

Effects of biochar and phosphorus on some agronomical traits of rapeseed (*Brassica napus* L.) and the associated water use efficiency in an alkaline loam soil

S. Salimi Trazoj, A. Reyhanitabar*  and N. Najafi

MSc Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

soheilsalimi70@yahoo.com

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

areyhani@tabrizu.ac.ir

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

nanajafi@yahoo.com

Received: November 2024 and Accepted: February 2025

Abstract

The effects of the combined application of biochar pyrolysed at 300 °C and phosphorous (P) fertilizer on some agronomical and morphological traits of the Hyola 308 cultivar of rapeseed (*Brassica napus* L.) as well as the associated water use efficiency were studied in an alkaline loam soil. For this purpose, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replicates. The factors were organic matter with two sources (biochar and wheat straw) at three levels (0, 20, and 40 g kg⁻¹) and three levels of phosphorus (0, 20, and 40 mg kg⁻¹ as triple superphosphate fertilizer). Prior to harvesting, leaf chlorophyll index and leaf area were measured while shoot, root, and seed dry matter as well as water use efficiency, plant height, stem diameter, root volume, number of pods, one-thousand seed weight, seed oil content, and seed protein concentration were measured after the harvest. The results showed that application of phosphorus and both levels (2% and 4% of biochar significantly increased leaf chlorophyll index, stem height, number of pods, one-thousand seed weight, water use efficiency, protein and seed oil contents as well as shoot, root, and seed dry matter contents compared to the control; application of wheat straw, however, led to decreases in these traits except for water use efficiency. Moreover, compared to the initial biomass, the biochar obtained from wheat straw pyrolyzed at 300 °C in an alkaline loam soil improved rapeseed agronomical and morphological traits in an alkaline loam soil.

Keywords: Biochar, Phosphorus fertilizer, Rapeseed, Wheat straw

* - Corresponding author's email: areyhani@tabrizu.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.367559.371>

تأثیر بیوچار و فسفر بر برخی خصوصیات زراعی گیاه کلزا و کارایی مصرف آب در یک خاک لوم قلیایی

سهیل سلیمی ترازوج، عادل ریحانی تبار*  و نصرت‌اله نجفی

کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. soheilsalimi70@yahoo.com

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. areyhani@tabrizu.ac.ir

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. nanajafi@yahoo.com

دریافت: آبان ۱۴۰۳ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر برهمکنش کود فسفر و بیوچار حاصل از کاه گندم پیرولیز شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس بر برخی خصوصیات زراعی و مورفولوژیکی گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) رقم هایولا ۳۰۸ در یک خاک لوم قلیایی در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ماده آلی در پنج سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ گرم بر کیلوگرم خاک از دو منبع کاه گندم و بیوچار حاصل از آن) و فسفر در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل) بودند. قبل از برداشت گیاهان شاخص کلروفیل و سطح برگ اندازه‌گیری شدند. بعد از برداشت گیاه نیز ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه، کارایی مصرف آب، ارتفاع گیاه، قطر ساقه، حجم ریشه، تعداد غلاف، وزن هزار دانه، مقدار روغن دانه، غلظت و مقدار پروتئین دانه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که مصرف بیوچار (در هر دو سطح دو و چهار درصد) و فسفر شاخص کلروفیل برگ، ارتفاع گیاه، ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه، تعداد غلاف، وزن هزار دانه، کارایی مصرف آب، مقدار پروتئین و روغن دانه را نسبت به شاهد به طور معناداری افزایش داد، اما مصرف کاه گندم سبب کاهش این خصوصیات به جزء کارایی مصرف آب شد. تبدیل کاه گندم به بیوچار پیرولیز شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و مصرف آن در یک خاک لوم قلیایی نسبت به کاه گندم باعث بهبود خصوصیات رشد و مورفولوژیکی گیاه کلزا شد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، کود فسفر، کاه گندم، کلزا

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: areyhani@tabrizu.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی



مقدمه

کمبود فسفر در دسترس در خاک دومین مشکل عمده حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهان در سراسر دنیا است (Lindsay & Chien., 1989). کشاورزی مدرن وابسته به کودهای فسفوری است و این عنصر پرمصرف به-همراه نیتروژن ساختار اصلی گیاهان را تشکیل می‌دهد. فسفر در ساختمان درشت مولکول‌ها شرکت داشته و حدود ۰/۲ درصد وزن خشک گیاهان را تشکیل می‌دهد (Anderson et al., 2011). فسفر به‌عنوان یک عنصر ضروری پرمصرف برای گیاهان شناخته شده است. اما کمیت منابع سنگ فسفات، اصلی‌ترین ذخایر طبیعی فسفر در کره زمین، محدود بوده و کیفیت سنگ فسفات استخراجی نیز روند نزولی دارد (Egle et al., 2014). فسفر در رشد و توسعه اندام‌های زایشی گیاهان دخیل است. تغذیه کافی فسفر، بسیاری از جنبه‌های فیزیولوژیک گیاه از قبیل فرایندهای اساسی فتوسنتز، تثبیت نیتروژن، گلدهی، میوه‌دهی و رسیدگی محصول را تشدید می‌کند. فسفر، رشد ریشه مخصوصاً ریشه‌های جانبی را افزایش می‌دهد. در غلات، تغذیه بهینه فسفر سبب قوی‌تر شدن بافت‌های ساختمانی برگ‌ها و ساقه‌ها شده و به جلوگیری از ایجاد ورس کمک می‌کند (Havlin et al., 2019). مطالعات متعددی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نشان داده-اند که مصرف کود فسفر، بازده مصرف آب را در گیاهان متعدد و تحمل به خشکی را در شرایط تنش کمبود افزایش می‌دهد (Singh & Sale., 2000). احتمالاً فسفر سبب رشد ریشه و افزایش حجم ریشه‌ها شده و در نتیجه آب قابل استفاده بیشتری برای گیاه وجود خواهد داشت. همچنین این امکان وجود دارد که فسفر به‌دلیل نقش آن در ذخیره‌سازی انرژی و تشکیل پروتئین‌ها، گیاه را به خشکی متحمل کند (Singh & Sale., 2000). کمبود فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک عملکرد محصول را محدود می‌کند. برای مقابله با کمبود فسفر سالانه حدود ۱۵ میلیون تن کود فسفر در سطح جهان در زمین‌های کشاورزی مصرف می‌شود (Wang et al., 2012). باین‌حال، تنها پنج

تا ۳۰ درصد از فسفر مصرف‌شده توسط گیاه در سال بعد استفاده می‌شود (Price., 2006). تثبیت فسفر در زمین‌های کشاورزی و میزان بازیافت کم باعث شده است که حدود ۸۰ درصد از منابع سنگ فسفات جهان، در حال حاضر در صنعت تولید کود استفاده شود، اما مطالعات نشان داده‌اند که ذخایر سنگ فسفات جهان طی ۱۰۰ سال آینده تمام خواهند شد (Shu et al., 2006). جستجو برای یک جایگزین مناسب برای سنگ فسفات به‌عنوان یک ماده خام اولیه برای کود فسفر موضوعی مهم در بحث‌های اخیر درباره تولید جهانی عناصر غذایی است. استفاده از ضایعات کشاورزی غنی از فسفر می‌تواند از بسته شدن چرخه ژئوشیمیایی فسفر و حفاظت از سنگ فسفات باقیمانده جلوگیری کند (Frišták & Soja., 2015).

بیوجار مواد غنی از کربن تولید شده از هر گونه مواد آلی طی فرایند پیرولیز در نبود یا غلظت پایین اکسیژن ولی در دمای ۲۵۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس است (Lehmann et al., 2006). بیوجار می‌تواند به‌عنوان یک منبع ارزشمند فسفر عمل کند (Wang et al., 2014). بیوجار مشابه یک کود فسفر در خاک بوده و بخشی از فسفر بیوجار برای گیاه قابل‌جذب است. این اثر به‌عرضه مستقیم فسفر در شکل‌های قابل‌جذب، به تغییرات pH خاک و یا افزایش فعالیت میکروبی و بهبود تهویه توسط بیوجار نسبت داده می‌شود که برآیند این فرایندها ممکن است منجر به جذب بهتر فسفر توسط گیاهان شود (Atkinson et al., 2010). در یک خاک اسیدی، بیوجار با دو سازوکار قابلیت جذب فسفر در خاک را افزایش می‌دهد: اول به‌دلیل آزادسازی فسفر و دوم افزایش pH و به‌تبع آن کاهش غلظت آلومینیم محلول در خاک‌های اسیدی که نتیجه آن افزایش قابلیت جذب فسفر خاک است (Guo et al., 2014). در یک پژوهش با بررسی تأثیر افزودن بیوجار حاصل از چوب درخت زیتون و کاه گندم به همراه سطوح مختلف کود معدنی بر خصوصیات خاک و رشد گندم (*Triticum durum* L.) گزارش شد که افزودن سطوح ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد وزنی بیوجار باعث افزایش عملکرد

رشد و عملکرد گیاه دانه روغنی آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) گردید (Takaragawa et al., 2017).

دانه‌های روغنی پس از غلات، دومین منبع غذایی جهان محسوب می‌شوند. این محصولات علاوه بر دارا بودن ذخایر غنی اسیدهای چرب، حاوی پروتئین نیز می‌باشند. کلزا به عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی در سطح جهان مطرح است؛ به طوری که پس از سویا و نخل روغنی سومین منبع تولید روغن نباتی جهان به شمار می‌رود. این گیاه روغنی به طور متوسط حاوی ۴۵-۴۰ درصد روغن در دانه است که با توجه به نیاز روزافزون به روغن‌های نباتی و وابستگی کشور به این مواد، لازم است توجه ویژه‌ای به توسعه و گسترش کشت دانه‌های روغنی به ویژه کلزا مبذول گردد. سیاوش و همکاران (Siavash, 2005 et al) در گیاه کلزا به این نتیجه رسیدند که کمبود فسفر سبب کاهش رشد گیاه، کاهش ارتفاع گیاه، تعداد خورجین‌ها و اندازه دانه شد و در کمبود شدید فسفر، رشد رویشی بسیار کند بود و اندام‌های زایشی نیز تشکیل نشدند.

هدف از انجام این پژوهش، اندازه‌گیری تأثیر بیوپچار، این ماده آلی نوظهور و مهم در ترسیب کربن و دوستدار محیط‌زیست و منبع عناصر غذایی و برهمکنش آن با عنصر پرمصرف فسفر بر برخی خصوصیات زراعی گیاه کلزا و کارایی مصرف آب در یک خاک لوم قلیایی بود که در کشور ما تا زمان انجام این تحقیق مطالعات منتشر شده محدود بودند.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه در این تحقیق از عمق ۳۰-۰ سانتی متری یک مزرعه در ایستگاه تحقیقاتی کرکج دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به صورت مرکب تهیه شد که پس از هوا خشک کردن، کوبیده و از الک دو میلی متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند بافت خاک به روش هیدرومتری چهار زمانه (Gee & Bauder, 1986)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson &

دانه گندم در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به کود معدنی شد. هر دو بیوپچار به عنوان منبع فسفر قابل جذب برای گیاه عمل کردند که این امر سبب تأثیرات مثبتی بر تولید محصول شده بود (Albuquerque et al., 2014). گزارش شده است که افزودن بیوپچار به خاک باعث افزایش کربن آلی محلول، فسفر قابل دسترس، جوانه زنی بذر، ماده خشک گیاه و کاهش غلظت نیترات خاک گردید که این تغییرات بسته به نوع و مقدار بیوپچار متفاوت بودند (Albuquerque et al., 2014). در تحقیقی تأثیر ۱۰ تن در هکتار بیوپچار (پوسته برنج، کود مرغی، کود دامی، چوب) بر عملکرد گیاه نخود (*Pisum sativum* L.) بررسی و گزارش شد که بیوپچار حاصل از پوسته برنج نسبت به بقیه بیوپچارها بر برخی صفات فیزیولوژیکی مانند تعداد غلاف در گیاه، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته و وزن تر شاخساره تأثیر معناداری داشت (Bhattarai et al., 2015). تأثیر بیوپچار (۰، ۲۵، و ۵۰ تن در هکتار) همراه با کم‌آبیاری^۱ (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، تبخیر و تعرق مرجع) بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی و کارایی مصرف آب آبیاری^۲ مطالعه و گزارش شد که بیوپچار (۲۵، و ۵۰ تن در هکتار) باعث بهبود ذخیره آب خاک در هر دو سطح کم‌آبیاری (۵۰ و ۷۵ درصد) و باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد شد (Agbna et al., 2017). استفاده از بیوپچار به میزان یک تا پنج درصد باعث افزایش رشد و برخی خصوصیات زراعی گیاه ذرت از جمله افزایش ارتفاع، قطر ساقه، غلظت کلروفیل و میزان فتوسنتز و در نتیجه عملکرد دانه و کاه شد (Sun et al., 2017). نتایج مطالعه تأثیر بیوپچار چوب جنگلی (۰، ۲/۵، ۳/۷۵، ۵ و ۶/۲۵ تن در هکتار) بر خصوصیات خاک و عملکرد خیار (*Cucumis sativus* L) نشان داد که کاربرد بیوپچار به طور معناداری باعث افزایش تعداد میوه، طول میوه و عملکرد خیار نسبت به شاهد شد (Mbah et al., 2017). گزارش شده است که بیوپچار حاصل از کاه آفتابگردان و نیشکر باعث افزایش

قابل جذب با استفاده از عصاره گیر استات آمونیوم (Jones., 2001)، pH در گل اشباع (Rhoades., 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (Thomas., 1996) تعیین شدند (جدول ۱).

