و قابلیت جذب عناصر غذایی خاک‌های آهکی. *علوم آب و خاک*، ۳۶(۲)، ۳۹–۵۹.

حضرتی، سعید؛ ذاکر، کاظم؛ حبیب‌زاده، فرهاد و صادقی بختوری، امیررضا (۱۴۰۱). تأثیر کاربرد همزمان بیوچار و ورمی‌کمپوست بر رشد و عملکرد دانه گیاه روغنی کامل‌نا (*Camelina sativa*) به‌صورت دیم‌کاری در استان آذربایجان شرقی. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۱(۵۱)، ۹۲–۷۷.

دهقانی احمدآبادی، مریم؛ شاهنظری، علی؛ قدمی‌فیروزآبادی، علی و اردکانی، محمدرضا (۱۴۰۰). تأثیر مدیریت آبیاری بر رشد و بهره‌وری مصرف آب گیاه ذرت تحت سطوح مختلف بیوچار. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۸(۱)، ۷۶–۶۷.

رضیئی، طیب (۱۳۹۴). بررسی ویژگی‌های خشکسالی در منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۷(۴)، ۳۷۸–۳۶۳.

رنجبر، مهرداد؛ صادق‌زاده، فردین؛ عمادی، مصطفی؛ قاجار سپانلو، مهدی و احمدپوراشلی‌برون، عبدالغفور (۱۴۰۱). تأثیر کاربرد انواع بیوچار و کود شیمیایی بر رشد و غلظت عناصر غذایی نیشکر. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۴(۴)، ۱۲۴۶–۱۲۳۳.

زلفی باوریانی، مختار و نوروزی، مهرداد (۱۴۰۰). تأثیر کود مرغی و بیوچار حاصل از آن در دماهای متفاوت روی جذب سطحی فسفر در یک خاک

