

Broccoli response to application of natural nanobiochar amendment, deficit irrigation and nitrogen fertigation

Atefeh Azadifar¹, Hamid Zareabyaneh^{*2}, Hassan Sarikhani³,
Mohamadreza Mosaddeghi⁴

1. Ph.D. Student, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: a.azadifar20@yahoo.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: zare@basu.ac.ir
3. Professor, Dept. of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: sarikhanih@gmail.com
4. Professor, Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: mosaddeghi@cc.iut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Full Paper</p> <p>Article history: Received: 06.26.2023 Revised: 11.10.2023 Accepted: 11.12.2023</p> <p>Keywords: Chlorophyll, Nanobiochar, Nutrients, Porous clay pitcher, Proline</p>	<p>Background and Objectives: Due to several factors, including anthropogenic global warming, drought is increasing in many arable areas which is one of the major threats to global food security. Abiotic stresses such as water deficit severely reduce crop productivity. Using strategies subsurface irrigation with porous clay capsules and natural nanobiochar amendment could be pivotal in reducing water and nitrogen fertilizer inputs as well as the effects of abiotic stresses on plants. Biochar addition to soil may improve soil physical and chemical characteristics. Soil water retention in the root zone enhances under the same irrigation schedule following biochar application. Biochar could improve plant access to soil nutrients and pivotal in reducing fertilizer inputs to agricultural soils.</p> <p>Materials and Methods: Greenhouse experiments were conducted in two years (2019 and 2020) on broccoli planted in sieved and non-sieved samples of a loam soil amended with natural nanobiochar (i.e., 0 and 10% by weight) under three irrigation regimes (i.e., 100, 75, and 50% of full irrigation) and two levels of nitrogen fertilizer (i.e., 225 and 300 kg ha⁻¹ N). The irrigation system was porous clay pitcher subsurface irrigation. The full irrigation (FI) treatments were watered to refill the pore space in the rooting zone to the field capacity (100% FI), while in deficit irrigation treatments plants received 75% of the full irrigation (75% FI) or 50% of the full irrigation (50% FI). Fertigation treatments included two levels of N fertigation (i.e., 225 kg N ha⁻¹ and 300 kg N ha⁻¹) in the seedling, vegetative growth and green head stages were applied. Physiological and morphological traits of broccoli including secondary head fresh and dry weights, secondary head density, concentration of nutrients, total chlorophyll and leaf proline were investigated.</p> <p>Results: Plants exposed to deficit irrigation and nitrogen fertigation presented a significant decrease in head fresh and dry weights, head density and also total chlorophyll, while an increase in the leaf proline content was observed. The application of NNB in soil mitigated the drought and nutritional stresses effects on the morphological traits. The results showed significant effects of the natural nanobiochar application in sieved and</p>

none-sieved soils on head fresh and dry weight, head density, total chlorophyll and leaf proline for both seasons (2019 and 2020). Natural nanobiochar addition to both sieved and non-sieved soils improved the head fresh and dry weights, head density, and total chlorophyll content. Moreover, it significantly reduced the leaf proline of broccoli plant under deficit irrigation and nitrogen fertigation. The highest values of fresh and dry weight, head density and calcium, magnesium and chlorophyll concentrations were 99.26 g, 39.79 g, 0.92 g cm⁻³, 5.96 mg g⁻¹, 3.52 mg g⁻¹ and 2.52 mg g⁻¹ in SNAS+NR2+FI, NNAS+NR2+FI, NUS+NR2+FI, SNAS+NR2+FI, SNAS+NR2+FI and NUS+NR2+FI treatments, respectively. As well as, the lowest value of leaf proline was 0.08 μmol g⁻¹ in NNAS+NR2+FI treatment.

Conclusion: Our study demonstrated some of the beneficial effects of natural nanobiochar as an organic amendment for promoting crop productivity. Hence, the integration of natural nanobiochar addition along with deficit irrigation and low N fertigation condition could be considered as a viable and optimum approach in terms of water and fertilizer saving, yield and cost. Thus, the combination of this technique and sub-surface irrigation with the porous clay pitcher system will particularly be useful in arid regions that frequently suffer with water shortages condition.

Cite this article: Azadifar, Atefeh, Zareabyaneh, Hamid, Sarikhani, Hassan, Mosaddeghi, Mohamadreza. 2024. Broccoli response to application of natural nanobiochar amendment, deficit irrigation and nitrogen fertigation. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (4), 29-56.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2023.21265.3661

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پاسخ کلم بروکلی به کاربرد اصلاح‌کننده نانوبیوچار طبیعی، کم آبیاری و کود آبیاری نیتروژن

عاطفه آزادی^۱، حمید زارع ایبانه^{۲*}، حسن ساری‌خانی^۳، محمدرضا مصدقی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: a.azadifar20@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: zare@basu.ac.ir
۳. استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: sarikhanih@gmail.com
۴. استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: mosaddeghi@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۰۲/۰۴/۰۵</p> <p>تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۸/۱۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۸/۲۱</p> <p>واژه‌های کلیدی: پرولین، عناصر غذایی، کپسول رسی متخلخل، کلروفیل، نانوبیوچار</p>	<p>سابقه و هدف: در اثر عوامل متعدد از جمله گرمایش جهانی ایجاد شده توسط فعالیت‌های انسانی، خشک‌سالی در بسیاری از مناطق تحت کشت در حال افزایش است که یکی از تهدیدهای اصلی امنیت غذایی جهانی محسوب می‌شود. تنش‌های غیرزیستی مانند کمبود آب به شدت بهره‌وری محصول را کاهش می‌دهد. کاربرد راهبردهای استفاده از آبیاری زیرسطحی با کپسول‌های رسی متخلخل و اصلاح‌کننده‌های خاک می‌تواند در کاهش نهاده‌های آب و کود نیتروژن به خاک و هم‌چنین کاهش آثار تنش‌های غیرزیستی بر گیاه نقش اساسی داشته باشند. افزودن بیوچار به خاک می‌تواند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشد. پس از کاربرد بیوچار رطوبت خاک در ناحیه ریشه تحت برنامه آبیاری یکسان افزایش می‌یابد. بیوچار می‌تواند دسترسی گیاه به مواد مغذی خاک را بهبود بخشد و در کاهش ورودی کود به خاک کشاورزی نقش اساسی داشته باشد.</p> <p>مواد و روش‌ها: دو آزمایش در محیط گلخانه (در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) بر روی کلم بروکلی که در خاک‌های الک‌شده و الک نشده تیمار شده با نانوبیوچار طبیعی (۰ و ۱۰ درصد وزنی نانوبیوچار طبیعی) تحت سه رژیم آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل) و دو سطح کود نیتروژنه (۳۰۰ و ۲۲۵ کیلوگرم در هکتار) رشد کرده بودند، انجام شد. سیستم آبیاری مورد استفاده در این پژوهش، آبیاری زیرسطحی با کپسول‌های رسی متخلخل بود. تیمارهای آبیاری کامل برای پر کردن مجدد فضای منافذ در ناحیه ریشه تا حد ظرفیت مزرعه آبیاری شدند، درحالی‌که در تیمارهای کم‌آبیاری گیاهان ۵۰ و ۷۵ درصد آبیاری کامل را دریافت کردند. تیمارهای کوددهی شامل دو سطح کود نیتروژن (یعنی ۲۲۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۳۰۰</p>

کیلوگرم نیتروژن در هکتار) در مرحله نهال، رشد رویشی و سرسبز اعمال شد. ویژگی‌های مورفولوژی و فیزیولوژیک کلم بروکلی شامل وزن تازه و خشک سرهای جانبی، چگالی سرهای جانبی، غلظت عناصر غذایی، کلروفیل کل و پرولین برگ مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج کاهش معنی‌دار وزن تازه و خشک، چگالی و غلظت عناصر کلسیم و منیزیم در سرهای جانبی و هم‌چنین کلروفیل کل برگ گیاه کلم بروکلی را در گیاهانی که در معرض کم‌آبایی و سطوح پایین کود نیتروژنه قرار گرفتند نشان داد، درحالی‌که پرولین برگ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک اثرات تنش‌های خشکی و تغذیه‌ای را بر صفات مورفولوژی کاهش داد. نتایج نشان داد که کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک‌های الک‌شده و الک‌نشده بر وزن تازه و خشک سر، تراکم سر، کلروفیل کل و پرولین برگ برای هر دو فصل (۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) قابل‌توجه بود. ترکیب خاک الک‌شده و الک‌نشده با نانوبیوچار طبیعی باعث بهبود وزن تازه و خشک، چگالی، غلظت عناصر کلسیم و منیزیم، کلروفیل کل و پرولین شد. علاوه بر این باعث کاهش معنی‌دار غلظت پرولین برگ در گیاهان در معرض کم‌آبایی و کمبود کود نیتروژنه گردید. بیش‌ترین مقادیر وزن تازه و خشک سرجانبی، چگالی سر جانبی، غلظت کلسیم، منیزیم و کلروفیل به ترتیب در تیمارهای SNAS+NR2+FI، NNAS+NR2+FI، NUS+NR2+FI، SNAS+NR2+FI و NUS+NR2+FI به مقدار ۹۹/۲۶ گرم، ۳۹/۷۹ گرم، ۰/۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۵/۹۶ میلی‌گرم بر گرم، ۳/۵۲ میلی‌گرم بر گرم و ۲/۵۲ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد. هم‌چنین کم‌ترین مقدار پرولین برگ ۰/۰۸ میکرومول بر گرم و در تیمار NNAS+NR2+FI به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: مطالعه ما برخی از اثرات مفید نانوبیوچار طبیعی را به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی برای ارتقای بهره‌وری محصول نشان داد. از این‌رو، ادغام افزودن نانوبیوچار طبیعی همراه با کم‌آبایی و شرایط کمبود کود نیتروژنه می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد مناسب و بهینه از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب و کود، عملکرد و هزینه در نظر گرفته شود. بنابراین، ترکیب این روش و آبیاری زیرسطحی با سیستم کپسول‌های رسی متخلخل به‌ویژه در مناطق خشکی که اغلب از شرایط کم‌آبی رنج می‌برند مفید خواهد بود.

استناد: آزادی‌فر، عاطفه، زارع ابیانه، حمید، ساری‌خانی، حسن، مصدقی، محمدرضا (۱۴۰۲). پاسخ کلم بروکلی به کاربرد اصلاح‌کننده نانوبیوچار طبیعی، کم‌آبایی و کود آبیاری نیتروژن. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۰ (۴)، ۵۶-۲۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2023.21265.3661



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

بیوچار مشتق‌شده از بقایای گیاهی، یک ماده کربنی پایدار و سازگار با محیط زیست است. کاربرد بیوچار در خاک ممکن است ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند تخلخل (۱)، چگالی ظاهری (۲)، پایداری خاکدانه‌ها (۳) و گنجایش نگهداری آب (۴) را بهبود بخشد. لی و همکاران (۲۰۱۸) دریافتند که تخلخل، میزان رطوبت خاک و در نتیجه جذب آب توسط ریشه با افزودن بیوچار به خاک بهبود می‌یابد. در تعدادی از پژوهش‌ها گزارش شده است که افزودن بیوچار آثار تنش خشکی و شوری را در گیاهان کاهش می‌دهد و باعث افزایش عملکرد محصول می‌شود (۵). علاوه بر این، بیوچار دارای مواد مغذی مختلفی مانند فسفر، پتاسیم، نیتروژن، منیزیم و کلسیم است (۶) و کاربرد آن در خاک هدررفت N، P، K را از طریق آبشویی کاهش می‌دهد (۷). بدین ترتیب فراهمی مواد مغذی خاک برای گیاه بهبود یافته و نیاز به کوددهی کاهش می‌یابد. بیوچار با تغییر فرآیند نیتریفیکاسیون (۸)، کاهش آبشویی و خروج گاز نیتروژن فراهمی اشکال یونی قابل‌دسترس برای گیاه را افزایش می‌دهد. بنابراین، بیوچار پتانسیل زیادی برای کاهش تحرک نیتروژن در خاک و در نتیجه کاهش آبشویی نترات به سوی منابع آب زیرزمینی دارد (۹). بیوچار با ایجاد محیط مناسب برای فعالیت ریزجانداران، افزایش رطوبت خاک و متعادل کردن pH خاک، واکنش‌ها را در چرخه نیتروژن خاک کنترل می‌کند (۱۰). مونتایا و همکاران (۲۰۲۲) مشاهده کردند که کاربرد بیوچار باعث افزایش ترکیبات غذایی در سر کلم بروکلی می‌شود (۱۱).