(Sommers., 1983)، غلظت قابل جذب عناصر غذایی کم مصرف کاتیونی (آهن، روی، مس و منگنز) به روش DTPA (Lindsay & Norvell., 1978)، نیتروژن کل به روش میکروکجلدال (Jones., 2001)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen & Sommers., 1982)، پتاسیم

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این تحقیق

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the soil used in this research

بافت خاک Textural class	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربن آلی OC	کربنات کلسیم معادل CaCO _{3eq}	رطوبت ظرفیت مزرعه FC	اسیدیته فعال pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)
Loam	46.1	39.3	14.5	1.1	13.35	19	7.7	0.69

ادامه جدول ۱

Continuation of Table 1

نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	آهن Fe	روی Zn	مس Cu	منگنز Mn
(g 100g ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
0.13	4.8	290.6	1.7	1.5	0.6	4.5

شهری شستشو و در داخل آب مقطر قرار داده شد و به-منظور همگن سازی نمونه ها پس از خشک شدن به وسیله آسیاب خرد و از الک یک میلی متری عبور داده شد. برخی از ویژگی های کاه گندم در جدول ۲ آمده است.

در این تحقیق کاه گندم از ایستگاه تحقیقاتی خلعت پوشان دانشگاه تبریز تهیه و به آزمایشگاه انتقال داده شد. سپس برای حذف مواد زائد و گردو خاک، ابتدا با آب

جدول ۲- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی کاه گندم مورد استفاده در این تحقیق

Table 2- Some physical and chemical characteristics of the straw used in this research

خاکستر Ash	کربن C	هیدروژن H	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	کربن به نیتروژن C/N	اسیدیته pH(1:10)	قابلیت هدایت الکتریکی EC(1:10) (dS m ⁻¹)
(g 100g ⁻¹)	(g 100g ⁻¹)	(g 100g ⁻¹)	(g 100g ⁻¹)	(g 100g ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(dS m ⁻¹)
16.65	39.70	6.26	0.6	0.79	2.66	66.16	7.56	0.681

کوره تزریق شد و شرایط برای انجام فرایند پیرولیز فراهم شد. سپس مواد اولیه بعد از حصول دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (با سرعت انتقال گرمای ۱۰ درجه سلسیوس در هر دقیقه) به مدت یک ساعت نگهداری شد. پس از رساندن دمای کوره حاوی بیوچار به طور تدریجی به دمای اتاق، بیوچار تولیدی از کوره خارج و از الک یک میلی متری عبور داده شد. برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی کاه گندم و بیوچار حاصل از آن از جمله مقدار کل عناصر کربن، هیدروژن و نیتروژن با استفاده از دستگاه CHN Elemental Analyzer (Carlo-Erba NA-1500)

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود مطابق انتظار کاه گندم مورد استفاده تقریباً ۴۰ درصد کربن داشت و نسبت کربن به نیتروژن هم ۶۶ و خیلی بالاتر از عدد ۳۰ بود که معمولاً در مطالعات غیرمتحرک شدن ازت بومی خاک حائز اهمیت است.

برای تولید بیوچار، ابتدا مواد اولیه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت آون خشک شدند (Dong et al., 2011). سپس نمونه ها در داخل کوره قرار داده شده و درب آن کاملاً بسته شد تا از ورود اکسیژن جلوگیری شود. گاز آرگون با دبی پنج لیتر بر دقیقه به داخل

کلزا بهاره رقم هایولا ۳۰۸ در هر گلدان حاوی سه کیلوگرم خاک کشت شدند. بعد از سبز شدن و اطمینان از استقرار آن‌ها، تعداد بوته‌ها در هر گلدان به سه عدد کاهش یافت. رطوبت خاک در طول این دوره در دامنه رطوبتی بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد FC به روش وزنی در دمای 25 ± 5 درجه سلسیوس نگه‌داشته شد. در طول دوره رشد، شاخص کلروفیل برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج (Hansatech، مدل CL-01) و سطح برگ با استفاده از دستگاه^۳ (LAM، مدل LI-3100C) ساخت کشور آمریکا قبل از برداشت گیاه اندازه‌گیری شدند. بعد از سه ماه، ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شدند. کارایی مصرف آب با استفاده از مقادیر آب مصرفی در طول زمان رشد گیاه و از تقسیم وزن دانه تولیدشده در گلدان بر مقدار آب مصرفی اندازه‌گیری شد. البته لازم به ذکر است که گلدان‌های مورد استفاده فاقد سوراخ زهکشی بوده و لذا تلفات خروج آب مایع از ته گلدان وجود نداشت. در هر گلدان، ارتفاع گیاه با خط کش، قطر ساقه با کونیس و حجم ریشه از طریق غوطه‌ور کردن در درون استوانه ۱۰۰۰ میلی‌لیتری که دارای حجم مشخص آب بود اندازه‌گیری شد. همچنین تعداد غلاف و وزن هزار دانه گیاهان نیز در هر گلدان اندازه‌گیری شدند. همچنین، مقدار روغن دانه به روش سوکسله^۴ و از حاصل ضرب درصد روغن در ماده خشک دانه، غلظت (درصد) پروتئین دانه از حاصل ضرب درصد نیتروژن در ۶/۲۵ (ضریب تبدیل نیتروژن به پروتئین در گیاه کلزا) و مقدار پروتئین دانه از حاصل ضرب درصد پروتئین دانه در ماده خشک دانه تعیین گردید. تجزیه واریانس با نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. ترسیم شکل‌ها با نرم‌افزار Excel انجام گردید.

ساخت کشور آلمان، قابلیت هدایت الکتریکی و pH در نسبت ۱:۱۰ کاه و بیوپچار به آب (Song & Guo., 2012) ، فسفر و پتاسیم کل به روش هضم در اسید (اسید کلریدریک و اسید نیتریک) (Jones., 2001; Olsen & Sommers., 1982) ، درصد خاکستر کاه گندم و بیوپچار و عملکرد بیوپچار بر طبق (Song & Guo., 2012) تعیین شدند (جدول ۳). این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ماده آلی از دو منبع (بیوپچار و کاه گندم) و در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ گرم بر کیلوگرم خاک) و فسفر در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل) بودند. به خاک با کلاس بافتی لوم، سطوح کاه گندم و بیوپچار به همراه ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره افزوده شد و به مدت ۳۰ روز در دامنه رطوبتی بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد FC و در دمای 25 ± 5 درجه سلسیوس در شرایط گلخانه نگهداری شد تا کاملاً مواد آلی مصرفی با خاک مخلوط شود. بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱) و توصیه‌های رایج کودی، مقدار ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین آهن (FeEDDHA)، پنج میلی‌گرم مس بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات مس ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) با در نظر گرفتن وزن خاک هر گلدان (سه کیلوگرم خاک) به صورت محلول موقع کشت مصرف شد. البته کود فسفر در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل) هم‌زمان با کاشت بذور استفاده شد. در این تحقیق کود نیتروژن در پنج نوبت و در هر نوبت ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره، به دلیل نیاز فراوان گیاه کلزا به کود نیتروژن و کمبود شدید ماده آلی و نیتروژن کل خاک (جدول ۱) در طول دوره رشد مصرف گردید. تعداد هشت بذر جوانه‌دار شده

جدول ۳- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوجار مورد استفاده در این تحقیق

Table 3- Some physical and chemical characteristics of the biochar used in this research

عملکرد	خاکستر	کربن	هیدروژن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	C/N	pH(1:10)	EC(1:10) (dS m ⁻¹)
yield	Ash	C	H	N	P	K			
		(g 100g ⁻¹)			(g kg ⁻¹)				
37.42	22.7	47.73	2.2	0.68	1.18	40.65	70.2	6.31	4.48

از نسبت مولی هیدروژن به کربن معمولاً به عنوان معیاری برای مقدار نسبی کربن آلیفاتیک و آروماتیک استفاده می‌کنند. نسبت مولی هیدروژن به کربن در کاه مورد استفاده ۱/۸۹ بود (جدول ۲)؛ اما این نسبت در بیوجار به عدد ۰/۵۵ رسید که مطابق استانداردهای جهانی از جمله انجمن جهانی بیوجار (IBI) و انجمن بیوجار اروپا باید کمتر از ۰/۷ باشد که در این مورد کمتر بود و نشان می‌دهد که ماده تولیدی در این تحقیق شامل تعریف بیوجار بود. البته افزایش این نسبت از کاه به بیوجار نشان‌دهنده افزایش ترکیبات آروماتیک است (Reyhanitabar et al., 2020).

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. همانند اکثر خاک‌های ایران کمبود ماده آلی مشهود است (Shahbazi, and Besharati, 2013). سطح بحرانی فسفر برای خاک‌های آهکی ایران حدود ۱۲ تا ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین شده است و خاک مورد استفاده دچار کمبود فسفر قابل جذب بود که برای تحقیق حاضر باید چنین خاکی انتخاب می‌شد. از نظر آهن (سطح بحرانی ۴/۵ تا ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نیز کمتر از سطح بحرانی بود ولی از نظر روی

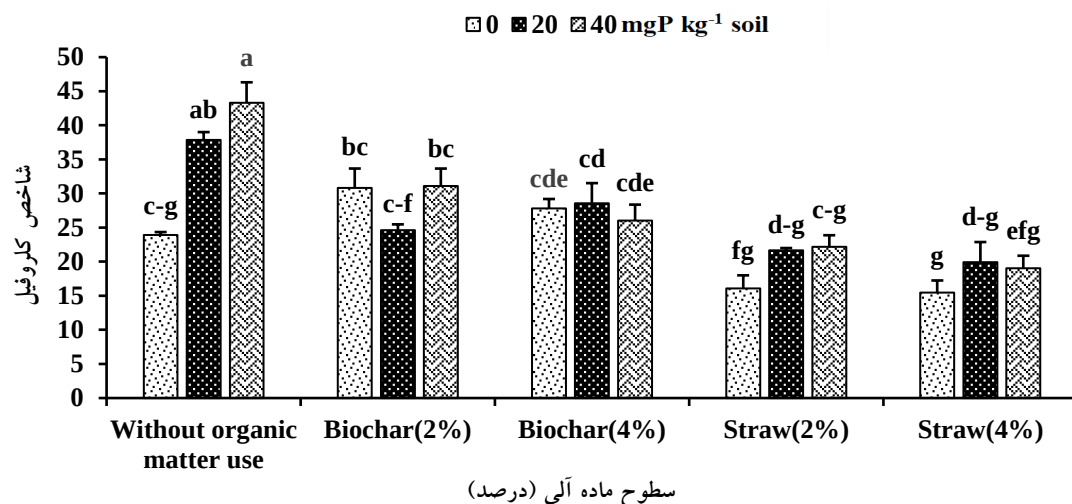
(سطح بحرانی یک میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پتاسیم قابل جذب (۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بالاتر از سطح بحرانی بود (Shahbazi, and Besharati, 2013). همچنین، مشکل شوری (قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر از چهار دسی زیمنس بر متر) در خاک مورد استفاده در این تحقیق مطرح نبود. برخی ویژگی‌های کاه و بیوجار مورد استفاده در این پژوهش در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. بیوجار سرشار از گروه‌های عاملی اسیدی همچون هیدروکسیدهای آهن و آلومینیم و عامل‌های آلی همچون اسیدهای فنولی بوده و اگر فلزات قلیایی و قلیایی خاکی در مقادیر متناهی وجود نداشته باشند انتظار بر آن است که pH آن اسیدی باشد (Singh et al., 2017). واکنش بیوجار تولید شده در این تحقیق اسیدی ضعیف بود که البته در خاک‌های آهکی امتیاز مثبتی می‌باشد (جدول ۳). به دلیل حضور فلزات قلیایی در بیوجار قابلیت هدایت الکتریکی بیوجار نسبتاً زیاد بود. از نظر شکل قابل دسترس عناصر نیز بیوجار مورد استفاده دارای مقادیر متناهی فسفر بود که می‌تواند باعث بهبود رشد گیاه شود. البته بر اثر حرارت دادن زیست‌توده اولیه مقادیری آمونیوم و نیترات هم در بیوجار تولید می‌شود که به عنوان نیتروژن قابل دسترس بیوجار شناخته می‌شود (Lehmann & Joseph., 2015).

