

Effects of Biochar and Nitrogen on Rapeseed plant Dry Matter and Macronutrients Uptake under Water Deficit Conditions in a Pot Culture

Asad Ghaderpoor¹ , Adel Reyhanitabar² , Nosratollah Najafi³ , Davoud Zarehaghi⁴ ,
Soheil Salimi Trazoj⁵

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. E-mail: asadagherpoor@gmail.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, Iran. E-mail: n-najafi@tabrizu.ac.ir

4-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. E-mail: davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

5-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. E-mail: soheilsalimi70@yahoo.com

Received: May, 2025

Revised: July 6, 2025

Accepted: July 12, 2025

Published: July 28, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

The use of organic and slow release fertilizers is one of the methods of increasing the bioavailability and use efficiency of nitrogen in plants. Biochar is a solid, carbon-rich material, obtained during thermochemical decomposition (pyrolysis) of biomass in a closed container under no or limited oxygen supply. Biochar is an organic matter that improves plant growth by the water- and nutrient-holding capacity. The interest in biochar research is mostly focused on its roles in long-term carbon storage in soils, and soil fertility. Strong resistance to microbial decomposition, high nutrient content such as phosphorus, potassium, calcium, and magnesium, high specific surface area, high cation exchange capacity (CEC), and porosity are the outstanding properties of biochar distinguishing it from other soil amendments. Nitrogen is one of the macronutrients for all plants, and its deficiency is common in arid and semi-arid calcareous soils. Because most soils cannot supply sufficient amount of plant available-nitrogen, inorganic and/or organic nitrogen sources must be applied to meet plant nitrogen requirements. Rapeseed (*Brassica napus* L.) also known as rape, oilseed rape, and canola, is a bright-yellow flowering member of the family *Brassicaceae*, cultivated mainly for its oil-rich seeds. About 90% of Iran's oil consumption is imported from abroad, and recently, the cultivation of rapeseed and attention to its nutrition have been included in the Ministry of Agriculture's programs. Rapeseed is known as a plant with a high nitrogen requirement. Therefore, it is important to study the interaction of nitrogen with biochar in the case of rapeseed.

Materials and Methods

This experiment examined the interaction effects of biochar (produced by wheat straw pyrolyzed at 300 °C) and nitrogen (N) under water deficit stress on the growth and macronutrients uptake of rapeseed (*Brassica napus* L.) cv. Hyola 308 in greenhouse conditions in a calcareous sandy loam soil. A factorial experiment was done in a completely randomized design with three replicates. The applied soil was passed through a 4.76 sieve, supplied with various levels of organic matter plus inorganic nitrogen (50 mg kg⁻¹ from ammonium sulfate source), and kept at 80-100% of field capacity (FC) moisture under greenhouse conditions for 60 days. The factors of our experiment were organic matter (biochar and wheat straw, each at three levels of 0, 0.75 and 1.5 %), nitrogen at two levels (150 and 300 mg N kg⁻¹ as urea) and soil moisture at two levels (0.85FC-FC as without stress or optimum moisture and 0.5FC-0.6FC as water deficit stress). After 90 days of plants growth, the plants were harvested and the dry matter and the concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium in shoot of rapeseed plants were measured.

Results

The results showed that application of nitrogen and biochar significantly increased rapeseed shoot dry matter. In contrast, water drought stress decreased rapeseed shoot dry matter. The two-way interaction of nitrogen $\times$ moisture level was significant on the concentrations of nitrogen, calcium and magnesium in the rapeseed shoot. Nitrogen and phosphorus concentrations were not significantly different between treatments containing biochar and without organic matter. Biochar application increased shoot potassium concentration compared to organic-free treatments. Concentrations of calcium and magnesium in the biochar containing treatments were not significantly different from those without organic matter. Drought stress increased the concentration of all studied nutrients due to the concentration effect except calcium concentration in rapeseed shoot. According to the results, it can be concluded that biochar application increased studied nutrients uptake and resulted in improved rapeseed plant growth. In this greenhouse study, the highest shoot dry matter was obtained by application of wheat straw at the 0.75% level and 300 mg of nitrogen per kg of soil at the moisture level of 85 to 100% of field capacity. Under 0.5FC-0.6FC and 1.5% biochar application conditions, increasing the level of nitrogen from 150 mg N kg⁻¹ to 300 mg N kg⁻¹ soil had no significant effect on the shoot dry matter of rapeseed plant.

Conclusion

According to the results of this study, the use of biochar derived from wheat straw pyrolyzed at 300 °C, increased the uptake of macronutrients by rapeseed, Hyola 308 cultivar, in a sandy loam soil. Biochar and wheat straw may play important roles in counteracting drought stress and improving soil fertility and canola production along with other proven benefits. Under water deficit conditions, the rapeseed plant need for nitrogen fertilizer can be decreased. At moisture content of 85 to 100% of field capacity, 300 mg nitrogen and at moisture content of 50 to 65% of field capacity, 150 mg nitrogen per kilogram of soil can be recommended under similar conditions. More research is needed in this area especially under field conditions.

