مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۹۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 99, No. 2, 2022

بررسی تأثیر کاربرد بیوچار و کاه گندم بر بهره‌وری کود نیتروژن در زراعت جو با استفاده از فن‌آوری ایزوتوپی ^{15}N

حسین عباسعلیان*[۱و۳]، جابر سلطانی[۲]، سید ابراهیم هاشمی گرم‌دره[۲]، اعظم برزویی[۳]، مریم احمدوند[۲]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، کدپستی: ۳۳۹۱۶۵۳۷۵۵، تهران- ایران

۲. گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، کدپستی: ۳۳۹۱۶۵۳۷۵۵، تهران- ایران

۳. پژوهشکده‌ی کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۸-۳۱۴۶۵، کرج - ایران

*Email: abbasalian@ut.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۴۰۰/۷/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۴۰۰/۱۰/۴

چکیده

امروزه مشکلاتی چون تغییرات آب و هوایی کره زمین و پیامدهای آن از جمله وقوع سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها، ذوب یخچال‌ها و بالا رفتن سطح آب اقیانوس‌ها به صورت یک چالش جهانی مطرح هستند و باید به سرعت در جهت مهار این مشکلات اقدام شود. در بسیاری از منابع به جنبه‌های مثبت کاربرد مواد آلی مثل بیوچار به عنوان نگه‌دارنده رطوبت خاک و عناصر غذایی گیاه، کاهنده آب‌شویی نیترات و انتشار گازهای گلخانه‌ای اشاره شده است. بیوچار، ترکیب غنی از کربنی است که در اثر پیرولیز مواد آلی طبیعی تولید می‌شود. در تحقیق حاضر مقادیر صفر درصد بیوچار (B_1)، ۲/۵ درصد بیوچار (B_2)، ۵ درصد بیوچار (B_3) و ۷/۵ درصد بیوچار (B_4)، همچنین ۲/۵ درصد کاه گندم (W_1) و ۵ درصد کاه (W_2) به خاک با بافت لوم رسی (S_1) و نیز خاک لوم شنی (S_2) افزوده شدند. این آزمایش گلدانی بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه و به روش ردیابی ایزوتوپ ^{15}N انجام شد. در اثر کاربرد بیوچار، زیست توده گیاه و در نتیجه، میزان بازیافت کود نیتروژن افزایش یافت. این افزایش به خصوص در تیمار S_1B_4 بسیار معنی‌دار بود ($P < ۰/۰۱$) و تا ۳۵ درصد رسید. کاه باعث شد بهره‌وری کود نیتروژن در تیمارهای S_1W_2 و S_2W_2 به ترتیب ۹۴ درصد و ۸۷ درصد کاهش یابد.

کلیدواژه‌ها: بیوچار، گازهای گلخانه‌ای، بهره‌وری کود نیتروژن، ردیابی ایزوتوپی

A study on the effect of biochar and wheat straw application on nitrogen fertilizer utilization in barley using ^{15}N isotope technology

H. Abbasalian*[1,3], J. Soltani[2], S.E. Hashemi[2], A. Borzouei[3], M. Ahmadvand[2]

1. Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Postal code: 3391653755, Tehran-Iran
2. Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Postal code: 3391653755, Tehran-Iran
3. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 31465-1498, Karaj-Iran

Research Article

Received 15.10.2021, Accepted 25.12.2021

Abstract

Today, problems such as global warming climate change and its consequences such as floods, droughts, melting glaciers, ocean water level rise are considered globally, and actions should be taken immediately to contain these problems. Many sources pointed to the positive aspects of using organic matter such as biochar to retain soil moisture and plant nutrients, reducing nitrate leaching and greenhouse gas emissions. Biochar is a carbon-rich compound produced by pyrolysis of natural organic matter. In the present study, 0% biochar (B_1), 2.5% biochar (B_2), 5% biochar (B_3), and 7.5% biochar (B_4), 2.5% wheat straw (W_1), and 5% straw (W_2) were added to soil with clay loam texture (S_1) and sandy loam soil (S_2). This pot experiment was implemented based on a completely randomized design in three replications and greenhouse using ^{15}N Isotope tracing method. Due to biochar application, Crop yield and nitrogen fertilizer use efficiency increased. This increase was particularly significant in S_1B_4 treatment ($P < 0.01$) and reached up to 35%. Straw reduced nitrogen fertilizer recovery in S_1W_2 and S_2W_2 treatments by 94% and 87%, respectively.

Keywords: Biochar, Greenhouse gas, Nitrogen fertilizer utilization, Isotope tracing

۱. مقدمه

منابع نیتروژن خاک تحت اثر فرایندهای مختلف مثل آب‌شویی نیترات و یا تصعید به اشکال گازی NO، N_2O و یا N_2 هدر می‌روند. خروج نیتروژن از زیست‌بوم‌های کشاورزی به شکل نیترات، آلودگی‌های زیست محیطی را به همراه دارد. اشکال گازی NO و به ویژه N_2O اثر گلخانه‌ای داشته، مونوکسید نیتروژن (N_2O) حدود ۱۲۱ سال ماندگار است و اثر گرمایشی آن بر کره زمین ۲۶۵ برابر دی اکسید کربن می‌باشد. هر عاملی که انتشار این گاز از خاک به اتمسفر را کاهش دهد، در حقیقت به کاهش اثرات گرمایش زمین و تغییر اقلیم کمک کرده است. مدیریت مصرف بهینه کودهای نیتروژن و نیز استفاده از اصلاح‌گرهای خاک مثل زغال زیستی یا بیوچار از جمله ساز و کارهایی هستند که در این خصوص مورد توجه قرار گرفته‌اند. زغال زیستی ترکیب جامد غنی از کربنی است که در اثر تجزیه حرارتی مواد آلی یا زیست توده، در غیاب اکسیژن یا در حضور اکسیژن محدود تولید می‌شود [۱]. بیوچار با هدف ترسیب کربن و بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیست شناختی به خاک افزوده می‌شود. این ماده به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، توزیع وسیع اندازه منافذ و نیز سطح ویژه زیاد می‌تواند در دسترس بودن آب و عناصر غذایی گیاه را در زیست‌بوم‌های کشاورزی افزایش داده، از هدرروی منابع نیتروژن خاک پیشگیری و بدین‌ترتیب به رشد گیاه و بهبود عملکرد کمک کند [۲-۶].