آهکی. *پژوهش‌های خاک*، ۳۵(۲)، ۱۱۷-۱۰۵.
سبحانی، سیدمحمدامین؛ علوی‌فاضل، مجتبی؛ اردکانی، محمدرضا؛ مدحج، عادل و لک، شهرام (۱۴۰۰). ارزیابی تغییرات عملکرد و اجزا عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.)در شرایط تغییر مقدار بیوچار و میکوریزا. *علوم به‌زراعی گیاهی*، ۱۱(۱)، ۷۵-۶۳.
سماوات، سعید (۱۳۸۹). نقش مدیریت مواد آلی خاک در حاصلخیزی خاک (مسایل و محدودیت‌ها). اولین کنگره چالش‌های کود در ایران، تهران.
سیدی، ندا؛ احمدیوسفی، مهدی؛ امیری‌نژاد، مهدیه؛ زاهدی‌فر، محبوبه؛ علیزاده، فاطمه و زاهد، محبوبه (۱۴۰۱). ارزیابی تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال زیستی، *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۴(۸)، ۱۵۰-۱۳۳.
شبان، محمدرضا؛ رزاقی، فاطمه و سپاسخواه، علی‌رضا (۱۴۰۱). اثرات متقابل سطوح بیوچار، رژیم‌های آبیاری و سطوح شوری آب آبیاری بر گندم: پارامترهای فیزیولوژیکی، تبخیر-تعرق و محصول. تحقیقات کشتورزی ایران، ۴۱(۱)، ۱۷-۹.
شمس‌الدین سعید، محدثه و رمرودی، محمود (۱۴۰۰). ارزیابی تأثیر بیوچار حاصل از دماهای مختلف پیرولیز بر رشد گیاه همیشه بهار تحت تنش شوری. *علوم باغبانی*، ۳۵(۴)، ۶۰۴-۵۹۱.
عالیپوربابادی، مینا؛ معزی، عبدالامیر؛ نوروزی‌مصیر، مجتبی و خادم‌الرسول، عطاالله (۱۳۹۷). تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال زیستی. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۹(۳)، ۵۴۷-۵۳۷.
عباس‌پور، فاطمه؛ اصغری، حمیدرضا؛ رضوانی‌مقدم، پرویز؛ عباس‌دخت، حمید؛ شباهنگ، جواد و بیگ‌بابایی، عادل. (۱۳۹۸). تاثیر بیوچار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) تحت شرایط تنش خشکی. *پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۷(۱)، ۳۹-۵۲.
عظیم‌زاده، یاسر و نجفی، نصرت‌اله (۱۳۹۵). اثر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک. *مدیریت اراضی*، ۴/۲(۲)، ۱۷۳-۱۶۱.
عظیم‌زاده، یاسر و نجفی، نصرت‌اله (۱۳۹۶). بیوچار، ماده ای با ویژگی‌های منحصر به فرد برای ترسیب کربن اتمسفر و کاهش گرمایش جهانی. *مدیریت اراضی*، ۵(۱)،۶۳-۵۱.
عظیم‌زاده، یاسر؛ مقیسه، ابراهیم و عسگری لجایر، بهنام (۱۳۹۹). *مهندسی بیوچار و هیدروچار برای کاربردهای زیست‌محیطی*. انتشارات پژوهش‌های دانشگاه، تبریز، ایران.
فرخیان فیروزی، احمد؛ بی‌ریا، میلاد؛ معزی، عبدالامیر و راهنما، افراسیاب (۱۴۰۲). اثر بیوچار کنوکارپوس بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک آهکی تحت کشت ذرّت. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، DOI: 10.22098/mmws.2023.12233.1217
فیروزی، فاطمه؛ سلگی، موسی؛ خالقی، علیرضا و باقری، حسین (۱۴۰۲). کاربرد اسید فولیک و بیوچار در تنش خشکی چمن اسپورت. *تولیدات گیاهی*، ۴۶(۱)، ۵۰-۳۹.
فیضی‌اصل، ولی (۱۳۹۹). ارزیابی وضعیت حاصلخیزی خاک در دیمزارهای شمال‌غرب ایران با استفاده از ارزش شاخص عناصر غذایی (NIV). *آب و خاک*، ۳۴(۴)، ۸۹۷-۹۱۹.
قربانپور، منصور؛ عظیم‌زاده، یاسر و عسگری لجایر، بهنام (۱۳۹۹). *بیوچار، روابط خاک-گیاه*. انتشارات دانشگاه اراک، اراک، ایران.
کاظمی، راضیه؛ رونقی، عبدالمجید؛ یثربی، جعفر؛ قاسمی‌فسایی، رضا و زارعی، مهدی (۱۳۹۸). اثر کود مرغی و بیوچار آن، Funneliformis mosseae و تنش شوری بر عملکرد و غلظت عناصر کم‌مصرف گیاه ذرت. *تحقیقات کشاورزی ایران*، ۳۸(۲)، ۴۶-۳۷.
کریمی، اکبر؛ معزی، عبدالامیر؛ چرم، مصطفی و عنایتی ضمیر، نعیمه (۱۳۹۹). تأثیر بیوچار باگاس نیشکر بر فراهمی عناصر غذایی و ویژگی‌های زیستی یک خاک آهکی. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۸(۱)، ۱-۱۷.
محدثی، عباس؛ شیرمردی، مصطفی؛ مفتاحی‌زاده، حیدر؛ غلام‌نژاد، جلال (۱۴۰۲). مقایسه تأثیر بیوچار و ورمی‌کمپوست بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیک گل مغربی (*Oenothera biennis*) تحت تنش خشکی. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۳(۱)، ۳۵-۵۱.
مصباح، رامین؛ اردکانی، محمدرضا؛ مقدم، علی و رفیعی، فرناز. (۱۴۰۰). تأثیر کاربرد کودهای زیستی و بیوچار بر عملکرد کمّی، کیفی و خصوصیات ریشه در توتون (*Nicotiana tobacum* L.) گرمخانه‌ای تحت شرایط دیم. *اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۱۵(۲ (۵۸)، ۲۲۹-۲۵۰.
ملکوتی، محمدجعفر و همائی، مهدی (۱۳۸۲). *حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک (مشکلات و راه‌حل‌ها)*. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
ناروئی، آسیه؛ زمانی، جواد؛ کوهستانی، شاپور و عباس‌زاده افشار، فریده (۱۴۰۰). تأثیر بیوچار برگ خرما و بیوچار ضایعات برداشت پسته بر رشد ذرت و غلظت فلزات سنگین. *مهندسی زراعی*، ۴۴(۴)، ۴۱۳-۳۹۹.
نسیمی، پریا؛ کریمی، احمد و گرامی، زهرا (۱۴۰۱). اثرات برگ خرما و بیوچار حاصل از آن بر عملکرد و کارآیی مصرف آب ذرت علوفه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۱)، ۹۷-۸۵.

