

Effects of Biochar and Phosphorus on Dry Matter and Uptake of Calcium, Magnesium, Iron, Zinc, Copper, and Manganese by Rapeseed in a Calcareous Soil

Soheil Salimi Trazoj¹, Adel Reyhanitabar^{2*}, Nosratollah Najafi³

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: soheilsalimi70@yahoo.com

2-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: areyhani@tabrizu.ac.ir

3-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: n-najafi@tabrizu.ac.ir

Received: August 5, 2024

Revised: October 29, 2024

Accepted: November 10, 2024

Published: December 21, 2024

Extended Abstract

Background and Objectives

Phosphorus (P) is a macronutrient that its deficiency severely limits plant growth and production. Because of the complexity of P chemistry in soil, less than 30% of applied P fertilizer is absorbed by plants and the rest in the soil converts to unavailable forms. Organic matter can be applied to the soil to reduce soil P fixation and increase soil P bioavailability because organic matter and its decomposition products (e.g., organic acids) occupy the surfaces of phosphate adsorbents in soils and prevent the precipitation of phosphate compounds. During pyrolysis of organic material a complex mixture of P species is formed, which may include amorphous, semi-crystalline, and crystalline constituents, along with organic constituents. However, organic P forms will tend to disappear while inorganic P forms will subsequently be formed and crystallinity will increase with increasing pyrolysis temperature. The crystalline P minerals that have been identified in biochars include whitlockite $[(Ca, Mg)_3(PO_4)_2]$ pyrolysed from manure at 500 °C, dehydrated struvite (NH_4MgPO_4) produced from cattle manure and sewage sludge, and hydroxyapatite $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ made from slaughterhouse waste and from mixtures of that waste with either corn residue or wood. The crystallinity of hydroxyapatite was lower when corn residues or wood were added to the slaughterhouse waste and as result increased the soluble P fraction. To the best of the authors' knowledge, the evidence to support the impact of biochar on P sorption and desorption in Iranian soils is scarce while taking account of the fact that P deficiency is dominant in approximately 72% of the arable soils. So, in this research, the effects of combined application of biochar pyrolysed at 300 °C and P fertilizer on dry matter and uptake of calcium (Ca), magnesium (Mg), iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu), and manganese (Mn) by rapeseed (*Brassica napus* L.), Hyola 308 cultivar, were studied in an alkaline loamy soil under greenhouse conditions.

Methodology

After being washed with deionized water, wheat straw samples were milled, sieved < 1 mm, and then were oven-dried at 60 °C for 24 h. The biochars were produced by slow pyrolysis of wheat straw at 300 °C for 1 h under argon (Ar) gas flow at the heating rate of 10 °C per minute. The produced biochars were transported in plastic containers for later analysis. Afterward, a factorial experiment was done on the basis of a completely randomized design with three replications. The factors were organic matter at 5 levels (no organic matter application, wheat straw 2%, wheat straw 4%, biochar 2%, and biochar 4%) and phosphorous (P) fertilizer at 3 levels (0, 20, and 40 mg/kg) as triple superphosphate. After the plant harvesting, shoot dry matter and the

concentration and content of Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, and Mn in plant shoot were determined by Atomic Absorption Spectrophotometer.

Results

Wheat straw application significantly reduced rapeseed shoot dry matter compared to the control. At each level of wheat straw (2 and 4%), P application significantly increased shoot dry matter as compared to the control treatment. Under wheat straw application conditions, the using both levels of P (20 and 40 mg/kg) significantly increased shoot dry matter. This finding indicates the possible immobilization of P due to wheat straw application and the positive effect of P fertilizer under these conditions. Using biochar at both levels of 2 and 4 percent increased the rapeseed shoot dry matter by 46 and 56.5 percent, respectively, compared to the control. The combined application of straw and P reduced the Ca, Mg, Fe, and Cu uptake at both levels of biochar (2 and 4 %) compared to the control. However, the content of Zn and Mn increased at the biochar level of 2% compared to the control, but significantly decreased at the biochar level of 4% compared to the control.

Conclusion

According to the results obtained from this research, the use of biochar produced from wheat straw at the temperature of 300°C increased the uptake of Fe, Zn, and Mn, which led to the improvement of the growth characteristics of rapeseed. In this research, the effect of biochar on the Cu concentration and content in shoot unlike other nutrients was negative. According to the results, the wheat straw driven biochar at 300 °C improved rapeseed plant growth characteristics and nutrients uptake except Cu. Also, application of biochar and P at 2% and 20 mg/kg levels, respectively, is recommended to reduce the consumptions of P fertilizer without yield reduction of rapeseed in under similar conditions. In addition, application of wheat straw at 2 and 4 % levels is not recommended and future research should be done at its lower levels. Finally, it was concluded that biochar may play an important role in soil fertility and plant production, so further research should continue.

Key words: Biochar, Fertilizer, Phosphorus, Rapeseed, Wheat straw.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors .

Acknowledgements

This paper is published as a part of a Master's thesis supported by the Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Tabriz, Tabriz, Iran. The authors are thankful to the University of Tabriz for financial supports.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Salimi Trazoj, S., Reyhanitabar, A. & Najafi, N. (2024). Effects of biochar and phosphorus on dry matter and uptake of calcium, magnesium, iron, zinc, copper, and manganese by rapeseed in a calcareous soil. *Journal of Soil and Plant Science*, 34(4), 91–113.

<https://doi.org/10.22034/sps.2024.19185>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2024 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS
JOURNALS



مقاله پژوهشی

اثر بیوچار و کود فسفر بر ماده خشک و جذب کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز به وسیله گیاه کلزا در یک خاک آهکی

سهیل سلیمی ترازوج^۱، عادل ریحانی تبار^۲، نصرت اله نجفی^۳

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

رایانامه: soheilsalimi70@yahoo.com

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه: areyhani@tabrizu.ac.ir

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه: n-najafi@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰	تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر برهمکنش فسفر و بیوچار حاصل از کاه گندم پیرولیز شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس بر رشد و جذب کلسیم، منیزیم و برخی عناصر غذایی کم مصرف به وسیله گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) رقم هایولا ۳۰۸ در یک خاک قلیایی با بافت لوم در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ماده آلی در پنج سطح (بدون مصرف ماده آلی، 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. بعد از برداشت گیاه ماده خشک شاخساره و غلظت و مقدار کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز در شاخساره کلزا اندازه گیری شدند. نتایج نشان داد که کاربرد کاه گندم وزن خشک شاخساره کلزا را به طور معناداری نسبت به شاهد کاهش داد اما در هر دو سطح کاه گندم (۲ و ۴ درصد) مصرف کود فسفر نسبت به تیمار بدون فسفر، وزن خشک شاخساره را افزایش داد. این یافته نشان دهنده غیرمتحرک شدن احتمالی فسفر بر اثر مصرف کاه گندم و اثر مثبت کود فسفر در این شرایط بود. در شرایط این پژوهش، بیوچار مصرفی در هر دو سطح ۲ و ۴ درصد باعث افزایش ماده خشک شاخساره کلزا به ترتیب به میزان ۴۶ و ۵۷ درصد نسبت به شاهد شد. مصرف توأم کاه و فسفر مقدار جذب کلسیم، منیزیم، آهن و مس را در هر دو سطح ۲ و ۴ درصد بیوچار نسبت به شاهد کاهش داد؛ اما مقدار جذب روی و منگنز را در سطح ۲ درصد بیوچار افزایش ولی در سطح ۴ درصد آن کاهش داد. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق استفاده از بیوچار حاصل از کاه گندم تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس جذب آهن، روی و منگنز را افزایش داد که سبب بهبود خصوصیات رشد گیاه کلزا گردید.

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

استناد به این مقاله: سلیمی ترازوج، س.، ریحانی تبار، ع. و نجفی، ن. (۱۴۰۳). اثر بیوچار و کود فسفر بر ماده خشک و جذب کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز به وسیله گیاه کلزا در یک خاک آهکی. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۴(۴)، ۹۱-۱۱۳.

<https://doi.org/10.22034/sps.2024.19185>

مقدمه

فسفر یکی از عناصر ضروری پرمصرف برای گیاهان است و کمبود آن مشکل عمده حاصلخیزی خاک در سراسر دنیا و از جمله ایران است (Lindsay et al., 1989). برای مقابله با کمبود فسفر سالانه حدود ۱۵ میلیون تن کود فسفر در جهان مصرف می‌شود (Wang et al., 2012). با این حال، تنها ۵ تا ۳۰ درصد از فسفر مصرف شده به‌وسیله گیاه در سال بعد استفاده می‌شود (Price, 2006). مطالعات نشان داده‌اند که افزایش مصرف کودهای فسفوری طی این سال‌ها، نه تنها عملکرد محصولات زراعی را چندان افزایش نداده بلکه بر اثر برهم‌زدن تعادل عناصر غذایی، کاهش محصول را نیز در مواردی باعث شده است. مصرف بی‌رویه کودهای فسفاتی، علاوه بر جنبه‌های اقتصادی موضوع، اثرات زیان بار دیگری نیز دارد. از جمله این اثرات می‌توان به کاهش میکوریزایی شدن ریشه، به هم‌خوردن تعادل عناصر غذایی و کاهش جذب آهن، روی و مس اشاره کرد. استفاده از ضایعات کشاورزی غنی از فسفر همچون بیوپچار می‌تواند از بسته شدن چرخه ژئوشیمیایی فسفر و تخلیه سنگ فسفات باقیمانده جلوگیری کند (Fristak & Soja, 2015; Amin, 2018). بیوپچار منبعی مستقیم برای عناصر غذایی از جمله فسفر، کلسیم، منیزیم، روی و مس می‌باشد (Lehman et al., 2003). میزان مواد آلی خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله خاک‌های آهکی ایران کم بوده و به دلیل تجزیه سریع، اثر مواد آلی افزوده شده هم پس از گذشت مدت زمان نسبتاً کوتاهی کاهش می‌یابد (Zolfi Bavariani et al., 2017). استفاده از مواد آلی پایدار با نیمه‌عمر زیاد مانند بیوپچار شاید یک ایده مناسب برای افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود تولید محصولات کشاورزی در این مناطق باشد. به عقیده Lehman et al. (2003) بیوپچار منبع پتاسیم، کلسیم، فسفر، روی و مس می‌باشد و این ماده آلی نوظهور از طریق تأثیر بر pH خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک، تأثیر بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و بهبود فعالیت میکروبی از جمله تقویت رابطه همزیستی مایکوریزایی می‌تواند بر جذب عناصر اثرگذار باشد. Xu et al. (2013) جذب هم‌زمان مس، روی، سرب و کادمیم را از محلول‌های آبی به‌وسیله بیوپچار حاصل از پوسته گندم و کود دامی مطالعه و گزارش کردند که بیوپچار حاصل از کود دامی چون غنی از فسفات و کربنات بود، قدرت جذب بیشتری داشت. در واقع، این ترکیبات معدنی مکان‌های جذب اضافی را عرضه می‌کنند که باعث توانایی جذب بیشتر بیوپچار برای فلزات سنگین می‌شوند.