آبیاری زیرسطحی که در آن آب در زیر سطح خاک، توسط نیروهای موینگی خاک اعمال می‌شود، یک راهبرد مدیریتی سازگار با محیط‌زیست و امیدوارکننده برای صرفه‌جویی در مصرف آب است.

این روش با کاهش هدررفت آب از طریق تبخیر، نفوذ و رواناب مصرف آب را کاهش می‌دهد. آبیاری زیرسطحی نه تنها از طریق استفاده دقیق از آب، بلکه با بهبود هوادهی ناحیه ریشه، کارایی مصرف آب، رشد محصول و عملکرد را افزایش می‌دهد (۱۲). علاوه بر این، در سبزی‌هایی که به طور گسترده کشت می‌شوند، آبیاری زیرسطحی می‌تواند باعث صرفه‌جویی نیروی کار، کوددهی آسان، کاهش آسیب‌های ناشی از آفتاب‌سوختگی و بیماری‌ها شود (۱۳). به علاوه، آبیاری زیرسطحی با کاهش هدررفت از طریق فرآیندهایی مانند رواناب سطحی و آبشویی اثربخشی کود نیتروژن مصرفی را افزایش می‌دهد (۱۴). بنابراین، استفاده از یک راهبرد مدیریت آبیاری کارآمد و هم‌چنین یک رویکرد مدیریت بهینه برای کاربردهای کود نیتروژن ممکن است هدررفت نیتروژن از زمین‌های کشاورزی را کاهش دهد (۱۵). در این راستا، کم‌آبیاری ممکن است بسیار سودمند باشد. استفاده از کم‌آبیاری (DI) نفوذ عمقی و هدررفت نیتروژن را کاهش می‌دهد، هم‌چنین ممکن است به طور قابل‌توجهی بهره‌وری محصول را کاهش دهد (۱۶).

آبیاری کوزه‌ای نوعی آبیاری زیرسطحی با رویکردی بسیار سودمند با کارایی زیاد برای کاهش عملکرد محصول ناشی از تنش آبی در روش‌های کم‌آبیاری است (۱۷). تخلیه آب در آبیاری با کپسول‌های رسی متخلخل که به صورت مدفون استفاده می‌شوند به صورت خودبه‌خود تنظیم می‌شود. آب از دیواره رسی کپسول‌های رسی متخلخل با سرعتی که تحت تأثیر تراوایی کپسول و مصرف آب گیاه است به بیرون تراوش می‌کند (۱۸). در مقایسه با کوددهی با روش آبیاری قطره‌ای، کوددهی با کپسول‌های رسی متخلخل عملکرد و کیفیت محصول را افزایش می‌دهد (۱۹). در این زمینه، ترکیبی از

خاک با ساختمان ضعیف (خاک الک‌شده) و مناسب (الک نشده) بر کاهش آثار منفی سه شدت مختلف کم‌آبایی و دو سطح کاربرد کود نیتروژن بر کیفیت سرهای جانبی کلم بروکلی (وزن تازه و خشک و چگالی سرهای جانبی)، مواد مغذی سر جانبی، کلروفیل کل و پرولین برگ انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در گلخانه پژوهشی (طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی، ۱۸۴۴ متر بالاتر از میانگین سطح دریا) در دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران در دو فصل رشد انجام شد: اول شهریورماه تا ۳۰ آذرماه سال ۱۳۹۸ و اول شهریورماه تا ۳۰ آذرماه سال ۱۳۹۹. کلم بروکلی در گلدان‌های با قطر ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر کشت شد. در طول فصول رشد گیاه در گلخانه (شهریور تا آذر)، میانگین دمای روزانه هوا ۲۸-۳۰ درجه سلسیوس، میانگین رطوبت نسبی ۷۵ درصد و میانگین تابش فعال فتوستتزی روزانه (۵۰۰ میکرومول فوتون $m^{-2}s^{-1}$) بود. بیست‌وچهار تیمار در سال ۱۳۹۸ با ۳ تکرار در قالب آرایش فاکتوریل (۴ فاکتور) و طرح پایه کاملاً تصادفی در نظر گرفته شد. تیمارهای مورد آزمایش خاک (الک‌شده و الک‌نشده)، نانوبیوچار (۰ و ۱۰ درصد وزنی)، کود آبیاری (۲۲۵ و ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و کم‌آبایی (۷۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد آبیاری کامل) بودند. اختصارات تیمارهای مورد آزمایش به‌کار رفته در پژوهش به‌شرح زیر می‌باشند:

راهبردهای مؤثر مختلف می‌تواند نقش اساسی در کاهش آثار سوء ناشی از کمبود آب و کود بر بهره‌وری گیاه داشته باشد.

از مشخصه‌های سیستم‌های کشت سبزیجات استفاده گسترده از کودهای نیتروژنه، تناوب زراعی با برداشت‌های متعدد در یک سال و کاربرد زیاد آب است (۲۰). نیتروژن یکی از عناصر ضروری پرمصرف برای رشد گیاه است که به دلیل تقاضای زیاد گیاه برای آن، احتمال هدررفت ناشی از آبشویی، رواناب و تبخیر (۲۱) در صورت استفاده از آن زیاد است. کشاورزی درازمدت و فشرده، حاصلخیزی خاک و در نتیجه توانایی آن در تأمین نیتروژن کافی برای محصولات را کاهش می‌دهد (۲۱). از طرفی، اصول کشاورزی پایدار نیازمند تولید فزاینده غذا در سراسر جهان (۲۲) و درعین‌حال کاهش ردپای زیست‌محیطی ناشی از گسترش کشاورزی است (۲۳). بنابراین، دستیابی به کاربرد راهبردهای مؤثر و مدیریت صحیح در کشاورزی و ارزیابی پتانسیل آن‌ها در کاهش ردپای زیست‌محیطی و افزایش تولید محصول در واحد سطح بسیار مهم است (۲۴).

به نظر می‌رسد هنوز دانسته‌های محدودی در مورد چگونگی تأثیر نانوبیوچار طبیعی بر خاک‌های با ساختمان ضعیف و مناسب و در نتیجه آثار آن بر صفات فیزیولوژیک و مورفولوژی کلم بروکلی کشت‌شده تحت سطوح مختلف کم‌آبایی و کود نیتروژنه در آبیاری زیرسطحی با کپسول رسی متخلخل وجود دارد. بنابراین، این پژوهش دوساله با هدف تبیین تأثیر یک‌بار کاربرد نانوبیوچار طبیعی در

جدول ۱- اختصارات به کار رفته در پژوهش.

Table 1. Abbreviations Used in the research.

توضیحات Description	علامت اختصاری Abbreviations
خاک الک نشده تیمار نشده با نانوبیوچار طبیعی Nonsieved Unamended Soil	NUS
خاک الک شده تیمار نشده با نانوبیوچار طبیعی Sieved Unamended Soil	SUS
خاک الک نشده تیمار شده با نانوبیوچار طبیعی Nonsieved nanobiochar amended soil	NNAS
خاک الک شده تیمار شده با نانوبیوچار طبیعی Nonsieved nanobiochar amended soil	SNAS
نرخ کود نیتروژنه Nitrogen rate	NR
آبیاری کامل Full irrigation	FI
رطوبت گنجایش مزرعه Field capacity	FC
تیمار نشده Unamended	UA
تیمار شده با نانوبیوچار طبیعی Nanobiochar amended	NBA
خاک الک شده Sieved soil	SS
خاک الک نشده None-Sieved soil	NSS

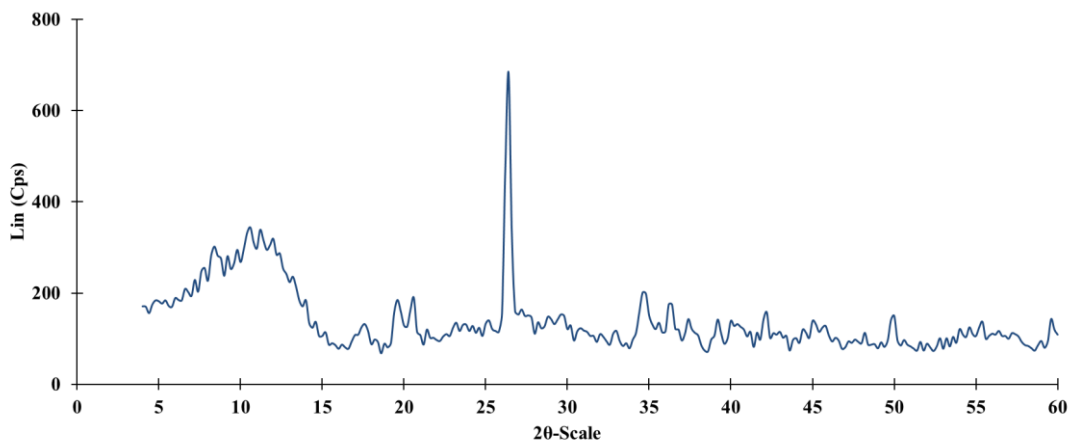
جمع آوری شد. برای تهیه تیمار خاک الک شده، ابتدا خاک هوا خشک شد و از الک با اندازه چشمه ۰/۵ میلی متر عبور داده شد.

بیوچار طبیعی از معدنی واقع در شهرستان کوهبنان در استان کرمان جمع آوری شد. بر اساس مطالعات زمین شناسی بیوچار طبیعی کوهبنان طی ۶۵۰ میلیون سال پیش در یک فرآیند طبیعی شکل گرفته است. برای تهیه نانوبیوچار طبیعی، بیوچار در یک آسیاب گلوله ای سیاره ای با انرژی زیاد به مدت ۱۲ ساعت آسیاب شد (۲۴). اندازه ذرات نانوبیوچار طبیعی با استفاده از نمودار طیف پراش پرتو ایکس^۱ (شکل ۱) و رابطه شرر^۲ (رابطه ۱) به دست آمد.

همه تیمارها در شهریورماه سال ۱۳۹۸ به طور تصادفی در گلخانه توزیع شدند. از تیمارهای یکسان برای هر دو فصل رشد استفاده شد. بذرهای کلم بروکلی در سینی های نشاء (۱۰۵ سلول)، با استفاده از مخلوط کوکوپیت و پرلیت (نسبت ۱:۱ حجمی) در محیط گلخانه تحت نور طبیعی روز جوانه دار شدند. نشاءهای کلم بروکلی در مرحله پنج برگی به صورت جداگانه در گلدان های پلاستیکی دارای ۳۰ کیلوگرم خاک لومی کاشته شدند. نانوبیوچار طبیعی یک بار در مرداد ماه سال ۱۳۹۸ به خاک افزوده شد و با خاک مخلوط گردید. خاک مورد استفاده برای آزمایش از لایه ۰ تا ۲۰ سانتی متری افق زراعی (AP) زمین کشاورزی واقع در دانشگاه بوعلی سینا همدان

1- XRD

2- Scherrer equation



شکل ۱- الگوی XRD ذرات نانوبیوچار.

Figure 1. XRD pattern of nanobiochar particles.