بیوچار یک منبع تجدیدپذیر است و به سبب وجود گروه‌های عامل فراوان، در تغذیه گیاه نقش دارد [۷، ۸]. با توجه به موارد یاد شده، انتظار می‌رود در اثر کاربرد این ماده کارآیی مصرف نیتروژن بهبود یابد پنکیو و همکاران اثر اصلاح‌گر بیوچار را بر رشد و فیزیولوژی گیاه آفتابگردان در شرایط دیم بررسی کردند. در این مطالعه از چهار نوع بیوچار (بیوچار چوب کاج، بیوچار ضایعات کاغذ، بیوچار لجن فاضلاب و بیوچار چوب درخت انگور) استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بیوچار باعث افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک، تحریک رشد گیاه، افزایش سطح برگ و ساقه، بهبود عملکرد زراعی و افزایش کارآیی مصرف آب می‌شود [۲]. اسلاویش و همکاران اثر اصلاحی بیوچار کود آلی و بیوچار بقایای گیاهی را بر عملکرد مرتع در یک خاک اسیدی فروسول بررسی و به این نتیجه رسیدند که بیوچار کود آلی باعث اصلاح اسیدیته خاک، افزایش کارآیی مصرف نیتروژن و بهبود عملکرد زراعی می‌شود [۹]. اختر و همکاران در بررسی تأثیر بیوچار بر فیزیولوژی، عملکرد زراعی و کیفیت گوجه فرنگی در رژیم‌های مختلف آبیاری مشاهده کردند که بیوچار موجب حفظ رطوبت خاک، بهبود فیزیولوژی، عملکرد، راندمان مصرف آب، مقدار نسبی رطوبت برگ، مقدار و کیفیت محصول گوجه فرنگی می‌شود [۳]. گرابر و همکاران اثر بیوچار چوب، را بر رشد و تولید فلفل در محیط کشت بدون خاک که در آن آب و عناصر غذایی به روش کود آبیاری تحویل گیاه می‌شد، بررسی کردند. افزایش یک تا پنج درصد وزنی بیوچار به محیط کشت باعث شد تا جمعیت موجودات ذره‌بینی خاک و هم‌چنین رشد گیاه و مقدار محصول فلفل به شکل معنی‌دار بهبود یابد [۱۰]. جنسیو و همکاران در یک تحقیق چهار ساله برای بررسی تأثیر بیوچار بر کمیت و کیفیت محصول انگور در شرایط دیم در ایتالیا مشاهده کردند مقدار محصول انگور در کرت‌های تیمار شده با بیوچار ۶۶ درصد افزایش یافت [۱۱].

فالوی و همکاران در مطالعه‌ای نشان دادند که زغال زیستی می‌تواند اثر منفی تنش خشکی را کاهش داده، عملکرد زراعی و کارآیی مصرف آب را بهبود ببخشد [۱۲]. میری و همکاران با بررسی تأثیر سطوح مختلف بیوچار ضایعات برداشت پسته بر ویژگی‌های رشدی و بهره‌وری آب ذرت به این نتیجه رسیدند که تأثیر کاربرد بیوچار، بسته به نوع خاک متفاوت است، چنان که کاربرد بیوچار در خاک لوم سیلتی باعث افزایش وزن اندام هوایی گیاه و افزایش بهره‌وری آب شد، حال آن‌که در خاک شنی، نتیجه عکس بود [۱۳]. کریمی‌نیا و همکاران مشاهده کردند که تبدیل کمپوست مصرف شده قارچ به بیوچار و کاربرد آن سبب افزایش مؤلفه‌های رشدی و جذب عناصر غذایی گیاه می‌شود [۱۴]. نتایج پژوهش کاظمی‌زاده و همکاران نشان داد که استفاده از بیوچار باگاس نیشکر موجب افزایش عملکرد و بهره‌وری آب در گیاه ذرت می‌شود [۱۵]. لیواُ و همکاران در یک تحقیق اثر بیوچار را بر معدنی شدن نیتروژن در خاک بررسی و به این نتیجه رسیدند که بیوچار، معدنی شدن خالص نیتروژن در خاک را کاهش می‌دهد [۱۶]. بیوچار، چرخه نیتروژن را کنترل می‌کند [۱۷]. زغال زیستی pH خاک را قلیایی می‌کند از این‌رو بر فعالیت باکتری‌های دنیتریفیکاسیون[1] اثر بازدارنده دارد. در آزمایشات کایولا و همکاران کاربرد زغال زیستی باعث شد انتشار گاز N_2O در مزرعه ۲۸ درصد و در آزمایشگاه تا ۵۴ درصد کاهش یابد [۱۸].

در دنیا به ندرت از فن‌آوری ردیابی ایزوتوپ ^{15}N و کارایی مصرف کود نیتروژن به عنوان شاخصی برای ارزیابی تلفات نیتروژن در این قبیل تحقیقات استفاده شده است. به‌علاوه، بر روی اثر بیوچار در کنار ماده اولیه آن بر بهره‌وری نیتروژن تحقیق نشده است در حالی‌که در پژوهش حاضر تلاش شده است تا به عنوان نوآوری، اثر کاربرد هر دو ماده بر متغیرهای

1. Denitrification

مورد نظر بررسی شود. منابع نیتروژن خاک به طرق مختلف مثل آب‌شویی نیترات، دنیتریفیکاسیون، محبوس‌شدن توسط موجودات ذره‌بینی خاک، تصعید آمونیاک و غیره هدر می‌روند. تعیین جداگانه مقدار هدرروی هر جزء زمان‌بر و پرهزینه است. افزون بر این، ممکن است برخی از مسیرهای هدرروی پنهان بوده یا قابل ارزیابی و اندازه‌گیری نباشند. شاخص کارایی مصرف کود نیتروژن اثر مجموع این عوامل و مسیرها را لحاظ می‌کند بدین‌ترتیب مسیرهای پنهان هدرروی، از نظر دور نمی‌مانند و هزینه پژوهش کاهش می‌یابد. با فن‌آوری‌های ردیابی ایزوتوپی به سرعت می‌توان به پاسخ رسید و نتایج حاصله از میزان بالایی از صحت و تکرارپذیری برخوردارند. در تحقیق حاضر از فن‌آوری ردیابی ایزوتوپ ^{15}N و شاخص بهره‌وری کود نیتروژن برای ارزیابی اثر تجمیعی عوامل مختلف دست‌اندرکار تلفات نیتروژن استفاده شده است.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر کاربرد بیوچار بر بهره‌وری نیتروژن کود در گیاه جو می‌باشد تا بتوان راهکاری برای تولید محصول بیش‌تر به ازای مصرف آب کم‌تر و نیز کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیتروژن در جهت مبارزه با تغییرات اقلیمی ارایه نمود.

۲. مواد و روش‌ها

این تحقیق از آذرماه ۱۳۹۹ تا پایان فروردین ۱۴۰۰ در پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای کرج انجام شد. به منظور شبیه‌سازی در شرایط کنترل‌شده و نیز کاهش هزینه‌ها، تحقیق حاضر در گلخانه به شکل کشت گلدانی انجام گرفت.

۱.۲ تهیه بیوچار

در پژوهش حاضر از بیوچار کاه گندم استفاده شد. دلیل انتخاب این ماده، فراوانی ماده اولیه و صرفه اقتصادی است. طبق تعریف و توصیه‌ی بنیاد بیوچار اروپا، بیوچار باید از ماده اولیه‌ای که تولید آن پایدار باشد مثل گیاهان تند رشد، بقایای آلی کشاورزی یا پسمان‌های آلی شهری و خانگی تهیه شود [۱۹].

بیوچار کاه گندم طی فرایند پیرولیز تولید گردید. بدین منظور، کاه به مدت ۹۰ دقیقه در معرض دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. مطالعات نشان داده‌اند که زغال تولید شده در این شرایط با معیارهای گواهی بیوچار اروپا[1] (EBC) مطابقت دارد [۱]. بر اساس ضوابط EBC، باید درصد وزنی کربن در ماده خشک بیوچار بیش از ۵۰ درصد، سطح ویژه بیش از ۱۵۰ متر مربع بر گرم، نسبت هیدروژن به کربن در آن کم‌تر از ۰٫۷، نسبت اکسیژن به کربن کم‌تر از ۰٫۴ و مقدار عناصر سنگین آن در محدوده توصیه‌شده، باشد [۲۰]. آنالیز عنصری بیوچار به روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX)[2] انجام گردید و برای تصویربرداری از میکروسکوپ الکترونی Hitachi S۴۱۶۰ استفاده شد (شکل ۱). بیوچار این آزمایش، فاقد عناصر گوگرد، سرب و ارسنیک بود. مقدار سایر عناصر در جدول ۱ آمده است.