Antón-Herrero et al. (2022) تأثیر توأم بیوپچار و محرک‌های زیستی بر مقدار جذب عناصر غذایی به‌وسیله گیاه فلفل را بررسی و گزارش کردند که بیوپچار باعث کاهش جذب مس در برگ گیاه فلفل شد. تأثیر بیوپچار حاصل از کاه نیشکر را در یک خاک آلوده به فلزات سنگین بررسی و گزارش کردند که استفاده از بیوپچار باعث کاهش جذب مس، روی، سرب و کادمیم به‌وسیله گیاه باقلا شد، در حالی که غلظت عناصر غذایی مانند فسفر افزایش یافت. Beesley and Dickinson (2011) گزارش کردند که استفاده از بیوپچار چوب جنگلی (از جمله بلوط، چنار، گیلان و توس) غلظت روی و کادمیم محلول را در خاک‌های آلوده کاهش داد. آنان نشان دادند که خصوصیات جذب بیوپچار نقش مهم‌تری در نگهداری فلز دارد که این امر به دلیل افزایش pH خاک ناشی از افزودن بیوپچار است. Vahedi et al. (2022) تأثیر توأم بیوپچار و تلقیح میکروبی بر زیست‌فراهمی فسفر، آهن و روی در یک خاک آهکی را بررسی و گزارش کردند که افزودن بیوپچار و تلقیح میکروبی به‌طور قابل‌توجهی غلظت عناصر فسفر، آهن و روی را در خاک نسبت به شاهد افزایش داد. Karimi et al. (2020) جذب آهن، روی و منگنز را بر اثر مصرف توأم اسید هیومیک و بیوپچار حاصل از هرس درختان انار بر رشد گیاه گل همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) گزارش کردند.

کلزا (*Brassica napus* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی در ایران و جهان مطرح می‌باشد. در راستای کاهش مصرف کودهای شیمیایی و افزایش کارایی مصرف آن‌ها، استفاده از کودهای آلی از جمله بیوپچار به‌عنوان منبع غنی از عناصر غذایی می‌تواند به پایداری تولید کلزا منجر شود. همچنین در مورد برهمکنش فسفر و بیوپچار بر جذب عناصر غذایی کم‌مصرف کاتیونی در خاک‌های آهکی تحقیقات کمی در سطح جهانی منتشر شده است. برهمکنش بیوپچار با فسفر بر جذب

عناصر کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز به وسیله گیاه کلزا در یک خاک آهکی در ایران تا زمان انجام تحقیق گزارش نشده بود و لذا این تحقیق انجام شد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه در این تحقیق از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری یک مزرعه در ایستگاه تحقیقاتی کرکج دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به صورت مرکب تهیه شد که پس از هوا خشک کردن و کوبیدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند بافت خاک به روش هیدرومتری چهار زمانه (Gee & Or, 2002)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1982)، آهن، روی، مس و منگنز قابل‌جذب به روش DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)، نیتروژن کل به روش میکروکجدال (Jones, 2001)، فسفر قابل‌جذب به روش اولسن (Olsen and Sommer, 1982)، پتاسیم قابل‌جذب با استفاده از عصاره‌گیر استات آمونیوم (Jones, 2001)، pH در گل اشباع (Rhoades, 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (Thomas, 1996) تعیین شدند (جدول ۱).

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

بافت خاک	شن	سیلت	رس	کربن آلی (%)	CCE	FC	pH	EC (dS m ⁻¹)
لوم	۴۶/۱	۳۹/۳	۱۴/۵	۱/۱	۱۳/۳	۱۹	۷/۷	۰/۶۹

ادامه جدول ۱						
نیتروژن کل (%)	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس	منگنز
غلظت قابل جذب (mg kg ⁻¹)						
۰/۱۳	۴/۸	۲۹۱	۱/۷	۱/۵	۰/۶	۴/۵

FC: رطوبت ظرفیت مزرعه، CCE: کربنات کلسیم معادل

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، کاه گندم از ایستگاه تحقیقاتی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز تهیه و به آزمایشگاه انتقال داده شد. سپس برای حذف مواد زائد و گرد و خاک، ابتدا با آب شهری شستشو و در داخل آب مقطر قرار داده شد و به‌منظور همگن‌سازی نمونه‌ها پس از خشک شدن به وسیله آسیاب خرد و از الک یک میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های کاه گندم در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کاه گندم مورد استفاده در این تحقیق.

خاکستر	کربن	هیدروژن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	C/N	pH (۱:۱۰)	EC (۱:۱۰) (dS m ⁻¹)
۱۶/۶۵	۳۹/۷۰	۶/۲۶	۰/۶	۰/۷۹	۲/۶۶	۶۶/۱۶	۷/۵۶	۰/۶۸۱

ادامه جدول ۲					
Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
غلظت کل (g kg ⁻¹)					
۳/۲۷	۱/۹۲	۴۲۰	۱۶/۵۹	۷/۶۲	۳۰/۰۵

برای تولید بیوپچار، ابتدا مواد اولیه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت آون خشک شدند (Dong et al., 2011). سپس نمونه‌ها 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 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 بیوپچار به‌طور تدریجی به دمای اتاق، بیوپچار تولیدی از کوره خارج و از الک یک میلی‌متری عبور داده شد (Reyhanitabar et al., 2020). برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچار از جمله غلظت کل عناصر کربن، هیدروژن و نیتروژن با استفاده از دستگاه CHN Elemental Analyzer (Carlo-Erba NA-1500) کشور آلمان، قابلیت هدایت الکتریکی و pH در نسبت ۱:۱۰ بیوپچار به آب مقطر (Song and Guo., 2012)، غلظت فسفر و پتاسیم کل به روش هضم در اسید (اسید کلریدریک و اسید نیتریک) (Jones, 2001)، درصد خاکستر و عملکرد بیوپچار بر طبق (Song and Guo, 2012) تعیین شدند (جدول ۳). این آزمایش به‌صورت 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 میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره افزوده 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 و توصیه‌های رایج کودی مقدار ۱۰ میلی گرم آهن بر کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین آهن (Fe-EDDHA)، ۵ میلی گرم مس بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات مس با در نظر گرفتن وزن خاک هر گلدان به صورت محلول موقع کشت مصرف شدند. در این تحقیق به دلیل نیاز بالای کلزا به نیتروژن نیتروژن در ۵ نوبت و در هر نوبت ۵۰ میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره در طول دوره رشد مصرف شد. تعداد هشت بذر جوانه‌دار شده کلزا (*Brassica napus* L.) 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. بعد از اتمام دوره رشد (سه ماه)، ماده خشک شاخساره اندازه‌گیری شد. همچنین بعد از هضم نمونه‌های گیاهی به روش خشک سوزانی غلظت عناصر کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Shimadzu, AA – 6300) ساخت کشور ژاپن اندازه‌گیری شد. تجزیه واریانس با نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. ترسیم شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام گردید.

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

عملکرد	خاکستر	کربن	هیدروژن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	C/N	pH	EC(۱:۱۰)
		(%)			(g kg ⁻¹)			(۱:۱۰)	(dS m ⁻¹)
۳۷/۴	۲۲/۷	۴۷/۷	۲/۲	۰/۶۸	۱/۱۸	۴۰/۷	۷۰/۲	۶/۳	۴/۵
ادامه جدول ۳									
	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	غلظت کل (g kg ⁻¹)		
							(mg kg ⁻¹)		
۲۶/۷	۵/۸۴	۴۵۰	۱۸/۱	۸/۷۱	۳۰/۴				

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. از نظر آهن و مس نیز کمتر از سطح بحرانی بوده ولی از نظر روی و پتاسیم قابل جذب بالاتر از سطح بحرانی بود (Shahbazi and Besharati, 2013). همچنین، مشکل شوری در خاک مورد استفاده در این تحقیق مطرح نبود.

برخی ویژگی‌های کاه و بیوپار مورد استفاده در این پژوهش در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. بیوپار 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 بیوپار تولید شده در این تحقیق اسیدی ضعیف بود که البته در خاک‌های آهکی امتیاز مثبتی می‌باشد (جدول ۳). به دلیل حضور فلزات قلیایی از جمله کلسیم و منیزیم در بیوپار هدایت الکتریکی بیوپار بالا می‌باشد. از نظر شکل قابل دسترس عناصر نیز بیوپار مورد استفاده دارای مقادیر متناهی آهن، روی، مس و منگنز بود که می‌تواند باعث بهبود رشد گیاه شوند. البته بر اثر حرارت دادن زیست‌توده اولیه مقادیری آمونیوم و نترات هم در بیوپار تولید می‌شود که به عنوان نیتروژن قابل دسترس بیوپار شناخته می‌شود (Lehmann and Joseph, 2015).

ماده خشک شاخساره

وزن خشک یکی 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).

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر ماده آلی و فسفر بر ماده خشک شاخساره، غلظت و مقدار جذب کلسیم شاخساره.

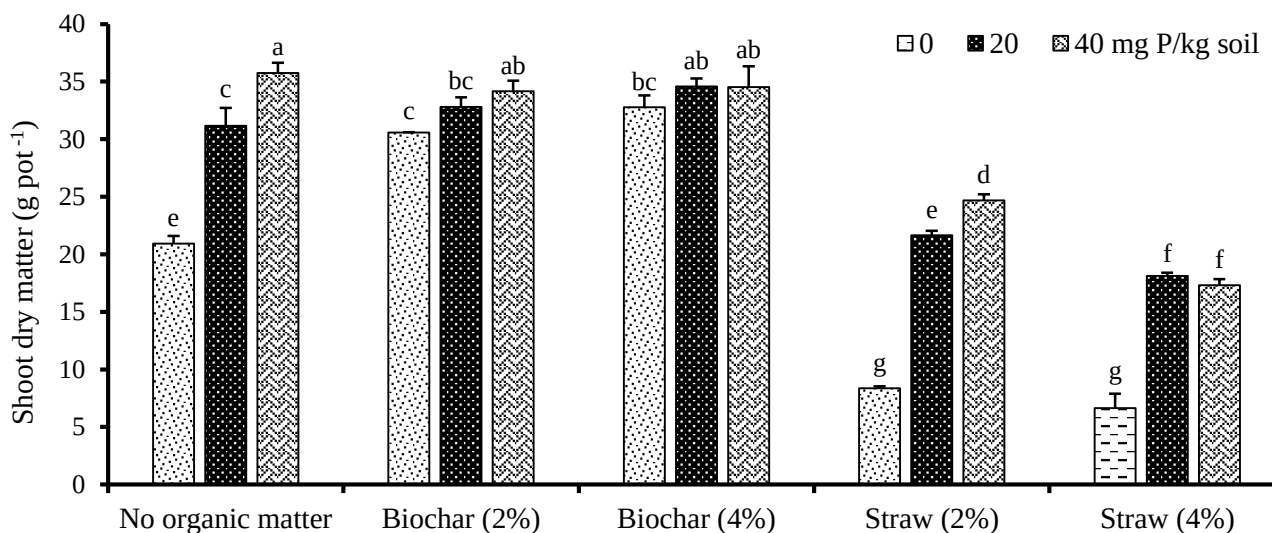
میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
مقدار جذب کلسیم شاخساره	غلظت کلسیم شاخساره	ماده خشک شاخساره		
۲۵۵۸۴۳/۲۴۶**	۰/۳۶۲**	۷۱۸/۸۸۴**	۴	ماده آلی
۱۰۵۱۵۲/۹۹۳**	۰/۶۱۷**	۳۸۰/۷۸۵**	۲	فسفر
۱۳۴۰۲/۵۵۸**	۰/۲۷۲**	۳۸/۳۷۹**	۸	ماده آلی × فسفر
۴۲۳۱/۷۹۸	۰/۰۵۴	۲/۴۶۳	۳۰	خطا
۱۳/۳۰	۱۱/۶۵	۶/۱۳		ضریب تغییرات (%)