REFERENCES

Abbas, M., Ijaz, S.S., Ansar, M., Hussain, Q., Hassan, A., Akmal, M., & Bashir, K. (2019). Impact of biochar

with different organic materials on carbon fractions, aggregate size distribution, and associated polysaccharides and soil moisture retentionin an arid soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(20), 1-8.

Abbaspour, F., Asghari, H., Rezvani Moghaddam, P., Abbasdokht, H., Shabahang, J., & Baig Babaei, A. (2019). Effects of Biochar on Soil Fertility and Water Use Efficiency of Black Seed (*Nigella sativa* L.) under Water Stress Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 17(1), 39-52. (In Persian).

Abed Hussein, B., Mahdi, A.B., Emad Izzat, S., Acwin Dwijendra, N.K., Romero Parra, R.M., Barboza Arenas, L.A., Mustafa, Y., Yasin, G., Thaeer Hammid, A., & kianfar, E. (2022). Production, Structural properties Nano biochar and Effects Nano biochar in soil: A review. *Egyptian Journal of Chemistry*, *65*(12), 607-618.

Abid, M., Danish, S., Zafar-ul-Hye, M., Shaaban, M., Iqbal, M.M., Rehim, A., & Naqqash, M.N. (2017). Biochar increased photosynthetic and accessory pigments in tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) plants by reducing cadmium concentration under various irrigation waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(27), 22111-22118.

Ahmad, M., Wang, X., Hilger, T.H., Luqman, M., Nazli, F., Hussain, A., Zahir, Z.A., Latif, M., Saeed, Q., & Malik, H.A. (2020). Evaluating Biochar-Microbe Synergies for Improved Growth, Yield of Maize, and Post-Harvest Soil Characteristics in a Semi-Arid Climate. *Agronomy*, *10*, 1055.

Akhtar, S., Andersen, M.N., & Liu, F. (2015a). Biochar mitigates salinity stress in potato. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201, 368–378

Akhtar, S.S., Andersen, M.N., & Liu, F. (2015b). Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. *Agricultural water management*, 158, 61–68.

Akmal, M., Maqbool, Z., Khan, K.S., Hussain, Q., Ijaz, S.S., Iqbal, M., & Rafa, H.U. (2019). Integrated use of biochar and compost to improve soil microbial activity, nutrient availability, and plant growth in arid soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(7), 1-6.

Alburquerque, J.A., Salazar, P., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M.C., Gallardo, A., & Villar, R. (2013). Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(3), 475-484.

Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M.F., Ok, Y.S., Ibrahim, M., Riaz, M., & Shahzad, A.N. (2017). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14), 12700-12712.

Alipour babadi, M., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., & Khademalrasoul, A. (2018). Effect of different feedstock and pyrolysis temperature on some chemical and physical properties of biochar. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *49*(3), 537-547. (In Persian).

Amer, M.M. (2016). Effect of biochar, compost tea and magnetic iron ore application on some soil properties and productivity of some field crops under saline soils conditions at North Nile Delta. *Egyptian Journal of Soil Science*, 56, 169–185.

Arabi, Z., Eghtedaey, H., Gharehchmaghloo, B., & Faraji, A. (2018). Effects of biochar and bio-fertilizer on yield and qualitative properties of soybean and some chemical properties of soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-9.

Arfaoui, A., Ibrahimi, K. & Trabelsi, F. (2019). Biochar application to soil under arid conditions: a bibliometric study of research status and trends. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 45-55.

Arif, M., Ilyas, M., Riaz, M., Ali, K., Shah, K., Haq, I.U., & Fahad, S. (2017). Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil. Field Crops Research, 214, 25-37.

Azimzadeh, Y., & Najafi, N. (2017). Biochar: the Material with Unique Properties for Carbon Sequestration and Global Warming Mitigation. *Land Management Journal*, 5(1), 51-63.(In Persian).

Azimzadeh, Y., & Najafi, N. (2017). Effects of Biochar on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Land Management Journal*, 4(2), 161-173. (In Persian).

Azimzadeh, Y., Moghiseh, E., & Asgari Lajayer, B. (2020). Biochar and hydrochar engineering for environmental application. University Press Publications, Tabriz. Iran. (In Persian).

Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Khataee, A. (2021). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12), 1649–1664.

Badr, E.A., Ibrahim, O., Tawfik, M., & Bahr, A.A. (2015). Management strategy for improving the productivity of wheat in newly reclaimed sandy soil. *Management*, 8, 1438–1445.