برای تعیین وزن تازه و خشک، چگالی و مواد مغذی سرهای جانبی از میانگین اولین سرهای جانبی روییده شده (۳ عدد برای هر بوته) استفاده گردید. سیستم آبیاری مورد استفاده در این پژوهش، آبیاری زیرسطحی با کپسول‌های رسی متخلخل بود. برای تأمین آب آبیاری گیاهان از آب شرب گلخانه آموزشی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان استفاده شد. کپسول‌ها در عمق ۲ سانتی‌متری خاک (از بالای لوله) دفن شدند. آب از یک منبع ذخیره نصب شده در بالای گلدان‌ها که با بار هیدرولیکی ۱۰۰ سانتی‌متری توسط لوله ۱۶ به سیستم آبیاری متصل شده بود، تأمین گردید. جدول ۳ ویژگی‌های ریخت‌شناسی و هیدرولیکی کپسول‌های رسی متخلخل مورد استفاده در پژوهش را در فشارهای هیدرواستاتیکی ۲۵، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد.

$$\tau = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

که در آن، τ اندازه متوسط کرسالت (نانومتر)، k ضریب شکل بلور، λ طول موج تیوب تولیدکننده پرتو ایکس (نانومتر)، β پهنای پیک در نصف در نصف ارتفاع بیشینه (درجه) و θ زاویه پراش (درجه) می‌باشند. میانگین اندازه ذرات ۲۰/۴۷ نانومتر به دست آمد که در محدوده نانوذره‌ها (۱۰۰-۱ نانومتر) قرار دارد. نانوبیوچار طبیعی برای تیمارهای حاوی نانوبیوچار طبیعی به میزان ۱۰ درصد وزنی با خاک ترکیب گردید. ویژگی‌های خاک و نانوبیوچار طبیعی مورد استفاده در پژوهش در جدول ۲ آورده شده است.

در مجموع ۱۲۰ روز پس از کاشت، نمونه‌های برگگی از جوان‌ترین برگ‌های کاملاً باز شده در یک سوم بالایی محور شاخه‌های کلم بروکلی (۲۵) برای تعیین کلروفیل کل و پرولین برگ جمع‌آوری شد.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و نانوبیوچار طبیعی مورد بررسی.

Table 2. Some chemical and physical properties of the studied soil and natural nanobiochar.				
نانوبیوچار طبیعی	خاک	واحد	روش اندازه‌گیری	ویژگی‌ها
Natural nanobiochar	Soil	Unit	Method	Properties
-	51.12	%	هیدرومتری Hydrometer method	شن Sand
-	34	%	هیدرومتری Hydrometer method	سیلت Silt
-	14.88	%	هیدرومتری Hydrometer method	رس Clay
-	Loam	-	هیدرومتری Hydrometer method	بافت خاک Soil texture
-	1.26	گرم بر سانتی متر مکعب gcm ⁻³	$\rho_b = \frac{M_w}{V_t}$	چگالی ظاهری Bulk density
-	52	درصد حجمی %	$n = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$	تخلخل Porosity
-	29	درصد حجمی %	$\theta_v = \frac{M_t - M_d}{M_d - M_c} \rho_b$	رطوبت گنجایش مزرعه Field capacity
2.3	0.01	درصد %	کج‌دال Kjeldahl	نیتروژن Nitrogen
19.0	1.61	درصد %	روش والکلی-بلک Walkley-Black Method	ماده آلی Organic matter
5.30	7.43	-	خاک: (عصاره ۱ به ۵ سوسپانسیون خاک و آب دیونیزه) Soil: (suspension of 1:5 soil/deionized water) نانوبیوچار: (عصاره ۱ به ۲۰ سوسپانسیون نانوبیوچار و آب دیونیزه) Nanobiochar: (suspension of 1:20 biochar/deionized water)	واکنش pH
2.70	1.26	دسی‌زیمنس بر متر dSm ⁻¹	خاک: (عصاره ۱ به ۵ سوسپانسیون خاک و آب دیونیزه) Soil: (suspension of 1:5 soil/deionized water) نانوبیوچار: (عصاره ۱ به ۲۰ سوسپانسیون نانوبیوچار و آب دیونیزه) Nanobiochar: (suspension of 1:20 biochar/deionized water)	شوری EC
93.4	14.37	ساتی مول در کیلوگرم خاک cmolk ⁻¹	به روش استات آمونیوم یک مولار (pH=7) (1 N ammonium acetate at pH 7)	گنجایش تبادل کاتیونی CEC
4.70	0.04	درصد %	روش عصاره گیری با آمونیوم استات و قرائت با دستگاه فلیم فتومتر Flame photometer (ammonium acetate method)	پتاسیم قابل جذب K
5	0.64	درصد %	طیف‌سنجی جذب اتمی Atomic absorption spectroscopy	کلسیم قابل جذب Ca
1.00	-	درصد %	طیف‌سنجی جذب اتمی Atomic absorption spectroscopy	منیزیم قابل جذب Mg ²
1.60	-	درصد %	دستگاه اسپکتروفوتومتر Spectrophotometer	اسید هیومیک Humic acid
0.62	-	درصد %	دستگاه اسپکتروفوتومتر Spectrophotometer	فولیک اسید Fulvic acid
>400°C	-	درجه سانتی‌گراد °C	دستگاه تعیین نقطه ذوب Melting point determination system	نقطه ذوب Melting point

جدول ۳- ویژگی‌های ریخت‌شناسی و هیدرولیکی کپسول رسی متخلخل.

Table 3. Morphological and hydraulic characteristics of porous clay capsule.

آبدهی (لیتر بر ساعت) Flow rate (Lh ⁻¹)				عمق خیسیدگی (سانتی‌متر) Wetted depth (cm)				شعاع خیسیدگی (سانتی‌متر) Wetted radius (cm)				شکل Shape	قطر داخلی (سانتی‌متر) Inner diameter (cm)	قطر خارجی (سانتی‌متر) External diameter (cm)	طول (سانتی‌متر) Length (cm)
100	80	50	25	100	80	50	25	100	80	50	25				
2.45	1.83	1.29	0.81	85	75	68	49	20	20	20	20	استوانه Cylinder	1.5	3.5	30

عناصر کلسیم و منیزیم، سرهای جانبی که در دمای ۷۲ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک شده بودند، آسیاب شدند. سپس نمونه‌های خشک‌شده و پودر شده توسط اسید نیتریک ۶۵ درصد هضم شد. در نهایت غلظت کل کلسیم و منیزیم توسط طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری شد (۲۶). برای اندازه‌گیری کلروفیل برگ، نمونه برگ تازه (۱۰۰ میلی‌گرم) در ۱۰ میلی‌لیتر استون (۸۰ درصد) غوطه‌ور شده و به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس جذب عصاره در طول موج‌های ۶۴۶ و ۶۶۴ نانومتر قرائت شده و کلروفیل کل برگ با روش لیکتین تالرز (۱۹۸۷) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پرولین برگ ابتدا عصاره جوان‌ترین برگ (۲۶) توسط محلول اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد استخراج و فیلتر شده و سپس مقدار پرولین با روش بیتس و همکاران (۱۹۷۳) تعیین گردید (۲۷، ۲۸). داده‌های برداشت‌شده با استفاده از روش PROC GLM در نرم‌افزار SAS (نسخه ۹،۴) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در نهایت میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$ مقایسه شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شاخص‌های رشد گیاه در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر متقابل

آبیاری به تعداد ۴۰ مرتبه با دور آبیاری سه روز در هر دو فصل رشد انجام شد. مقدار آب برای تیمار آبیاری کامل بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$IW = (A)(\Delta SW)(\rho_b)(D_{rz}) \quad (2)$$

که در آن، IW مقدار آب مورد نیاز آبیاری (سانتی‌متر مکعب)، A مساحت گلدان (سانتی‌متر مربع)، ΔSW کمبود رطوبتی خاک در عمق ریشه پیش از آبیاری در تیمار آبیاری کامل، ρ_b چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و D_{rz} ضخامت خاک لایه توسعه ریشه (سانتی‌متر) می‌باشند. تیمارهای کم‌آبیاری ۳۰ روز پس از کشت آغاز شد و به مدت ۹۰ روز به طول انجامید. در تیمار آبیاری کامل (FI) در خاک الک نشده آبیاری انجام می‌شد تا رطوبت خاک در ناحیه ریشه به گنجایش مزرعه (100%FC) برسد، در حالی که گیاهان در تیمارهای کم‌آبیاری به اندازه ۷۵ درصد آبیاری کامل (75%FI) و ۵۰ درصد آبیاری کامل (50%FI) آب دریافت کردند. تیمارهای کوددهی شامل دو سطح کود نیتروژنه (۳۰۰ و ۲۲۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع اوره) در مراحل نشاء، رشد رویشی و گلدهی اعمال شد.

سرهای جانبی بوته‌های کلم بروکلی از هر گلدان در مرحله تجاری (حداکثر اندازه و فشردگی) برداشت گردید. سپس وزن تازه و خشک و هم‌چنین چگالی سرها (جرم/حجم) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری

آبیاری و کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک الک شده و الک نشده بر وزن خشک سرهای جانبی کلم بروکلی در سال اول در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود ولی در سال دوم معنی دار نبود.

کم آبیاری، کودآبیاری و کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک الک شده و الک نشده بر وزن تازه و چگالی سرهای جانبی کلم بروکلی در سال های اول و دوم به ترتیب در سطح احتمال یک، یک، یک و پنج درصد معنی دار بود. هم چنین اثر متقابل کم آبیاری، کود

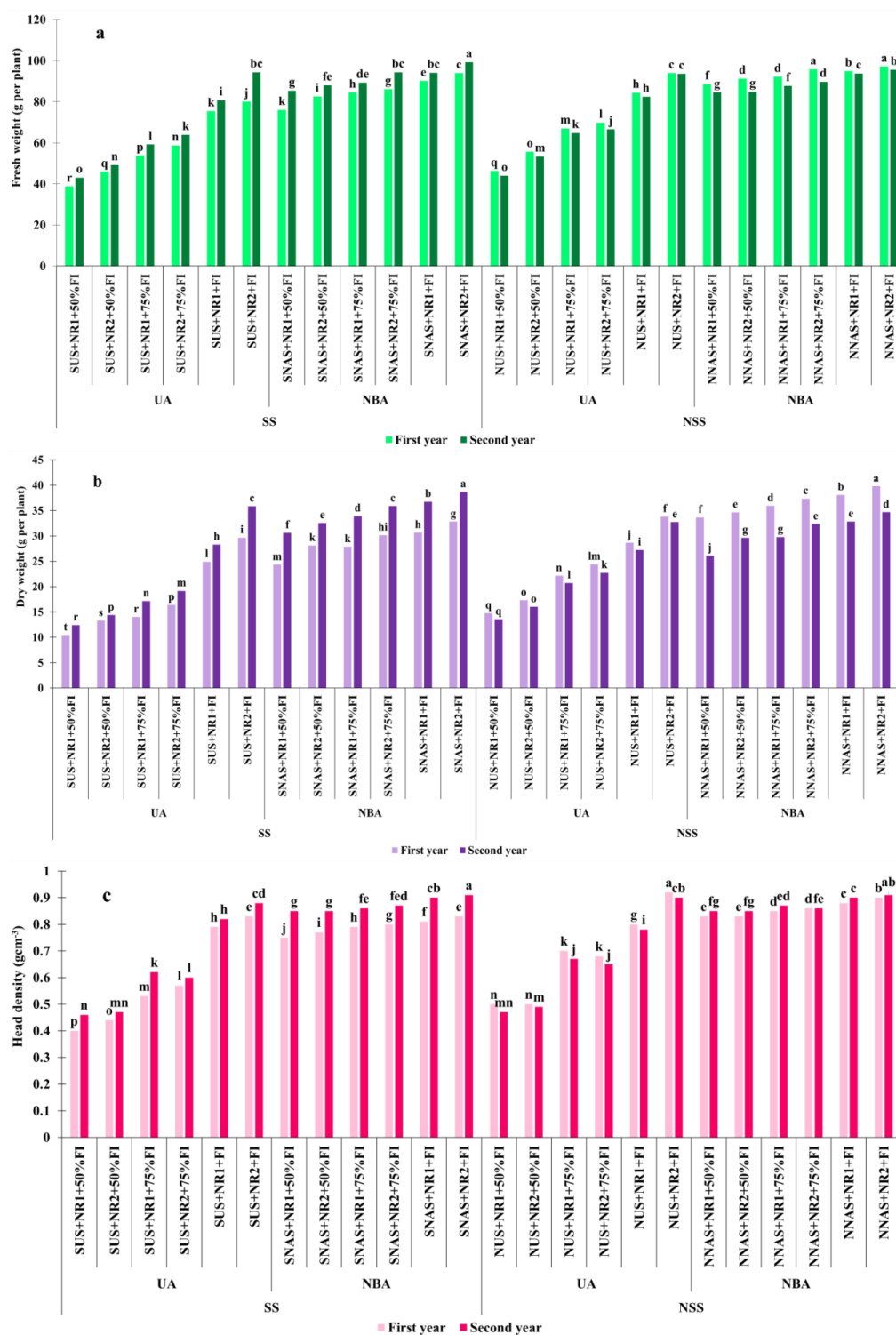
جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده.