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر سطوح ماده آلی و فسفر بر شاخص کلروفیل، ماده خشک شاخساره، ارتفاع گیاه، قطر ساقه و سطح برگ

Table 4- Analysis variance of the effect of organic matter and phosphorus levels on chlorophyll index, shoot dry matter, plant height, and stem diameter and leaf area

میانگین مربعات						
منابع تغییر	درجه آزادی	شاخص کلروفیل	ماده خشک شاخساره	ارتفاع گیاه	قطر ساقه	سطح برگ
ماده آلی	4	427.539**	718.884**	1312.049**	0.065**	1718.3**
فسفر	2	118.513**	380.785**	1543.043**	0.042**	442.8**
ماده آلی × فسفر	8	69.573**	38.379**	438.052**	0.010**	110.9**
خطا	30	22.126	2.463	116.809	0.001	23.50
ضریب تغییرات (درصد)		18.16	6.13	11.96	6.06	9.97

** منادار در سطح احتمال یک درصد



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های شاخص کلروفیل (SPAD) برگ کلزا برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر
Figure 1- Comparison of rapeseed chlorophyll index averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

شاخص کلروفیل

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر شاخص کلروفیل در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).

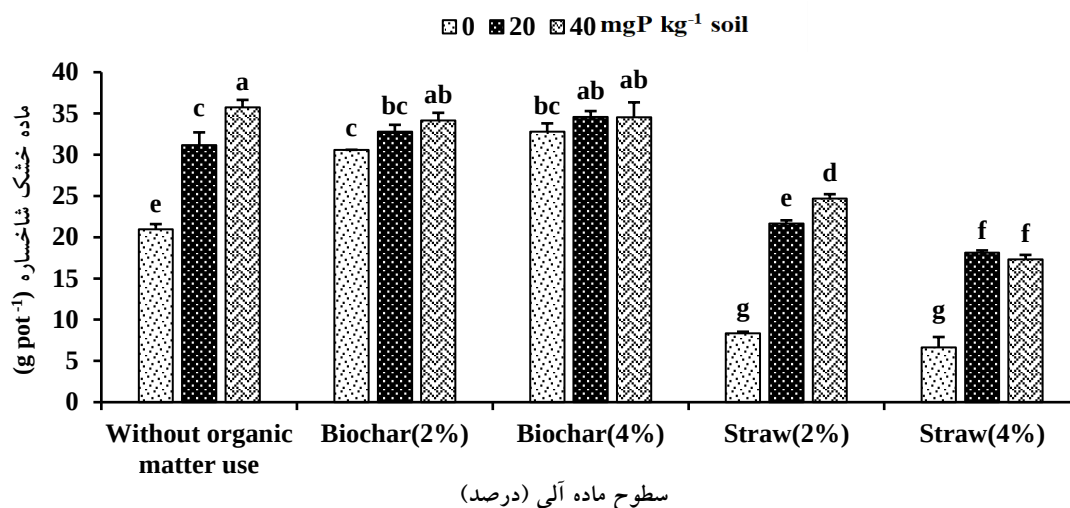
در شرایط این تحقیق گلخانه‌ای بین سطوح بیوچار مصرفی از نظر شاخص کلروفیل در سطوح متناظر فسفر کاربردی تفاوت معناداری وجود نداشت. همین نتیجه برای دو سطح کاه نیز صادق بود (شکل ۱). اگرچه ماده آلی مصرفی باعث کاهش شاخص کلروفیل شد، اما این کاهش برای زیست‌توده اولیه بیشتر از بیوچار مصرفی بود (شکل ۱). در مطالعه‌ای که سان و همکاران (Sun et al., 2017)

با مصرف بیوچار کاه ذرت در مقادیر مختلف (۰، ۱، ۳، ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد) بر روند رشد گیاه ذرت در یک خاک اسیدی انجام دادند، گزارش کردند که استفاده از بیوچار به میزان یک تا پنج درصد باعث افزایش مقدار کلروفیل و میزان فتوسنتز گیاه ذرت شد. اما در این تحقیق در یک خاک

آهکی فقیر از ماده آلی به‌رغم مصرف ۲۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک در پنج نوبت شاخص کلروفیل باز هم کاهش یافت که دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد. افزایش رشد گیاه، غیرمتحرک شدن نیتروژن معدنی و کاهش غلظت و جذب نیتروژن و برخی عناصر دیگر همگی می‌توانند از دلایل مذکور باشند. رابطه هم‌افزایی فسفر با نیتروژن و تأثیر مثبت فسفر مصرفی بر وضعیت نیتروژن گیاه و در نتیجه شاخص کلروفیل از دیرباز امر شناخته شده‌ای بوده و در این تحقیق گلدانی هم کود فسفر مصرفی به‌طور معناداری شاخص کلروفیل را بهبود بخشید (شکل ۱).

ماده خشک شاخساره

ماده خشک از مهم‌ترین صفات زراعی است و تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ماده خشک شاخساره کلزا در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های ماده خشک شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 2- Comparison of shoot dry matter averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

بدون فسفر نداشت (شکل ۲). اگرچه به دلیل نسبت بالای کربن به نیتروژن در کاه و کلش مورد استفاده، موضوع غیر متحرک شدن عناصر از جمله نیتروژن و فسفر کاملاً متفی نیست، ولی در منابع معتبر بیان شده است که محصولات حاصل از تجزیه کاه همانند اسیدهای آلی با جرم مولکولی بالا (به‌ویژه اسیدهای فولیک) باعث ایجاد شرایط کم‌هوازی یا بی‌هوازی موضعی در خاک شده و موجب تولید اسیدهای فنولیک، اسیدهای آلیفاتیک و اسیدهای چرب می‌شود که این شرایط باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (Marschner, 2011). در مطالعه‌ای که بر روی بیوجار حاصل از ساقه ذرت بر پویایی فسفر و رشد ذرت در یک خاک رسی انجام گرفت، نتایج نشان داد که بیوجار باعث افزایش ماده خشک شاخساره گیاه ذرت به میزان ۴۸/۷ درصد در مقایسه با شاهد شد (Amin, 2018). با توجه به شکل ۲ بیوجار مورد استفاده در این پژوهش در دو سطح دو و چهار درصد به ترتیب ۴۶ و ۵۶/۵ درصد باعث افزایش ماده خشک شاخساره کلزا در مقایسه با شاهد گردید. توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر مصرفی از ۲۵ تا ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ماده خشک شاخساره گیاه کلزا افزایش یافت. در مطالعه‌ای که توسط ملا و همکاران (Molla et al., 2017) بر روی بیوجار حاصل از خاک اره و تأثیر آن بر عناصر غذایی و عملکرد گیاه تاج‌خروس

مقایسه میانگین‌های ماده خشک شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ماده خشک شاخساره در سطح صفر ماده آلی ولی با مصرف ۴۰ میلی-گرم فسفر حاصل شد که با سطح دو درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و تیمار چهار درصد بیوجار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۲). این موضوع حائز اهمیت است چون در یک خاک آهکی فقیر از فسفر قابل جذب، کاربرد بیوجار به تنهایی و بدون کاربرد فسفر توانسته در سطح دو درصد معادل ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (حدود ۴۰ کیلوگرم فسفر بر هکتار) بر ماده خشک گیاه کلزا اثرگذار باشد.

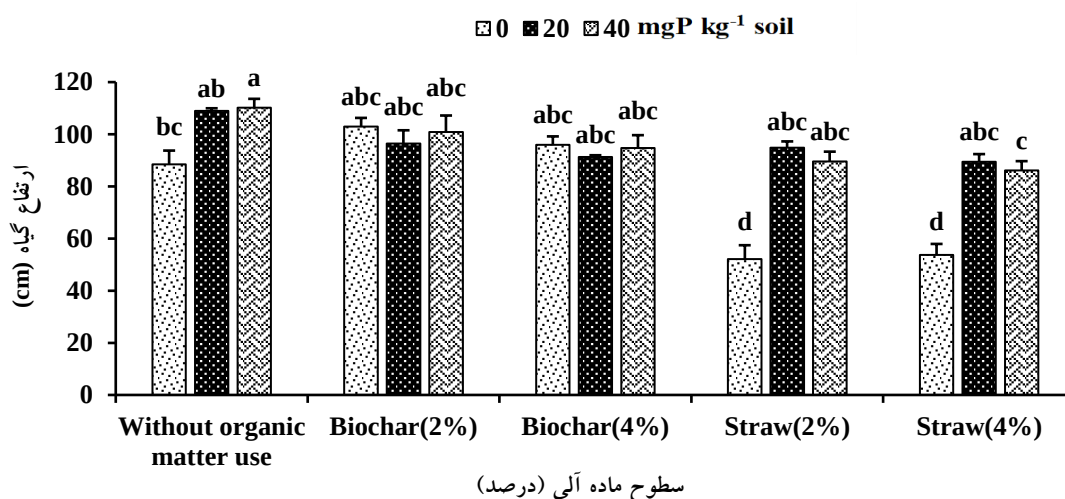
بر اساس جدول شماره ۳، بیوجار تولیدشده در این تحقیق خود دارای مقدار قابل توجهی فسفر است و احتمالاً همین فسفر باعث تأمین فسفر مورد نیاز گیاه و عدم تفاوت بین سطوح ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم شده است. بدیهی است اثر فسفر همراه بیوجار مثل همه منابع کودی دیگر دارای اثر باقیمانده بوده و اینکه این اثر باقیمانده چند سال خواهد بود نیازمند تحقیقات مستقلی است. با توجه به گرانی کودهای فسفوری و همین‌طور آلودگی آن‌ها به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیم این نتیجه حائز اهمیت است. کمترین ماده خشک نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود که البته تفاوت معناداری با سطح دو درصد کاه

بر رشد کاهو (*Lactuca sativa*) و کلم (*Brassica chinensis*) بررسی و گزارش کردند که کاربرد بیوچار حاصل از پوسته برنج سبب افزایش ماده خشک شاخساره هر دو گیاه در مقایسه با شاهد شد.

ارتفاع گیاه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ارتفاع گیاه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).