Banihashemian, S.H., Eftekhari, A., Nasiri, M., & Mousavi Mirkalaei, S.A.A. (2022). Investigation of the effect of biochar and different sources of nitrogen on the growth characteristics of rice (*Oryza sativa*

L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(12), 3059-3072. (In Persian).
Bazi abdoli, M., Barani Motlag, M., Bosatni, A., & Nazari, T. (2023). Effect of Application of Acid Modified Biochar on Vegetative Growth and Yield components of Quinoa in a Calcareous soil Affected by Salt. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization*, doi:10.22055/agen.2023.43166.1657. (In Persian).
Biederman, L.A., & Harpole, W.S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology-Bioenergy*, 5(2), 202-214.
Cen, R., Feng, W., Yang, F., Wu, W., Liao, H., & Qu, Z. (2021). Effect mechanism of biochar application on soil structure and organic matter in semi-arid areas. *Journal of Environmental Management*, 286, 112198.
Chan, K., & Xu, Z. (2009). Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. pp.53-66. In Lehmann J, Joseph S, (Eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan. London. UK.
Chang, N., Zhai, Z., Li, H., Wang, L., & Deng, J. (2020). Impacts of nitrogen management and organic matter application on nitrous oxide emissions and soilorganic carbon from spring maize fields in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 196, 104441.
Colazo, J.C., & Buschiazzo, D.E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1-2), 228-236.
Crane-Droesch, A., Abiven, S., Jeffery, S., & Torn, M.S. (2013). Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environmental Research Letters*, *8*(4), 044049.
Dehghani Ahmadabadi, M., Shahnazari, A., Ghadami Firouzabadi, A., & Ardakani, M. (2021). The effect of irrigation management on growth and water use efficiency of maize plant under different levels of biochar. *Water Management in Agriculture*, *8*(1), 67-76. (In Persian).
Deng, B., Tammeorg, P., Luukkanen, O., Helenius, J., Starr, M. (2017). Effects of Acacia seyal and biochar on soil properties and sorghum yield in agroforestry systems in South Sudan. *Agroforestry systems*, 91, 137–148.
D'Odorico, P., Porporato, A., & Runyan, C. (2019). Ecohydrology of arid and semiarid ecosystems: An introduction. *In Dryland Ecohydrology*. Springer. 1-27.
Diatta, A.A., Fike, J.H., Battaglia, M.L., Galbraith, J.M., & Baig, M.B. (2020). Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14), 1-17.
Du, J., Zhang, Y., Qu, M., Yin, Y., Fan, K., Hu, B., & Ma, C. (2019). Effects of biochar on the microbial activity and community structure during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 272, 171-179.
Dugan, E., Verhoef, A., Robinson, S., Sohi, S., Gilkes, R., & Prakpongkep, N. (2010). Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science, Symposium.
Farrokhian Firouzi, A., Biria, M., Moezzi, A., & Rahnama, A. (2023). Effect of Conocarpus erectus biochar on some physical and mechanical properties of a calcareous soil under corn cultivation. *Water and Soil Management and Modelling*, DOI: 10.22098/mmws.2023.12233.1217. (In Persian).
Fathi Dokht, H., Movahedi Naeini, S.A., Dordipour, E., De Jong, L.W., & Hezarjaribi, E. (2017). Effects of sewage sludge and its biochar on soybean yield in fine-textured loess soil. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 4(2), 83–91.
Feiziasl, V. (2020). Evaluation of Soil Fertility Status in Northwest of Iran drylands by Nutrient Index Value (NIV). *Water and Soil*, 34(4), 897-919. (In Persian).
Firouzi, F., Solgi, M., Khaleghi, A., & Bagheri, H. (2023). The application of folic acid and biochar on drought stress in sport turfgrass. *Plant Productions*, *46*(1), 39-50. (In Persian).
Ghosh, B., Meena, V., Alam, N., Dogra, P., Bhattacharyya, R., Sharma, N., & Mishra, P. (2016). Impact of conservation practices on soil aggregation and the carbon management index after sevenyears of maize–wheat cropping system in the Indian Himalayas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 247-257.
Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal–a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230.
Gorbanpur, M., Azimzadeh, Y., & Asgari Lajayer, B. (2021). Biochar, soil-pland relations. Arak University Press, Arak. Iran. (In Persian).
Hammer, E.C., Forstreuter, M., Rillig, M.C., & Kohler, J. (2015). Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Applied Soil Ecology*, 96, 114-121.
Han, E-x., Han, G., & Bo, Y-s. (2004). Utilization of Water-retaining Agent in Plantation in Semi-arid Region. *Journal-Northwest Forestry University*, 19(3), 50-52.