Table 4. The results of variance analysis (mean square and degree of freedom) of the measured parameters.

چگالی سر سال دوم Head density (Second year)	چگالی سر سال اول Head density (First year)	وزن خشک سال دوم Dry weight (Second year)	وزن خشک سال اول Dry weight (First year)	وزن تازه سال دوم Fresh weight (Second year)	وزن تازه سال اول Fresh weight (First year)	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
0.277949**	0.283991**	800.24921**	637.459489**	3884.467540**	3220.80314**	2	کم آبیاری Deficit irrigation (DI)
0.001663**	0.104173**	37.613356**	760.760022**	0.085420 ^{ns}	1538.18311**	1	خاک Soil (S)
0.885026**	0.644056**	2228.893889**	2573.552939**	10662.86722**	11521.8730**	1	نانو بیوچار طبیعی Natural nanobiochar (NNB)
0.005053**	0.012867**	155.643606**	130.950139**	519.601340**	434.093110**	1	کود نیتروژنه Nitrogen fertilizer (NF)
0.001546**	0.002662**	13.055418**	8.523822**	1.962690*	11.762580**	2	کم آبیاری×خاک DI×S
0.153590**	0.152167**	195.337235**	165.980406**	1393.953890**	1147.36930**	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی DI×NNB
0.006236**	0.002311**	7.487476**	2.789006**	36.175770**	15.174700**	2	کم آبیاری× کود نیتروژنه DI×NF
0.000704*	0.002894**	102.5312**	21.670139**	98.280200**	38.881500**	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی S×NNB
0.000348*	0.000154 ^{ns}	0.029606 ^{ns}	2.074006**	12.650450**	0.302900 ^{ns}	1	خاک× کود نیتروژنه S×NF
0.002130**	0.003209**	7.385606**	7.068800**	104.980050**	39.887330**	1	نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه NNB×NF
0.001141**	0.003015**	11.736654**	7.831706**	9.600720**	34.176030**	2	کم آبیاری× خاک× نانو بیوچار طبیعی DI×S×NNB
0.000493*	0.002492**	1.739518**	0.863839**	5.360620**	2.291020**	2	کم آبیاری×خاک× کود نیتروژنه DI×S×NF
0.000618*	0.000004 ^{ns}	1.71125**	2.026756**	4.195340*	8.562900**	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه S×NNB×NF
0.002614**	0.001367**	12.822768**	3.414867**	32.169020**	3.468630**	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×NNB×NF
0.000263*	0.001159**	0.165154 ^{ns}	0.340289**	3.896740**	13.609530**	2	کم آبیاری×خاک× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×S×NNB×NF
1.15	0.88	0.90	0.77	0.98	0.72		ضریب تغییرات (CV) Coefficient of variation
0.000077	0.000041	0.06	0.04	0.59	0.31		خطا Error

طول هر دو فصل رشد (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) کاهش یافتند. از سوی دیگر، استفاده از نانوبیوچار طبیعی در خاک آثار تنش کم‌آبایی و سطح پایین کاربرد کود نیتروژنه بر روی شاخص‌های مورفولوژی را کاهش داد. بیش‌ترین مقادیر وزن تازه و خشک و شاخص‌های سرهای جانبی کلم بروکلی در هر دو فصل در تیمارهای آبیاری و کوددهی مشاهده شد، درحالی‌که کم‌ترین مقادیر متعلق به تیمار $SUS+NR1+50\%FI$ بود. گیاهان کلم بروکلی رشد کرده در خاک‌های الک‌شده و الک‌نشده (اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی) بیش‌ترین مقادیر وزن تازه و خشک و چگالی سرهای جانبی خود را در سال دوم حفظ کردند؛ این شاخص‌ها در گذر زمان افزایش یافتند. علاوه بر این، گیاهان رشدیافته در خاک الک نشده سطوح بیش‌تری از وزن تازه و خشک و چگالی سرهای جانبی را در مقایسه با خاک الک‌شده نشان دادند (شکل ۲a-c).

نتایج مقایسه میانگین آثار برهمکنش نانوبیوچار طبیعی (در خاک الک‌شده و خاک الک‌نشده)، کم‌آبایی و سطوح پایین کود نیتروژن بر وزن تازه و خشک و چگالی سرهای جانبی کلم بروکلی در شکل ۲a-c آورده شده است. نتایج نشان‌دهنده اثر قابل‌توجه کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک الک‌شده و خاک الک‌نشده بر روی وزن تازه و خشک و چگالی سرهای جانبی کلم بروکلی در هر دو سال ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ است (شکل 2a-c). وزن تازه و خشک و چگالی سرهای جانبی کلم بروکلی‌های رشدیافته در خاک‌های اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی (خاک الک‌شده و خاک الک‌نشده) در تمام تیمارها (کم‌آبایی و سطح پایین کود نیتروژنه) در مقایسه با خاک بدون نانوبیوچار افزایش یافت. در خاک‌های بدون نانوبیوچار، این شاخص‌ها به تدریج با افزایش شدت کم‌آبایی (۵۰ درصد FI و ۷۵ درصد FI) و سطح پایین کود نیتروژنه (۲۲۵ کیلوگرم در هکتار) در



شکل ۲- مقایسه میانگین (a) وزن تازه (گرم در بوته)، (b) وزن خشک (گرم در بوته) و (c) چگالی (گرم بر سانتی مترمکعب) سرهای جانبی کلم بروکلی در پاسخ به کاربرد نانوبیوجار طبیعی در خاک‌های الک شده و الک نشده تحت سطوح مختلف کم آبیاری و کود نیتروژن. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

Figure 2. Mean comparisons of a) fresh weight (g per plant), b) dry weight (g per plant) and c) head density (gcm^{-3}) of secondary head of broccoli plants in response to natural nanobiochar application in sieved and nonsieved soils under different levels of deficit irrigation and nitrogen fertigation; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

در پژوهش حاضر، کمبود آب و نیتروژن باعث کاهش شاخص‌های کیفیت سر گیاه کلم بروکلی (مانند وزن تازه، وزن خشک و چگالی) شد که مشابه یافته‌هایی است که قبلاً در مورد کلم بروکلی گزارش شده است (۲۶). این نتایج هم‌چنین با یافته‌های رزاق و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد (۲۹). آن‌ها هم‌چنین گزارش کردند که کاهش شاخص‌های مورفولوژی ناشی از کمبود آب در گیاهان به کاهش جذب مواد مغذی، پراکسیداسیون لیپیدی و تغییر در سطوح هورمونی گیاه نسبت داده می‌شود. کمبود آب با تأثیر بر فعالیت‌های متابولیکی، فعالیت‌های آنزیمی، تعادل اسمزی و فتوسنتز از رشد گیاه جلوگیری می‌کند (۳۰). در پژوهش‌های دیگر نیز نتایج مشابهی یافت شد، به‌گونه‌ای که کم‌آبایی منجر به کاهش قابل‌توجه عملکرد و رشد محصول گردید (۲۶). کاهش جذب آب توسط ریشه و کمبود آب در بافت‌های گیاه منجر به کاهش فتوسنتز می‌شود که منجر به کوچک شدن سلول‌های گیاهی و سطح برگ در بافت‌های رویشی تازه تشکیل شده و در نهایت کاهش حجم سلول در بافت‌های گیاهی به دلیل کمبود آب در بافت‌ها می‌گردد (۳۱). پژوهش‌گران دریافته‌اند که کاهش آب و نیتروژن باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (۳۲). نیتروژن یکی از اجزای مهم پروتئین است که در تقسیم سلولی، بزرگ شدن سلول، فتوسنتز و در نتیجه در رشد گیاه نقشی حیاتی دارد. سوری و حاتمیان (۲۰۱۹) به آثار نیمه‌هورمونی ترکیبات نیتروژن‌دار مختلف از جمله نیترات و آمونیوم در متابولیسم سلولی گیاه پی بردند (۳۳). علاوه بر این، عملکرد کل بازتاب مستقیم فتوسنتز و جذب مواد مغذی توسط گیاه است. به طوری که سطوح بالاتر کوددهی نیتروژن منعکس‌کننده کیفیت بهتر سر کلم بروکلی، مواد مغذی بیش‌تر سر (۳۴) و در نهایت عملکرد بیش‌تر گیاه (۳۵) می‌گردد. فراکیولا و همکاران (۲۰۲۰) دریافته‌اند که وزن، اندازه گل‌آذین و هم‌چنین عملکرد کلم بروکلی با افزایش سطح کود نیتروژن به صورت خطی افزایش می‌یابد (۳۶). کیم و همکاران (۲۰۲۱) در

پژوهشی دریافته‌اند که عملکرد کلم بروکلی با کاربرد کود نیتروژن رابطه مستقیم دارد (۳۷). با این وجود، این آثار منفی بر رشد و عملکرد محصول با افزودن نانوبیوچار طبیعی به خاک کاهش یافت. ویژگی‌های کیفی سر گیاه کلم بروکلی مانند FW ، DW و HD که همگی از معیارهای مهم کیفیت کلم بروکلی هستند، تحت تأثیر کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک الک‌شده و الک‌نشده، به‌ویژه در سال دوم، تحت شدت‌های مختلف کم‌آبایی و سطوح پایین کود نیتروژن قرار گرفتند. در تعدادی از پژوهش‌ها آثار مثبت کاربرد بیوچار و کود نیتروژن بر افزایش بهره‌وری آب گزارش شده است (۲). براساس پژوهش چیتلا و همکاران (۲۰۱۴)، ادغام بیوچار با کودها باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شود (۳۸). پژوهش‌های دیگر مزایای کاربرد بیوچار را برای حداقل دو سال پس از استفاده نشان داده‌اند (۳۹). برخی دیگر دریافته‌اند که این مزایا در طول زمان نیز افزایش می‌یابند (۴۰)، اما هیچ کدام بین خاک‌های الک‌شده و الک نشده تمایزی قائل نشدند. پاسخ مثبت کلم بروکلی‌های رشدیافته در خاک اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی تحت شدت‌های مختلف کم‌آبایی و هم‌چنین سطح پایین کاربرد کود نیتروژن نسبت به گیاهان رشدیافته در خاک بدون نانوبیوچار با پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که افزودن بیوچار یک راهبرد مؤثر برای افزایش عملکرد محصول حتی در بلندمدت است و نه تنها با بهبود ساختار خاک و ذخایر کربن، بلکه با ارتقای کارایی مصرف نیتروژن نیز مرتبط است (۴۱). رشد گیاه به فراهمی مواد آلی و سایر مواد مغذی (۴۲) و رطوبت خاک (۴۳) در مقدار و زمان مناسب و هم‌چنین افزایش سیستم ریشه که توسط بیوچار تقویت می‌شوند (۴۰) مرتبط است. مقادیر FW ، DW و HD گیاه کلم بروکلی تا زمانی که گیاهان به طور کامل آبیاری و کوددهی شوند می‌تواند بهبود (۴۴). علاوه بر مزایای افزودن نانوبیوچار طبیعی به خاک، اعمال ترکیب کم‌آبایی و سطوح مختلف کود نیتروژن در ترکیب با نانوبیوچار طبیعی،

تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده غلظت کلسیم و منیزیم در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج تجزیه واریانس اثر متقابل کم آبیاری، کود آبیاری و کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک الک شده و الک نشده بر غلظت کلسیم و منیزیم سرهای جانبی کلم بروکلی در سال های اول و دوم به ترتیب در سطح احتمال پنج، یک، پنج و پنج درصد معنی دار بود.