(*Amaranthus tricolor*) انجام گرفت، گزارش شد که مصرف ۱۵ تن در هکتار بیوچار باعث افزایش ماده خشک شاخساره در مقایسه با شاهد شد. پارک و همکاران (Park et al., 2011) گزارش کردند که افزودن بیوچار به خاک اسیدی باعث افزایش ماده خشک گیاه گندم به میزان ۳۵/۳ درصد نسبت به سطح شاهد شد. حسینی و همکاران (Hoseini et al., 2009) گزارش کردند که افزودن فسفر به خاک تا سطح ۴۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک باعث افزایش معنادار ماده خشک گیاه کلزا شد و افزودن بیشتر فسفر بر ماده خشک گیاه تأثیر معناداری نداشت. کارتر و همکاران (Carter et al., 2013) در گلخانه اثر بیوچار را



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های ارتفاع گیاه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

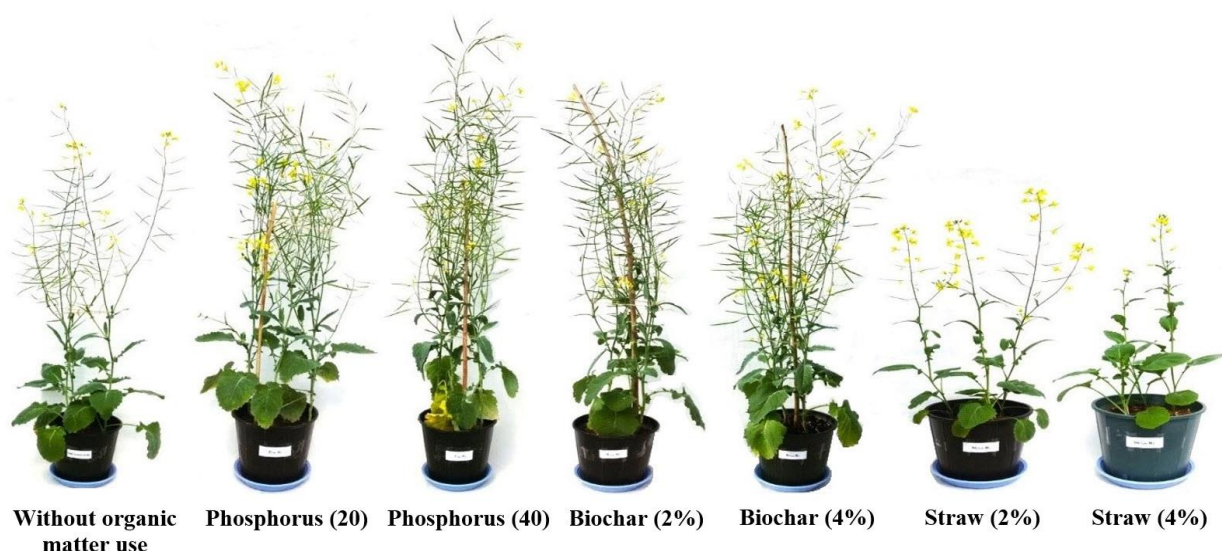
Figure 3- Comparison of plant height averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

معناداری وجود نداشت. در شرایط این تحقیق گلدانی کاربرد بیوچار تا سطح دو درصد باعث اثر مثبت بر ارتفاع گیاه و افزایش رشد بوده است و پس از آن افزایش بیوچار اثر معناداری بر ارتفاع گیاه نداشت. همان‌طور که قبلاً نیز مشاهده شد، بیوچار تولید و مورد استفاده در این تحقیق خود دارای مقدار قابل توجهی فسفر بود (جدول شماره ۳). توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ارتفاع گیاه کلزا به‌طور معناداری افزایش یافت. سان و همکاران (Sun et al., 2017) نیز گزارش

مقایسه میانگین‌های ارتفاع گیاه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه در سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر حاصل شد و با سطح شاهد ماده آلی بدون فسفر، سطح دو و چهار درصد کاه بدون فسفر و سطح چهار درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر تفاوت معناداری داشت (شکل ۳). همچنین کمترین ارتفاع گیاه نیز در سطح دو و چهار درصد کاه بدون کود فسفر مصرفی به دست آمد (شکل ۴). با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در دو سطح بیوچار مصرفی بدون توجه به سطح فسفر مصرفی، از نظر ارتفاع گیاه تفاوت

کردند که افزودن بیوچار حاصل از کاه ذرت به میزان یک تا پنج درصد در یک خاک اسیدی باعث افزایش ارتفاع گیاه ذرت شد. در مطالعه‌ای که بر روی سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار) بر کارایی مصرف آب و محصول گندم در شرایط گلخانه‌ای انجام شد؛ نتایج نشان داد که با افزایش بیوچار در خاک روند افزایشی در ارتفاع گیاه گندم مشاهده شد شبان و همکاران (۱۳۹۶). در مطالعه‌ای که بر روی تأثیر فسفر (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) و شوری بر رشد گیاه کلزا انجام

گرفت، نتایج نشان داد که افزودن فسفر در خاک فقط تا ۲۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک سبب افزایش معنادار ارتفاع گیاه گردید، لیکن مصرف بیشتر آن سبب افزایش معناداری نشد (Hoseini et al., 2009). کارتر و همکاران (Carter et al., 2013) در یک تحقیق گلخانه‌ای اثر مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ گرم در کیلوگرم بیوچار را بر رشد کاهو و کلم بررسی و گزارش کردند که کاربرد بیوچار سبب افزایش ارتفاع هر دو گیاه در مقایسه با شاهد شد.



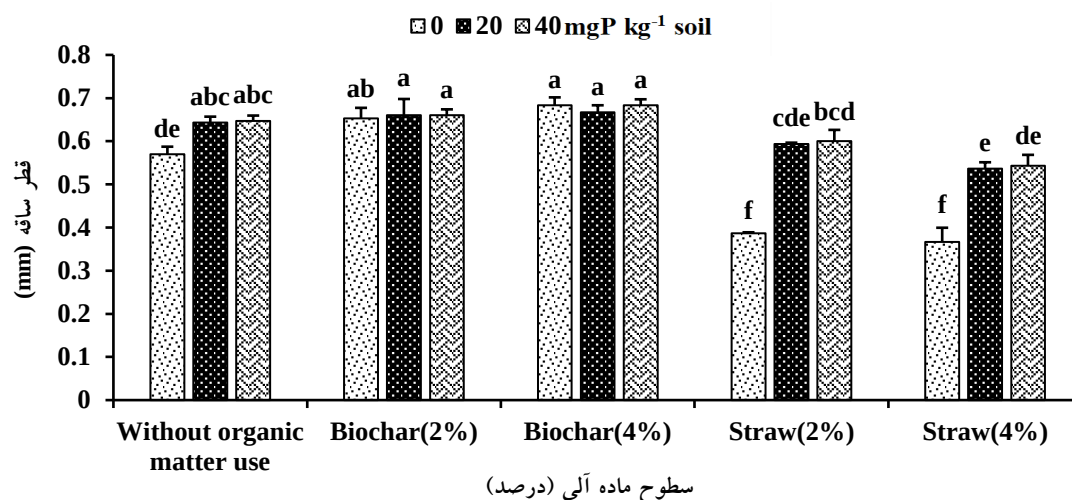
شکل ۴- نمایی از گیاهان کلزا ۷۰ روز پس از کشت در گلخانه

Figure 4- A view of different levels of rapeseed plants 70 days after cultivation in the greenhouse

قطر ساقه در محل طوقه

قطر ساقه از صفات مهم مورفولوژی گیاه کلزا است که در پایداری گیاه در مقابل ورس یا خوابیدگی بسیار

حائز اهمیت است. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).



شکل ۵- مقایسه میانگین‌های قطر ساقه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

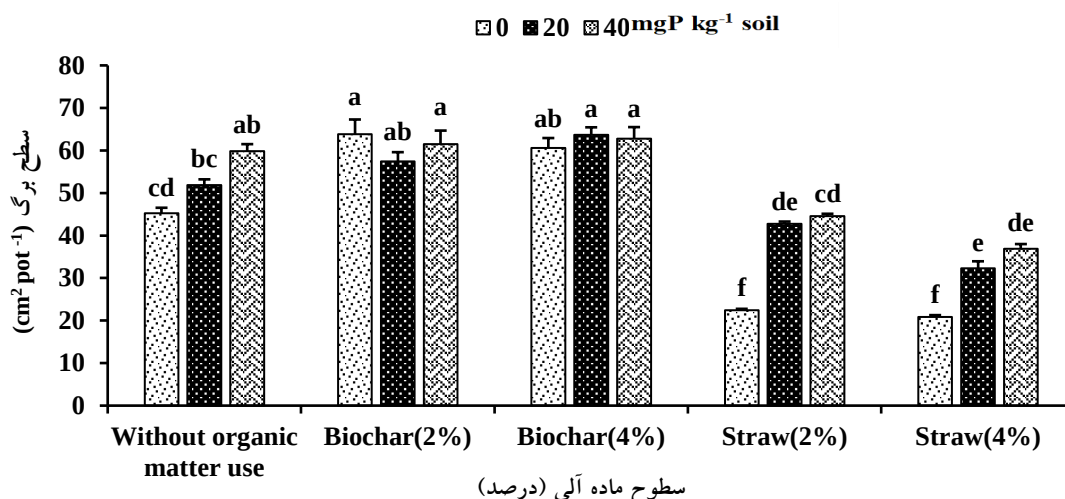
Figure 5- Comparison of stem diameter averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

گزارش کردند که استفاده از بیوجار به میزان یک تا پنج درصد در یک خاک اسیدی باعث افزایش قطر ساقه گیاه ذرت شد. غنائی (Ghanai, 2014) گزارش کرد که هیچ یک از سطوح مصرفی کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل در خاک آهکی تأثیر معناداری بر روی قطر ساقه کلزا نداشت.

سطح برگ

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر سطح برگ در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).

مقایسه میانگین‌های قطر ساقه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین قطر ساقه در تیمارهای چهار درصد بیوجار بدون فسفر و چهار درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر بود ولی با سطح شاهد با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر، سطح صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر و سطح چهار درصد بیوجار با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر بود که البته با سطح دو درصد کاه تفاوت معناداری نداشت (شکل ۵). مقایسه دو سطح بیوجار مصرفی نشان داد که در همه سطوح فسفر از نظر قطر ساقه تفاوت معناداری نداشت. در مطالعه‌ای که سان و همکاران (Sun et al., 2017) بر روی بیوجار کاه ذرت و تأثیر آن بر روند رشد گیاه ذرت انجام دادند؛



شکل ۶- مقایسه میانگین‌های سطح برگ برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 6- Comparison of leaf area averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

نیترژن و فسفر بر رشد و عملکرد دانه را بررسی و گزارش کردند که افزودن کود فسفر به خاک باعث افزایش شاخص سطح برگ کلزا نسبت به تیمار شاهد شد. تاکاراگوا و همکاران (Takaragawa et al., 2017) گزارش کردند استفاده از بیوجار تأثیر مثبت بر رشد گیاه آفتابگردان در طول مرحله رشد داشت که این امر باعث افزایش شاخص سطح برگ نسبت به شاهد گردید. بنگال و دادلی (Ben-Gal & Dudley., 2003) افزایش سطح برگ و تعداد برگ‌های ذرت را در اثر کاربرد فسفر گزارش کردند. حسینی و همکاران (Hoseini et al., 2009) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۰ تا ۸۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک شاخص سطح برگ کلزا افزایش یافت.

مقایسه میانگین‌های سطح برگ برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین سطح برگ در سطح دو درصد بیوجار بدون مصرف فسفر به دست آمد که البته با سطح دو درصد بیوجار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر و سطح چهار درصد بیوجار در همه سطوح فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت. کمترین سطح برگ نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود که البته با سطح دو درصد کاه بدون فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۶). مقایسه دو سطح بیوجار مصرفی نشان داد که در سطوح متناظر فسفر مصرفی از نظر سطح برگ تفاوت معناداری وجود نداشت. چیمبا و همکاران (Cheema et al., 2001) تأثیر زمان و میزان مصرف

جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر سطوح ماده آلی و فسفر بر کارایی مصرف آب، ماده خشک ریشه، حجم ریشه، ماده خشک دانه و تعداد غلاف

Table 5- Analysis variance of the effect of organic matter and phosphorus levels on water use efficiency, root dry matter, root volume, seed dry matter and number of pods

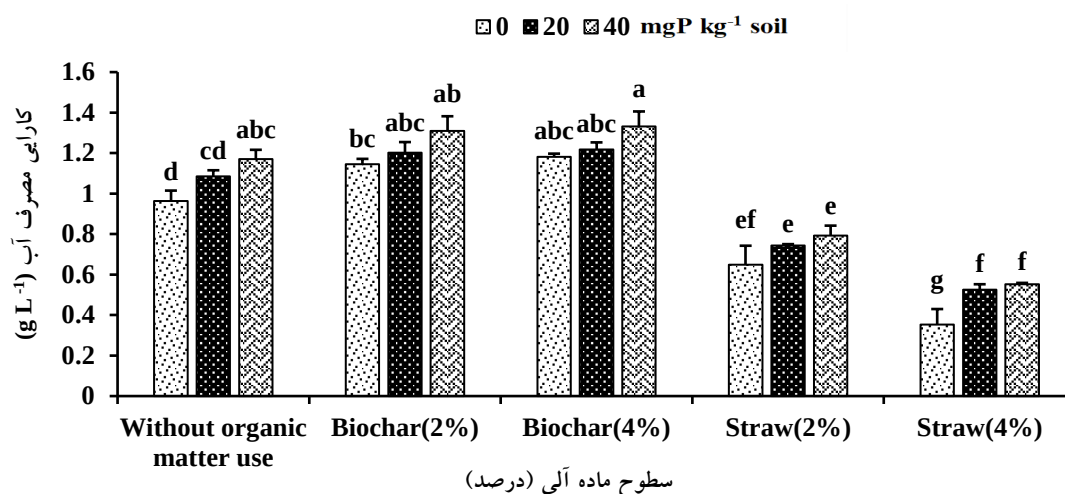
میانگین مربعات						
منابع تغییر	درجه آزادی	کارایی مصرف آب	ماده خشک ریشه	حجم ریشه	ماده خشک دانه	تعداد غلاف
ماده آلی	4	1.005**	70.826**	182.700**	297.786**	7219.852**
فسفر	2	0.113**	43.702**	420.289**	48.550**	1716.750**
ماده آلی × فسفر	8	0.003 ^{ns}	3.353**	82.900**	3.764**	460.517**
خطا	30	0.008	0.227	4.311	0.864	39.713
ضریب تغییرات (درصد)		9.33	5.60	7.73	9.04	4

^{ns} و ^{**} به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال یک درصد

کارایی مصرف آب

سطح احتمال یک درصد معنادار بود، اما اثر متقابل آن‌ها غیرمعنادار شد (جدول ۵).