۲.۲ انتخاب گیاه زراعی

مقدار بیوچار تیمارهای طرح متفاوت بود. از طرف دیگر، شوری بیوچار بالاست، لذا احتمالاً تفاوت شوری محیط‌های کشت، اثر خود را به شکل تغییر در زیست توده گیاه نشان می‌داد که به منظور به حداقل رساندن این اثر، از گیاه جو (رقم گوهران) استفاده شد. گیاه زراعی جو مقاوم به شوری و کم‌آبی است. آستانه تحمل شوری در جو، هشت دسی زیمنس بر متر است [۲۱]. پس از آن به ازای هر واحد افزایش هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، عملکرد دانه پنج درصد کاهش می‌یابد [۲۱]. رقم گوهران جو که در سال ۱۳۹۴ توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر و نهال معرفی شده است، بهاره و مناسب کاشت در اقلیم معتدل کشور است. میانگین عملکرد دانه آن در تنش خشکی ۴۹۵۸ و در شرایط عادی ۷۱۶۱ کیلوگرم در هکتار با میانگین وزن هزار دانه، ۴۳ گرم می‌باشد.

۳.۲ انتخاب نوع خاک

در این تحقیق از دو نوع بافت خاک استفاده شد. هدف این بود که ظرفیت نگه‌داری رطوبت خاک‌ها تا حد امکان متفاوت باشد. بدین‌منظور نمونه‌های خاک از چند محل گردآوری شدند، درصد اجزای بافت به روش هیدرومتری و بافت خاک‌ها به کمک مثلث بافت خاک وزارت کشاورزی آمریکا تعیین گردید. سپس ظرفیت نگه‌داری رطوبت خاک، با توجه به درصد اجزای شن، رس و به کمک مدل (SPAW Hydrology) برآورد شد [۲۲]. داده‌های مربوط به ظرفیت نگه‌داری رطوبت با در نظر گرفتن ۱ درصد وزنی کربن آلی در خاک لوم رسی و ۰٫۳ درصد وزنی کربن آلی برای خاک لوم شنی در جدول ۲ آمده‌اند. سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مربوط به خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب در سطر S_1B_1 و S2B1 جدول ۴ تشریح شده‌اند.

۴.۲ طرح آزمایشی به کار رفته در این تحقیق

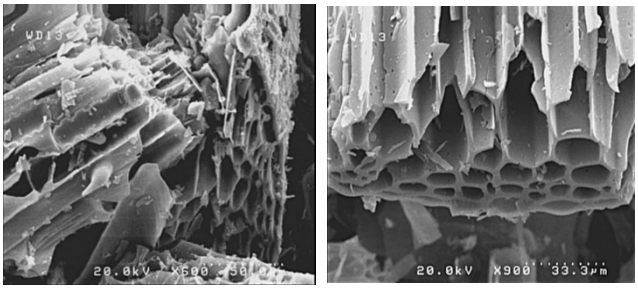
بافت خاک در دو سطح (لوم شنی، لوم رسی)، مقدار بیوچار در چهار سطح (صفر، ۲٫۵، ۵ و ۷٫۵ درصد وزنی) و کاه گندم در دو سطح (۲٫۵ و ۵ درصد وزنی) از عوامل آزمایش بودند. آزمایش بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه انجام گردید. طرح شامل دوازده تیمار (سی و شش واحد آزمایشی) بود.

1. European Biochar Certificate

2. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

جدول ۱. آنالیز عنصری بیوچار به‌کار رفته در این تحقیق (آزمایشگاه نانو الکترونیک دانشگاه تهران)

	عنصر									
واحد	کربن	نیتروژن	اکسیژن	هیدروژن	کادمیوم	کروم	نیکل	مس	روی	جیوه
درصد وزنی در ماده خشک								۰/۶	۰/۵	۰/۱



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی از بیوچار (توسط آزمایشگاه نانوالکترونیک دانشگاه تهران).

جدول ۲. آنالیز بافت و خصوصیات هیدرولیکی خاک

بافت خاک	شن (درصد وزنی)	سیلت (درصد وزنی)	رس (درصد وزنی)	ظرفیت نگه‌داشت رطوبت (درصد حجمی)
لوم رسی (S_1)	۳۵/۲	۳۲	۳۲/۸	۳۴
لوم شنی (S_2)	۷۴/۶	۱۴/۶	۱۰/۸	۱۳

۵.۲ آماده‌سازی محیط کشت

تعداد ۳۶ گلدان پلاستیکی به شکل مخروط ناقص به ابعاد (قاعده ۲۳ سانتی‌متر، ارتفاع ۲۴ سانتی‌متر و مقطع ۱۷ سانتی‌متر) تهیه شدند تا هفت و نیم کیلوگرم محیط کشت شامل (خاک بدون بیوچار یا کاه، ترکیب خاک و بیوچار، ترکیب خاک و کاه) در آن‌ها ریخته شود. از این پس، خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب با نماد S_1 و S_2، سطوح صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد بیوچار به ترتیب با نمادهای B_1، B_2، B_3، B_4 و سطوح ۲/۵ و ۵ درصد وزنی کاه به ترتیب با نمادهای W_1 و W_2 نمایش داده می‌شوند. جدول ۳ ترکیب خاک گلدان را در تیمارهای آزمایش نشان می‌دهد.

۶.۲ نمونه‌برداری از محیط کشت و آنالیز نمونه‌ها

پس از آماده شدن بسترهای کشت، از آن‌ها در گلخانه و طبق شیوه نامه مؤسسه تحقیقات خاک و آب نمونه فرعی گرفته شد تا مقدار قابل دسترس عناصر غذایی پرمصرف شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم- اسیدیته یا واکنش خاک، درصد وزنی کربن آلی، هم‌چنین متغیرهای فیزیکی شامل درصد اشباع، رطوبت در ظرفیت مزرعه، رطوبت در نقطه پژمردگی و چگالی ظاهری اندازه‌گیری شوند. نتایج آنالیز فیزیکی و شیمیایی محیط‌های کشت در جدول ۴ آمده‌اند.

عناصر غذایی پر مصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم با توجه به مقدار قبلی این عناصر در خاک، عملکرد هدف نُه تن دانه در هکتار و توصیه نشریه شماره ۶۶ فائو به ترتیب از منابع اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم برای محیط‌های کشت تأمین گردیدند. هدف این بود که مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم همه تیمارها یکسان باشد تا اثر فراهمی عناصر غذایی به عنوان یک عامل ایجاد تغییر در عملکرد گیاه حذف شود. برای تولید هر تن دانه جو در هکتار با فرض تراکم کاشت دویست بوته در متر مربع به سی کیلوگرم نیتروژن، پنج کیلوگرم فسفر و بیست کیلوگرم پتاسیم نیاز است [۲۳]. منابع فسفر و پتاسیم قبل از کاشت به محیط کشت افزوده شدند حال آن‌که کود نیتروژن در طول دوره رشد طی پنج مرحله به شکل اقساط داده شد تا میزان هدرروی آن طی فرایندهای آبشویی نیترات و دنیتریفیکاسیون کاهش یابد. جدول ۵ مقدار کود استفاده شده در هر گلدان را به تفکیک تیمار نشان می‌دهد.