رشد کلم بروکلی را بهبود بخشید. این یافته به دلیل توانایی نانوبیوچار طبیعی برای افزایش جذب و نگهداشت آب و نیتروژن در خاک، بهبود خاکدانه سازی و تخلخل خاک می تواند باشد که به نوبه خود باعث افزایش تهویه در ناحیه ریشه می گردد. نتایج مشابهی در پژوهش های کوپر و همکاران (۲۰۲۰)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۰)، حسین و همکاران (۲۰۲۰) و زانوتل و همکاران (۲۰۲۲) به دست آمد (۴۱، ۴۶، ۴۵).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده.

Table 5. The results of variance analysis (mean square and degree of freedom) of the measured parameters.

منیزیم (سال دوم) Mg (Second year)	منیزیم (سال اول) Mg (First year)	کلسیم (سال دوم) Ca (Second year)	کلسیم (سال اول) Ca (First year)	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
1.89267999**	1.94795212**	12.97513889**	12.95055556**	2	کم آبیاری Deficit irrigation (DI)
0.12580964**	1.09594012**	0.05013889**	3.08347222**	1	خاک Soil (S)
11.18038066**	9.77041012**	32.13347222**	26.76680556**	1	نانو بیوچار طبیعی Natural nanobiochar (NNB)
0.46395739**	0.72902812**	2.53125**	2.03347222**	1	کود نیتروژنه Nitrogen fertilizer (NF)
0.0057941 ^{ns}	0.00148838 ^{ns}	0.00597222 ^{ns}	0.00722222*	2	کم آبیاری×خاک DI×S
0.48887951**	0.44722913**	4.72513889**	4.80055556**	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی DI×NNB
0.01942139**	0.00237037 ^{ns}	0.01291667*	0.01055556*	2	کم آبیاری× کود نیتروژنه DI×NF
0.15658541**	0.49750313**	0.58680556**	1.10013889**	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی S×NNB
0.00006105 ^{ns}	0.07546613**	0.00347222 ^{ns}	0.02347222*	1	خاک× کود نیتروژنه S×NF
0.12731899**	0.15484613**	0.28125**	0.15125**	1	نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه NNB×NF
0.00179472 ^{ns}	0.00832388*	0.02763889**	0.03388889**	2	کم آبیاری×خاک× نانو بیوچار طبیعی DI×S×NNB
0.00663276*	0.02188462**	0.01930556*	0.00722222*	2	کم آبیاری×خاک× کود نیتروژنه DI×S×NF
0.00009271 ^{ns}	0.00270112 ^{ns}	0.00125**	0.00347222*	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه S×NNB×NF
0.02671148**	0.00898537*	0.00791667**	0.01166667*	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×NNB×NF
0.00948177*	0.00931613*	0.00375**	0.01055556*	2	کم آبیاری×خاک× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×S×NNB×NF
1.49	1.67	1.14	1.03		ضریب تغییرات (CV) Coefficient of variation
0.001963	0.0023	0.0029	0.0022		خطا Error

شدت‌های مختلف کم‌آبیاری و سطوح پایین کود نیتروژنه مشاهده شد. در مقابل در خاک‌های بدون نانوبیوچار با افزایش شدت کم‌آبیاری و کاهش سطح کود نیتروژنه غلظت این عناصر کاهش یافت. این نتایج با یافته‌های عبدالمجید و همکاران (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد. آن‌ها مشاهده کردند که کاربرد بیوچار منجر به افزایش جذب مواد مغذی در گیاه باقلا می‌گردد. براساس یافته‌های لی و همکاران (۲۰۱۸) بیوچارها معمولاً حاوی بازهای آلی، کربنات‌ها، نیتروژن، فسفر و هیدروکسیدهای Ca و Mg هستند. هم‌چنین، سطح ویژه زیاد نانوبیوچار طبیعی توان زیادی برای جذب و حفظ مواد مغذی دارد. تجمع مواد مغذی در بافت‌های سرهای جانبی کلم بروکلی با غلظت آن‌ها در زیست‌توده گیاه و هم‌چنین مقدار ماده خشک مرتبط است (۲۶). این معیار تجمع بیش‌تر مواد مغذی کلم بروکلی رشد کرده در تیمارهای خاک اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی در مقایسه با خاک‌های بدون نانوبیوچار را توضیح می‌دهد. از سوی دیگر، افزایش مواد مغذی در زیست‌توده گیاهان رشد یافته در خاک (الک‌شده و الک‌نشده) اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی تحت شدت‌های متفاوت کم‌آبیاری و سطح پایین کاربرد کود نیتروژنه با گسترش تدریجی سیستم ریشه (۴۰)، بهبود آب خاک و وضعیت مواد مغذی و تأثیر مثبت نیتروژن در افزایش حلالیت این عناصر در خاک مرتبط است (۳۴). عبدالمجید و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که افزایش جذب مواد مغذی توسط گیاهان به احتمال زیاد به دلیل بهبود نیتروژن کل، P_2O_5 ، pH و CEC خاک است. در هر صورت، این نتایج نشان‌دهنده کارایی افزودن نانوبیوچار طبیعی در بهبود جذب Ca و Mg توسط گیاهان و تأثیر آن‌ها بر عملکرد کل گیاه است. فراکیولا و همکاران (۲۰۲۰) بیان کرد که با افزایش نرخ کوددهی نیتروژن، غلظت Mg در گیاه کلم بروکلی افزایش یافت (۳۶). سانتوکا و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که افزایش جذب کلسیم و هم‌چنین سطوح بالای کود

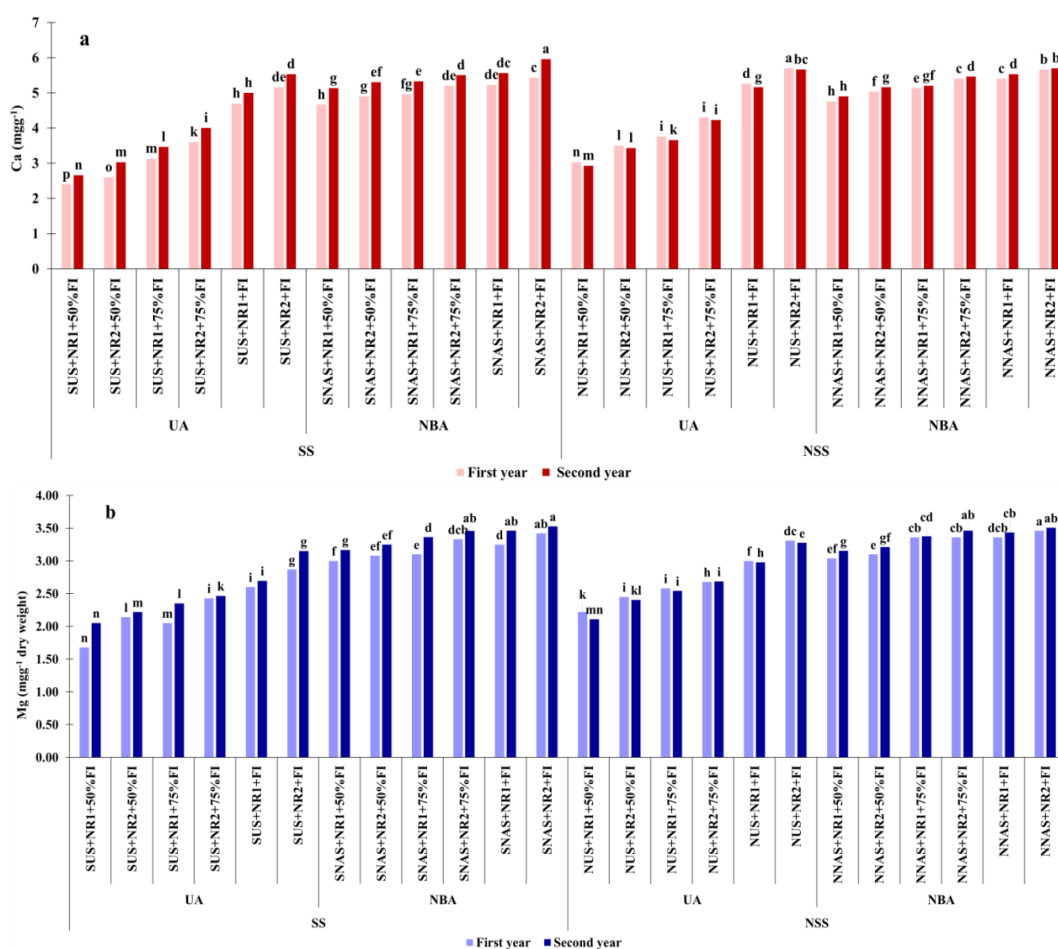
نتایج مقایسه میانگین اثر خاک (الک‌شده و الک‌نشده) اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی تحت شدت‌های مختلف کم‌آبیاری و سطوح مختلف کود نیتروژنه بر غلظت کلسیم و منیزیم سرهای جانبی کلم بروکلی در شکل ۳a-b نشان داده شده است. براساس تجزیه و تحلیل آماری، برهم‌کنش بین نانوبیوچار طبیعی و سطوح مختلف کم‌آبیاری و کود نیتروژنه بر غلظت کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) در سرهای جانبی به‌صورت معنادار تأثیرگذار بوده است. این شاخص‌ها با افزایش شدت کم‌آبیاری (۵۰ درصد FI و ۷۵ درصد FI) و سطح پایین کود نیتروژنه (۲۲۵ کیلوگرم در هکتار) به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند درحالی‌که افزودن نانوبیوچار به خاک الک‌شده و الک‌نشده آثار منفی کم‌آبیاری و سطوح پایین کود نیتروژنه را بر غلظت کلسیم و منیزیم کلم بروکلی کاهش داد. در هر دو فصل، بیش‌ترین غلظت Ca و Mg در سرهای جانبی کلم بروکلی در خاک الک‌شده و الک‌نشده در تیمار $NB+NR_2+FI$ به‌دست آمد، درحالی‌که کم‌ترین آن در تیمار $SUS+NR_1+50\%FI$ مشاهده شد. مواد مغذی (کلسیم و منیزیم) سر جانبی کلم بروکلی‌های رشد یافته در خاک الک‌شده تیمار شده با نانوبیوچار طبیعی (SNAS) و خاک الک‌نشده تیمار شده با نانوبیوچار طبیعی (NNAS) در سال دوم بهبود یافت. علاوه بر این، غلظت مواد مغذی در کلم بروکلی رشد یافته در خاک الک‌نشده (NUS) به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر از خاک الک‌شده (SUS) بود (۳a-b).

کلم بروکلی یک منبع غذایی سرشار از مواد مغذی است (۴۷). در این پژوهش مواد مغذی (کلسیم و منیزیم) در سرهای جانبی کلم بروکلی تجزیه و تحلیل شد. مقدار مواد مغذی در بین تیمارهای مختلف در سرهای جانبی بوته کلم بروکلی متفاوت بود. در خاک‌های اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی، افزایش چشمگیر غلظت Ca و Mg در سرهای جانبی کلم بروکلی در خاک الک‌شده و الک‌نشده تحت

نمودن نانوبیوچار به خاک نیز نسبت داد. این نتایج با یافته‌های اوموندی و همکاران (۲۰۱۶)، وانگ و همکاران (۲۰۱۷)، لی و همکاران (۲۰۱۸) و کوپر و همکاران (۲۰۲۰) هماهنگی دارد.

تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده کلروفیل در جدول ۶ نشان داده شده است. براساس نتایج تجزیه واریانس اثر متقابل کم‌آبایی، کودآبایی و کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک الک شده و الک نشده بر مقدار کلروفیل کل برگ گیاه کلم بروکلی در سال اول و دوم به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود.