Hasanpour, I., Shirvani, M., Hajabbasi, M., & Majidi, M. (2022). Effect of Acidic Biochars on Some Chemical Properties and Nutrient Availabilities of Calcareous Soils. *Journal of Water and Soil Science*, 2022; 26 (2) :39-59. (In Persian).

Hazrati, S., Zaker, K., Habibzadeh, F., & Sadeghi Bakhtevari, A.R. (2022). Effect of simultaneous application of biochar and vermicompost on the growth and grain yield of camelina (*Camelina sativa*) oil plant under rainfed condition in East Azarbaijan province. *Plant Process and Function*, 11(51), 77-92. (In Persian).

Heydari, M., Hajinia, S., Jafarian, N., Karamian, M., Mosa, Z., Asgharzadeh, S., Rezaei, N., Guidi, L., Valkó, O., & Prévosto, B. (2023). Synergistic use of biochar and the plant growth-promoting rhizobacteria in mitigating drought stress on oak (*Quercus brantii Lindl* L.) seedlings. *Forest Ecology and Management*, 531, 120793.

Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A.C., Van Groenigen, J.W., Hungate, B.A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001.

Jirka, S., & Tomlinson, T. (2015). State of the biochar industry 2014. A Survey of Commercial Activity in the Biochar Sector. International Biochar Initiative.

Kanwal, S., Ilyas, N., Shabir, S., Saeed, M., Gul, R., Zahoor, M., & Mazhar, R. (2018). Application of biochar in mitigation of negative effects of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 41(4), 526-538.

Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., & Regina, K. (2011). Biochar addition to agricultural soil increased CH4 uptake and water holding capacity–Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(1-2), 309-313.

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2021). Influence of Sugarcane Bagasse Biochar on Nutrient Availability and Biological Properties of a Calcareous Soil. *Applied Soil Research*, 8(1), 1-17. (In Persian).

Kazemi, R., Ronaghi, A., Yasrebi, J., Ghasemi-Fasaei, R., & Zarei, M. (2019). Influence of poultry manure and its biochar, Funneliformis mosseae and salinity stress on corn yield and micronutrients concentration. *Iran Agricultural Research*, 38(2), 37-46. (In Persian).

Khadem, A., Raiesi, F., Besharati, H., & Khalaj, M.A. (2021). The effects of biochar on soil nutrients status, microbial activity and carbon sequestration potential in two calcareous soils. *Biochar*, 3, 105–116.

Khanmohammadi, Z., Afyuni, M., & Mosaddeghi, M.R. (2017) Effect of sewage sludge and its biochar on chemical properties of two calcareous soils and maize shoot yield. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63:2, 198-212.

Kim, H-S., Kim, K-R., Yang, J.E., Ok, Y.S., Owens, G., Nehls, T., Wessolek, G., & Kim, K-H. (2016). Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response. *Chemosphere*, 142, 153-159.

Kloss, S., Zehetner, F., Wimmer, B., Buecker, J., Rempt, F., & Soja, G. (2014). Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 3-15.

Lashari, M.S., Ye, Y., Ji, H., Li, L., Kibue, G.W., Lu, H., Zheng, J., Pan, G. (2015). Biochar–manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 1321–1327.

Lawrinenko, M., & Laird, D.A. (2015). Anion exchange capacity of biochar. *Green Chemistry*, 17(9), 4628-4636.

Lee, S., Shah, H.S., Igalavitkana, A.D., Awad, Y.M., & Ok, Y. (2013). Enhancement of C3 and C4 plants productivity in soils amended with biochar and polyacrylamide. In: Technical Bulletin - Food and Fertilizer Technology Center: 12 pp.

Liu G, Xie M, Zhang S. 2017. Effect of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)-based biochar on organic carbon mineralization in a dry land soil. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 473-482.

Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C.A., & Gonnermann, H.M. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *Plos one*, 12(6), e0179079.