۷.۲ خزانه‌کاری و انتقال نهال

نیمه آذر ۱۳۹۹ خزانه‌کاری انجام شد و اوایل دی ماه وقتی ارتفاع بوته‌ها به حدود ده تا پانزده سانتی‌متر رسید، بوته‌ها به گلدان منتقل شدند. سطح خاک گلدان ۰/۰۲۷ متر مربع بود از این‌رو به منظور رعایت تراکم ۲۰۰ بوته در متر مربع، در هر گلدان تعداد شش گیاه کشت شدند.

جدول ۳. ترکیب بستر کشت تیمارها

تیمار	خاک (گرم)	بیوچار یا کاه (گرم)
$S^* B_1$	۷۵۰۰	۰
$S^* B_2$	۷۳۱۲	۱۸۷
$S^* B_3$	۷۱۲۵	۳۷۵
$S^* B_4$	۶۹۳۷	۵۶۲
$S^* W_1$	۷۳۱۲	۱۸۷
$S^* W_2$	۷۱۲۵	۳۷۵

نشان * بیانگر هر دو بافت خاک است

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محیط‌های کشت

تیمار	N_{ava} (ppm)	P_{ava} (ppm)	K_{ava} (ppm)	EC (ds/m)	pH	درصد اشباع (%W/W)	ظرفیت مزرعه (%W/W)	نقطه پژمردگی (%W/W)	چگالی ظاهری (gr/cm^3)	C ٪
S_1B_1	۵٫۶*	۳۲٫۶	۳۹۸	۱٫۴۱	۷٫۸۸	۳۹	۲۳٫۴	۱۵٫۴	۱٫۱۹	۱
S_1B_2	۶	۳۱٫۸	۳۸۸	۲٫۷۵	۸٫۰۴	۴۵	۲۵٫۴	۱۶٫۶	۱٫۰۱	-
S_1B_3	۶٫۴	۳۱	۳۷۸	۳٫۶۳	۸٫۱۴	۴۳	۲۵٫۵	۱۶٫۵	۰٫۹۵	-
S_1B_4	۶٫۸	۳۰٫۲	۳۶۸	۴٫۷۸	۸٫۳۷	۵۷	۳۲٫۲	۲۰٫۱	۰٫۸۶	-
S_2B_1	۵٫۳*	۳	۱۷۵	۰٫۹۶	۷٫۹۲	۲۳	۱۲٫۴	۷٫۹۵	۱٫۴۱	۰٫۳۴
S_2B_2	۵٫۷	۲٫۹	۱۷۰	۲٫۹۲	۷٫۹۹	۲۹	۱۴٫۹	۹٫۲۰	۱٫۲۶	-
S_2B_3	۶٫۱	۲٫۹	۱۶۶	۴	۸٫۱۰	۳۷	۱۸٫۲	۱۰٫۴	۱٫۱۶	-
S_2B_4	۶٫۵	۲٫۸	۱۶۱	۴٫۶۹	۸٫۲۳	۴۴	۱۹٫۴	۱۲٫۹	۰٫۹۷	-
S_1W_1	۵٫۵	۳۱٫۸	۳۸۸	۴٫۴۳	۶٫۶۶	۵۰	۲۰٫۹	۱۴٫۷	۰٫۹۳	-
S_1W_2	۵٫۳	۳۱	۳۷۸	۳٫۴	۷٫۱۶	۵۱	۲۰٫۲	۱۱٫۷	۰٫۸۶	-
S_2W_1	۵٫۱	۲٫۹	۱۷۰	۳٫۷۹	۶٫۸۸	۳۷	۱۳٫۴	۹٫۰۵	۱٫۰۹	-
S_2W_2	۵	۲٫۹	۱۶۶	۳٫۱۵	۶٫۹	۳۵	۱۰٫۷	۶٫۰۱	۱٫۰۷	-

* ازت قابل دسترس در دو نمونه خاک و بیوچار به شکل آمونیم بوده، مقدار ازت نیتراتی ناچیز است

جدول ۵. منابع کودی استفاده شده در هر گلدان به تفکیک تیمار

تیمار	اوره (گرم)	سوپر فسفات تریپل (گرم)	سولفات پتاسیم (گرم)
S_1B_1	۱٫۵	-	-
S_1B_2	۱٫۵	۰٫۰۳	۰٫۱۸
S_1B_3	۱٫۵	۰٫۰۶	۰٫۳۶
S_1B_4	۱٫۵	۰٫۰۹	۰٫۵۵
S_2B_1	۱٫۵	۱٫۱۱	۴٫۰۸
S_2B_2	۱٫۵	۱٫۱۱	۴٫۱۶
S_2B_3	۱٫۵	۱٫۱۲	۴٫۲۴
S_2B_4	۱٫۵	۱٫۱۲	۴٫۳۲
S_1W_1	۱٫۵	۰٫۰۳	۰٫۱۸
S_1W_2	۱٫۵	۰٫۰۶	۰٫۳۶
S_2W_1	۱٫۵	۱٫۱۱	۴٫۱۶
S_2W_2	۱٫۵	۱٫۱۲	۴٫۲۴

۸.۲ کاربرد اوره نشان‌دار به ایزوتوپ نیتروژن-۱۵

کود نیتروژن نشان‌دار در دسترس، اوره با غلظت اسمی ۱۰ اتم درصد ^{15}N بود. با توجه به نیاز کودی تعیین شده توسط دستورالعمل رکسانا و نیز راهنمای آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، غلظت ایزوتوپ در اوره نشان‌دار که باید به گلدان‌ها داده شود محاسبه و ۰٫۶ اتم درصد ^{15}N به دست آمد [۲۴، ۲۵]. این غلظت کافی بود تا مقدار ایزوتوپ در بافت گیاه، توسط طیف‌سنج نوری[1] قابل آشکارسازی و اندازه‌گیری باشد ولی در این آزمایش، اوره با غلظت اسمی حدود یک اتم درصد داده شد.

برای تأمین نیاز نیتروژن گیاه لازم بود به هر گلدان ۱٫۵ گرم اوره داده شود. این مقدار کود، در مجموع معادل ۵۴ گرم اوره برای ۳۶ گلدان طرح است. از این‌رو برای تهیه محلول ذخیره کود مقدار ۱۱ گرم اوره نشان‌دار غلظت ۱۰ اتم درصد ^{15}N با ۴۳ گرم اوره غیرنشان‌دار ترکیب و در یک لیتر آب حل شد. این محلول در بطری پلاستیک دربدار، و در فریزر نگه‌داری شد تا در طول دوره رشد گیاه طی پنج قسط به گلدان‌ها داده شود. در هر قسط ۲۰۰ میلی‌لیتر از این محلول، به درون یک مخزن پلاستیکی همزن‌دار با گنجایش ۴ لیتر منتقل گردید و با آب شهری، حجم کل محلول به ۳۶۰۰ میلی‌لیتر رسید. پس از همزدن کامل، به هر گلدان ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول اخیر داده شد.

۹.۲ برداشت محصول، آنالیز نمونه‌های نشان‌دار کود و گیاه

انتهای فروردین ۱۴۰۰ با استفاده از قیچی هرس، در همه‌ی گلدان‌ها ساقه از ارتفاع پنج سانتی‌متری سطح خاک قطع شد. اندام هوایی گیاه (شامل کاه و دانه) به پاکت کاغذی منتقل و در آون دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند تا رطوبت خود را از دست داده و به وزن ثابت برسند سپس نمونه‌های هر گلدان آسیاب شدند و برای آنالیز عنصری نیتروژن کل و همچنین تعیین غلظت ایزوتوپ ^{15}N به آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک ارسال شدند. برای آنالیز نمونه‌های نشان‌دار کود و گیاه از دستگاه طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی[2] مدل Isoprime Precision استفاده شد.