نیتروزنه باعث افزایش تحمل به تنش خشکی می‌گردد (۴۸). افزایش غلظت Ca در بافت‌های برگ از آسیب به غشای سلولی جلوگیری می‌کند، همچنین ظرفیت حفظ وضعیت آب در گیاهان را از طریق تنظیم اسمزی ارتقا می‌دهد. پژوهش‌گران دریافتند که بیوچار با تغییر pH خاک (۴۹)، مواد آلی (۵۰)، جامعه میکروبی (۴۹)، مواد معدنی (۵۰) و CEC (۵۱) می‌تواند خاکدانه‌سازی را بهبود بخشد. بنابراین، تفاوت در نتایج خاک‌های الک شده و الک نشده اصلاح شده با نانوبیوچار طبیعی در سال‌های اول و دوم را می‌توان به تغییرات ساختمان خاک در گذر زمان در اثر اضافه



شکل ۳- مقایسه میانگین غلظت (a) کلسیم و (b) منیزیم در سرهای جانبی کلم بروکلی در پاسخ به کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک‌های الک شده و الک نشده تحت سطوح مختلف کم‌آبایی و کود نیتروزن. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

Figure 3. Mean comparisons of a) calcium and b) magnesium concentrations in secondary heads of broccoli plants in response to natural nanobiochar application in sieved and nonsieved soils under different levels of deficit irrigation and nitrogen fertigation; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده.

Table 6. The results of variance analysis (mean square and degree of freedom) of the measured parameters.

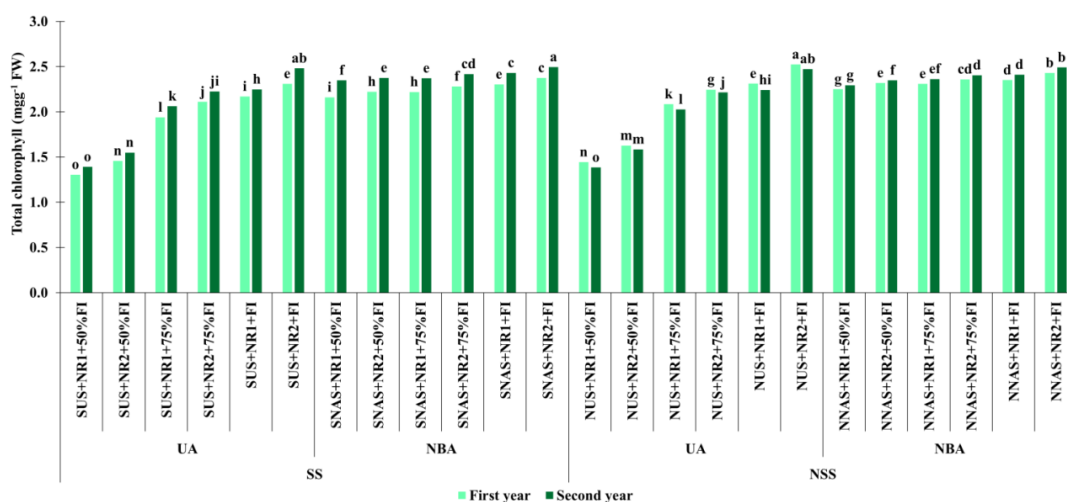
کلروفیل کل (سال دوم) Total chlorophyll (Second year)	کلروفیل کل (سال اول) Total chlorophyll (First year)	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
1.57945119**	1.56746845**	2	کم آبیاری Deficit irrigation (DI)
0.00319467**	0.24606282**	1	خاک Soil (S)
2.9668856**	2.05581744**	1	نانو بیوچار طبیعی Natural nanobiochar (NNB)
0.27878044**	0.24998342**	1	کود نیتروژنه Nitrogen fertilizer (NF)
0.00007787 ^{ns}	0.00021173**	2	کم آبیاری×خاک DI×S
0.98375395**	0.91771704**	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی DI×NNB
0.00339895**	0.00033234**	2	کم آبیاری× کود نیتروژنه DI×NF
0.00104882**	0.02948806**	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی S×NNB
0.00131927**	0.00112575**	1	خاک× کود نیتروژنه S×NR
0.09355696**	0.04968077**	1	نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه NNB×NF
0.00181838**	0.00254277**	2	کم آبیاری×خاک× نانو بیوچار طبیعی DI×S×NNB
0.00027288*	0.00094678**	2	کم آبیاری×خاک× کود نیتروژنه DI×S×NF
0.00011705 ^{ns}	0.00094106**	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه S×NNB×NF
0.00036085*	0.00005752*	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×NNB×NF
0.00019163*	0.00039971**	2	کم آبیاری×خاک× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×S×NNB×NF
0.37	0.12		ضریب تغییرات (CV) Coefficient of variation
0.000067	0.0000073		خطا Error

خاک‌های الک‌شده و الک‌نشده)، سطوح مختلف کم آبیاری و کود نیتروژن قرار گرفتند. بیش‌ترین مقادیر کلروفیل در هر دو فصل زمانی ثبت شد که گیاه کلم بروکلی در حضور نانوبیوچار طبیعی در خاک

نتایج مقایسه میانگین مقدار کلروفیل کل در تیمارهای مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. مقدار کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر اثر برهمکنش بین اصلاح‌کننده نانوبیوچار طبیعی (در

درصد نیاز آبی و کاربرد ۲۲۵ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژنه در تیمارهای SUS و NUS کاهش یافت. درحالی‌که کاربرد نانوبیوچار طبیعی به‌طور قابل‌توجهی محتوای کلروفیل کل گیاهان کلم بروکلی را در شرایط کمبود آب و کود نیتروژن بهبود بخشید (شکل ۳). مقادیر کلروفیل گیاهان کلم بروکلی رشد کرده در خاک اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی (الک‌شده و الک‌نشده) با گذر زمان افزایش یافت. علاوه‌بر این، محتوای کلروفیل گیاهان بروکلی رشد کرده در SUS کم‌تر از NUS بود (شکل ۴).

(الک‌شده و الک‌نشده) تحت آبیاری کامل و نرخ بالای کاربرد کود نیتروژنه (۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) برای هر دو فصل قرار گرفت. از سوی دیگر، اعمال کم‌آبیاری (۵۰ درصد FI و ۷۵ درصد FI) و سطوح پایین کود نیتروژن (۲۲۵ کیلوگرم در هکتار) به‌طور قابل‌توجهی مقدار کلروفیل کل گیاه کلم بروکلی را در تیمارهای SUS و NUS کاهش داد. کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر به‌ترتیب در تیمارهای SUS+NR1+50%FI و تیمارهای تحت آبیاری و کوددهی کامل برای هر دو فصل ثبت شد. مقدار کلروفیل کل به شدت در ۵۰



شکل ۴- مقایسه میانگین میزان کلروفیل کل در گیاهان کلم بروکلی در پاسخ به کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک‌های الک‌شده و الک‌نشده تحت سطوح مختلف کم‌آبیاری و کود نیتروژن. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

Figure 4. Mean comparisons of total chlorophyll of broccoli plants in response to natural nanobiochar application in sieved and nonsieved soils under different levels of deficit irrigation and nitrogen fertigation; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

گیاهی و بهره‌وری گیاهان مرتبط هستند (۵۴، ۵۵). از سوی دیگر، به‌عنوان یک واقعیت اساسی در علوم گیاهی نیتروژن موجود در مولکول‌های کلروفیل گیاه را قادر می‌سازد تا انرژی نور خورشید را با عمل فتوسنتز منتقل کند. بنابراین، اعمال کود نیتروژن به گیاه بر مقدار کلروفیل تشکیل شده در نتیجه فعالیت‌های فتوسنتزی تأثیرگذار است (۵۶). مقادیر کلروفیل

کلروفیل‌های واقع در کلروپلاست برای فتوسنتز حیاتی هستند، اما اختلال در تامین آب می‌تواند مولکول‌های کلروفیل را از بین ببرد و سنتز آن‌ها را مهار کند، که منجر به کاهش نرخ فتوسنتز در شرایط تنش آبی می‌شود (۵۲، ۵۳). بر اساس پژوهش‌های تامز و همکاران (۲۰۱۹) و ون‌نگوین و همکاران (۲۰۲۲)، مولکول‌های کلروفیل به‌شدت با زیست‌توده

کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک الک‌شده و الک‌نشده بر غلظت پرولین برگ گیاه کلم بروکلی در سال اول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود اما در سال دوم معنی‌دار نبود.

نتایج ارائه‌شده در شکل ۵ نشان داد که غلظت پرولین برگ (LP) به شدت تحت تأثیر کاربرد نانوبیوچار و سطوح مختلف کم‌آبیاری و کود نیتروژن قرار گرفت. افزایش معنی‌دار غلظت پرولین برگ در گیاهان رشدیافته در تیمارهای SUS و NUS در مقایسه با SNAS و NNAS مشاهده شد. در تمام تیمارهای USS، غلظت پرولین برگ در مقایسه با تیمارهای اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی با افزایش شدت کم‌آبیاری (۵۰ درصد FI و ۷۵ درصد FI) و کاهش سطح کود نیتروژن (۲۲۵ کیلوگرم در هکتار) به تدریج افزایش یافت. بیش‌ترین مقادیر پرولین برگ در تیمار SUS+100%NR+50%FI مشاهده شد. اعمال تیمارهای کم‌آبیاری (۵۰ درصد FI و ۷۵ درصد FI) در SUS و NUS به‌طور قابل‌توجهی تولید پرولین برگ را تحریک نمود، درحالی‌که کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک از افزایش آن‌ها جلوگیری کرد (شکل ۵). مقادیر پرولین برگ کلم بروکلی‌های رشدیافته در خاک‌های اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی در تمام سطوح کم‌آبیاری و کوددهی عمدتاً در حدود تیمارهایی که به‌طور کامل آبیاری شده بودند باقی ماند (SUS، NUS، SNAS و NNAS). علاوه بر این، مقادیر پرولین برگ در کلم بروکلی‌های رشدیافته در NUS کم‌تر از SUS بود (شکل ۵).

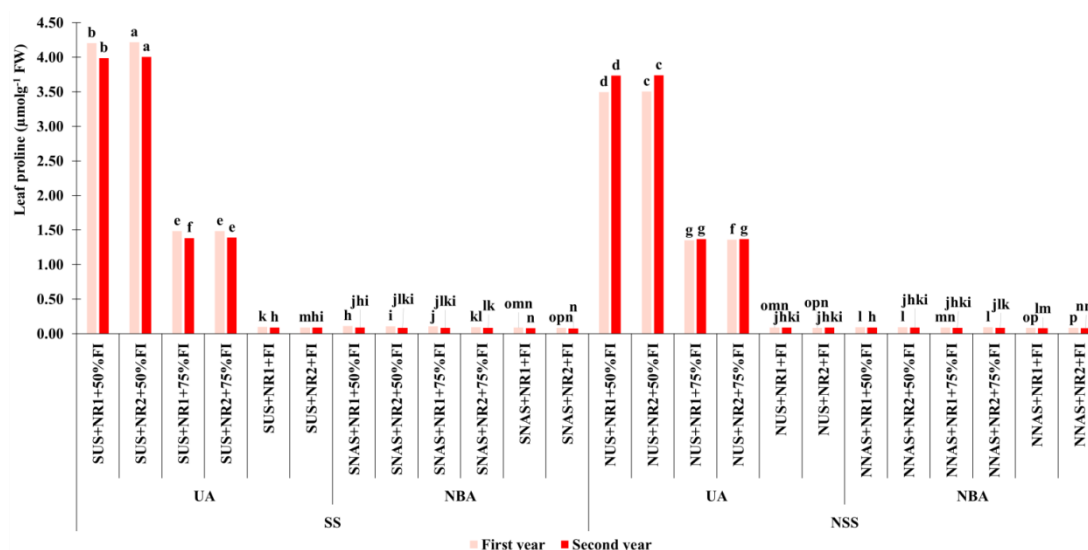
می‌تواند به‌عنوان روشی قابل اعتماد برای ارزیابی نوسانات رخ داده در عملکرد فتوسیستم II در تنش‌های مختلف در نظر گرفته شود (۵۷). کاهش مقادیر کلروفیل در گیاهان مربوط به تیمارهای خاک بدون نانوبیوچار تحت شرایط کم‌آبیاری و سطوح پایین کود نیتروژن ممکن است به دلیل کاهش مقدار آب لازم برای فتوسنتز در بافت گیاهی باشد. این نتایج با یافته‌های لمان و همکاران (۲۰۱۱) و عبدالمجید و همکاران (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد (۵۸). به گفته آلبرت و همکاران (۲۰۱۲) مقدار کلروفیل قابل اعتمادترین صفت برای بیان شرایط رشد گیاه تحت رژیم‌های مختلف نیتروژن و آبیاری است. آن‌ها همچنین نشان دادند که رشد دانه‌های روغنی کلزا با محدود کردن مقدار نیتروژن و آب تسریع می‌گردد. فراکیولا و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که با افزایش میزان کاربرد کود نیتروژن، مقدار کلروفیل افزایش می‌یابد (۳۶). با این حال، در پژوهش حاضر، کاربرد نانوبیوچار طبیعی به‌طور چشم‌گیری باعث بهبود مقدار کلروفیل کلم بروکلی تحت سطوح مختلف کم‌آبیاری و کود نیتروژن شد. بهبود قابل‌توجه محتوای کلروفیل در پاسخ به کاربرد نانوبیوچار طبیعی اهمیت استفاده از آن برای کاهش تنش آبی و سطوح پایین کود نیتروژن در گیاهان را تأیید کرد. بیوچار با بهبود فراهمی مواد مغذی و آب منجر به افزایش قابل‌توجه رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ گیاهان می‌گردد (۵۹).

تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری‌شده پرولین در جدول ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر متقابل کم‌آبیاری، کودآبیاری و

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده.

Table 7. The results of variance analysis (mean square and degree of freedom) of the measured parameters.

پرویلین برگ (سال دوم) Leaf proline (Second year)	پرویلین برگ (سال اول) Leaf proline (First year)	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
22.21650062**	22.04268158**	2	کم آبیاری Deficit irrigation (DI)
0.03759282**	0.38201084**	1	خاک Soil (S)
51.63142835**	51.65666665**	1	نانو بیوچار طبیعی Natural nanobiochar (NNB)
0.00022543**	0.00027261**	1	کود نیتروژنه Nitrogen fertilizer (NF)
0.03179435**	0.21804598**	2	کم آبیاری×خاک DI×S
22.01491763**	21.70027764**	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی DI×NNB
0.00005447**	0.00000926*	2	کم آبیاری× کود نیتروژنه DI×NF
0.04040377**	0.33736267**	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی S×NNB
0.00001318 ^{ns}	0.00004917**	1	خاک× کود نیتروژنه S×NF
0.00003068*	0.00010878**	1	نانو بیوچار طبیعی × کود نیتروژنه NNB×NF
0.03154213**	0.20455214**	2	کم آبیاری×خاک× نانو بیوچار طبیعی DI×S×NNB
0.00001153 ^{ns}	0.00000067 ^{ns}	2	کم آبیاری×خاک× کود نیتروژنه DI×S×NF
0.00002689*	0.00003887**	1	خاک× نانو بیوچار طبیعی × کود نیتروژنه S×NNB×NF
0.00002708*	0.00001779**	2	کم آبیاری× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×NNB×NF
0.000006 ^{ns}	0.00008572**	2	کم آبیاری×خاک× نانو بیوچار طبیعی× کود نیتروژنه DI×S×NNB×NF
0.24	0.15		ضریب تغییرات (CV) Coefficient of variation
0.0000051	0.0000022		خطا Error



شکل ۵- مقایسه میانگین غلظت پرولین برگ کلم بروکلی در پاسخ به کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک‌های الک‌شده و الک‌نشده تحت سطوح مختلف کم‌آبایی و کود نیتروژن. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

Figure 5. Mean comparisons of leaf proline concentration of broccoli plants in response to natural nanobiochar application in sieved and non-sieved soils under different levels of deficit irrigation and nitrogen fertigation; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

اسمیرنوف (۲۰۰۲)، دمیرال و تورکان (۲۰۰۵) و مونرئال و همکاران (۲۰۰۷) دریافتند که تنش آبی عامل اصلی تجمع پرولین در ریشه گیاهان است (۶۸، ۶۹، ۷۰). باندورسکا (۲۰۰۴) دریافت که کلم بروکلی یکی از گیاهانی است که قادر به تولید مقادیر زیادی از پرولین است (۷۱). در پژوهش حاضر غلظت پرولین در گیاه کلم بروکلی که در خاک‌های الک‌شده و الک‌نشده) بدون نانوبیوچار تحت کم‌آبایی رشد کرده بودند، تفاوت قابل‌توجهی با خاک‌های اصلاح‌شده با نانوبیوچار طبیعی داشتند. این نتایج تأیید می‌کند که گیاه کلم بروکلی در خاک‌های الک‌شده و الک‌نشده) بدون نانوبیوچار در اثر اعمال کم‌آبایی تحت‌تأثیر تنش خشکی قرار گرفتند. چوبلی و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که توانایی دفع سدیم و جبران از دست دادن پتاسیم با پرولین (به عنوان یک اسمولیت) ممکن است نشانه‌ای از تحمل گیاهان به خشکی باشد که به بیوسنتز پرولین و دفع سدیم از

پرولین به‌عنوان یک اسیدآمینه مرتبط با تنش‌های محیطی در نظر گرفته می‌شود (۶۰) که علاوه بر این‌که به‌عنوان پیش‌سازی برای اسمولیت‌ها عمل می‌کند، خود نیز می‌تواند به‌عنوان اسمولیت عمل نماید یا حتی کارهایی در تحمل تنش آبی داشته باشد. علاوه بر این، پرولین با تنظیم اسمزی مرتبط است (۶۱)، هم‌چنین می‌تواند به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان (۶۲)، تنظیم‌کننده pH سیتوزولی، هیدروکسیل پاک‌کننده رادیکال (۶۳، ۶۴) و پاک‌کننده گونه‌های اکسیژن فعال (۶۵) عمل نماید. براساس پژوهش‌های گزیک (۱۹۹۶) و وربروگن و هرمانز (۲۰۰۸)، تجمع پرولین با پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه به شرایط تنش مرتبط با کم‌آبی مرتبط است. اشرف و فولاد (۲۰۰۷) گزارش کردند این مسأله که آیا حضور پرولین یک پاسخ سازگاری برای تحمل تنش است یا این‌که افزایش آن نشانه آسیب به گیاه در شرایط تنش می‌تواند می‌باشد، هنوز مورد بحث و بررسی است (۶۶، ۶۷). ریموند و

ریشه یا سیتوزول به عنوان عوامل محدودکننده تحمل تنش در گیاه اشاره می‌کند. آن‌ها همچنین گزارش دادند که از نقطه نظر بیوانرژی، پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی هزینه بر است. بیوستز اسمولیت‌ها (مانند پرولین) و حفظ هموستاز یونی به مقادیر زیادی انرژی نیاز دارد که باید از سایر فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه (که پیش‌تر مربوط به رشد گیاه است) تأمین شود. به همین دلیل در شرایط تنش آبی، گیاهان رشد خود را کند یا به طور کامل متوقف می‌کنند و عملکرد کاهش می‌یابد که در نهایت منجر به کاهش بهره‌وری کشاورزی می‌شود. از سوی دیگر آبرفت و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که محدودیت نیتروژن برای گیاه منجر به حساسیت کم‌تر به تنش آبی می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند که وقتی نیتروژن معدنی در دوره رشد گیاه محدود می‌شود، تجمع پرولین در برگ‌ها، به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، با کاهش از دست دادن آب در بافت گیاه مهار می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت LP گیاهان رشد کرده در خاک اصلاح شده با نانوبیوچار طبیعی تحت شرایط کم‌آبایی کاهش یافت. کاربرد نانوبیوچار طبیعی در خاک می‌تواند WHC خاک را از طریق بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک افزایش داده و آثار نامطلوب تنش خشکی را کاهش دهد (۴۲).

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از داوران محترم این مقاله به جهت صرف وقت کافی و ارائه نظرات ارزشمند کمال تشکر را دارند.

داده‌ها و اطلاعات

این پژوهش با اندازه‌گیری‌های گلخانه‌ای و آزمایشگاهی رساله دکتری نویسنده اول نگارش شده است. آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در آزمایشگاه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آماده‌سازی و اندازه‌گیری داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله. نویسنده دوم:

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، اثر کاربرد نانوبیوچار طبیعی در ترکیب با سطوح مختلف کم‌آبایی و کود نیتروژنی بر رشد کلم بروکلی در یک خاک لوم با ساختمان ضعیف (الک شده) و مناسب (الک نشده) در سیستم آبیاری زیرسطحی با کپسول رسی متخلخل طی دو فصل رشد (سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) در شرایط گلخانه بررسی شد. سه رژیم آبیاری و دو رژیم کود نیتروژنی در خاک با ساختمان ضعیف و مناسب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده آثار مفید

تعارض منافع

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

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است.

طرح تحقیق و روش‌شناسی، نظارت پژوهش، اصلاح نهایی و بازبینی مقاله. نویسنده سوم و چهارم: مشارکت در آنالیزها، طرح تحقیق، روش‌شناسی و بازبینی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر، رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

منابع

1. Hossain, M. Z., Bahar, M. M., Sarkar, B., Donne, S. W., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Kirkham, M. B., Chowdhury, S., & Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 2, 379-420.
2. Li, C., Xiong, Y., Qu, Z., Xu, X., Huang, Q., & Huang, G. (2018). Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China. *Geoderma*, 331, 100-108.
3. Du, Z., Xiao, Y., Qi, X., Liu, Y., Fan, X., & Li, Z. (2018). Peanut-shell biochar and biogas slurry improve soil properties in the North China Plain: a four-year field study. *Scientific reports*, 8, 1-9.
4. Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
5. Safari, S., Nazari, F., Vafae, Y., & Teixeira da Silva, J. A. (2022). Impact of Rice Husk Biochar on Drought Stress Tolerance in Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-17.
6. Gul, S., & Whalen, J. K. (2016). Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 1-15.
7. Beusch, C., Cierjacks, A., Böhm, J., Mertens, J., Bischoff, W. A., de Araújo Filho, J. C., & Kaupenjohann, M. (2019). Biochar vs. clay: Comparison of their effects on nutrient retention of a tropical Arenosol. *Geoderma*, 337, 524-535.
8. Igalavithana, A. D., Ok, Y. S., Usman, A. R., Al-Wabel, M. I., Oleszczuk, P., & Lee, S. S. (2016). The effects of biochar amendment on soil fertility. *Agricultural and environmental applications of biochar: Advances and barriers*, 63, 123-144.
9. Wang, Y., Su, J., Ali, A., Chang, Q., Bai, Y., & Gao, Z. (2022). Enhanced nitrate, manganese, and phenol removal by polyvinyl alcohol/sodium alginate with biochar gel beads immobilized bioreactor: Performance, mechanism, and bacterial diversity. *Bioresource Technology*, 348, 126818.
10. Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 206, 46-59.
11. Montoya, D., Fernández, J. A., Franco, J. A., and del Carmen Martínez Ballesta, M. (2022). Enriched-biochar application increases broccoli nutritional and phytochemical content without detrimental effect on yield. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
12. Gunarathna, M. H. J. P., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H., & Wakasugi, K. (2018). Optimized subsurface irrigation system: The future of sugarcane irrigation. *Water*, 10, 314.