** معنادار در سطح احتمال یک درصد

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 میلی‌گرم فسفر حاصل شد ولی با سطح دو درصد بیوپار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و چهار درصد بیوپار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۱). این موضوع دارای اهمیت است چون در یک خاک آهکی فقیر از فسفر قابل جذب، بیوپار توانسته در سطح دو درصد معادل ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (حدود ۴۰ کیلوگرم فسفر بر هکتار) بر وزن خشک گیاه کلزا اثرگذار باشد. با توجه به گرانی کودهای فسفوری و همین‌طور آلودگی آن‌ها به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیم این نتیجه دارای اهمیت است. کمترین وزن خشک نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود که البته تفاوت معناداری با سطح دو درصد کاه بدون فسفر نداشت (شکل ۱). محصولات حاصل از تجزیه کاه همانند اسیدهای آلی با جرم مولکولی بالا (به‌ویژه اسیدهای فولیک) باعث ایجاد شرایط کم‌هوایی یا بی‌هوایی موضعی در خاک شده و موجب تولید اسیدهای فنولیک، اسیدهای آلیفاتیک و

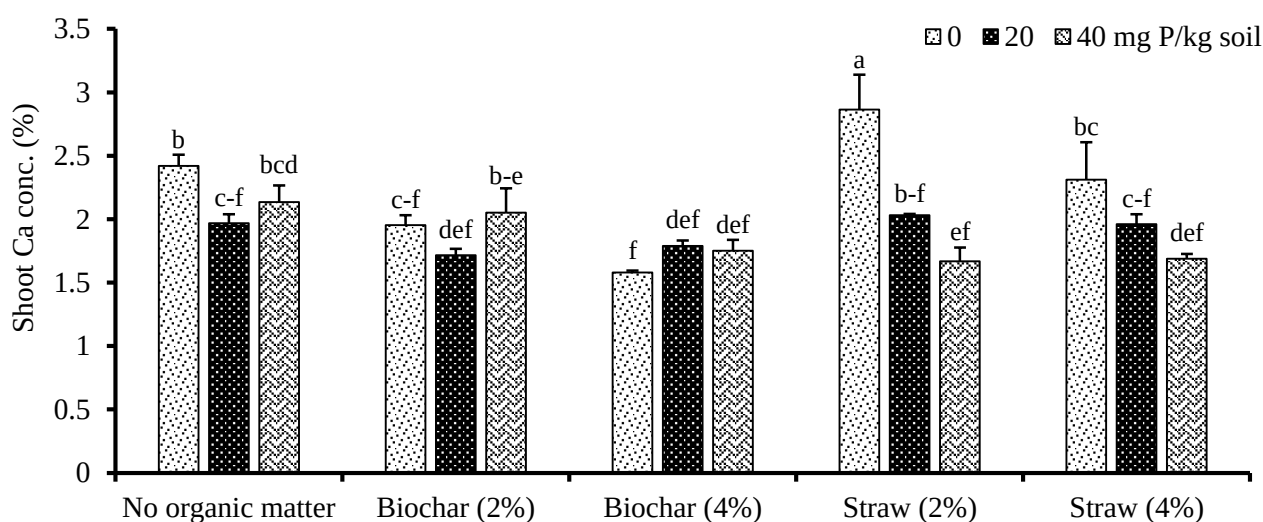
اسیده‌های چرب می‌شود که این شرایط باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (Marschner, 2012). Maghsoodi et al. (2024) گزارش کردند که با مصرف کاه برنج در خاک، رشد گیاه برنج کاهش یافت. در مطالعه‌ای که بر روی بیوپچار حاصل از ساقه ذرت بر پویایی فسفر و رشد ذرت در یک خاک رسی انجام گرفت، نتایج نشان داد که بیوپچار باعث افزایش ماده خشک شاخساره گیاه ذرت به میزان ۴۸/۷ درصد در مقایسه با شاهد شد (Amin, 2018). با توجه به شکل ۱ بیوپچار در دو سطح دو و چهار درصد به ترتیب ۴۶ و ۵۶/۵ درصد در مقایسه با شاهد باعث افزایش ماده خشک شاخساره کلزا گردید. (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. (Azimzadeh et al. (2020) مشاهده کردند که با مصرف بیوپچار و کود فسفر ماده خشک شاخساره ذرت افزایش یافت. در مطالعه‌ای که به وسیله Molla et al. (2017) بر روی بیوپچار حاصل از خاک اره و تأثیر آن بر عناصر غذایی و عملکرد گیاه تاج خروس (*Amaranthus tricolor*) انجام گرفت، گزارش شد که مصرف ۱۵ تن در هکتار بیوپچار باعث افزایش ماده خشک شاخساره در مقایسه با شاهد شد.

Park et al. (2011) گزارش کردند که افزودن بیوپچار به خاک اسیدی باعث افزایش وزن خشک گیاه گندم به میزان ۳۵/۳ درصد نسبت به سطح شاهد شد. (Hoseini et al. (2009) گزارش کردند که افزودن فسفر به خاک تا سطح ۴۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک باعث افزایش معنادار وزن خشک گیاه کلزا شد و افزودن بیشتر فسفر بر وزن خشک گیاه تأثیر معناداری نداشت. (Carter et al. (2013) در گلخانه اثر بیوپچار را بر رشد کاهو (*Lactuca sativa*) و کلم (*Brassica chinensis*) بررسی و گزارش کردند که کاربرد بیوپچار حاصل از پوسته برنج سبب افزایش ماده خشک شاخساره هر دو گیاه در مقایسه با شاهد شد. همچنین با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که مصرف کاه گندم نسبت به شاهد باعث کاهش معنادار ماده خشک شاخساره شده است؛ اما نکته قابل توجه این است که در هر سطح کاه و کلش (۲ و ۴ درصد) مصرف فسفر باعث افزایش معنادار ماده خشک شاخساره نسبت به سطح صفر فسفر شد. البته تفاوت بین دو سطح فسفر مصرفی (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در سطح ۲ درصد کاه و کلش معنادار ولی در سطح ۴ درصد کاه و کلش غیرمعنادار بود. این موضوع نشان دهنده غیرمتحرک شدن احتمالی فسفر بر اثر مصرف کاه و کلش و تأثیر مثبت کود فسفر مصرفی در این شرایط می‌باشد.



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های ماده خشک شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

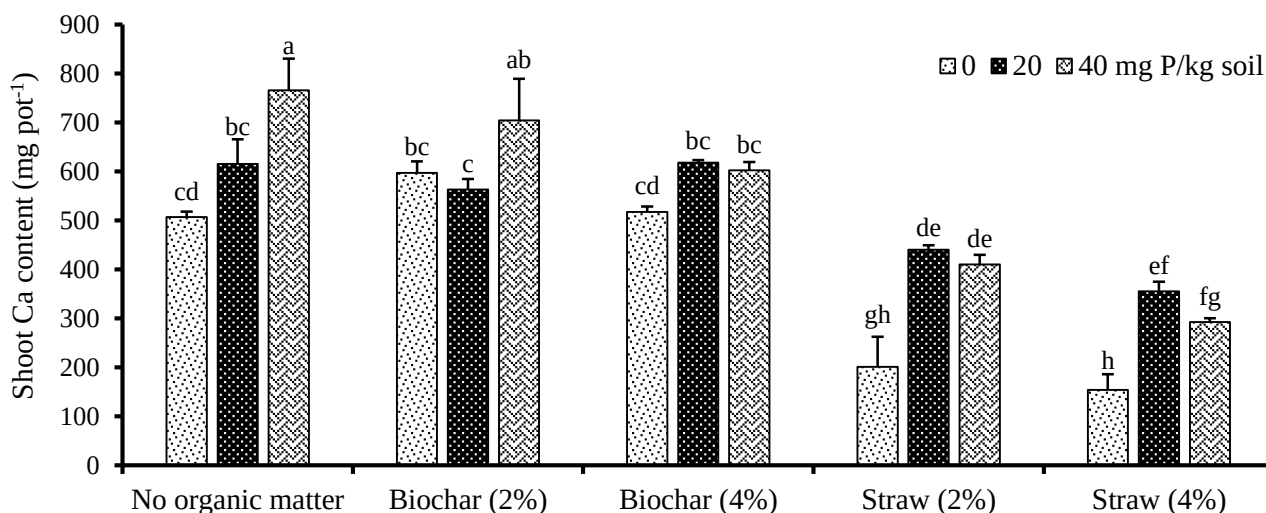
نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت کلسیم (Ca) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌های غلظت کلسیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین غلظت کلسیم شاخساره در سطح دو درصد کاه بدون فسفر مصرفی و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد بیوپچار بدون فسفر مصرفی مشاهده شد (شکل ۲). Mbah et al. (2017) افزایش غلظت کلسیم را بر اثر افزودن بیوپچار حاصل از چوب جنگلی در گیاه خیار (*Cucumis sativus*) گزارش کردند. در برگ کاملاً توسعه یافته بر روی ساقه اصلی در ابتدای دوره رشد ساقه کلزا حدود بهینه غلظت کلسیم از ۱ تا ۲/۲ درصد گزارش شده است. اگرچه در این تحقیق کل شاخساره تجزیه شده و در منابع اعدادی برای مقایسه یافت نشد اما غلظت کلسیم بین دو تا سه درصد مشاهده شد.



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های غلظت کلسیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

مقدار جذب کلسیم شاخساره

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار جذب کلسیم (Ca) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب کلسیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نیز نشان داد که بیشترین مقدار جذب کلسیم شاخساره در سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر اتفاق افتاده است، ولی تفاوت معناداری با سطح دو درصد بیوپچار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر نداشت. کمترین مقدار جذب کلسیم نیز در سطح چهار درصد کاه بدون مصرف فسفر به دست آمد که البته با سطح دو درصد کاه تفاوت معناداری نداشت (شکل ۳). در خاک‌های آهکی تصور بر این است که کلسیم قابل جذب به قدر کفایت در خاک وجود داشته و به‌رغم اینکه بیوپچار مورد استفاده در این تحقیق حدود ۲/۷ درصد کلسیم کل داشت تأثیر آن بر مقدار جذب کلسیم بارز نبود. تأثیر منفی کاه بر جذب کلسیم به‌ویژه در حالت عدم مصرف کود فسفر دوباره به تأثیر منفی کاه بر رشد و توسعه ریشه‌ها بر می‌گردد و غیرمتحرک شدن کلسیم در این مورد نمی‌تواند دارای اهمیت باشد. در مطالعه‌ای که به‌وسیله Sousa and Figueiredo, (2016) بر روی بیوپچار حاصل از لجن فاضلاب و تأثیر آن بر رشد تربچه (*Raphanus sativus*) انجام دادند، گزارش کردند که با افزایش مقدار بیوپچار مصرفی از ۱۰ تا ۳۰ گرم در کیلوگرم خاک مقدار جذب کلسیم شاخساره افزایش یافت.