۱۰.۲ محاسبه بهره‌وری نیتروژن، تجزیه و تحلیل آماری

پس از تعیین غلظت ایزوتوپ ^{15}N در نمونه‌ها، بهره‌وری کود نیتروژن به کمک معادلات ۱ تا ۴ محاسبه گردید

$$\%\,NDFF = \frac{at\%\,{}^{15}N_{ex\ plant}}{at\%\,{}^{15}N_{ex\ Labelled\ \ Fertilizer}} \qquad (۱)$$

که $NDFF$ درصدی از نیتروژن موجود در بافت گیاه است که منشأ کودی دارد[3]. صورت و مخرج معادله ۱ به ترتیب اتم درصد

1. Emission Spectrometer

2. IRMS

3. Nitrogen Derived from Fertilizer

اضافه ^{15}N در گیاه و اتم درصد اضافه ^{15}N در کود نشان‌دار می‌باشند [۲۵].

$$NY = DMY \times \frac{\%N}{100} \quad (۲)$$

NY کل نیتروژنی است که گیاه از طریق ریشه جذب نموده است[1]، DMY ماده خشک گیاهی تولید شده[2] و $\%N$ درصد نیتروژن در ماده خشک گیاه است [۲۵].

$$FNY = NY \times \frac{\%NDFF}{100} \quad (۳)$$

FNY آن بخش از نیتروژن موجود در بافت گیاه است که منشأ کودی دارد[3].

$$\%FNU = \frac{FNY}{Rate\ of\ N\ application} \quad (۴)$$

FNU بهره‌وری کود نیتروژن[4] و مخرج کسر در معادله ۴، مقدار نیتروژنی است که به شکل کود ازته به گلدان داده شده است. در این تحقیق، متغیرهای DMY، FNY و NY برحسب گرم در گلدان محاسبه شدند.

به منظور انجام آنالیز آماری، ابتدا مفروضات آزمون‌های آماری پارامتری شامل نرمال بودن توزیع داده‌ها[5] و نیز همگنی واریانس تیمارها[6] با نرم‌افزار Analyse-it بررسی و سپس تجزیه واریانس و مقایسه میانگین تیمارها برای متغیرهای مورد نظر در محیط برنامه MSTAT-C انجام گردید. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون چند دامنه دانکن استفاده شد.

۱۱.۲ تعیین شوری محیط کشت

به منظور تعیین میزان شوری محیط کشت، در پایان دوره رشد گیاه از خاک هر گلدان نمونه‌برداری شد و طبق شیوه‌نامه مؤسسه تحقیقات خاک و آب، به نمونه‌ها آب مقطر افزوده شد تا گل اشباع تهیه شود. سپس از گل اشباع عصاره‌گیری شد و هدایت الکتریکی عصاره هر نمونه، با استفاده از هدایت‌سنج Genway ۴۳۲۰ تعیین گردید [۲۶].

۳. یافته‌ها و بحث

۱.۳ اثر تیمار بر عملکرد بیولوژیک جو

جدول ۶ و ۱۰ اثر تیمار را بر عملکرد بیولوژیک (وزن اندام هوایی گیاه) نشان می‌دهند. بیوچار به طور کلی باعث افزایش عملکرد بیولوژیک نسبت به تیمار شاهد شد. گاترن و همکاران گزارش کردند که کاربرد بیوچار همراه با کود شیمیایی نیتروژن سبب افزایش عملکرد در گیاه جو می‌شود [۲۷]. هراک و همکاران در بررسی تأثیر کاربرد بیوچار به تنهایی و یا همراه با کود نیتروژن بر کیفیت خاک و عملکرد دانه گندم، جو و ذرت گزارش کردند که بیوچار در افزایش عملکرد دانه تأثیر معنی‌دار دارد [۲۸]. کندرلوا و همکاران در آزمایشات خود مشاهده کردند که کاربرد ده تن در هکتار بیوچار همراه با کود نیتروژن و یا ۲۰ تن در هکتار حتی بدون کود نیتروژن در خاک بافت لوم توانست زیست توده گیاه جو را افزایش دهد [۲۹]. ابروزینی و همکاران به این نتیجه رسیدند که کاربرد بیوچار بقایای نیشکر سبب بهبود کارایی مصرف کود نیتروژن و افزایش عملکرد دانه و کاه در گندم می‌شود [۳۰]. وانگ و همکاران در آزمایش تأثیر بیوچار بر میزان جذب نیتروژن توسط گیاه در تناوب پنبه- جو دریافتند که بیوچار سبب افزایش عملکرد و مقدار جذب نیتروژن توسط گیاه می‌شود [۳۱]. چن و همکاران تأثیر بیوچار و مدیریت آبیاری بر هدرروی نیتروژن در شالیزار را بررسی نموده و پی بردند که بیوچار سبب افزایش عملکرد برنج، بهبود کارایی مصرف آب و بهبود راندمان جذب نیتروژن توسط گیاه می‌شود [۳۲].

اما نتایج بیان‌گر آن هستند که افزایش عملکرد در مقادیر کم بیوچار تا ترکیب ۷/۵ درصد وزنی معنی‌دار نیست. عملکرد بیولوژیک در تیمارهای کاه به طور معنی‌داری کم‌تر از تیمارهای بیوچار و یا تیمارهای فاقد بیوچار است و هر چه مقدار کاه بیش‌تر می‌شود عملکرد، کاهش بیش‌تری نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار عملکرد بیولوژیک در تیمار خاک لوم رسی با ۷/۵ درصد بیوچار و کم‌ترین آن در خاک لوم رسی با ۵ درصد کاه مشاهده شد (به ترتیب ۵۷۲۰۰ و ۳۷۰۰ کیلوگرم در هکتار).

افزایش عملکرد در تیمارهای بیوچار از اثر اصلاح‌کننده خاک بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی خاک ناشی می‌شود.

1. Nitrogen Yield
2. Dry Matter Yield
3. Fertilizer Nitrogen Yield
4. Fertilizer Nitrogen Utilization
5. Data Normality
6. Homogeneity of Variance

جدول ۶. تجزیه واریانس عملکرد بیولوژیک

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره‌ی F
تیمار	۱۱	۱۱۵۸۸٫۶	۱۰۵۳٫۵	۱۳۱٫۸**
خطا	۲۴	۱۹۱٫۸	۷٫۹۹	
کل	۳۵	۱۱۷۸۰٫۴		

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

جدول ۷. تجزیه واریانس شوری خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره‌ی F
تیمار	۱۱	۳۳٫۰۳	۳	۹٫۸۷**
خطا	۲۴	۷٫۳	۰٫۳	
کل	۳۵	۴۰٫۳۳		

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

جدول ۸. نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های گیاه، کود نشان‌دار و محاسبه بهره‌وری کود نیتروژن به تفکیک تیمار و تکرار