Mesbah, R., Ardakani, M.R., Moghaddam, A., & Rafiei, F. (2021). Effect of Biofertilizer and Biochar Applications on Quantitative, Qualitative Yields and Root Characteristics of Flue-Cured Tobacco (*Nicotiana tobacum* L.) Under Dryland Farming Condition. *Journal of Crop Ecophysiology*, 15(58), 229-250. (In Persian).

Malakouti, M.J., & Homaee, M. (2005). Soil fertility in arid and semi-arid regions (problems and solutions). Tarbiat Modares University Press, Tehran. Iran. (In Persian).

Marques, M.J., Álvarez, A.M., Carral, P., Esparza, I., Sastre, B., & Bienes, R. (2020). Estimating soil organic carbon in agricultural gypsiferous soils by diffuse reflectance spectroscopy. *Water*, 12(1), 261.

Mohadesi, A., Shirmardi, M., Meftahizadeh, H., & Gholamnezhad, J. (2023). Comparison of the effect of biochar and vermicompost on some morphophysiological characteristics of *Oenothera biennis* under drought stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 33(1), 35-51. (In Persian).

Moradi, S., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Sepehr, E., Khodaverdiloo, H., & Barin, M. (2019). Soil nutrients status affected by simple and enriched biochar application under salinity conditions. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-13.

Mousa, A.A. (2017). Effect of using some soil conditioners on salt affected soil properties and its productivity at El-Tina Plain area, North Sinai, Egypt. *Egyptian Journal of Soil Science*, 57, 101–111.

Muhammad, A., Muhammad, I., Muhammad, R., Kawsar, A., Kamran, S., & Shah, F. (2017). Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil. *Field Crops Research*, 214, 25-37.

Nabavinia, F., Emami, H., Astaraee, A., & Lakzian, A. (2015). Effect of tannery wastes and biochar on soil chemical and physicochemical properties and growth traits of radish. *International Agrophysics*, 29, 333–339.

Naroie, A., Zamani, J., Kohestani, S., & Abbaszadeh Afshar, F. (2022). The Effect of Biochar of Date Palm's Leaves and Pistachio Harvesting wastes on the growth of maize (*Zea mays* L.) and heavy metals concentrations. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)*, *44*(4), 399-413. (In Persian).

Nasimi, P., Karimi, A., & Gerami, Z. (2022). Investigation the effects of date palm leaves and it's biochar on yield and water use efficiency of forage corn. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(1), 85-97. (In Persian).

Novak, J.M., Busscher, W.J., Watts, D.W., Amonette, J.E., Ippolito, J.A., Lima, I.M., & Ahmedna, M. (2012). Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols. *Soil Science*, 177(5), 310-320.

Nzanza, B., Marais, D., Soundy, P. (2012). Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation and biochar amendment on growth and yield of tomato. *Plant Production and Soil Science*, http://hdl.handle.net/2263/20948.

Olmo, M., Alburquerque, J.A., Barrón, V., Del Campillo, M.C., Gallardo, A., Fuentes, M., Villar, R. (2014). Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 50(8), 1177-1187.

Osooli, H., Karimi, A., shirani, H., & Tabatabaei, S. H. (2021). The effect of type, particle size and amount of biochar on some physical and mechanical properties of calcareous soil. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 11(1), 113-128. (In Persian).

Parida, A.K., & Das, A.B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349.

Rab, A., Khan, M.R., Haq, S.U., Zahid, S., Asim, M., Afridi, M.Z., Arif, M., & Munsif, F. (2016). Impact of biochar on mungbean yield and yield components. *Pure and applied biology*, 5, 632.

Ranjbar, M., Sadegh-Zadeh, F., Emadi, M., Ghajar Sepanlou, M., & Ahmadpour Dashliboroun, A. (2022). The Effect of Various Biochar and Chemical Fertilizers on Growth and Nutrient Concentrations of Sugarcane. *Journal of Crops Improvement*, 24(4), 1233-1246. (In Persian).

Rasuli, F., Owliaie, H., Najafi-Ghiri, M., & Adhami, E. (2022). Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous soils. *Arid Land Research and Management*, 36(1), 1-26.

Raziei, T. (2016). Investigation of drought characteristics in arid and semi-arid regions of of Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 7(4), 363-378. (In Persian).

Rezaei, N., & Razzaghi, F. (2018). Effect of different levels of water salinity and biochar on wheat yield under greenhouse conditions. *Acta Horticulture*, 1190, 83-88.