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب کلسیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

غلظت منیزیم شاخساره

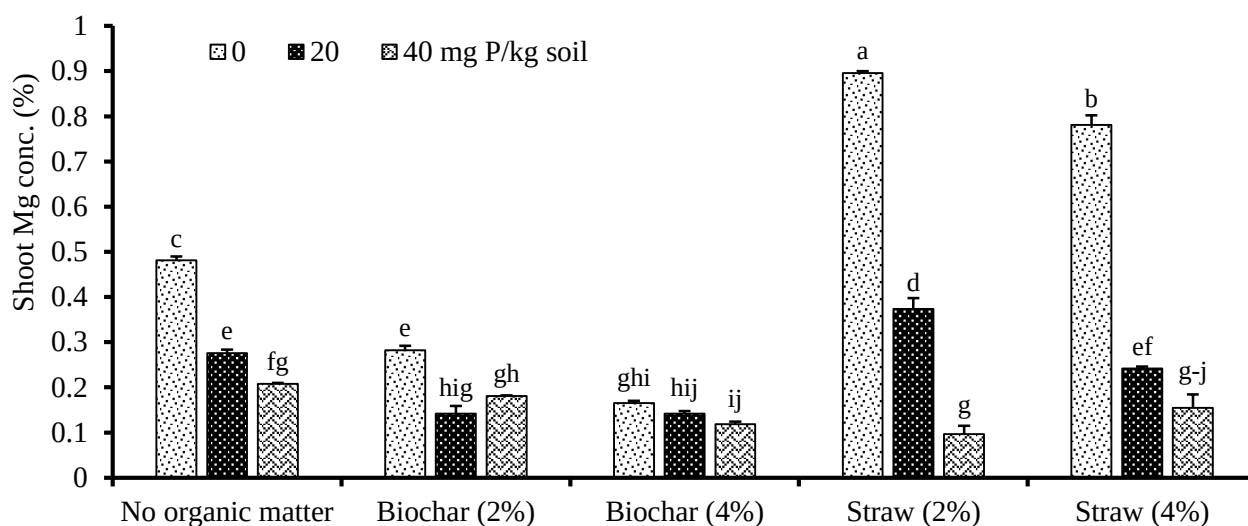
نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت منیزیم (Mg) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).

جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر ماده آلی و فسفر بر غلظت و مقدار جذب منیزیم و آهن در شاخساره.

میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییر
مقدار جذب آهن شاخساره	غلظت آهن شاخساره	مقدار جذب منیزیم شاخساره	غلظت منیزیم شاخساره		
۲۵/۳۹۸**	۱۱۰/۱۱/۴۲۳**	۲۹۲۴/۳۴۷**	۰/۱۵۲**	۴	ماده آلی
۲/۲۵۰**	۴۲۶/۱۳۱**	۲۴۲۵/۸۱۲**	۰/۵۶۲**	۲	فسفر
۰/۹۱۵**	۶۱۷/۱۳۷**	۵۷۷/۵۷۹**	۰/۰۸۹**	۸	ماده آلی × فسفر
۰/۰۷۳	۵۳/۲۶۲	۹۵/۵۱۲	۰/۰۰۱	۳۰	خطا
۹/۴۳	۶/۹۶	۱۶/۵۰	۸/۰۱		ضریب تغییرات (%)

** معنادار در سطح احتمال یک درصد

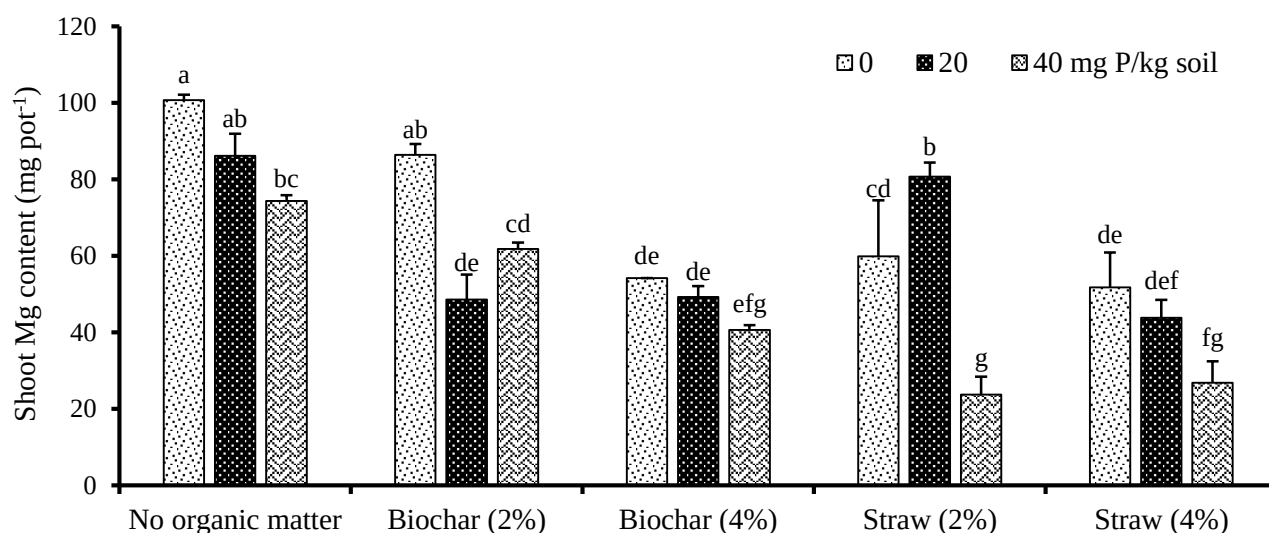
مقایسه میانگین‌های غلظت منیزیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بدون توجه به نوع ماده آلی با افزایش سطوح فسفر مصرفی، غلظت منیزیم شاخساره کاهش یافت. البته بیشترین غلظت منیزیم شاخساره در سطح دو درصد کاه بدون فسفر مصرفی برابر با ۰/۸۹ درصد حاصل شد که به دلیل افت شدید وزن خشک گیاه در این تیمار و اثر تغلیظ می‌باشد. کمترین غلظت منیزیم شاخساره نیز در سطح دو درصد کاه و کلش با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر برابر با ۰/۰۹ درصد مشاهده شد (شکل ۴). منیزیم تنها جزء معدنی کلروفیل بوده و اهمیت آن به همین دلیل برای گیاه زیاد است. Mbah et al. (2017) تأثیر بیوچار حاصل از چوب جنگلی را بر عملکرد گیاه خیار مطالعه و گزارش کردند که مصرف بیوچار غلظت منیزیم را به‌طور معناداری کاهش داد.



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های غلظت منیزیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

مقدار جذب منیزیم شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر مقدار جذب منیزیم (Mg) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب منیزیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین مقدار جذب منیزیم شاخساره در سطح شاهد ماده آلی بدون فسفر مصرفی بود که البته تفاوت معناداری با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۲۰ میلی‌گرم فسفر و دو درصد بیوپچار بدون فسفر مصرفی نداشت و کمترین آن نیز در سطح دو درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر مشاهده شد ولی با سطح چهار درصد بیوپچار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و چهار درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر تفاوت معناداری نداشت (شکل ۵). در مطالعه‌ای Zemanová et al. (2017) گزارش شد که افزودن پنج درصد بیوپچار باعث کاهش مقدار جذب منیزیم شاخساره نسبت به شاهد در دو گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) و خردل (*Sinapis alba*) شد.



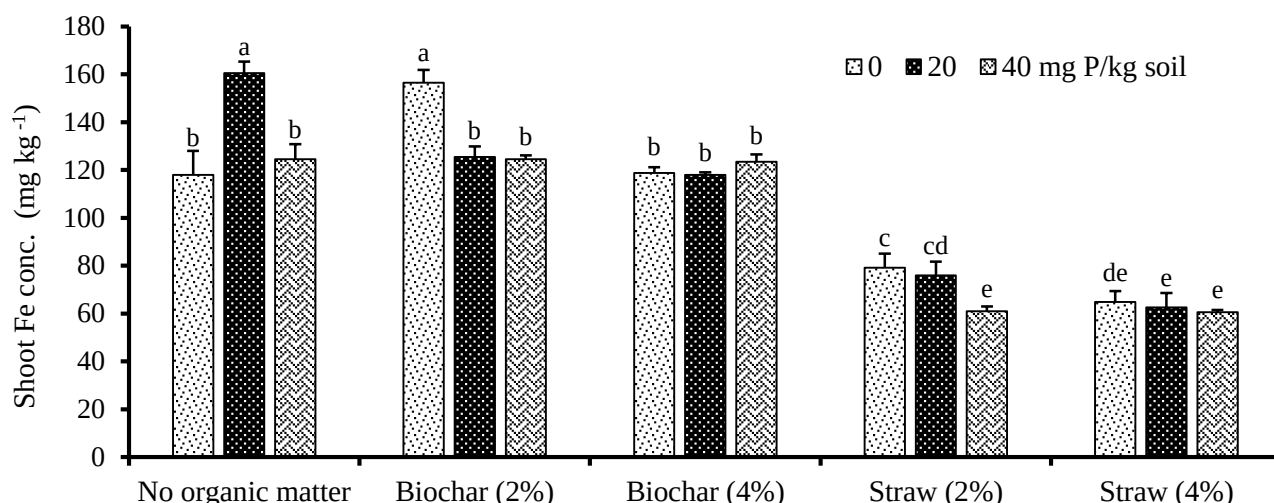
شکل ۵- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب منیزیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

غلظت آهن شاخساره

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آهن (Fe) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های غلظت آهن شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین غلظت آهن شاخساره در سطح دو درصد بیوپچار بدون فسفر مصرفی بود اما با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۲۰ میلی‌گرم فسفر تفاوت معناداری نداشت. کمترین غلظت آهن شاخساره نیز در سطح چهار درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر به دست آمد که البته با سطح دو درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و چهار درصد کاه با مصرف صفر و ۲۰ میلی‌گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۶). البته نظر به اینکه در تیمارهای کاه ماده خشک شاخساره کمتر از شاهد و تیمار بیوپچار بود لذا کاهش غلظت آهن شاخساره با اثر رقت قابل توجیه نیست و احتمالاً کاهش جذب آهن به وقوع پیوسته است.