تیمار	N_{DM} (%)	BY (gr/pot)	$^{15}N_{ex\ plant}$ (atom %)	$^{15}N_{ex\ labelled\ fertilizer}$ (atom %)	NDFF (%)	NY (gr/pot)	FNY (gr/pot)	FNU (%)
S_1B_1	۰٫۷	۸۶٫۸۹	۰٫۳۲	۰٫۴۵	۷۱	۰٫۶۱	۰٫۴۳	۲۸٫۸
S_1B_1	۰٫۶۵	۹۱٫۲۲	۰٫۳۲	۰٫۴۵	۷۱	۰٫۵۹	۰٫۴۲	۲۸٫۱
S_1B_1	۰٫۷۵	۸۳٫۷	۰٫۳۱	۰٫۴۵	۶۹	۰٫۶۳	۰٫۴۳	۲۸٫۸
S_1B_2	۰٫۷۱	۱۱۳٫۴۵	۰٫۳۳	۰٫۴۵	۷۳	۰٫۸۱	۰٫۵۹	۳۹٫۴
S_1B_2	۰٫۶۹	۹۵٫۸۸	۰٫۳۲	۰٫۴۵	۷۱	۰٫۶۶	۰٫۴۷	۳۱٫۴
S_1B_2	۰٫۷۵	۹۴٫۸۹	۰٫۳۲	۰٫۴۵	۷۱	۰٫۷۱	۰٫۵۱	۳۳٫۷
S_1B_3	۰٫۷۲	۱۰۶٫۳۷	۰٫۳۴	۰٫۴۵	۷۶	۰٫۷۷	۰٫۵۸	۳۸٫۶
S_1B_3	۰٫۷۳	۱۰۰٫۳۷	۰٫۳۴	۰٫۴۵	۷۶	۰٫۷۳	۰٫۵۵	۳۶٫۹
S_1B_3	۰٫۷۶	۸۵٫۸۶	۰٫۲۹	۰٫۴۵	۶۴	۰٫۶۵	۰٫۴۲	۲۸
S_1B_4	۰٫۶۵	۱۳۲٫۳۷	۰٫۳۴	۰٫۴۵	۷۶	۰٫۸۶	۰٫۶۵	۴۳٫۳
S_1B_4	۰٫۶۳	۱۱۹٫۰۱	۰٫۳۳	۰٫۴۵	۷۳	۰٫۷۵	۰٫۵۵	۳۶٫۷
S_1B_4	۰٫۶۷	۱۱۵٫۲	۰٫۳۱	۰٫۴۵	۶۹	۰٫۷۷	۰٫۵۳	۳۵٫۴
S_1W_1	۰٫۵۵	۱۵٫۷۴	۰٫۳۷	۰٫۴۵	۸۲	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۴٫۷
S_1W_1	۰٫۶۶	۱۸٫۱۸	۰٫۳۸	۰٫۴۵	۸۴	۰٫۱۲	۰٫۱	۶٫۸
S_1W_1	۰٫۷۲	۱۳٫۱۵	۰٫۴۴	۰٫۴۵	۹۸	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۶٫۲
S_1W_2	۰٫۵۷	۹٫۹۴	۰٫۳۱	۰٫۴۵	۶۹	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۲٫۶
S_1W_2	۰٫۴۷	۵٫۸۵	۰٫۱۸	۰٫۴۵	۴۰	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۷
S_1W_2	۰٫۶۱	۶٫۹۳	۰٫۲۶	۰٫۴۵	۵۸	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۱٫۶
S_2B_1	۰٫۷۵	۷۳٫۳۵	۰٫۳۷	۰٫۶۶	۵۶	۰٫۵۵	۰٫۳۱	۲۰٫۶
S_2B_1	۰٫۸۴	۶۰٫۷	۰٫۲۷	۰٫۶۶	۴۱	۰٫۵۱	۰٫۲۱	۱۳٫۹
S_2B_1	۰٫۸۵	۶۲٫۴۶	۰٫۳۶	۰٫۶۶	۵۵	۰٫۵۳	۰٫۲۹	۱۹٫۳
S_2B_2	۰٫۷۶	۶۹٫۰۸	۰٫۳۹	۰٫۶۶	۵۹	۰٫۵۲	۰٫۳۱	۲۰٫۷
S_2B_2	۰٫۷۴	۶۸٫۰۷	۰٫۳۸	۰٫۶۶	۵۸	۰٫۵	۰٫۲۹	۱۹٫۳
S_2B_2	۰٫۷۵	۶۸٫۵۴	۰٫۳۶	۰٫۶۶	۵۵	۰٫۵۱	۰٫۲۸	۱۸٫۷
S_2B_3	۰٫۷۷	۷۰٫۹۳	۰٫۳۹	۰٫۶۶	۵۹	۰٫۵۵	۰٫۳۲	۲۱٫۵
S_2B_3	۰٫۷۳	۶۷٫۱۴	۰٫۳۹	۰٫۶۶	۵۹	۰٫۴۹	۰٫۲۹	۱۹٫۳
S_2B_3	۰٫۷۶	۶۹٫۹۷	۰٫۳۸	۰٫۶۶	۵۸	۰٫۵۳	۰٫۳۱	۲۰٫۴
S_2B_4	۰٫۷۱	۸۷٫۰۶	۰٫۳۸	۰٫۶۶	۵۸	۰٫۶۲	۰٫۳۶	۲۳٫۷
S_2B_4	۰٫۸	۹۳٫۰۳	۰٫۳۸	۰٫۶۶	۵۸	۰٫۷۴	۰٫۴۳	۲۸٫۶
S_2B_4	۰٫۷۸	۷۱٫۷۶	۰٫۳۸	۰٫۶۶	۵۸	۰٫۵۶	۰٫۳۲	۲۱٫۵
S_2W_1	۰٫۶۸	۱۷٫۰۴	۰٫۳۱	۰٫۶۶	۴۷	۰٫۱۲	۰٫۰۵	۳٫۶
S_2W_1	۰٫۶۱	۱۹٫۱۳	۰٫۲۳	۰٫۶۶	۳۵	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۲٫۷
S_2W_1	۰٫۷۴	۱۵٫۶	۰٫۳۵	۰٫۶۶	۵۳	۰٫۱۲	۰٫۰۶	۴٫۱
S_2W_2	۰٫۶۱	۱۰٫۱۱	۰٫۴۳	۰٫۶۶	۶۵	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۲٫۷
S_2W_2	۰٫۶۵	۱۳٫۱۵	۰٫۳۱	۰٫۶۶	۴۷	۰٫۰۹	۰٫۰۴	۲٫۷
S_2W_2	۰٫۵۳	۹٫۸۹	۰٫۳۲	۰٫۶۶	۴۸	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۱٫۷

جدول ۹. تجزیه واریانس بهره‌وری کود نیتروژن

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره‌ی F
تیمار	۱۱	۵۹۵۷٫۵۹	۵۴۱٫۶	۶۵٫۹۹**
خطا	۲۴	۱۹۶٫۹۷	۸٫۲۰۷	
کل	۳۵	۶۱۵۴٫۵۷		