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر بر کارایی مصرف آب در



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های کارایی مصرف آب برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 7- Comparison of water use efficiency averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

مصرف آب را به میزان ۶، ۱۳۹ و ۹۱ درصد افزایش داد. کاهش مقدار آب مصرفی احتمالاً به دلیل اثرات مثبت بیوچار است. بیوچار به دلیل سطح ویژه زیاد و تخلخل بالایی که دارد مقدار آب بیشتری در خود نگه می‌دارد و مانع تبخیر و از دست رفتن آب موجود در خاک می‌شود. اختر و همکاران (Akhtar et al., 2014) در آزمایشی بیوچار حاصل از پوسته برنج و دانه کتان را بر عملکرد گوجه‌فرنگی بررسی و گزارش کردند که با افزودن پنج درصد وزنی بیوچار، به‌رغم اعمال کم آبیاری، کارایی مصرف آب به میزان ۳۵ درصد افزایش یافت. در مطالعه‌ای که بر روی سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار) بر کارایی مصرف آب و محصول گندم در شرایط گلخانه‌ای انجام شد؛ نتایج نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب در سطح ۸۰ تن در هکتار بیوچار حاصل شد (Steiner et al., 2010). استینر و همکاران (Shaban et al., 2017) گزارش کردند که با کاربرد بیوچار به‌عنوان اصلاح کننده خاک، راندمان مصرف آب در کشت ذرت به دلیل افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک توسط بیوچار

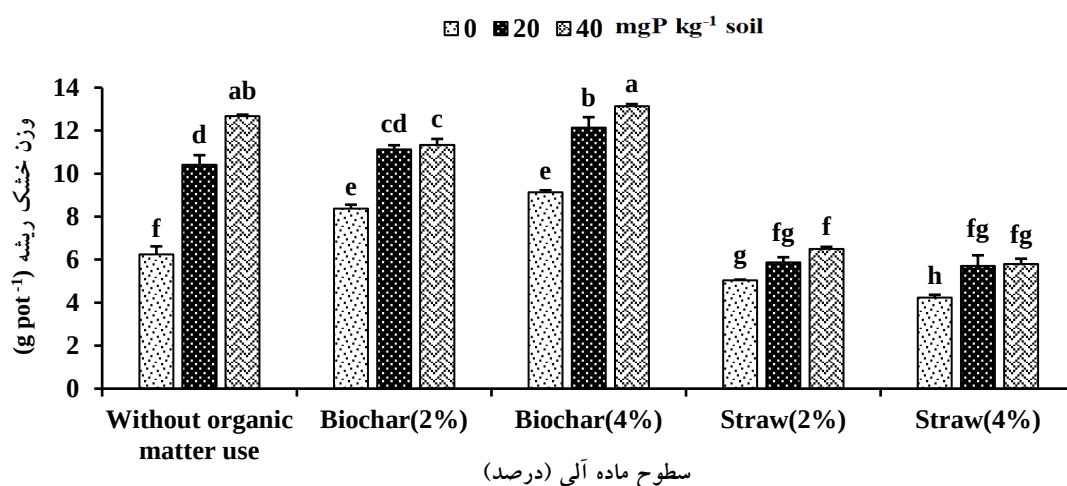
مقایسه میانگین‌های کارایی مصرف آب برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب در سطح چهار درصد بیوچار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر بدست آمد که البته تفاوت معناداری با سطح چهار درصد بیوچار با مصرف صفر و ۴۰ میلی‌گرم فسفر، سطح دو درصد بیوچار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر و سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر تفاوت معناداری نداشت. کمترین کارایی مصرف آب نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۷). آگبنا و همکاران (Agbna et al., 2017) تأثیر بیوچار (۰، ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار) را بر عملکرد گوجه‌فرنگی و کارایی مصرف آب آبیاری بررسی و گزارش کردند بیوچار باعث افزایش کارایی مصرف آب آبیاری و عملکرد گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد شد. در تحقیقی وزما و همکاران (Uzoma et al., 2011) تأثیر افزودن بیوچار حاصل از کود گاوی در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سلسیوس به خاک شنی زیر کشت ذرت را بررسی و گزارش کردند که کاربرد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با شاهد کارایی

این امر را افزایش شوری محلول خاک توسط بیوپچار در سطح ۱۰۰ تن در هکتار اعلام کردند.

ماده خشک ریشه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ماده خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).

افزایش یافت. پورمنصور و رزاقی (Pourmansour and Razaghi, 2016). تأثیر سطوح مختلف بیوپچار (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار) و کم آبیاری بر راندمان مصرف آب در باقلا را بررسی و گزارش کردند که کاربرد سطوح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوپچار حاصل از کاه گندم باعث افزایش راندمان مصرف آب در مقایسه با شاهد شد، که به دلیل توانایی بالای بیوپچار در نگه‌داشت آب در خاک نسبت داده شد، درحالی که سطح ۱۰۰ تن در هکتار بیوپچار باعث کاهش راندمان مصرف آب گردید که دلیل



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های ماده خشک ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 8- Comparison of root dry matter averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

حتی برخی از آن‌ها به داخل منافذ بیوپچار نفوذ می‌کنند. بیوپچار به دلیل بهبود حاصلخیزی فیزیکی و شیمیایی خاک می‌تواند نقش قابل توجهی در افزایش رشد و توسعه ریشه داشته باشد. توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ماده خشک ریشه گیاه کلزا به طور معناداری افزایش یافت. کارتر و همکاران (Carter et al., 2013) در آزمایشی گلخانه‌ای اثر مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ گرم در کیلوگرم بیوپچار را بر رشد کاهو و کلم بررسی و گزارش کردند که کاربرد بیوپچار سبب افزایش ماده خشک ریشه هر دو گیاه در مقایسه با شاهد شد. چان و همکاران (Chan et al., 2007) گزارش کردند در خاک‌هایی که به علت تراکم و خشکی محدودیت رشد ریشه در آن‌ها وجود

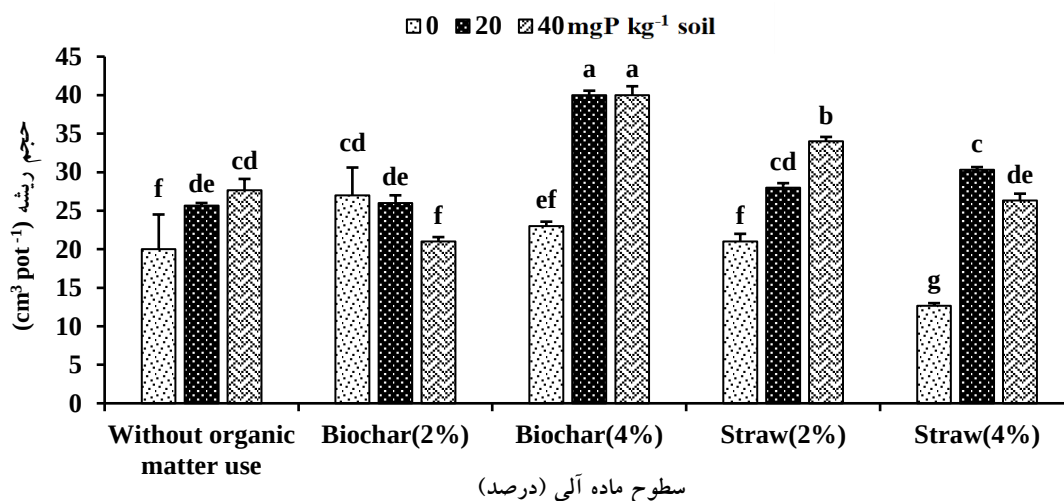
مقایسه میانگین‌های ماده خشک ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ماده خشک ریشه در سطح چهار درصد بیوپچار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد که البته تفاوت معناداری با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی نداشت. همچنین، کمترین ماده خشک ریشه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی مشاهده شد (شکل ۸). سطوح تبدیلی بیوپچار حاوی عناصر غذایی مختلف می‌تواند ریشه گیاه را به سمت خود جذب کند. حتی این احتمال وجود دارد که ریشه‌های موئین گیاه به داخل ذرات بیوپچار نفوذ کنند. جوزف و همکاران (Joseph et al., 2010) بیان کردند که وقتی ریشه گیاه در مجاورت ذرات بیوپچار قرار می‌گیرد ریشه‌های موئین به سطوح بیوپچار متصل و

دارد، کاربرد بیوچار می‌تواند سبب افزایش توسعه ریشه در خاک شود. پرندرگاست-میلر و همکاران (Prendergast-Miller et al., 2011) گزارش کردند که افزودن بیوچار (۰، ۲۰ و ۶۰ تن در هکتار) باعث افزایش طول ریشه گندم شد. در مطالعه بعدی، (Prendergast-Miller et al., 2014) اشاره کردند که ریشه‌ها به سمت بیوچار جذب می‌شوند. برنان و همکاران (Brennan et al., 2014) به این نتیجه رسیدند که استقرار ریشه در خاک را می‌توان با افزودن بیوچار افزایش داد، اما انتخاب نوع بیوچار مهم است. در این تحقیق گلدانی و گلخانه‌ای مشخص گردید که کاه گندم در هر دو سطح دو و چهار درصد باعث کاهش اکثر صفات زراعی کلزا از جمله ماده خشک ریشه، شاخساره و دانه شد. به‌رغم مصرف ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن قبل از شروع آزمایش و مصرف ۲۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در پنج قسط، باز کاه گندم احتمالاً به دلیل غیرمتحرک کردن نیتروژن خاک به دلیل نسبت بالای کربن به نیتروژن در کاه باعث کاهش صفات زراعی کلزا شد. البته بحث غیرمتحرک شدن محدود به عنصر نیتروژن نبوده و در مورد بقیه عناصر هم کم‌وبیش اتفاق افتاده و تأثیر منفی بر رشد گیاه می‌گذارد (Havlin et al., 2019). تامسن و کریستنسن (Thomsen & Christensen., 1998) در آزمایشی، آبشویی نیتروژن کل در شرایط لایسیمتر اندازه‌گیری و گزارش کردند که مخلوط نمودن کاه با خاک، عملکرد و جذب نیتروژن را در جو کاهش داد و دلیل آن را طولانی نمودن دوره غیرمتحرک شدن نیتروژن ذکر کردند. همچنین ممکن است نسبت C/N بالا در کاه گندم و اثرات منفی آن بر عملکرد اثرات مثبت این ماده آلی را خنثی سازد، لذا

استفاده از بقایای غلات بدون توجه به بحث غیرمتحرک شدن عناصر به‌ویژه نیتروژن می‌تواند عملکرد محصول را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد (Bahrani et al., 2007). کاه گندم از جمله مواد آلی هستند که لیگنین زیاد داشته و به هنگام تجزیه تولید مواد سمی گیاهی همانند اسیدهای فنولیک مانند اسید پارا-کوماریک (P-Coumaric) و اسید پارا-هیدروکسی بنزوئیک (P-hydroxy benzoic) می‌کنند که به‌شدت رشد ریشه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این مواد به‌دلیل اثرات خود بر سوخت‌وساز اکسین معروف هستند و فعالیت آنزیم اکسین اکسیداز را افزایش یا کاهش می‌دهند. در نتیجه تشکیل ریشه‌های فرعی و رشد طولی ریشه را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند (Marschner., 2011). البته اثر منفی این مواد علاوه بر غلظت اسیدهای فنولی و چرب فرار، به خصوصیات خاک به‌ویژه pH توده خاک و ریزوسفر نیز بستگی دارد. همچنین، با افزودن دو درصد به‌ویژه چهار درصد کاه گندم به خاک ممکن است در ریزمکان‌هایی که تهویه خاک ضعیف می‌شود، اتیلن انباشته شود. در غلظت کم ممکن است اتیلن رشد ریشه را تسریع کند اما در غلظت‌های بالا از رشد ریشه جلوگیری می‌کند (Marschner., 2011).