حد بهینه غلظت آهن در برگ کاملاً توسعه یافته بر روی ساقه اصلی در ابتدای طویل شدن ساقه کلزا بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم عنوان شده است. اگرچه برای کل شاخساره کلزا اعدادی برای مقایسه یافت نشد، اما اگر این دامنه را برای کل شاخساره مناسب در نظر بگیریم در این تحقیق فقط در تیمارهای کاه گندم در هر دو سطح دو و چهار درصد غلظت آهن شاخساره کمتر از ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. در مطالعه‌ای که بر روی تأثیر بیوپچار (صفر، یک و دو درصد) و ورمی‌کومپوست بر غلظت برخی عناصر غذایی کم‌مصرف در گیاه کلزا تحت تنش شوری انجام گرفت، نتایج نشان داد که غلظت آهن شاخساره کلزا از ۶۸/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به ۷۶/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار دو درصد وزنی بیوپچار به‌طور معناداری افزایش یافت (Ghadam Kheir et al., 2017).

معمولاً تصور بر این است که کودهای دامی پوسیده افزون بر اینکه خود دارای عناصر کم مصرفی مانند آهن می‌باشند، به شکل یک منبع انرژی برای ریزجانداران خاک بوده و در فرایند معدنی شدن به دلیل آزادسازی اسیدهای آلی، سبب کاهش موضعی pH خاک شده و جذب آهن را افزایش می‌دهند. همچنین تشکیل لیگاندهای آلی محلول در نتیجه تجزیه مواد آلی در نگهداری آهن به شکل فراهم مؤثر بوده و مواد آلی در خاک با افزایش تولید میکروارگانیسم‌های تولیدکننده سیدروفورها، سبب افزایش حلالیت آهن در خاک می‌شوند. البته بدیهی است در مورد کاه به دلیل غیرمتحرک شدن آهن محلول خاک بر اثر افزایش جمعیت میکروبی و همین‌طور افزایش جزئی pH در مراحل اولیه تجزیه کاه و تولید مواد مضر و تأثیر منفی بر رشد و نمو ریشه‌ها ممکن است جذب آهن کاهش پیدا کند. برخی مطالعات دیگر هم به نقش مؤثر بیوپچار در افزایش غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف اشاره کرده‌اند (Duku et al., 2011). بیوپچار دارای سطح ویژه بالا و همچنین دارای عناصر غذایی فراوانی نیز در ترکیب خود بوده که این مسئله برای گیاه و بهبود حاصلخیزی خاک بسیار مهم است. کربونیزه کردن باگاس نیشکر و تولید بیوپچار از آن باعث افزایش غلظت عناصر موجود در آن می‌شود. علت این امر احتمالاً آزادسازی عناصر از بخش آلی و تجمع آن در خاکستر بیوپچار می‌باشد.

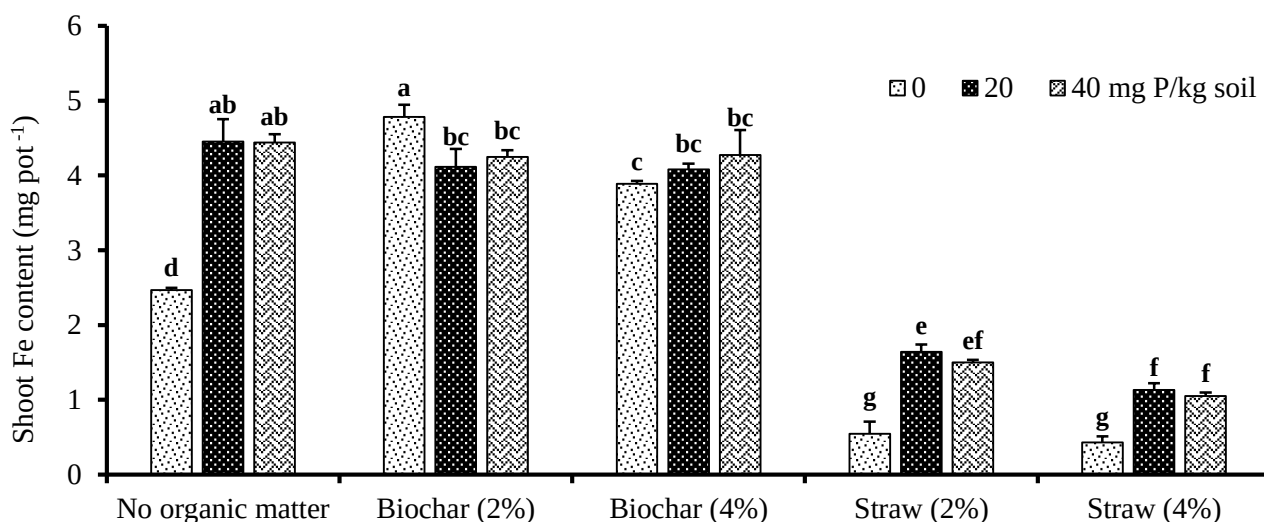


شکل ۶- مقایسه میانگین‌های غلظت آهن شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

مقدار جذب آهن شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار جذب آهن (Fe) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب آهن شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین مقدار جذب آهن شاخساره در سطح دو درصد بیوپچار بدون فسفر مصرفی بود که تفاوت معناداری با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر مصرفی نداشت. این یافته به این معنا است که در شرایط این پژوهش بیوپچار در سطح دو درصد بدون مصرف فسفر در یک خاک فقیر از فسفر قابل‌جذب منجر به همان مقدار جذب آهن شده است که در سطح ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک بدون مصرف بیوپچار به‌دست آمده است. همچنین کمترین مقدار جذب آهن در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود که البته با سطح دو درصد کاه تفاوت معناداری نداشت (شکل ۷).

با توجه به شکل ۷، تأثیر منفی افزودن کاه در دو سطح دو و چهار درصد بر مقدار جذب عنصر آهن می‌تواند نقش اساسی در متابولیسم سایر عناصر با اهمیت از جمله نیتروژن، سنتز کلروفیل و فتوسنتز داشته باشد. همچنین اختلال در جذب آهن می‌تواند یکی از دلایل کاهش وزن‌تر یا خشک کلزا در شرایط این آزمایش گلخانه‌ای باشد. علاوه بر تولید انواع و اقسام اسیدها و مواد مضر بر اثر تجزیه مواد آلی، غیرمتحرک شدن آهن قابل‌جذب خاک به وسیله جامعه میکروبی در حال تجزیه کاه نیز می‌تواند یکی از دلایل نتیجه مشاهده شده باشد؛ اما آنچه که واضح است تأثیر منفی کاه پس از تبدیل به بیوپچار از بین می‌رود. در مطالعه‌ای که بر روی بیوپچار و تأثیر آن بر مقدار جذب عناصر غذایی به وسیله گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) و خردل (*Sinapis alba*) انجام گرفت، مشاهده شد که افزودن پنج درصد بیوپچار باعث افزایش مقدار جذب آهن شاخساره نسبت به شاهد شد (Zemanová et al., 2017).



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب آهن شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

غلظت روی شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت عنصر کم مصرف روی (Zn) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶).

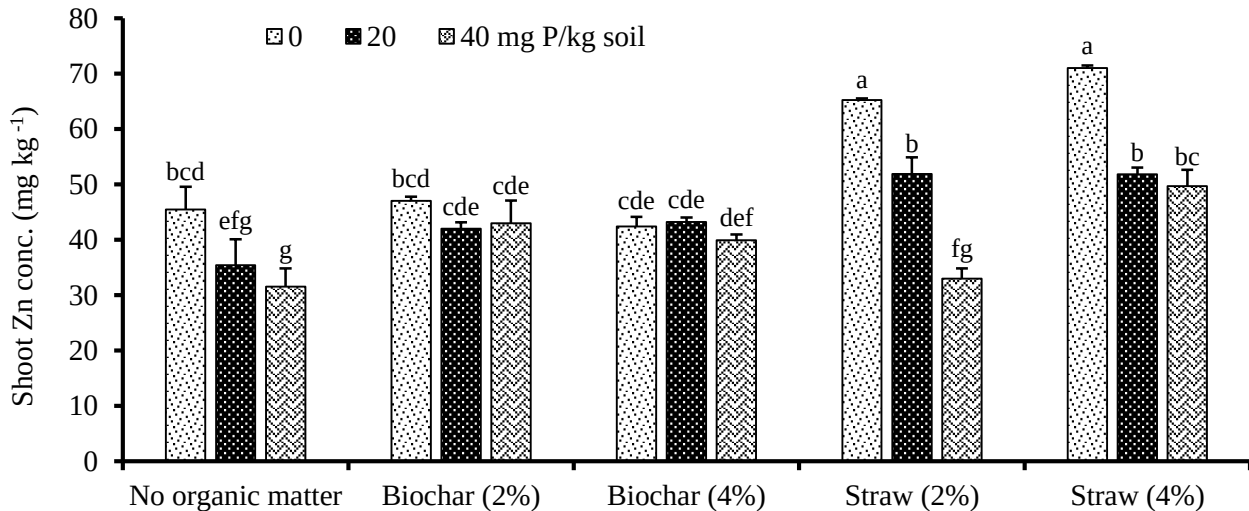
جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر ماده آلی و فسفر بر غلظت و مقدار روی و مس شاخساره.

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییر
مقدار جذب مس شاخساره	غلظت مس شاخساره	مقدار جذب روی شاخساره	غلظت روی شاخساره		
۰/۱۳۱**	۱۵۳/۲۱۲**	۰/۹۶۲**	۴۵۴/۳۵۲**	۴	ماده آلی
۰/۰۳۰**	۲۴/۳۸۴**	۰/۲۹۶**	۸۴۱/۸۰۵**	۲	فسفر
۰/۰۱۳**	۲۵/۴۸۹**	۰/۰۷۴*	۱۳۶/۳۳۳**	۸	ماده آلی × فسفر
۰/۰۰۱	۱/۱۲۱	۰/۰۲۸	۱۹/۱۵۴	۳۰	خطا
۱۹/۵۴	۱۲/۶۵	۱۵/۴۳	۹/۴۸		ضریب تغییرات (%)

** معنادار در سطح احتمال یک درصد

مقایسه میانگین‌های غلظت روی شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین غلظت روی شاخساره در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی به‌دست آمد ولی با سطح دو درصد کاه بدون مصرف فسفر تفاوت معناداری نداشت. چون ماده خشک شاخساره در این دو تیمار کمترین بود لذا این افزایش غلظت با پدیده تغلیظ یا عکس فرایند رقت قابل توجیه است. یعنی ماده خشک به شدت کاهش یافته و غلظت افزایش یافته است. همچنین کمترین غلظت روی شاخساره نیز در سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر به‌دست آمد که قبلاً مشاهده شد بیشترین ماده خشک شاخساره در این تیمار به‌دست آمده است. البته این غلظت به‌دست آمده با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۲۰ میلی‌گرم فسفر و دو درصد کاه بدون فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۸). مقایسه دو سطح بیوپار مصرفی نشان داد که در همه سطوح فسفر مصرفی از نظر غلظت روی شاخساره تفاوت معناداری وجود نداشت. در برگ کاملاً توسعه یافته در ابتدای دوره رشد کلزا حد بهینه روی بین ۴۰ تا ۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است. در این تحقیق