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

جدول ۱۰. مقایسه میانگین متغیرهای تحت بررسی

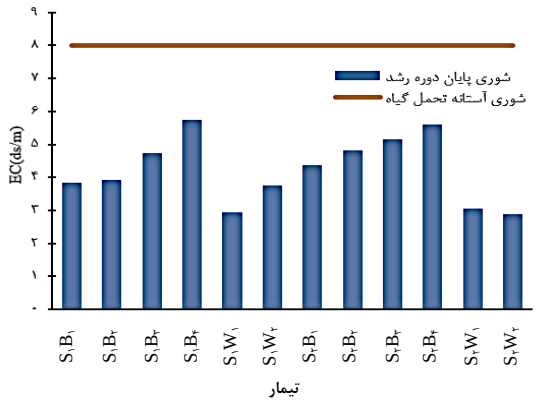
تیمار	عملکرد بیولوژیک (Kg. ha^{-1})	شوری محیط کشت (dS.m^{-1})	بهره‌وری کود نیتروژن (%)
S_1B_1	۴۱۴۰۰^{bc}	۳٫۸۴^{bcd}	۲۸٫۵۷^{bc}
S_1B_2	۴۷۷۰۰^{b}	۳٫۹۲^{bcd}	۳۴٫۸۳^{ab}
S_1B_3	۴۶۶۰۰^{bc}	۴٫۷۳^{ab}	۳۴٫۵^{ab}
S_1B_4	۵۷۲۰۰^{a}	۵٫۷۵^{a}	۳۸٫۴۷^{a}
S_1W_1	۷۲۷۰^{e}	۲٫۹۳^{d}	۵٫۹^{e}
S_1W_2	۳۷۰۰^{e}	۳٫۷۵^{bcd}	۱٫۶۳^{e}
S_2B_1	۳۱۱۰۰^{d}	۴٫۳۶^{abc}	۱۷٫۹۳^{d}
S_2B_2	۳۳۲۰۰^{d}	۴٫۸۱^{ab}	۱۹٫۵۷^{d}
S_2B_3	۳۳۱۰۰^{d}	۵٫۱۴^{ab}	۲۰٫۴^{d}
S_2B_4	۳۹۹۰۰^{c}	۵٫۵۹^{a}	۲۴٫۶^{cd}
S_2W_1	۸۴۰۰^{e}	۳٫۰۵^{cd}	۳٫۴۶^{e}
S_2W_2	۵۳۰۰^{e}	۲٫۸۸^{d}	۲٫۳۷^{e}

وجود حداقل یک حرف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار است.

۲.۳ اثر شوری بستر کاشت بر عملکرد زراعی

بررسی شوری محیط کاشت تیمارها نشان داد که با افزایش درصد بیوچار، شوری محیط کشت افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران که اثر بیوچار و پسماند صنایع فولاد را بر میزان انتشار دی اکسید کربن از شالیزارها بررسی می‌کردند و نیز برتنیکی و همکاران در نقد اثرات نامطلوب بیوچار بر محیط خاک، گزارش کردند که در اثر افزودن بیوچار به خاک، شوری خاک به طور معنی‌دار افزایش می‌یابد [۳۳، ۳۴]. این افزایش به جز در تیمار S_1B_4 معنی‌دار نبود (جدول‌های ۷ و ۱۰). نتایج نشان داد که استفاده از کاه در تغییر شوری خاک بی‌تأثیر است. دلیل شور بودن بیوچار این است که ضمن فرایند تولید آن که در غیاب اکسیژن یا در حضور اکسیژن محدود انجام می‌شود، ساختار فیزیکی و شیمیایی ماده آلی اولیه دگرگون می‌شود. در فرایند پیرولیز دی اکسید کربن متصاعد نمی‌شود بلکه گازهای خاص[1] و هم‌چنین روغن زیستی[2] تولید می‌شوند [۱].

اگر شوری خاک از آستانه تحمل گیاه فراتر رود کاهش عملکرد را به دنبال خواهد داشت [۲۱، ۳۵، ۳۶]. شوری عصاره اشباع خاک در آستانه تحمل گیاه جو ۸ دسی زیمنس بر متر است [۲۱]. با توجه به شکل ۲، شوری عصاره اشباع خاک در پایان فصل رشد در هیچ‌یک از تیمارها به آستانه تحمل گیاه نزدیک نشده است. بنابراین اگر چه در اثر کاربرد بیوچار، شوری بستر افزایش یافت ولی این شوری بر عملکرد گیاه تأثیر منفی نداشت.



شکل ۲. شوری خاک تیمارهای آزمایش در پایان دوره رشد گیاه.

۳.۳ اثر تیمار بر بهره‌وری نیتروژن

فراوانی ایزوتوپ ^{15}N در کود نشان‌دار به کار رفته برای تیمارهای لوم شنی ۰٫۸۱ اتم درصد و در تیمارهای لوم رسی ۱٫۰۲ اتم درصد بود. نتایج مربوط به بهره‌وری کود نیتروژن به تفکیک تیمار و تکرار در جدول ۸ آمده‌اند. در این جدول BY عملکرد بیولوژیک (وزن اندام هوایی گیاه)[3] و N_{DM} مقدار نیتروژن در ماده خشک گیاه می‌باشند سایر متغیرهای جدول در مبحث مواد و روش‌ها، تعریف شده‌اند.

نتایج تجزیه واریانس بازیافت کود نیتروژن در جدول ۹ آمده است. با توجه به جدول، اثر تیمار باعث تفاوت معنی‌دار در میزان بازیافت نیتروژن شده است.

جدول ۱۰ نشان می‌دهد که در اثر کاربرد بیوچار، درصد نیتروژن بازیافت شده، افزایش و در اثر کاربرد کاه کاهش می‌یابد. این افزایش به ویژه در تیمار S_1B_4 نسبت به شاهد (S_1B_1) معنی‌دار است ($P<0.01$). دلیل افزایش بازیافت نیتروژن، افزایش جرم زیست توده گیاه است. بهره‌وری کود نیتروژن، نسبت نیتروژن برداشت شده توسط گیاه به ازتی است که به شکل کود نیتروژن به خاک داده شده است. از طرف دیگر، ازت برداشت شده توسط گیاه حاصل‌ضرب دو متغیر (درصد ازت در ماده خشک و مقدار ماده خشک گیاهی تولید شده) است. در اثر کاربرد بیوچار، دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی بهبود یافته و در نتیجه، عملکرد زراعی افزایش می‌یابد [۲۷-۳۲]. با افزایش عملکرد، مقدار نیتروژن برداشت شده از خاک که یکی از مؤلفه‌های تعیین نیتروژن بازیافت شده می‌باشد، افزایش می‌یابد و افزایش بازیافت نیتروژن به نوبه خود به معنی بهبود بهره‌وری کود نیتروژن است. از این‌رو دور از انتظار نیست که در تیمارهای S_1W_1، S_1W_2، S_2W_1 و S_2W_2 که وزن زیست توده گیاه به دلیل نقش منفی کاه به طور معنی‌داری کاهش یافته است، در بهره‌وری کود نیتروژن نیز کاهش معنی‌دار دیده شود.

1. Syngas
2. Bio Oil
3. Biological Yield

۴. نتیجه‌گیری

کاربرد زغال‌زیستی سبب شد عملکرد بیولوژیک در تیمارهای S_1B_1 تا S_2B_4 به ترتیب ۱۳۸ و ۱۲۸ درصد افزایش یابد. بیوچار در هر دو نوع خاک، سبب بهبود کارایی مصرف کود نیتروژن شد. به نحوی که در تیمارهای S_1B_2، S_1B_3 و S_1B_4 نسبت به تیمار شاهد (S_1B_1) به ترتیب ۲۲، ۲۱، ۳۵ درصد و در تیمارهای S_2B_1، S_2B_2 و S_2B_3 نسبت به تیمار بدون بیوچار S_2B_1 به ترتیب ۹، ۱۴ و ۳۷ درصد، نیتروژن بیش‌تر بازیافت گردید. بهره‌وری بیش‌تر کود نیتروژن به معنی هدرروی کم‌تر آن به شکل نیترات یا گازهای گلخانه‌ای نیتروژن است.