Sadeghi, S.H., Kiani-Harchegani, M., Hazbavi, Z., Sadeghi, P., Angulo-Jaramillo, R., Lassabatere, L., & Younesi, H. (2020). Field measurement of effects of individual and combined application of biochar and polyacrylamide on erosion variables in loess and marl soils. *Science of the Total Environment*, 728, 138866.

Safari, S., Nazari, F., & Vafaee, Y. (2023). Impact of Rice Husk Biochar on Drought Stress Tolerance in Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, 810–826.

Safaei Khorram, M., Zhang, G., Fatemi, A., Kiefer, R., Maddah, K., Baqar, M., & Li, G. (2019). Impact of biochar and compost amendment on soil quality, growth and yield of a replanted apple orchard in a 4-year field study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1862-1869.

Salem, B. (1989). Arid zone forestry: a guide for field technicians. *FAO Conservation Guide*, (20).

Samavat, S. (2011). The role of soil organic matter management in soil fertility (issues and limitations). The 1st Iranian Fertilizer Challenges Congress, Half a Century of the Fertilizer Consumption. Tehran, Iran. (In Persian).

Seyedi, N., Ahmadyousefi, M., Amiri nejad, M., Zahedi far, M., Alizadeh, F., & Zahed, M. (2022). The assessment of biomasses effect and pyrolysis temperatures on some chemical and physical properties of biochar. *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(8), 133-150. (In Persian).

Shaban, M.R., Razzaghi, F., & Sepaskhah, A.R. (2022). Interaction effects of biochar levels, irrigation regimes, and irrigation water salinity levels on wheat: I: Physiological parameters, evapotranspiration, and yield. *Iran Agricultural Research*, *41*(1), 9-17. (In Persian).

Shamsaddin saied, A., & Ramroudi, M. (2022). Evaluation of the Effect of Biochar Obtained from Different Pyrolysis Temperatures on the Marigold Growth under Salt Stress. *Journal Of Horticultural Science*, *35*(4), 591-604. (In Persian).

Shi, W-Y., Zhu, X-C., Zhang, F-B., Wang, K-B., Deng, L., & Ma, M-G. (2019). Soil carbon biogeochemistry in arid and semiarid forests. *In Applied Geochemistry with Case Studies on Geological Formations, Exploration Techniques and Environmental Issues*. IntechOpen.

Shokuhifar, Y., Ghahsareh, A.M., Shahbazi, K. (2023). Biochar and wheat straw affecting soil chemistry and microbial biomass carbon countrywide. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 5407–5417.

Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A.A., Mahmoodabadi, M., & Laurent, B. (2019). Portable wind tunnelexperiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Geoderma*, 333, 69-80.

Singh, R., Srivastava, P., & Bhadouria, R. (2020). Combined application of biochar and farmyard manure reduces wheat crop eco-physiological performance in a tropical dryland agro-ecosystem. *Energy, Ecology and Environment*, 5, 171–183.

Sobhani, S.M.A., Alavi Fazel, M., Ardakani, M.R., Modhej, A., & Lak, S. (2021). Evaluation of yield changes and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) under changing conditions of biochar and mycorrhiza. *Journal of Plant production Sciences*, *11*(1), 63-75. (In Persian).

Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47-82.

Tavakoly, E., Ghasemi, A.R., & Motaghian, H.R. (2023). The Effect of Walnut Wood Biochar and Bentonite on Electrical Conductivity and Soil Permeability. *New Research in Sustainable Water Engineering*, *1*(2), 145-157. (In Persian).

Tirgarsoltani, M., Bahrami, H., & mokhtasibidgoli, A. (2022). The Effect of Grapevine Wood Biochar on Maize Response to Water Deficit Stress in Greenhouse Condition. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(9), 1979-1996. (In Persian).

Torres-García, M.T., Oyonarte, C., Cabello, J., Guirado, E., Rodríguez-Lozano, B., & Salinas-Bonillo, M.J. (2022). The potential of groundwater-dependent ecosystems to enhance soil biological activity and soil fertility in drylands. *Science of the Total Environment*, 826, 154111.

Usman, A.R.A., Al-Wabel, M.I., Abdulaziz, A-H., Mahmoud, W-A., El-Naggar, A.H., Ahmad, M., Abdulelah, A-F., & Abdulrasoul, A-O. (2016). Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation. *Pedosphere*, 26, 27–38.