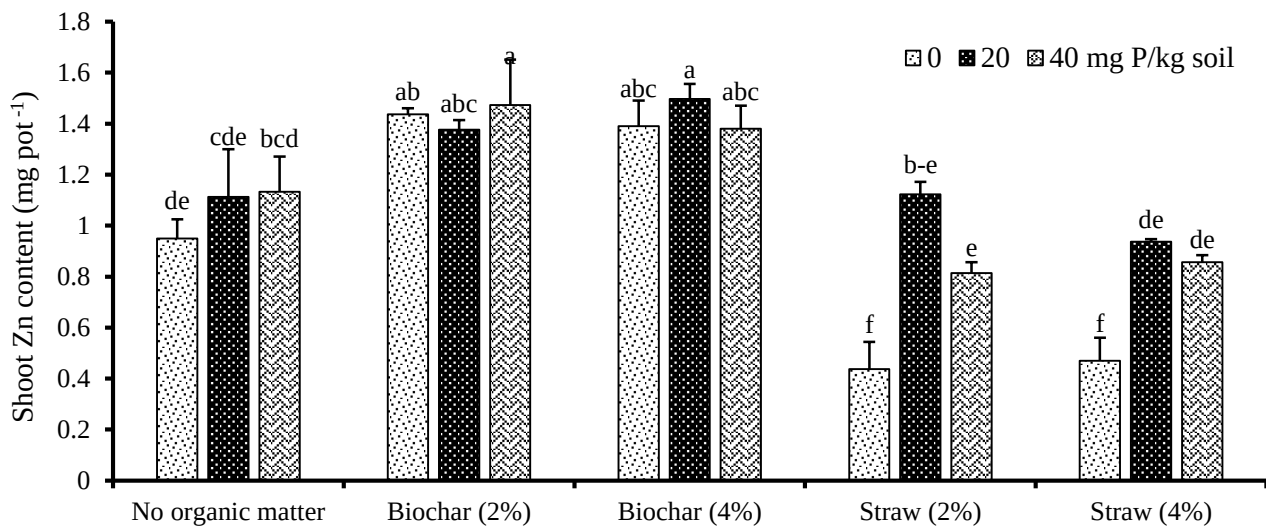
فقط در تیمارهای شاهد ماده آلی با مصرف فسفر و کاه دو درصد با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر این غلظت به زیر ۴۰ رسید.



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های غلظت روی شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

مقدار جذب روی شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار جذب روی (Zn) شاخساره معنادار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب روی شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بین سطوح بیوپچار مصرفی از نظر مقدار جذب روی شاخساره در همه سطوح فسفر مصرفی تفاوت آماری معناداری وجود نداشت. البته بیشترین مقدار جذب روی شاخساره در سطح چهار درصد بیوپچار با مصرف ۲۰ میلی‌گرم فسفر و کمترین آن نیز به‌ترتیب در سطح دو و چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی مشاهده شد (شکل ۹). اگرچه رابطه ناهم‌سازی فسفر در غلظت‌های بالا با عنصر روی معروف است اما مشاهده می‌شود که در حالت کمبود فسفر به‌دلیل عدم توسعه و رشد بهینه ریشه‌ها و عدم تأمین انرژی کافی جذب روی نیز کاهش می‌یابد. در مورد عنصر کم‌مصرف روی، هم تأثیر منفی زیست‌توده اولیه و تأثیر مثبت تبدیل آن به بیوپچار مشاهده می‌شود. اگرچه در مورد تأثیر بیوپچار بر قابلیت جذب روی اطلاعات چندانی در خاک‌های زراعی به‌ویژه خاک‌های آهکی در دست نیست اما بدیهی است با توجه به کیفیت متفاوت بقایای گیاهی و شرایط مختلف تولید بیوپچار به‌ویژه دمای پیرولیز، بیوپچارهای حاصله نیز ویژگی‌های مختلف داشته و تأثیرهای متفاوتی بر قابلیت جذب روی خواهند داشت. بیوپچار از راه‌های مختلفی می‌تواند با عنصر روی برهمکنش داشته باشد. مثلاً می‌تواند در بخش آلی با روی تشکیل کمپلکس دهد. با آزاد شدن کربن آلی محلول، حلالیت روی را افزایش دهد، pH خاک را تغییر و بر واکنش‌های رسوب و انحلال روی اثرگذار باشد (Moreno-Jiménez et al., 2016). در حضور گیاه موضوع پیچیده شده و بیوپچار از طریق بهبود حاصلخیزی فیزیک خاک می‌تواند باعث بهبود رشد ریشه‌ها شده و جذب روی را تقویت کند. در واقع اثر مثبت بیوپچار در این تحقیق بر جذب روی برآیند کلیه واکنش‌های شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی است که ممکن است الزاماً هم‌راستا نیز نباشند.

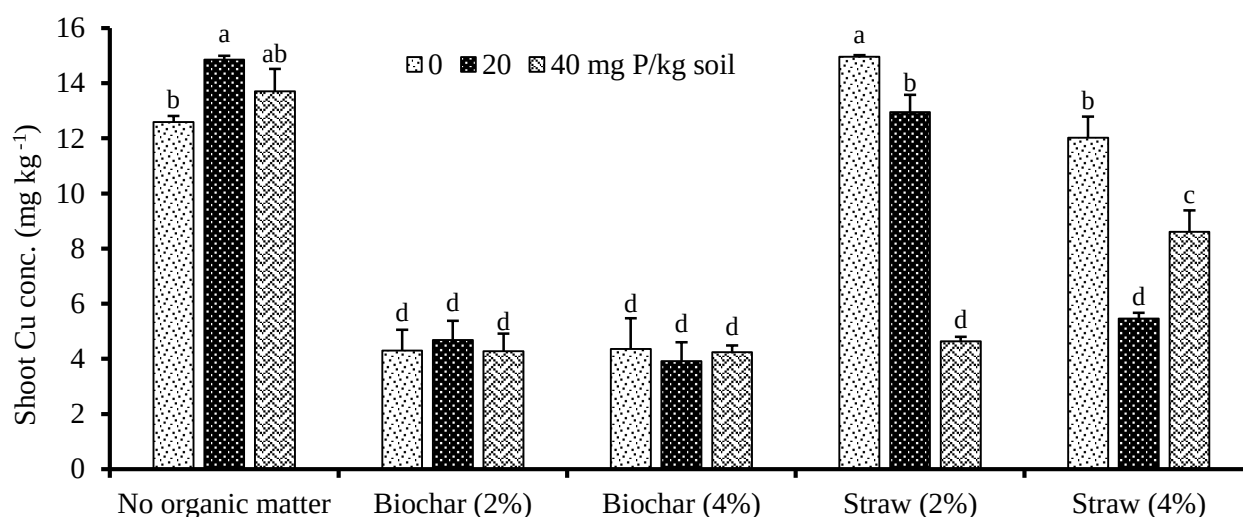


شکل ۹- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب روی شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

غلظت مس شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت مس (Cu) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین‌های غلظت مس شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین غلظت مس شاخساره در سطح دو درصد کاه بدون فسفر مصرفی به‌دست آمد ولی با سطح شاهد ماده آلی و سطوح ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر تفاوت معناداری نداشت. کمترین غلظت مس شاخساره نیز در سطح چهار درصد بیوپار با مصرف ۲۰ میلی‌گرم فسفر مشاهده شد البته با دیگر سطوح بیوپار بدون توجه به سطح فسفر تفاوت معناداری نداشت (شکل ۱۰). اگر چه ماده آلی مصرفی باعث کاهش غلظت مس شاخساره شد اما این کاهش برای بیوپار بیشتر از کاه بود. در مطالعه‌ای که بر روی تأثیر فسفر (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) و شوری بر رشد، غلظت عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در گیاه کلزا انجام گرفت، نتایج نشان داد که با افزایش سطوح فسفر غلظت مس شاخساره افزایش یافت (Hoseini et al., 2009).

Puga et al. (2015) کاهش غلظت مس شاخساره را بر اثر افزودن بیوپار حاصل از نیشکر را در گیاه باقلا گزارش کردند. در به‌دست آمدن نتایج شکل ۱۰، هم عامل شیمی مس در خاک و برهمکنش آن در خاک با مواد آلی و محصولات حاصل از تجزیه آن دخیل هستند و هم عوامل گیاهی دخیل هستند. در منابع شیمی خاک اثبات شده است که یون مس از جمله یون‌های فلزی است که با لیگاندهای حاوی اکسیژن به‌عنوان اتم دهنده الکترون، تشکیل کمپلکس می‌دهد و هم شامل یون‌های فلزی است که با لیگاندهای حاوی اتم‌های فسفر، نیتروژن و گوگرد به‌عنوان اتم‌های دهنده الکترون پیوند کوئوردینانسی تشکیل می‌دهد (Sposito et al., 1982). بنابراین، یون مس می‌تواند با تمام گروه‌های فعال موجود در اسیدهای هومیک و فولویک پیوند تشکیل دهد. لذا با افزودن مواد آلی قابل تجزیه مثل کاه گندم هم به‌دلیل غیرمتحرک شدن میکروبی و هم تشکیل پیوند قوی با مس انتظار بر این است که از قابلیت جذب مس کاسته شود. ویژگی‌های بیوپار می‌تواند متنوع باشد و برخی اوقات حتی می‌تواند به‌دلیل دارا بودن ترکیبات آلی فرار و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، اثر مضر بر رشد گیاهان داشته باشد (Kuppusamy et al., 2016).