حجم ریشه

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر حجم ریشه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).



شکل ۹- مقایسه میانگین‌های حجم ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

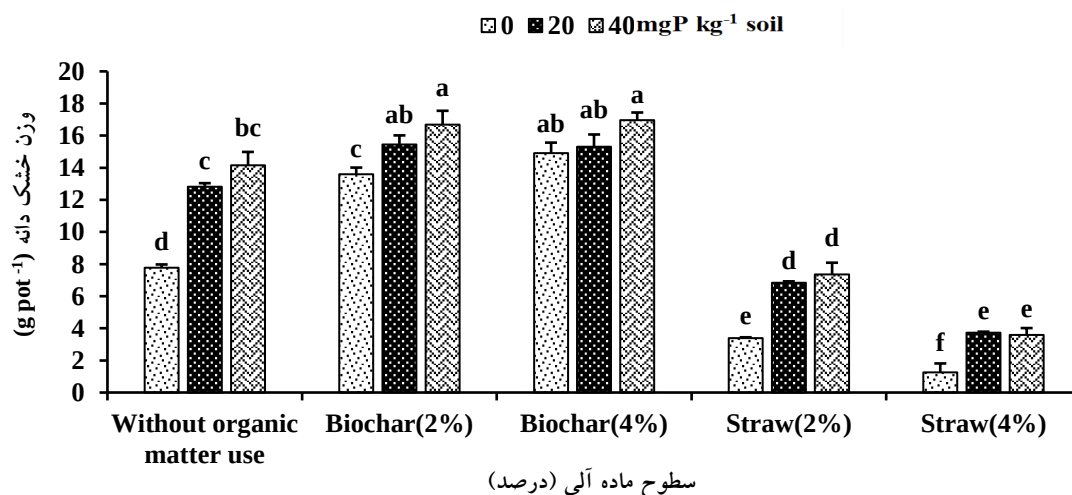
Figure 9- Comparison of root volume averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

نسبت کربن به نیتروژن، فعالیت میکروبی و غیرمتحرک شدن عناصر و تولید ترکیبات آلی مضر در اثر تجزیه کاه می‌توان اشاره کرد (Marschner., 2011).

ماده خشک دانه

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ماده خشک دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).

مقایسه میانگین‌های حجم ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین حجم ریشه در سطح چهار درصد بیوجار با مصرف کود فسفر به‌دست آمد و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی اندازه‌گیری شد که البته با سطح دو درصد کاه بدون مصرف فسفر تفاوت معنادار آماری نداشت (شکل ۹). تأثیر مثبت کود فسفر مصرفی بر حجم ریشه با نقش مثبت فسفر بر توسعه ریشه گیاه و کمبود فسفر قابل‌جذب در خاک مورد آزمایش قابل توجیه است اما اثر منفی کاه بر حجم ریشه پیچیده بوده و به عوامل متعددی مثل بر هم خوردن



شکل ۱۰- مقایسه میانگین‌های ماده خشک دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

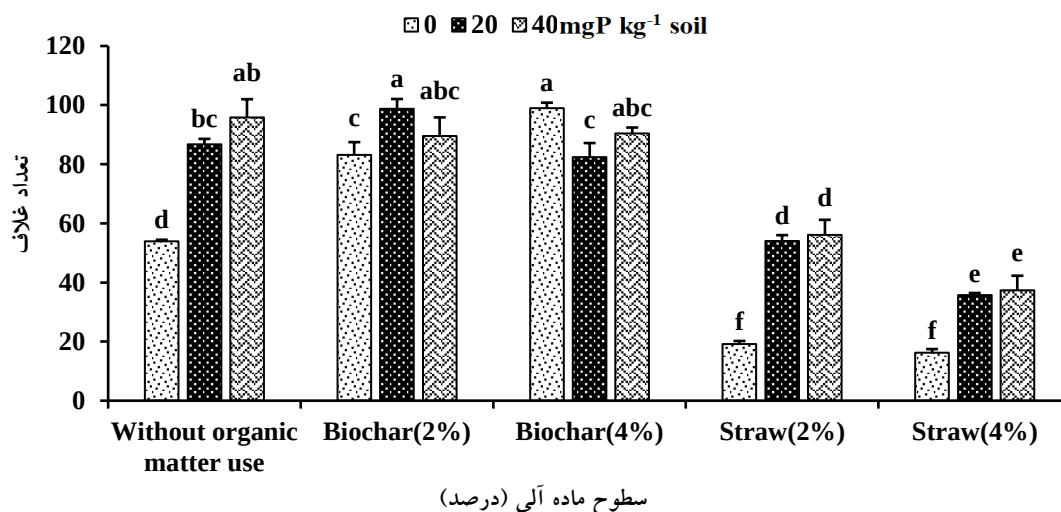
Figure 10- Comparison of seed dry matter average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

در هکتار ماده خشک دانه باقلا نسبت به شاهد افزایش یافت؛ به طوری که بیشترین ماده خشک دانه باقلا در سطح ۲۵ تن در هکتار بیوچار به دست آمد. این در حالی است که با افزودن مقادیر بالای بیوچار ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار ماده خشک دانه نسبت به شاهد کاهش یافت که دلیل این کاهش وزن به دلیل افزایش شوری خاک حاصل از کاربرد بیوچار ذکر شد (Hoseini et al., 2009).

تعداد غلاف

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر تعداد غلاف در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).

مقایسه میانگین‌های ماده خشک دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ماده خشک دانه در سطوح دو و چهار درصد بیوچار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد که البته با سطح چهار درصد بیوچار بدون مصرف کود فسفر و سطح دو درصد بیوچار با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت. همچنین کمترین ماده خشک دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون مصرف فسفر به دست آمد (شکل ۱۰). شبان و همکاران (Shaban et al., 2017) گزارش کردند که با افزودن ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار بیوچار ماده خشک دانه گندم در مقایسه با شاهد افزایش یافت. در مطالعه‌ای دیگر که بر روی تأثیر سطوح مختلف بیوچار و کم آبیاری بر راندمان مصرف آب در باقلا انجام گرفت، نتایج نشان داد که با افزایش بیوچار تا سطح ۲۵ و ۵۰ تن



شکل ۱۱- مقایسه میانگین‌های تعداد غلاف برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 11- Comparison of number of pods average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی به دست آمد ولی تفاوت معناداری با سطح دو درصد کاه نداشت (شکل ۱۱). تعداد غلاف در گیاه یکی از مهم‌ترین اجزای عملکرد است که تابعی از طول دوره گلدهی، تعداد شاخه‌های فرعی در گیاه و شرایط اقلیمی هنگام گلدهی است. هر گونه تنش در این دوره سبب اختلال در گرده‌افشانی، کاهش تعداد گل، غلاف و دانه در گیاه می‌گردد. در مطالعه‌ای چیمبا و

مقایسه میانگین‌های تعداد غلاف برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین تعداد غلاف در سطح چهار درصد بیوچار بدون فسفر به دست آمد که البته با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر، سطح دو درصد بیوچار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر و چهار درصد بیوچار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت. بر طبق انتظار کمترین تعداد غلاف نیز

همکاران (Cheema et al., 2001) تأثیر زمان و میزان مصرف نیتروژن و فسفر بر رشد، عملکرد دانه و روغن کلزا را بررسی و گزارش کردند که افزودن کود فسفر به خاک باعث افزایش تعداد غلاف کلزا نسبت به تیمار شاهد شد. با افزایش سطوح فسفر مصرفی از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم بر کیلو گرم خاک تعداد غلاف گیاه کلزا به طور معناداری افزایش یافت (Tavajjoh et al., 2016).

جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر سطوح ماده آلی و فسفر بر وزن هزار دانه، درصد پروتئین دانه، مقدار پروتئین دانه، درصد روغن دانه و مقدار روغن دانه

Table 6- Analysis variance of the effect of organic matter and phosphorus levels on thousand seed weight, seed protein percentage, seed protein content, seed oil percentage and seed oil content

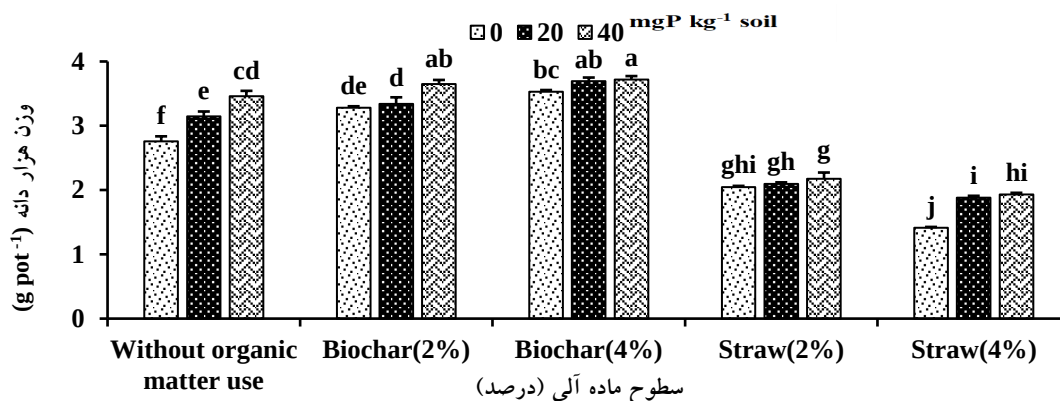
میانگین مربعات						
منابع تغییر	درجه آزادی	وزن هزار دانه	درصد پروتئین دانه	مقدار پروتئین دانه	درصد روغن دانه	مقدار روغن دانه
ماده آلی	4	6.323**	4.303 ^{ns}	88638.233**	71.950**	349826.898**
فسفر	2	0.551**	5.186 ^{ns}	21347.594**	38.214**	44696.504**
ماده آلی × فسفر	8	0.056**	12.343**	2531.546**	19.386**	8448.869**
خطا	30	0.011	2.710	548.447	4.427	1723.750
ضریب تغییرات (درصد)		3.66	8.55	12.20	6.66	12.29

^{ns} و ^{**} به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال یک درصد

وزن هزار دانه

وزن دانه بیان کننده اهمیت نمو دانه است و نقش مهمی را در میان اجرای عملکرد برای نشان دادن توان عملکرد یک رقم ایفا می کند (Olama et al., 2014). نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن ها بر وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین های وزن هزار دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه در سطح چهار درصد

بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی به دست آمد که البته تفاوت معناداری با سطح چهار درصد بیوجار با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر و دو درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی نداشت و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی مشاهده شد (شکل ۱۲). توجه و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلو گرم خاک وزن هزار دانه گیاه کلزا به طور معناداری افزایش یافت.



شکل ۱۲- مقایسه میانگین های وزن هزار دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

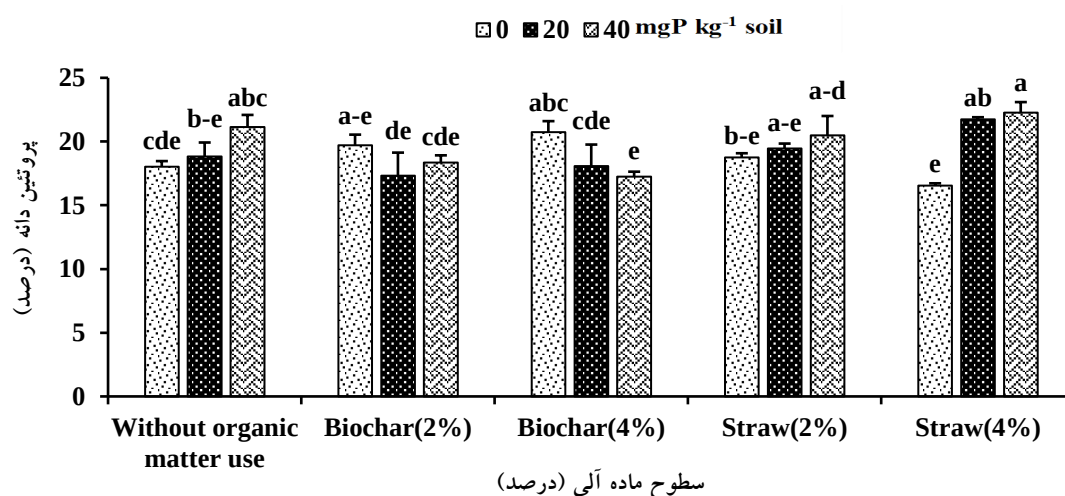
Figure 12- Comparison of weight of one thousand seeds averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

دانه گیاه شد. حسینی و همکاران (۱۳۸۷) نیز گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۰ تا ۸۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک وزن هزار دانه کلزا افزایش یافت. از دیرباز نقش مثبت فسفر در دوره زایشی گیاهان و تولید دانه در تغذیه گیاه امر شناخته شده‌ای است (Havlin et al., 2019).