Wang, Y., Liu, Y., Liu, R., Zhang, A., Yang, S., Liu, H., & Yang, Z. (2017). Biochar amendment reduces paddy soil nitrogen leaching but increases net global warming potential in Ningxia irrigation, China. *Scientific Reports*, *7*(1), 1-10.

Xie, Y., Wang, L., Li, H., Westholm, L.J., Carvalho, L., Thorin, E., Yu, Z., Yu, X., & Skreiberg, O. (2022). A critical review on production, modification and utilization of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161, 105405.

Yang, X., & Ali, A. (2019). Biochar for Soil Water Conservation and Salinization Control in Arid Desert Regions. *In Biochar from Biomass and Waste*. Elsevier. 161-168.

Zhang, D., Pan, G., Wu, G., Kibue, G.W., Li, L., Zhang, X., Zheng, J., Zheng, J., Cheng, K., & Joseph, S. (2016). Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere*, 142, 106–113.

Zhang, L., Jing, Y., Xiang, Y., Zhang, R., & Lu, H. (2018). Responses of soilmicrobial community structure

changes and activities to biochar addition: a meta-analysis. *Science of the Total Environment,* 643, 926-935.

Zhang, X., Qu, J., Li, H., La, S., Tian, Y., & 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, 114170.

Zimmerman, A.R., Gao, B., & Ahn, M-Y. (2011). Positive and negative carbon mineralization priming effectsamong a variety of biochar-amended soils. *Soil biology and biochemistry,* 43(6), 1169-1179.

Zolfi Bavariani, M., & Nowroozi, M. (2021). Effect of Poultry Manure and Its Derived Biochar at Different Temperatures on Phosphorus Adsorption in a Calcareous Soil. *Iranian Journal of Soil Research*, *35*(2), 105-117. (In Persian).

The role of biochar on soil fertility and crop productivity in arid and semi-arid regions: Challenges and opportunities

EXTENDED ABSTRACT

Background and aim

More than 80% of Iran's area is arid and semi-arid. Arid and semi-arid areas are characterized by a higher evaporation than precipitation, as well as persistent water shortages, frequent droughts, high climate variability, and high wind velocity. These soils have various problems and limitations such as poor physical properties, low fertility and water scarcity. One of the most important factors limiting soil fertility and crop production in these areas is the lack of soil organic matter. In more than 60% of Iran's agricultural lands, the amount of soil organic matter is less than 1%; While its optimal level in soils is 2-3%. Soil organic matter, as one of the most important indicators of soil health, improves soil physical, chemical and biological properties and plays a vital role in crop production; So, by increasing the amount of soil organic matter, the physical, chemical, and biological characteristics of the soil and crop yield can be improved. However, the organic content in dry soils is biologically and chemically less stable. Hence, organic fertilizers and wastes have low stability and little residual effects in the soil. Nowadays, converting organic wastes and residues into biochar and adding it to the soil is one of the new methods of increasing soil organic carbon.

Methodology

In this review article, while reviewing the positive effects of biochar on soil quality indicators and crop production, the challenges of using biochar in arid and semi-arid soils, especially in drylands, and the possible solutions to overcome these challenges have been reviewed.

Findings

Biochar's unique physical and chemical properties distinguish it from other soil organic matter. For example, biochar carbon is more resistant to degradation than the original carbon compounds in biomass. Adding biochar to the soil can improve not only its physical properties such as specific surface area, water holding capacity, aeration, and resistance to soil erosion but also its chemical properties such as cation exchange capacity, pH, organic carbon, nutrient availability, and reduced risk of soil contaminants. Moreover, it has such advantageous biological effects as increasing microorganism colonies and their protection against predators, raising soil fertility, enhancing crop yield and carbon sequestration, climate change mitigation, and biofuel production. Therefore, addition of biochar to the soil not only leads to carbon sequestration but also improves soil’s physical, chemical, and biological properties, thereby playing an important role in sustainable agriculture and soil management by improving soil fertility and plant yield.

Conclusion

Despite the universal attention shown to the biochar for its expected beneficial effects on soil and carbon sequestration, few studies have as of yet been devoted to its production and application in Iran. In addition, due to the specific characteristics of the arid and semi-arid soils, using biochar in these regions is associated with challenges and has received less attention. Due to the high importance of soil organic matter, this article reviewed the advantages of biochar application, including its role in increasing soil fertility and crop productivity in arid and semi-arid soils.

Keywords: Carbon Sequestration, Organic Carbon, Rainfall, Soil Organic Matter.