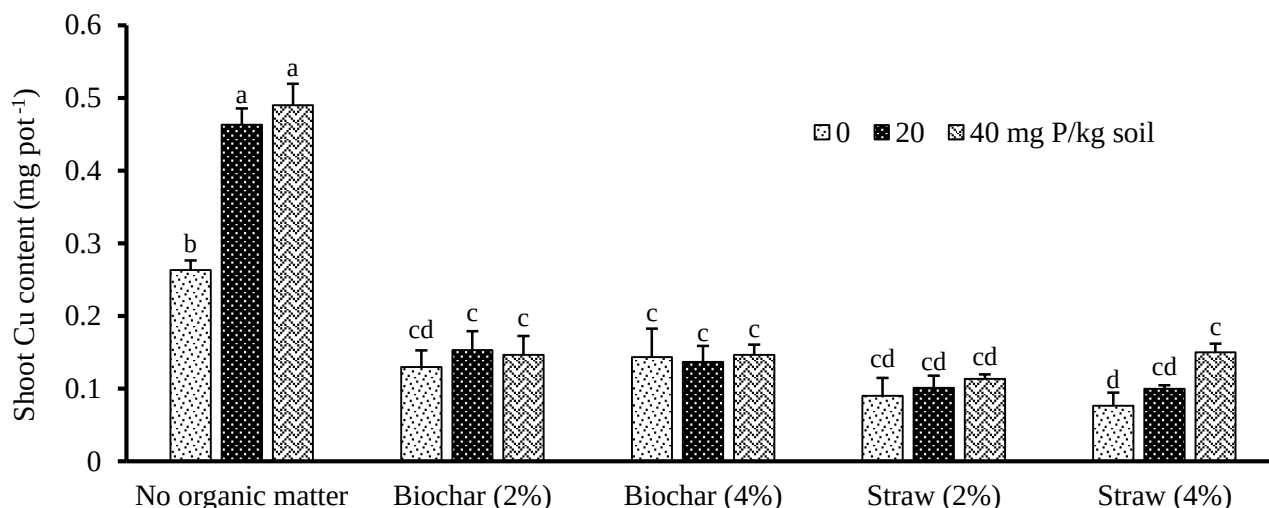


شکل ۱۰- مقایسه میانگین‌های غلظت مس شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

مقدار جذب مس شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار جذب مس (Cu) به‌وسیله شاخساره کلزا در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب مس شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بین سطوح بیوپچار از نظر مقدار جذب مس شاخساره مصرفی در سطوح متناظر فسفر مصرفی تفاوت معناداری مشاهده نشد. همین نتیجه برای کاه دو درصد نیز صادق است. بیشترین مقدار جذب مس شاخساره در سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر بود در حالی که تفاوت معناداری در همین سطح ماده آلی با مصرف ۲۰ میلی‌گرم فسفر نداشت. همچنین کمترین جذب مس نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۱۱). (Puga et al. (2015). کاهش مقدار جذب مس شاخساره را بر اثر افزودن بیوپچار حاصل از نیشکر را در گیاه باقلا گزارش کردند.

Khanmohammadi et al. (2017) گزارش کردند که استفاده از بیوپچار حاصل از لجن فاضلاب (۰، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ تن بیوپچار بر هکتار خاک) باعث کاهش مقدار جذب مس شاخساره گیاه ذرت شد. در بین عناصر غذایی کم‌مصرف کاتیونی اندازه‌گیری شده در این پژوهش شاید مس از این نظر استثناء باشد که بیوپچار مصرفی هم باعث کاهش غلظت و هم کاهش مقدار جذب آن در شاخساره کلزا نسبت به شاهد شده و بسیار شبیه کاه عمل کرده است. این موضوع می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات آتی در مورد تأثیر بیوپچار بر قابلیت جذب مس به‌وسیله کلزا و سایر گیاهان زراعی شده و در صورت تکرار نتایج حاصله ممکن است در توصیه کودی مس در خاک‌های دریافت‌کننده بیوپچار اثر گذار باشد. اگر در این تحقیق بیشتر از پنج میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک مصرف شده بود شاید عملکرد و ماده خشک شاخساره در تیمارهای بیوپچار حتی بیشتر از مقادیر فعلی می‌شدند. اگر از سرب به‌عنوان استثناء بگذریم، مس در بین کاتیون‌های دو ظرفیتی، از همه قوی‌تر جذب اکسیدهای آهن و آلومینیم و مواد آلی خاک می‌شود. یون مس مستقیماً با دو یا بیشتر گروه عامل عمدتاً کربوکسیلی یا فنلی تشکیل پیوند می‌دهد. اسیدهای هومیک و فولویک دارای مکان‌های مستعد پیوندی، عمدتاً گروه‌های کربوکسیلی برای مس می‌باشند. در مورد مواد آلی خاک مشخص شده است که تا هشت درصد هم سطح آلی و هم سطح معدنی در جذب سطحی مس مؤثر هستند اما در مقادیر بیش از هشت درصد، جذب مس عمدتاً به‌وسیله سطح آلی به وقوع می‌پیوندد (Havlin et al., 2016). البته این گونه اطلاعات هنوز در مورد بیوپچار حاصل نشده است. اکثر مطالعات انجام گرفته در ارتباط با بیوپچار و مس در خاک‌های اسیدی و آلوده به مس انجام گرفته است که حاکی از کاهش میزان استخراج مس به‌وسیله عصاره‌گیرهای مختلف پس از افزودن بیوپچار به خاک بوده است.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب مس شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

غلظت منگنز شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت منگنز (Mn) شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۷).

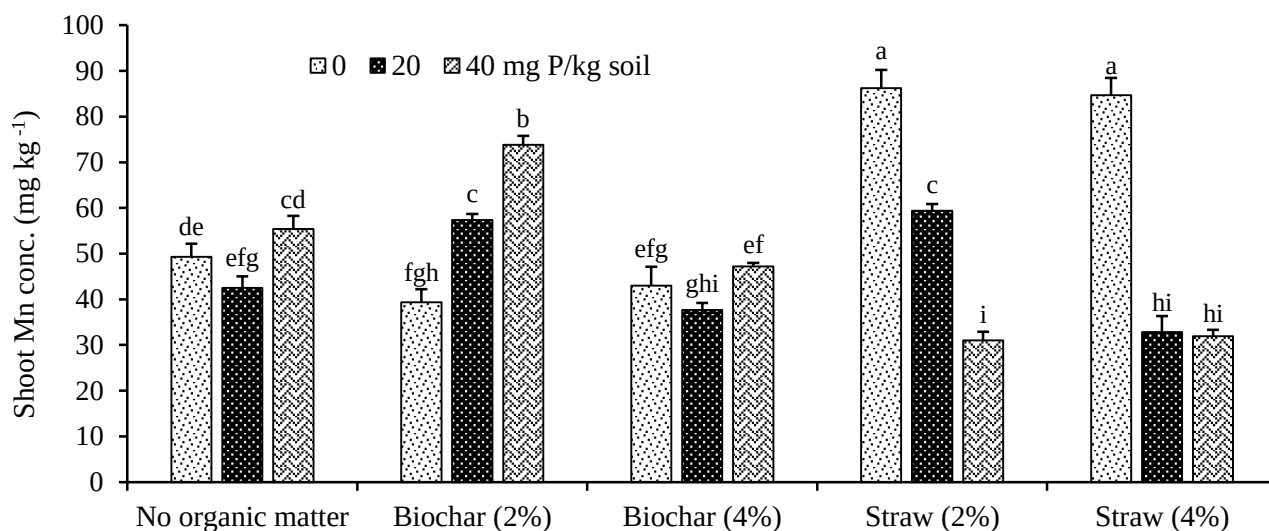
جدول ۷- تجزیه واریانس تأثیر ماده آلی و فسفر بر غلظت و مقدار منگنز شاخساره

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییر
مقدار جذب منگنز شاخساره	غلظت منگنز شاخساره		
۲/۳۹۲**	۳۸۴/۱۹۲**	۴	ماده آلی
۱/۰۶۳**	۹۳۸/۷۸۴**	۲	فسفر
۰/۳۵۸**	۱۲۹۳/۲۱۶**	۸	ماده آلی × فسفر
۰/۰۲۲	۱۹/۶۷۶	۳۰	خطا
۱۱/۸۶	۸/۶۲		ضریب تغییرات (%)

**معنادار در سطح احتمال یک درصد

مقایسه میانگین‌های غلظت منگنز شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین غلظت منگنز شاخساره در سطح دو درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود که البته با سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت و کمترین آن نیز در سطح دو درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر مصرفی مشاهده شد (شکل ۱۲). در مطالعه‌ای که بر روی تأثیر فسفر (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) و شوری بر رشد، غلظت عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در گیاه کلزا انجام گرفت، نتایج نشان داد که با افزایش سطوح فسفر غلظت منگنز شاخساره به‌طور معناداری افزایش یافت (Hoseini et al., 2009). در مطالعه‌ای دیگر که بر پارامترهای رشد گیاه گندم انجام گرفت؛ نتایج نشان داد که افزودن بیوپچار غلظت منگنز شاخساره را در مقایسه با شاهد کاهش داد که دلیل این امر ممکن است طبیعت بیوپچار یعنی pH قلیایی و مقدار کربنات بالا باشد (Albuquerque et al., 2013). البته در این پژوهش بیوپچار مورد استفاده از pH بالایی برخوردار نبود ولی تأثیر بیوپچار بر رشد ریشه‌ها و شاخساره می‌تواند غلظت منگنز را تغییر دهد. حد بهینه غلظت منگنز در برگ کاملاً توسعه یافته بر روی ساقه اصلی در ابتدای طویل شدن ساقه کلزا ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در

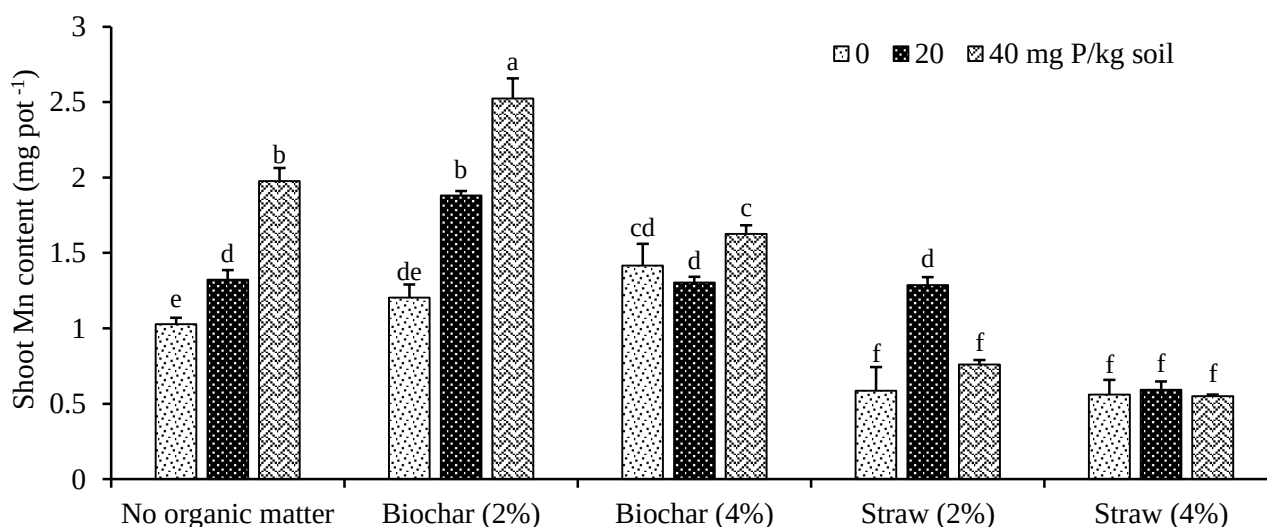
کیلوگرم گزارش شده است. با فرض پذیرش همین اعداد برای شاخصاره فقط در تیمارهای چهار درصد کاه با مصرف ۲۰ میلی‌گرم فسفر و دو درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر غلظت منگنز (حدود ۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) تفاوت آشکاری با حد بهینه داشت.