درصد پروتئین دانه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر غیرمعدن دار اما اثر متقابل ماده آلی و فسفر بر غلظت پروتئین دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶).

در مطالعه‌ای که بر روی سطوح مختلف بیوپچار (صفر، ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار) بر برخی صفات کمی و کیفی گیاه گندم انجام شد، نتایج نشان داد که سطح ۴۰ تن در هکتار بیوپچار باعث افزایش ۲۰ درصدی وزن هزار دانه در مقایسه با شاهد شد. این در حالی است که سطح ۸۰ تن در هکتار بیوپچار فقط ۵/۱ درصد باعث افزایش وزن هزار دانه نسبت به شاهد گردید (شبان و همکاران، ۱۳۹۶). آلبوکرک و همکاران (Albuquerque et al., 2013) تأثیر بیوپچار و سطوح مختلف کود معدنی را بر عملکرد گیاه گندم بررسی و گزارش کردند که کاربرد سطوح ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد وزنی دو نوع بیوپچار (کاه گندم و درخت زیتون) در ترکیب با کود معدنی باعث افزایش معنادار وزن هزار



شکل ۱۳- مقایسه میانگین‌های درصد پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 13- Comparison of seed protein percentages average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

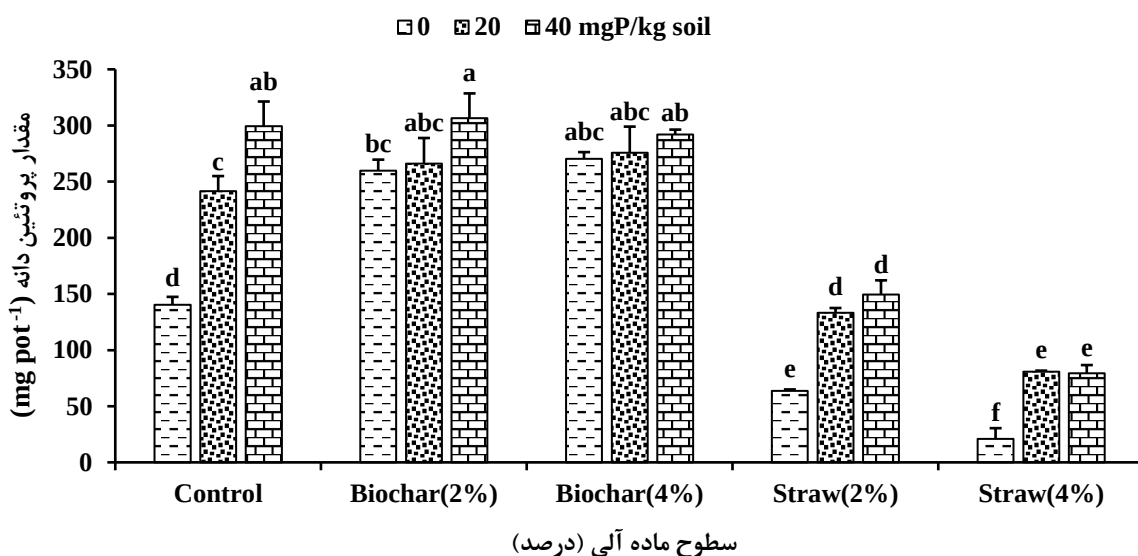
همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک درصد پروتئین دانه گیاه کلزا به ترتیب ۱۱/۶۳ و ۱۱/۸۲ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. در مطالعه‌ای که فتاحی‌نژاد و همکاران (Fatahinejad et al., 2013) بر روی تأثیر کود فسفر بر عملکرد، درصد روغن و پروتئین کلزا در زراعت دیم در شهرستان بهبهان به مدت دو سال زراعی (۱۳۸۷-۱۳۸۹) در خاک‌های مختلف انجام دادند، گزارش کردند که کود فسفر تأثیر معناداری بر درصد

مقایسه میانگین‌های درصد پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین درصد پروتئین دانه در سطح چهار درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد که البته با سطوح چهار درصد کاه با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر، دو درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر، چهار و دو درصد بیوپچار بدون مصرف فسفر و شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر تفاوت معناداری نداشت. همچنین کمترین پروتئین دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۱۳). توجه و

مقدار پروتئین دانه

مقدار پروتئین دانه از حاصل ضرب درصد پروتئین دانه در ماده خشک دانه حاصل شد. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار پروتئین دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶).

پروتئین دانه نداشت. در برخی شرایط کود فسفوری بر ترکیبات نیتروژن دار دانه کلزا اثر می‌گذارد و میزان اسیدهای آمینه آزاد (آرژنین و پرولین) را افزایش می‌دهد. البته این اثر اندک بوده و به طور کلی میزان پروتئین دانه کمتر تحت تأثیر فسفر قرار می‌گیرد.



شکل ۱۴- مقایسه میانگین‌های مقدار پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 14- Comparison of seed protein content average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

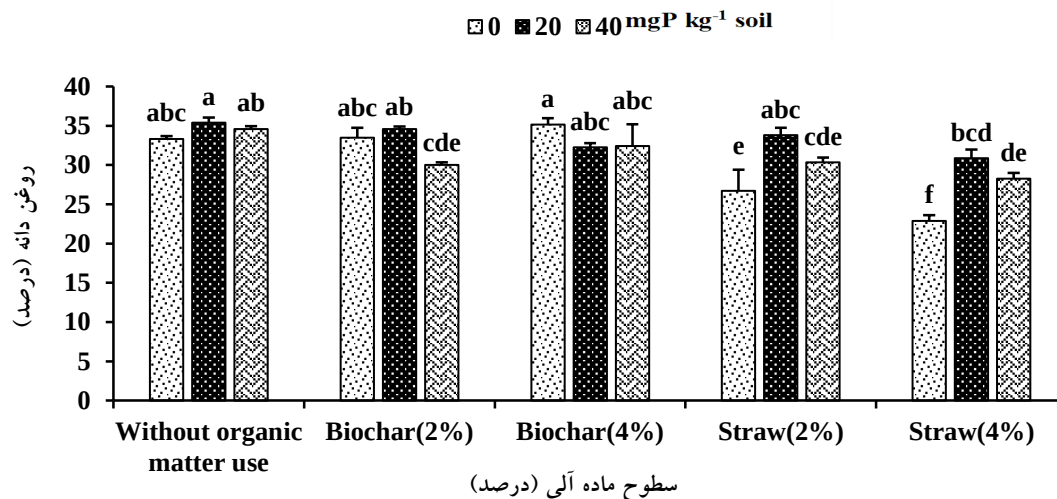
غلظت روغن دانه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر درصد روغن دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین‌های درصد روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین درصد روغن دانه در سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر و چهار درصد بیوجار بدون مصرف فسفر مشاهده شد. این نتیجه حائز اهمیت است که بیوجار چهار درصد در یک خاک فقیر از فسفر قابل جذب توانسته معادل فسفر در سطح ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک که تقریباً معادل ۴۰ کیلوگرم فسفر بر هکتار (با فرض دو میلیون کیلوگرم وزن خاک یک هکتار) که آن هم معادل ۴۰۰ کیلوگرم بر هکتار سوپر فسفات منفرد و یا ۲۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل است

مقایسه میانگین‌های مقدار پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که در شرایط این تحقیق بیشترین مقدار پروتئین دانه در سطح دو درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد و کمترین پروتئین دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۱۴). با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با مصرف بیوجار در هر دو سطح دو و چهار درصد بدون مصرف فسفر مقدار پروتئین دانه تفاوت معناداری با تیمار بدون بیوجار ولی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ندارد. توجه و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک عملکرد پروتئین دانه گیاه کلزا به ترتیب ۶/۱۲ و ۶/۶۸ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت.

مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر، دو درصد کاه با مصرف صفر و ۴۰ میلی گرم فسفر و چهار درصد کاه با مصرف صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری داشت. همچنین کمترین درصد روغن دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۱۵).

عمل کند. با توجه به قیمت سوپرفسفات، واکنش‌های تثبیت فسفر در خاک و عواقب برهم خوردن نسبت عناصر در اثر مصرف بی‌رویه کودهای فسفوری حضور کادمیم و سایر آلاینده‌ها در کودهای فسفوری به نظر می‌رسد این یک نتیجه قابل توجهی است که البته با سطح دو درصد بیوجار با



شکل ۱۵- مقایسه میانگین‌های درصد روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

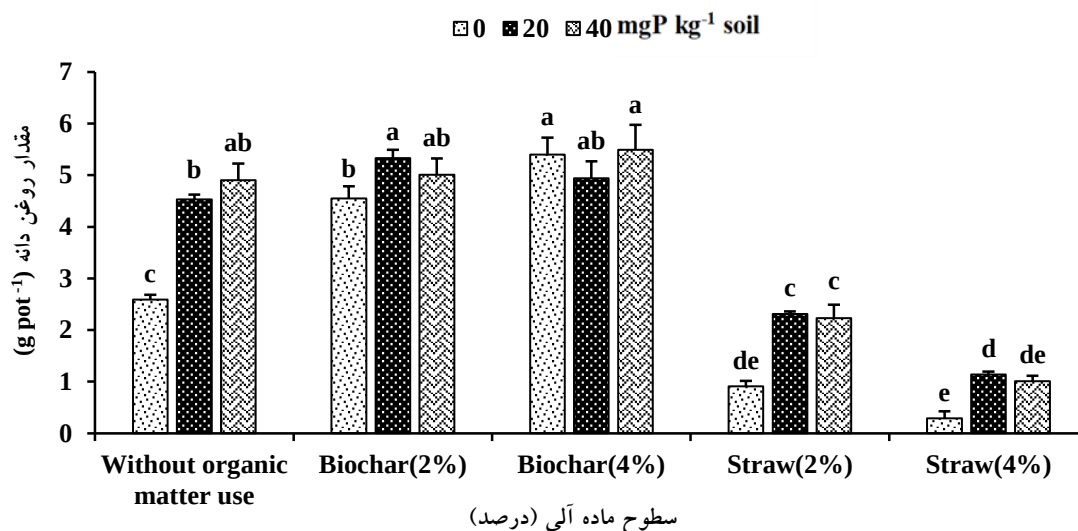
Figure 15- Comparison of seed oil percentage average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

کمبود شدید فسفر مقدار روغن از ۳۳ درصد به ۲۳ درصد کاهش می‌یابد.

مقدار روغن دانه

مقدار روغن دانه از حاصل ضرب درصد روغن دانه در ماده خشک دانه به دست آمد و نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار روغن دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶).