13. Hamad, A. A. A., Wei, Q., Wan, L., Xu, J., Hamoud, Y. A., Li, Y., & Shaghaleh, H. (2022). Subsurface Drip Irrigation with Emitters Placed at Suitable Depth Can Mitigate N₂O Emissions and Enhance Chinese Cabbage Yield under Greenhouse Cultivation. *Agronomy*. 12, 745.
14. Irmak, S., Mohammed, A. T., & Kukal, M. S. (2022). Maize response to coupled irrigation and nitrogen fertilization under center pivot, subsurface drip and surface (furrow) irrigation: Growth, development and productivity. *Agricultural Water Management*. 263, 107457.
15. Karandish, F., & Šimůnek, J. (2017). Two-dimensional modeling of nitrogen and water dynamics for various N-managed water-saving irrigation strategies using HYDRUS. *Agricultural Water Management*. 193, 174-190.
16. Alotaibi, M., El-Hendawy, S., Mohammed, N., Alsamin, B., & Refay, Y. (2023). Appropriate application methods for salicylic acid and plant nutrients combinations to promote morpho-physiological traits, production, and water use efficiency of wheat under normal and deficit irrigation in an arid climate. *Plant*. 12(6), 1368.
17. Martínez de Azagra Paredes, A., Del Río San José, J., Reque Kilchenmann, J., Díez Hernández, J. M., & Sanz Ronda, F. J. (2022). Methods for Watering Seedlings in Arid Zones. *Forests*. 13, 351.
18. Cai, Y., Wu, P., Zhang, L., Zhu, D., Chen, J., Wu, S., & Zhao, X. (2017). Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter. *Agricultural Water Management*. 192, 244-256.
19. Li, Y., Liu, J., Hu, M., & Zhang, Z. (2017). Numerical modeling of ice-water system response based on Rankine source method and finite difference method. *Ocean Engineering*. 138, 1-8.
20. Sánchez-García, M., Sánchez-Monedero, M. A., & Cayuela, M. L. (2020). N₂O emissions during Brassica oleracea cultivation: Interaction of biochar with mineral and organic fertilization. *European Journal of Agronomy*. 115, 126021.
21. Shi, W., Ju, Y., Bian, R., Li, L., Joseph, S., Mitchell, D.R., Munroe, P., Taherymoosavi, S., & Pan, G. (2020). Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*. 701, 134424.
22. Lan, K., & Yao, Y. (2019). Integrating life cycle assessment and agent-based modeling: a dynamic modeling framework for sustainable agricultural systems. *Journal of Cleaner Production*. 238, 117853.
23. Campbell, B. M., Beare, D. J., Bennett, E. M., Hall-Spencer, J. M., Ingram, J. S., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J. A., & Shindell, D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society*. 22.
24. Lyu, H., Gao, B., He, F., Zimmerman, A. R., Ding, C., Huang, H., & Tang, J. (2018). Effects of ball milling on the physicochemical and sorptive properties of biochar: Experimental observations and governing mechanisms. *Environmental Pollution*. 233, 54-63.
25. Grieve, C. M., Poss, J. A., Grattan, S. R., Suarez, D. L., & Smith, T. E. (2010). The combined effects of salinity and excess boron on mineral ion relations in broccoli. *Scientia Horticulturae*. 125, 179-187.
26. Munawar, A., Akram, N. A., Ahmad, A., & Ashraf, M. (2019). Nitric oxide regulates oxidative defense system, key metabolites and growth of broccoli (*Brassica oleracea* L.) plants under water limited conditions. *Scientia Horticulturae*. 254, 7-13.
27. Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*. 39, 205-207.
28. Lichtenthaler, H. K. (1987). [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes, Methods in Enzymology. *Academic Press*. 148, 350-382.
29. Razzaq, M., Akram, N. A., Ashraf, M., Naz, H., & Al-Qurainy, F. (2017). Interactive effect of drought and nitrogen on growth, some key

- physiological attributes and oxidative defense system in carrot (*Daucus carota* L.) plants. *Scientia Horticulturae*. 225, 373-379.
30. Dastogeer, K. M. (2018). Influence of fungal endophytes on plant physiology is more pronounced under stress than well-watered conditions: a meta-analysis. *Planta*. 248, 1403-1416.
31. Yaseen, R., Shafi, J., Ahmad, W., Rana, M. S., Salim, M., & Qaisrani, S. A. (2014). Effect of deficit irrigation and mulch on soil physical properties, growth and yield of maize. *Environ. Ecol. Res.* 2, 122-137.
32. Albert, B., Le Cahérec, F., Niogret, M. F., Faes, P., Avicé, J. C., Leport, L., & Bouchereau, A. (2012) Nitrogen availability impacts oilseed rape (*Brassica napus* L.) plant water status and proline production efficiency under water-limited conditions. *Planta*. 236, 659-676.
33. Sourì, M. K., & Hatamian, M. (2019). Aminochelates in plant nutrition: a review. *Journal of Plant Nutrition*. 42, 67-78.
34. Agbna, G. H., Dongli, S., Zhipeng, L., Elshaikh, N. A., Guangcheng, S., & Timm, L. C. (2017). Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*. 222, 90-101.
35. Ünlü, M., Kanber, R., Koç, D. L., Tekin, S., & Kapur, B. (2011). Effects of deficit irrigation on the yield and yield components of drip irrigated cotton in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 98, 597-605.
36. Fracchiolla, M., Renna, M., D'Imperio, M., Lasorella, C., Santamaria, P., & Cazzato, E. (2020). Living mulch and organic fertilization to improve weed management, yield and quality of broccoli raab in organic farming. *Plants*. 9, 177.
37. Kim, S., Kim, S., Kiniry, J. R., & Ku, K. M. (2021). A hybrid decision tool for optimizing broccoli production in a changing climate. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 62, 299-312.
38. Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D., & Julson, J. L. (2014). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 60, 393-404.
39. Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., & Paz-Ferreiro, J. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions-a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*. 373, 583-594.
40. Zhang, Q., Song, Y., Wu, Z., Yan, X., Gunina, A., Kuzyakov, Y., & Xiong, Z. (2020). Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*. 242, 118435.
41. Zhang, Zx., Dong, X., Wang, S., & Pu, X. (2020). Benefits of organic manure combined with biochar amendments to cotton root growth and yield under continuous cropping systems in Xinjiang, China. *Scientific reports*. 10, 1-10.
42. Semida, W. M., Beheiry, H. R., Sétamou, M., Simpson, C. R., Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., & Nelson, S. D. (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany*. 127, 333-347.
43. Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*. 274, 28-34.
44. Moreno-Cornejo, J., Caballero-Lajarán, A., Faz, Á., & Zornoza, R. (2017). Pepper crop residues and chemical fertilizers effect on soil fertility, yield and nutritional status in a crop of Brassica oleracea. *Journal of soil science and plant nutrition*. 17, 648-661.
45. Cooper, J., Greenberg, I., Ludwig, B., Hippich, L., Fischer, D., Glaser, B., & Kaiser, M. (2020). Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under

- field conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 295, 106882.
46. Zanutel, M., Garré, S., & Bielanders, C. L. (2022). Long-term effect of biochar on physical properties of agricultural soils with different textures at pre-industrial charcoal kiln sites in Wallonia (Belgium). *European Journal of Soil Science*. 73, 13157.
47. Dominguez-Perles, R., Moreno, D. A., Carvajal, M., & Garcia-Viguera, C. (2011). Composition and antioxidant capacity of a novel beverage produced with green tea and minimally-processed byproducts of broccoli. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 12, 361-368.
48. Saneoka, H., Moghaieb, R. E., Premachandra, G. S., & Fujita, K. (2004). Nitrogen nutrition and water stress effects on cell membrane stability and leaf water relations in *Agrostis palustris* Huds. *Environmental and Experimental Botany*. 52, 131-138.
49. Wang, D., Fonte, S. J., Parikh, S. J., Six, J., & Scow, K. M. (2017). Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates. *Geoderma*. 303, 110-117.
50. Ma, N., Zhang, L., Zhang, Y., Yang, L., Yu, C., Yin, G., Doane, T. A., Wu, Z., Zhu, P., & Ma, X. (2016). Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a mollisol after three years of field application. *PloS one*. 11, 154091.
51. Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S. C., Ryu, C., Jeon, J. K., Shin, M. C., & Park, Y. K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 40, 1-15.
52. Abd El-Mageed, T. A., Belal, E. E., Rady, M. O., Abd El-Mageed, S. A., Mansour, E., Awad, M. F., & Semida, W. M. (2021). Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba* L.) plants: Influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency. *Agronomy*. 11, 1290.
53. Haghghi, T. M., Saharkhiz, M. J., Ramezani, A., & Zarei, M. (2023). The use of silicon and mycorrhizal fungi to mitigate changes in licorice leaf micromorphology, chlorophyll fluorescence, and rutin content under water-deficit conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*. 197, 107662.
54. Tamez, C., Morelius, E. W., Hernandez-Viezcas, J. A., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. (2019). Biochemical and physiological effects of copper compounds/nanoparticles on sugarcane (*Saccharum officinarum*). *Science of the Total Environment*. 649, 554-562.
55. Van Nguyen, D., Nguyen, H. M., Le, N. T., Nguyen, K. H., Nguyen, H. T., Le, H. M., Nguyen, A. T., Dinh, N. T. T., Hoang, S. A., & Van Ha, C. (2022). Copper nanoparticle application enhances plant growth and grain yield in maize under drought stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*. 41, 364-375.
56. Namvar, A., & Khandan, T. (2015). Inoculation of rapeseed under different rates of inorganic nitrogen and sulfur fertilizer: impact on water relations, cell membrane stability, chlorophyll content and yield. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 61, 1137-1149.
57. Abd El-Mageed, T. A., El-Sherif, A. M., Abd El-Mageed, S. A., & Abdou, N. M. (2019). A novel compost alleviate drought stress for sugar beet production grown in Cd-contaminated saline soil. *Agricultural Water Management*. 226, 105831.
58. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry*. 43, 1812-1836.
59. Speratti, A. B., Romanyà, J., Garcia-Pausas, J., & Johnson, M. S. (2018). Determining the stability of sugarcane filtercake biochar in soils with contrasting levels of organic matter. *Agriculture*. 8, 71.

60. Bazrgar, G., Kalat, S. M. N., Khorasani, S. K., Ghasemi, M., & Kelidari, A. (2023). Effect of deficit irrigation on physiological, biochemical, and yield characteristics in three baby corn cultivars (*Zea mays* L.). *Heliyon*. 9 (4).
61. Chevilly, S., Dolz-Edo, L., López-Nicolás, J. M., Morcillo, L., Vilagrosa, A., Yenush, L., & Mulet, J. M. (2021a). Physiological and molecular characterization of the differential response of broccoli (*Brassica oleracea* var. Italica) cultivars reveals limiting factors for broccoli tolerance to drought stress. *Journal of agricultural and food chemistry*. 69, 10394-10404.
62. Chevilly, S., Dolz-Edo, L., Morcillo, L., Vilagrosa, A., López-Nicolás, J. M., Yenush, L., & Mulet, J. M. (2021b). Identification of distinctive physiological and molecular responses to salt stress among tolerant and sensitive cultivars of broccoli (*Brassica oleracea* var. Italica). *BMC plant biology*. 21, 1-16.
63. John, R., Ganeshan, U., Singh, B. N., Kaul, T., Reddy, M. K., Sopory, S. K., & Rajam, M. V. (2016). Over-expression of topoisomerase II enhances salt stress tolerance in tobacco. *Frontiers in Plant Science*. 7, 1280.
64. Verbruggen, N., & Hermans, C. (2008). Proline accumulation in plants: a review. *Amino acids*. 35, 753-759.
65. Chen, C., & Dickman, M. B. (2005). Proline suppresses apoptosis in the fungal pathogen *Colletotrichum trifolii*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 102, 3459-3464.
66. Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Improving plant abiotic-stress resistance by exogenous application of osmoprotectants glycine betaine and proline. *Environ. Exp. Bot.* 59, 206-216.
67. Gzik, A. (1996). Accumulation of proline and pattern of α -amino acids in sugar beet plants in response to osmotic, water and salt stress. *Environmental and Experimental Botany*. 36, 29-38.
68. Demiral, T., & Türkan, I. (2005). Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. *Environmental and experimental botany*. 53, 247-257.
69. Monreal, J. A., Jimenez, E. T., Remesal, E., Morillo-Velarde, R., García-Mauriño, S., & Echevarría, C. (2007). Proline content of sugar beet storage roots: Response to water deficit and nitrogen fertilization at field conditions. *Environmental and Experimental Botany*. 60, 257-267.
70. Raymond, M. J., & Smirnov, N. (2002). Proline metabolism and transport in maize seedlings at low water potential. *Annals of botany*. 89, 813-823.
71. Bandurska, H. (2004). Free proline accumulation in leaves of cultivated plant species under water deficit conditions. *Journal of the Polish Botanical Society*. 57, 57-67.