شکل ۱۲- مقایسه میانگین‌های غلظت منگنز شاخصاره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

مقدار جذب منگنز شاخصاره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار جذب منگنز (Mn) شاخصاره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب منگنز شاخصاره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین مقدار جذب منگنز شاخصاره در سطح دو درصد بیوپچار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون توجه به سطوح فسفر مصرفی به‌دست آمد و البته با سطح دو درصد کاه با مصرف صفر و ۴۰ میلی‌گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۱۳). در این پژوهش هم خاک مورد استفاده از نظر منگنز قابل‌جذب وضعیت مطلوبی تقریباً داشت و هم بیوپچار مورد استفاده بیش از ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم منگنز داشت. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود بیوپچار در سطح دو درصد بدون فسفر مصرفی توانست باعث جذب همان مقدار منگنز شود که در حالت عدم مصرف بیوپچار در سطح دو درصد بدون فسفر مصرفی توانست باعث جذب بیوپچار مصرفی از دو به چهار درصد از تأثیر مثبت بیوپچار کاسته شد. دلایلی همچون غیرمتحرک شدن میکروبی منگنز یا جذب منگنز به‌وسیله بیوپچار شاید در اینجا قابل ذکر باشد.



شکل ۱۳- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب منگنز شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق گلدانی نشان داد که مصرف کود فسفر در هر سطح کاه گندم باعث افزایش ماده خشک شاخساره شد. این موضوع می‌تواند دال بر بروز پدیده غیرمتحرک شدن فسفر در خاک بر اثر مصرف کاه و کلش و تاثیر مثبت کود فسفر مصرفی در این شرایط باشد. همچنین کاربرد بیوپچار حاصل از کاه گندم تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس باعث افزایش ماده خشک شاخساره کلزا در مقایسه با شاهد شد. برهمکنش بیوپچار و فسفر باعث افزایش مقدار جذب کلسیم، آهن، روی و منگنز شاخساره نسبت به شاهد شد، در حالی‌که مقدار جذب منیزیم و مس شاخساره کلزا را کاهش داد؛ اما برخلاف بیوپچار، مصرف توأم کاه گندم و فسفر در سطوح دو و چهار درصد باعث کاهش مقدار جذب عناصر غذایی کم‌مصرف در مقایسه با شاهد گردید. لذا پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی از سطوح دیگر کاه گندم و ترجیحا درصدهای کمتر استفاده شود تا تأثیر این ماده آلی بهتر ارزیابی شود. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق استفاده از بیوپچار در خاک‌های آهکی را می‌توان امر مثبتی در جذب عناصر غذایی کم‌مصرف به‌وسیله گیاه کلزا تلقی کرد. هر چند که تحقیقات آتی باید در مزرعه انجام شود.

منابع مورد استفاده

References

- Alburquerque, J.A., Salazar, P., Barrón, V., Torrent, J., Campillo, M.d.C., Gallardo, A. & Villar, R. (2013). Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(3), 475–484. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0128-3>
- Amin, E.A.Z. (2018). Phosphorus dynamics and corn growth under applications of corn stalks biochar in a clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(14), 379–396. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3719-8>
- Antón-Herrero, R., Vega-Jara, L., García-Delgado, C., Mayans, B., Camacho-Arévalo, R., Moreno-Jiménez, E., and Eymar, E. (2022). Synergistic effects of biochar and biostimulants on nutrient and toxic element uptake by pepper in contaminated soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102, 167–174. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11343>
- Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S. & Khataee, A. (2020). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12), 1649–1664. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1802012>

- Beesley, L., & Dickinson, N. (2011). Carbon and trace element fluxes in the pore water of an urban soil following greenwaste compost, woody and biochar amendments, inoculated with the earthworm (*Lumbricus terrestris*). *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.035>
- 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, 404–418. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020404>
- Crowly, D.E., Romheld, V., Marschner, H. & Szaniszli, P.J. (1992). Root microbial effects on plant iron uptake from siderophores and phito siderophores. *Plant and Soil*, 142, 1–7. DOI: [10.1007/BF00010169](https://doi.org/10.1007/BF00010169)
- 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, 909–915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.008>
- Duku, M.H., Gu, S. & Hagan, E.B. (2011). Biochar production potential in Ghana- a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3539–3551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.010>
- Frišták, V. & Soja, G. (2015). Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova Biotechnologica Et Chimica*, 14, 104–115. <https://doi.org/10.1515/nbec-2015-0020>
- Gee, G.W., Or, D. (2002). Particle size analysis. Pp. 255–293. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis*. Part 4. *Physical methods*. Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, WI., USA.
- Ghadam Kheir, E., Nadian, H. & Jafari, S. (2017). The effect of biochar and vermicompost on concentration of some micronutrients in canola under salinity stress. Pp.1–6. In: *15th Iranian Soil Science Congress*, 28 -30 August. 2017, Isfahan-Iran (In Persian with English abstract).
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L & Nelson, W.L. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Sixth Edition, Academic Press, Soil Science Society of America. Madison, WI., USA.
- Hoseini, Y., Homaei, M., Karimian, N.A & Saadat, S. (2009). The effects of phosphorus and salinity on growth, nutrient concentrations, and water use efficiency in canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Research* 8, 1–18. (In Persian with English abstract).
- Jones, J.R. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press, Boca Raton, FL., USA.
- Karimi, E., Shirmardi, M., Dehestani Ardakani, M., Gholamnezhad, J. & Zarebanadkouki, M. (2020). The effect of humic acid and biochar on growth and nutrients uptake of calendula (*Calendula officinalis* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51, 1658–1669. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1791157>
- Khanmohammadi, Z., Afyuni, M. & Mosaddeghi, M.R. (2017). Effect of sewage sludge and its biochar on chemical properties of two calcareous soils and maize shoot yield. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63, 198–212. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1210787>
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K. & Naidu, R. (2016). Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions. *Environment International*, 87, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.018>
- Lehmann, J. & Joseph S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Second Edition, Academic Press, London, UK.
- Lehmann, J., Kem, D., German, L., McCann, J., Martis, G.C. & Moreira, L. (2003). Soil fertility and production potential. Chapter 6. Pp. 105–124. In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, W. I. Woods (Eds). *Amazonian dark earths: origin, properties, management*. Kluwer Academic, Dordrecht, the Netherlands.
- Lindsay, W.L. & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Lindsay, W.L., Vlek, P.L. & Chien, S.H. (1989). Phosphate Minerals. Pp. 1089–1130. In: Dixeon, J.B. & Weed SB (Eds). *Minerals in soil environments*. Secondth Edition. SSSA Book Series No. 1, Madison, WI. USA.

- Maghsoodi, M.R., Najafi, N., Reyhanitabar, A. & Oustan, S. (2024). Effects of biochar, hydrochar, zeolite, and hydroxyapatite nanorods as urea carriers on some agronomical traits and water use efficiency of rice plant. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02143-8>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Second Edition, Academic Press, London, UK.
- Mbah, C., Njoku, C., Okolo, C., Attoe, E. & 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, 1781–1792. DOI: [10.5897/AJAR2016.11654](https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11654)
- Molla, M.S., Akhter, M., Maniruzzaman, M., Lipi, N.J., Rabiul, A. & Tisam, A. (2017). Response of biochar to plant nutrients and yield of *Amaranthus tricolor*. *International Journal of Innovative Research*, 2, 13–17.
- Moreno-Jiménez, E., Fernández, J.M., Puschenreiter, M., Williams, P.N. & Plaza, C. (2016). Availability and transfer to grain of As, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in a barley agri-system: Impact of biochar, organic and mineral fertilizers. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 219, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.001>
- Nelson, D.W. & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 961–1010. In: *Methods of soil analysis*. Sparks, D.L., et al. (Eds) Part 3. *Chemical methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI., USA.
- Olsen, S.R. & Sommer, L.E. (1982). Phosphorus. Pp. 403–430. In: Page, A.L., Miller, R.H and Keeney, D.R. (Eds). *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. SSSA, Madison, WI., USA.
- Ouda, B.A. & Mahadeen, A.Y. (2008). Effect of fertilizers on growth, yield, yield components, quality and certain nutrient contents in broccoli (*Brassica oleracea*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 10, 627–32.
- Park, J.H., Choppala, G.K., Bolan, N.S, Chung, J.W & Chuasavathi, T., 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348, 439–451. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0948-y>
- Price, G., 2006. *Australian soil fertility manual*. Third Edition, Fertilizer Industry Federation of Australia Inc. and CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, Australia.
- Puga, A., Abreu, C., Melo, L. & Beesley, L. (2015). Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *Journal of Environmental Management*, 159, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.036>
- 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
- Rhoades, J. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. Pp. 417–435. In: Sparks, D.L et al. (Eds.). *Methods of soil analysis*, Part 3. *Chemical methods*. SSSA, Madison, WI., USA.
- Shahbazi, K. & Besharati, H.(2013). Overview of agricultural soil fertility status of Iran. *Journal of Land Management*, 1, 1–15. (In Persian with English abstract).
- Singh, B., Camps-Arbestain, M. & Lehmann, J.(2017). *Biochar: A guide to analytical methods*. First Edition, Academic Press, CSIRO Publishing.
- Song, W. & Guo, M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018>
- Sousa, A., & Figueiredo, C., (2016). Sewage sludge biochar: Effects on soil fertility and growth of radish. *Biological Agriculture and Horticulture*, 32, 127–138. <https://doi.org/10.1080/01448765.2015.1093545>
- Sposito, G., Lund, L.J, & Chang, A.C. (1982). Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in soil phases. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 260–264. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600020009x>
- Tavajjoh, M., Karimian, N.A., Ronaghi, A., Yasrebi, J., Hamidi, R., & 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 Science and Technology of Greenhouse Culture*, 6, 99–113. (In Persian with English abstract). DOI: [10.18869/acadpub.ejgcst.6.4.99](https://doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.6.4.99)
- Thomas, G.W. (1996). *Soil pH and soil acidity*. pp. 475-490. In: Sparks, D.L et al., (Eds). *Methods of soil analysis*. Part 3. *Chemical methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI., USA..
- Vahedi, R., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Barin, M. & Vetukuri, R.R. (2022). Effect of biochar and microbial inoculation on P, Fe, and Zn bioavailability in a calcareous soil. *Processes*, 10, 343–357. <https://doi.org/10.3390/pr10020343>
- Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M. & Bishop, P. (2012). Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil*, 357, 173–187. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1131-9>
- Xu, X., Cao, X. & Zhao, L. (2013). Comparison of rice husk-and dairy manure-derived biochars for simultaneously removing heavy metals from aqueous solutions: role of mineral components in biochars. *Chemosphere*, 92(8), 955–961. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.009>
- Zemanová, V., Břendová, K., Pavlíková, D., Kubátová, P. & Tlustoš, P. (2017). Effect of biochar application on the content of nutrients (Ca, Fe, K, Mg, Na, P) and amino acids in subsequently growing spinach and mustard. *Plant, Soil and Environment*, 7, 322–327. DOI: [10.17221/318/2017-PSE](https://doi.org/10.17221/318/2017-PSE)
- Zolfi Bavariani, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J. & Ghasemi, R. (2017). Influence of biochars prepared from poultry manure on phosphorus availability and recovery in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Science*, 21, 23–35. (In Persian with English abstract). DOI: [10.18869/acadpub.jstnar.21.1.23](https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.1.23)