غنایی (Ghanai, S. 2014) اثر متقابل خشکی و فسفر بر کلزا را بررسی و گزارش کرد که با افزایش سطوح مصرفی فسفر درصد روغن دانه روند افزایشی نشان داد؛ به طوری که با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم فسفر بیشترین درصد روغن به دست آمد. توجه و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک درصد روغن دانه گیاه کلزا به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۶۹ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. بوز (Bose., 1957) گزارش داد تغذیه فسفر در کشت کلزا تأثیر مهمی بر درصد روغن دانه دارد، به طوری که در شرایط



شکل ۱۶- مقایسه میانگین‌های مقدار روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 16- Comparison of seed oil content averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

پروتئین دانه و مقدار روغن دانه را در یک خاک متوسط بافت و قلیایی نسبت به شاهد به‌طور معناداری افزایش دادند، اما برخلاف بیوجار، مصرف کاه گندم سبب کاهش برخی خصوصیات مورفولوژیکی گیاه کلزا شد. البته اثر بیوجار بر ماده خشک گیاه در شرایط کمبود فسفر بیشتر از شرایط فسفر کافی بود. بیوجار مورد استفاده در این تحقیق سرشار از فسفر بود و حداقل در سال اول توانست همانند کود فسفره، نیاز گیاه را به فسفر برطرف کند. البته بدیهی است که جهت دانستن اثر باقیمانده فسفر بیوجار نیازمند تحقیقات آتی هستیم؛ بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق تبدیل کاه گندم به بیوجار و استفاده از بیوجار در خاک‌های آهکی را می‌توان امر مثبتی در رشد گیاه کلزا تلقی کرد و تحقیقات بیشتر با کاه غلات دیگر در مزرعه قابل توصیه است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

مقایسه میانگین‌های مقدار روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین مقدار روغن دانه در سطح چهار درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون مصرف فسفر حاصل شد (شکل ۱۶). توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک عملکرد روغن دانه گیاه کلزا به ترتیب ۹/۵۶ و ۱۵/۲۲ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. آنان دلیل این امر را این‌گونه بیان کردند که افزایش فراهمی فسفر در خاک سبب افزایش معنادار عملکرد روغن، دانه و انتقال فسفر به دانه‌ها می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق گلخانه‌ای نشان داد که مصرف بیوجار حاصل از کاه گندم تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل شاخص کلروفیل برگ، ارتفاع گیاه، ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه، تعداد غلاف، وزن هزار دانه، کارایی مصرف آب، مقدار

References

1. Agbna, G. H., Dongli, S., Zhipeng, L., Elshaikh, N. A., Guangcheng, S., and Timm, L. C., 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*, 222, pp. 90-101
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.004>
2. Akhtar, S. S., Li, G., Andersen, M. N., and Liu, F., 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 138, pp. 37-44 . <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.016>
3. Alburquerque, J. A., Calero, J. M., Barrón, V., Torrent, J., Del Campillo, M. C., Gallardo, A., and Villar, R., 2014. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177, pp. 16-25 .<https://doi.org/10.1002/jpln.201200652>
4. Alburquerque, J. A., Salazar, P., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M. d. C., Gallardo, A., and Villar, R., 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, pp. 475-484 .
<https://doi.org/10.1007/s13593-012-0128-3>
5. Amin, A. E.-E. A. Z., 2018. Phosphorus dynamics and corn growth under applications of corn stalks biochar in a clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, pp. 379 .
<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3719-8>
6. Anderson, C. R., Condon, L. M., Clough, T. J., Fiers, M., Stewart, A., Hill, R. A., and Sherlock, R. R., 2011. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia*, 54, pp. 309-320 .<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.07.005>
7. Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., and Hipps, N. A., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils :a review. *Plant and Soil*, 337, pp. 1-18 . <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
8. Bahrani, M., Raufat, M., and Ghadiri, H., 2007. Influence of wheat residue management on irrigated corn grain production in a reduced tillage system. *Soil and Tillage Research*, 94, pp. 305-309 . <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.08.004>
9. Ben-Gal, A., and Dudley, L. M., 2003. Phosphorus availability under continuous point source irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 67, pp. 1449-1456
<https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1449>
10. Bhattarai, B., Neupane, J., and Dhakal, S. P., 2015. Effect of biochar from different origin on physio-chemical properties of soil and yield of garden pea (*Pisum sativum* L.) at Paklihawa, Rupandehi, Nepal. *World Journal of Agricultural Research*, 3, pp. 129-138 .
<https://doi.org/10.12691/wjar-3-4-3>
11. Bose, T., 1957. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on growth, yield and oil content of mustard (*Brassicajuncea*). *Indian Agriculturist*, 1, pp. 29-38 .
12. Brennan, A., Jiménez, E. M., Puschenreiter, M., Alburquerque, J. A., and Switzer, C., 2014. Effects of biochar amendment on root traits and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. *Plant and Soil*, 379, pp. 351-360 .
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2074-0>
13. Carter, S., Shackley, S., Sohi, S., Suy, T. B., & Haefele, S., 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy*, 3, pp. 404-418 .
<https://doi.org/10.3390/agronomy3020404>
14. Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., and Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45, pp. 629-634 .
<https://doi.org/10.1071/SR07109>
15. Cheema, M., Malik, M., Hussain, A., Shah, S., and Basra, S., 2001. Effects of time and rate of nitrogen and phosphorus application on the growth and the seed and oil yields of canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186, pp. 103-110 .
<https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2001.00463.x>

16. Dong, X., Ma, L. Q., & Li, Y., 2011. Characteristics and mechanisms of hexavalent chromium removal by biochar from sugar beet tailing. *Journal of Hazardous Materials*, 190, pp. 909-915 . <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.008>
17. Egle, L., Zoboli, O., Thaler, S., Rechberger, H., and Zessner, M., 2014. The Austrian P budget as a basis for resource optimization. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, pp. 152-162 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.009>
18. Fatahinejad, E., Siadat, A., Esfandiyari, M., Moghadasi, R., and Moezi, A., 2013. Effect of phosphorus fertilizer on yield, oil and canola protein in dry farming in different groups of soil phosphorus fertility. *Crop physiology*, 5, pp. 83-100. <https://sid.ir/paper/174476/en>
19. Frišták, V., and Soja, G., 2015. Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova biotechnologica et chimica*, 14, pp. 104-115 .<https://doi.org/10.1515/nbec-2015-0020>
20. Ghanai, S. 2014. The interaction effect of drought and phosphorus on rapeseed in Gonbad region. *National Conference on Climate Change and Sustainable Agriculture, Tehran, Tolo Farzin Science and Industry Company*. (In Persian). <https://civilica.com/doc/282354>
21. Gee, G. W., and Bauder, J. W., 1986. Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, pp. 383-411 .<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
22. Guo, Y., Tang, H., Li, G., and Xie, D., 2014. Effects of cow dung biochar amendment on adsorption and leaching of nutrient from an acid yellow soil irrigated with biogas slurry . *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, pp. 1-13 . <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1820-x>
23. Havlin J. L., Beaton J. D., Tisdale S. L., and Nelson W. L., 1999. Soil Fertility and Fertilizers, 6 Ed. Soil Science Society of America. Madison, Wisc.
24. Hoseini, Y., Homaei, M., Karimian, N.A., and Saadat, S., 2009. The effects of phosphorus and salinity on growth, nutrient concentrations, and water use efficiency in canola (*Brassica napus* L.). *Agricultural Research*, 8, pp. 1-18. (In Persian). <https://sid.ir/paper/84857/en>
25. Jones, J. B., 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis: CRC press, Boca Raton, FL.
26. Joseph, S. D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C., Hook, J., and Singh, B. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Soil Research*, 48, pp. 501-515 . <https://doi.org/10.1071/SR10009>
27. Lehmann, J., Gaunt, J., and Rondon, M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, pp. 403-427 .<https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
28. Lehmann, J., and Joseph, S., 2015. *Biochar for Environmental Management :science, technology and implementation*: Routledge.
29. Lindsay, W. L., and Norvell, W., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, pp. 421-428 . <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
30. Lindsay, W. L., Vlek, P. L., and Chien, S. H., 1989. Phosphate minerals. *Minerals in Soil Environments*, 1, pp. 1089-1130 . <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c22>
31. Marschner, H., 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants: Academic press. London.
32. Mbah, C., Njoku, C., Okolo, C., Attoe, E., and Osakwe, U., 2017. Amelioration of a degraded Ultisol with hardwood biochar: Effects on soil physico-chemical properties and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L). *African Journal of Agricultural Research*, 12, pp. 1781-1792 .<https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11654>
33. Molla, M. S., Akhter, M., Maniruzzaman, M., Lipi, N. J., Rabiul, A., and Tisam, A., 2017. Response of biochar to plant nutrients and yield of *Amaranthus tricolor*. *International Journal of Innovative Research*, 2, pp.13-17.
34. Nelson, D. W., and Sommers, L. E., 1983. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, pp. 539-579 .<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>

35. Olama, V., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J., Hamidi, R., and Tavajjoh, M., 2014. Comparison of yield, yield components and seed quality (oil and protein content) of two rapeseed cultivars as affected by different levels of soil-applied nitrogen and zinc. *Isfahan University of Technology*, 4, pp. 83-98. (in Persian).
36. Olsen, SR., and Sommer, LE., 1982. Phosphorus. pp. 403-430. In: A.L. Page R.H. Miller and D.R. Keeney eds. *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. SSSA, Madison, WI.
37. Pourmansour, S., and Razaghi, F., 2016. The effect of different levels of biochar and low irrigation on the efficiency of water use in beans. *2nd Iranian National Congress of Irrigation and Drainage*. Isfahan, Iran. (in Persian). <https://sid.ir/paper/874046/fa>
38. Park, J. H., Choppala, G. K., Bolan, N. S., Chung, J. W., and Chuasavathi, T., 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348, pp. 439-451. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0948-y>
39. Prendergast-Miller, M. T., Duvall, M., and Sohi, S. P., 2011. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, pp. 2243-2246. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.07.019>
40. Prendergast-Miller, M., Duvall, M., and Sohi, S., 2014. Biochar–root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *European Journal of Soil Science*, 65, pp. 173-185. <https://doi.org/10.1111/ejss.12079>
41. Price, G. 2006. *Australian Soil Fertility Manual*: CSIRO publishing.
42. Reyhanitabar, A., Frahadi, E., Ramezanzadeh, H., Oustan, S., 2020. Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 22:547–561
43. Rhoades, J. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, pp. 417-435. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
44. Shaban, M. R., and Razzaghi F., 2017. The effect of different levels of biochar, low irrigation and salinity on water use efficiency and wheat yield in greenhouse conditions. *14th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction*, Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian). <https://civilica.com/doc/693417>
45. Shahbazi, K., and Besharati, H., 2013. Overview of Agricultural Soil Fertility Status of Iran. *Land Management Journal*, 1, pp. 1-15. (in Persian).
46. Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., and Johnson, J., 2006. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresource Technology*, 97, pp. 2211-2216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.005>
47. Siavash, B., Carapetian, Z., and Zare, S., 2005. Studying on lipid content and fatty acids in some varieties of colza (*Brassica napus* L.). *Pajouhesh-va-sazandegi, in agronomy and horticulture*, 18, pp. 95-101. (In Persian). <https://sid.ir/paper/19601/en>
48. Singh, B., Camps-Arbestain, M., and Lehmann, J., 2017. *Biochar: a guide to analytical methods*: Csiro Publishing.
49. Singh, D. K., and Sale, P. W., 2000. Growth and potential conductivity of white clover roots in dry soil with increasing phosphorus supply and defoliation frequency. *Agronomy Journal*, 92, pp. 868-874. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.925868x>
50. Song, W., and Guo, M., 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, pp. 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018>
51. Steiner, C., Das, K., Melear, N., and Lakly, D., 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *Journal of Environmental Quality*, 39, pp. 1236-1242. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0337>
52. Sun, C., Chen, X., Cao, M., Li, M., and Zhang, Y., 2017. Growth and metabolic responses of maize roots to straw biochar application at different rates. *Plant and Soil*, 416, pp. 487-502. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3229-6>
53. Takaragawa, H., Yabuta, S., Watanabe, K., and Kawamitsu, Y., 2017. Effects of application of bagasse-and sunflower residue-derived biochar to soil on growth and yield of oilseed sunflower. *Tropical Agriculture and Development*, 61, pp. 32-39

- . <https://doi.org/10.11248/jsta.61.32>
54. Tavajjoh, M., Karimian, N., Ronaghi, A., Yasrebi, J., Hamidi, R., and Olama, V., 2016. Yield, yield components and seed quality of two rapeseed cultivars as affected by different levels of phosphorus and boron under greenhouse conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology*, 6, pp. 99-113. (In Persian). <https://doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.6.4.99>
55. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis: part 3 Chemical Methods*, 5, pp. 475-490 . [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00134-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00134-5)
56. Thomsen, I. K., and Christensen, B. T., 1998. Cropping system and residue management effects on nitrate leaching and crop yields. *Agriculture ,Ecosystems and Environment*, 68, pp. 73-84 . <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
57. Uzoma, K., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., and Nishihara, E., 2011. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention . *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 9(3): 1137-1143.
58. Wang, T., Camps-Arbestain, M., and Hedley, M., 2014. The fate of phosphorus of ash-rich biochars in a soil-plant system. *Plant and Soil*, 375, pp. 61-74 . <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1938-z>
59. Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., and Bishop, P., 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil*, 357, pp. 173-187 . <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1131-9>