با توجه به اثرات منفی کاه بر بهره‌وری آب و کود نیتروژن از یک سو و نقش مثبت بیوچار در این خصوص، پیشنهاد می‌شود ساز و کاری تدوین شود که به موجب آن، کشاورزان بقایای گیاهی پس از برداشت گندم را از سطح مزرعه جمع‌آوری و پس از تبدیل به بیوچار، همراه با عملیات خاک‌ورزی و آماده کردن بستر کاشت، در مزرعه به کار ببرند. چنان‌چه این قبیل فعالیت‌ها در سطح گسترده انجام شود صرف‌نظر از اقتصادی‌تر شدن تولیدات کشاورزی، گامی مؤثر در راستای مهار پیامدهای ناخواسته تغییرات آب و هوایی کره زمین برداشته خواهد شد.

در شرایطی که راهکار بالا عملی نباشد، باید به کاه فرصت داده شود تا تحت اثر فعل و انفعالات بیوشیمیایی خاک تجزیه شود. مدت زمان لازم، به شرایط محیطی بستگی دارد و اگر از آن صرف نظر شود افت عملکرد در محصول بعدی اتفاق خواهد افتاد.

مراجع

1. J. Lehmann, S. Joseph, *Biochar for environmental management: science*, technology and implementation. Routledge, S. (Eds.). (2015).
2. M. Paneque, et al, *Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relations of sunflower plants under non-irrigation conditions*, Catena, **147**, 280-287 (2016).
3. S.S. Akhtar, et al, *Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation*, Agricultural Water Management, **138**, 37-44 (2014).
4. Y. Wang, et al, *Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount*, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, **32(8)**, 113-119 (2016).
5. M. Ramlow, et al, *Broadcast woody biochar provides limited benefits to deficit irrigation maize in Colorado*. Agriculture, Ecosystems & Environment, **269**, 71-81 (2019).
6. G.H. Agbna, et al, *Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato*, Scientia Horticulturae, **222**, 90-101 (2017).
7. H.P. Schmidt, *Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil*, Agriculture, **5(3)**, 723-741 (2015).
8. C.I. Kammann, et al, *Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar*, Scientific reports, **5(1)**, 1-13 (2015).
9. P.G. Slavich, et al, *Contrasting effects of manure and green waste biochars on the properties of an acidic ferralsol and productivity of a subtropical pasture*, Plant and Soil, **366(1)**, 213-227 (2013).
10. E.R. Graber, et al, *Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media*, Plant and Soil, **337(1)**, 481-496 (2010).
11. L. Genesio, et al, *Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany*, Agriculture, Ecosystems & Environment, **201**, 20-25 (2015).
12. O.T. Faloye, et al, *Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation*, Agricultural Water Management, **217**, 165-178 (2019).
13. F. Miri, J. Zamani, M. Zarebanadkouki, *The Effect of Different Levels of Pistachio Harvesting Wastes Biochar on Growth and Water Productivity of Maize (Zea mays L.)*, Iranian Journal of Soil and Water Research, **52(1)**, 227-236 (2021) (In Persian).
14. F. Karami Niya, et al, *The Effect of Spent Mushroom Compost and Its Biochar on Parsley Yield under Salinity Stress*, Iranian Journal of Soil and Water Research, **50(6)**, 1453-1465 (2019) (In Persian).
15. M. Kazemizadeh, et al, *Investigating the Effect of Biochar and Hydrochar (Sugar Cane Bagasse) on Yield*, Water Productivity and Nitrogen Leaching in Maize Cultivation. Iranian Journal of Soil and Water Research, **51(3)**, 753-761 (2020) (In Persian).
16. X. Luo, et al, *Biochar addition reduced net N mineralization of a coastal wetland soil in the Yellow River Delta*, China. Geoderma, **282**, 120-128 (2016).
17. T.J. Clough, et al, *A review of biochar and soil nitrogen dynamics*, Agronomy, **3(2)**, 275-293 (2013).
18. M.L. Cayuela, et al, *Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis*, Agriculture, Ecosystems & Environment, **191**, 5-16 (2014).
19. H.P. Schmidt, *European biochar certificate-guidelines for a sustainable production of biochar*, 1-17 (2016).
20. A. Sedmihradská, et al, *Pyrolysis of wheat and barley straw*, Research in Agricultural Engineering, **66(1)**, 8-17 (2020).
21. G. Haghnia, *Plant Salinity Tolerance guideline*, Mashad. Ferdowsi University Press, **32** (1989) (In Persian).

22. K.E. Saxton, W.J. Rawls, *Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions*, Soil science society of America Journal, **70(5)**, 1569-1578 (2006).
23. M.K.V. Carr, *Crop Yield Response to Water*, FAO Irrigation and Drainage Paper 66. By P. Steduto, TC Hsiao, E. Fereres and D. Raes. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013).
24. S. Roxana, A.S. Gustavo, A. Rossella, *Barley. In: Steduto, P., Hsiao, TC., Fereres, E., Raes, D. 2013. Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66.:* Food and Agriculture Organization of the United Nations,134-144 (2012).
25. T.C.S. No, *Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition*, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (2001).
26. Water & Soil Research Institute, No. **467**, 255 (2008) (In Persian).
27. A. Gathorne-Hardy, J. Knight, J. Woods, *Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertiliser to improve barley yields in the UK. In IOP Conference Series*, Earth and Environmental Science, **6(37)** (2009) IOP Publishing.
28. J. Horák, V. Šimanský, E. Aydin, *Benefits of biochar and its combination with nitrogen fertilization for soil quality and grain yields of barley. wheat and corn*, Journal of Elementology, **25(2)**, 443-458 (2020).
29. E. Kondrlova, J. Horak, D. Igaz, *Effect of biochar and nutrient amendment on vegetative growth of spring barley ('Hordeum vulgare' L. var. Malz)*, Australian Journal of Crop Science, **12(2)**, 178–184 (2018).
30. T.F. Abbruzzini, *Dynamic biochar effects on nitrogen use efficiency, crop yield and soil nitrous oxide emissions during a tropical wheat-growing season*, Journal of Environmental Management, **252**, 109638 (2019).
31. Z. Wang, et al, *Biochar increases ^{15}N fertilizer retention and indigenous soil N uptake in a cotton-barley rotation system*, Geoderma, **357**, 113944 (2020).
32. X. Chen, *Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field*, Journal of Cleaner Production, **290**, 125811 (2021).
33. M. Wang, et al, *Steel slag and biochar amendments decreased CO2 emissions by altering soil chemical properties and bacterial community structure over two-year in a subtropical paddy field*, Science of The Total Environment, **740**, 140403 (2020).
34. M. Brtnicky, *A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment*, Science of The Total Environment, **796**, 148756 (2021).
35. C. Zörb, C.M. Geilfus, K.J. Dietz, *Salinity and crop yield*, Plant Biology, **21**, 31-38 (2019).
36. M.A. ÇULLU, *Estimation of the effect of soil salinity on crop yield using remote sensing and geographic information system*, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, **27(1)**, 23-28 (2003).

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله
حسین عباسعلیان، جابر سلطانی، سید ابراهیم هاشمی گرمدره، اعظم برزویی، مریم احمدوند (۱۴۰۱)، بررسی تأثیر کاربرد بیوچار و کاه گندم بر بهره‌وری کود نیتروژن در زراعت جو با استفاده از فن‌آوری ایزوتوپی N^{15}، ۹۹، ۴۷-۵۶

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.1.6.9
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1349.html