Keywords: Chemical fertilizer, Organic fertilizer, Plant nutrition, Urea, Water deficiency

Author Contributions

Conceptualization, A.G and A.R; methodology, N.N; Performing experiments and measurements, A.G; software, N.N; validation, A.R and N.N; formal analysis, A.G and D.Z.; data curation, A.R. and N.N; writing—original draft preparation, A.G and S.S.T.; writing—review and editing, A.G. and S.S.T; visualization, N.N; supervision, A.R; project administration, A.R. and N.N; funding acquisition, A.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a M.Sc 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: Ghaderpoor, A., Reyhanitabar, A., Najafi, N. Zarehaghi, D. & Salimi Trazoj, S. (2025). Effects of biochar and nitrogen on rapeseed plant dry matter and macronutrients uptake under water deficit conditions in a pot culture. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(2), 43-71.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.67401.1010>

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



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS
JOURNALS



تأثیر بیوجار و نیتروژن بر ماده خشک و جذب عناصر غذایی پرمصرف در گیاه کلزا در شرایط کم آبی در کشت گلدانی

اسعد قادرپور^۱، عادل ریحانی تبار^۲، نصرت اله نجفی^۳، داود زارع حقی^۴، سهیل سلیمی ترازوج^۵

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: asadaghaderpoor@gmail.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

۴- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

۵- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: soheilsalimi70@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر مصرف بیوجار حاصل از کاه گندم (پیرولیز شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس) و نیتروژن بر جذب عناصر غذایی پرمصرف به وسیله گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) رقم هایولا ۳۰۸ در شرایط تنش کم آبی در یک خاک آهکی لوم شنی و در کشت گلخانه‌ای انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل ماده آلی در پنج سطح (بیوجار و کاه گندم هر یک در ۳ سطح صفر، ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد)، کود نیتروژن در دو سطح (۱۵۰ و ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره) و رطوبت خاک در دو سطح (۸۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای به عنوان بدون تنش و ۵۰ تا ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای به عنوان تیمار تنش کم آبی) بودند. بعد از برداشت گیاه ماده خشک شاخساره و غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در شاخساره گیاه کلزا اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که با مصرف بیوجار و نیتروژن، ماده خشک شاخساره به طور معنادار نسبت به شاهد افزایش یافت. با این حال، بیشترین ماده خشک شاخساره در تیمار ۰/۷۵ درصد کاه گندم با مصرف ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک و رطوبت ۸۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه به دست آمد. مصرف بیوجار سبب افزایش غلظت پتاسیم و فسفر شاخساره نسبت به تیمار بدون ماده آلی شد ولی غلظت کلسیم و منیزیم در تیمار حاوی بیوجار با تیمار بدون ماده آلی تفاوت معنادار نداشت. اعمال تنش کم آبی به دلیل کاهش ماده خشک گیاه و وقوع پدیده «اثر تغلیظ» سبب افزایش غلظت همه عناصر غذایی مورد مطالعه به جز کلسیم شد. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق گلخانه‌ای استفاده از بیوجار حاصل از کاه گندم، جذب عناصر ضروری پرمصرف و رشد گیاه کلزا را افزایش داد و نقش مهمی در بهبود تحمل تنش کم آبی گیاه داشت. در رطوبت ۸۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای، ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن و در رطوبت ۵۰ تا ۶۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای، ۱۵۰ میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک در شرایط مشابه می‌تواند توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: اوره، تغذیه گیاه، کود آلی، کود شیمیایی، کمبود آب

استناد به این مقاله: قادرپور، ا.، ریحانی تبار، ع.، نجفی، ن.، زارع حقی، د. و سلیمی ترازوج، س. (۱۴۰۴). تأثیر بیوجار و نیتروژن بر ماده خشک و جذب عناصر غذایی پرمصرف در گیاه کلزا در شرایط کم آبی در کشت گلدانی. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵(۲)، ۴۳-۷۱.

مقدمه

نیتروژن یکی از حیاتی‌ترین عناصر برای رشد و عملکرد گیاه است که کمبود آن در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به ویژه ایران مطرح است؛ زیرا در این مناطق مقدار مواد آلی که عمده‌ترین منبع نیتروژن محسوب می‌شود، کم است. حدود ۶۳ درصد از خاک‌های ایران و ۸۱ درصد خاک‌های استان آذربایجان شرقی کمتر از یک درصد کربن آلی دارند (Shahbazi & Besharati, 2013). نیتروژن در ساختار ویتامین‌ها، کوآنزیم‌ها، نوکلئوتیدها (مانند ATP، RNA و DNA)، اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها حضور دارد و مقدار نیتروژن یکی از عوامل اثرگذار بر میزان پروتئین بافت‌های گیاهی است (Bai et al., 2017). برگ‌ها منبع اصلی نیتروژن هستند و مقدار بیش از حد و یا کمبود نیتروژن بر رشد گیاه اثرهای منفی دارد. کمبود نیتروژن می‌تواند عملکرد گیاه را به شدت کاهش دهد و کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار دهد. مقدار نیتروژن در اندام‌های مختلف گیاهان متفاوت است ولی مقدار آن در ماده خشک گیاهی در حدود یک تا شش درصد گزارش شده است (Malakouti & Homaee, 2004).

بیش از سه دهه است که گیاه کلزا به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای تولید روغن در کشور مورد توجه قرار گرفته است. نیاز کلزا به نیتروژن زیاد بوده و مدیریت این عنصر یکی از مهم‌ترین عوامل پایداری تولید به حساب می‌آید. کود نیتروژن مورد نیاز کلزا برای دستیابی به عملکرد مطلوب بسته به وضعیت خاک از ۵۰ تا ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار متفاوت گزارش شده است. البته بدیهی است در کنار نیتروژن سایر عناصر غذایی پرمصرف به ویژه فسفر و پتاسیم و عناصر غذایی کم‌مصرف به قدر کفایت برای رسیدن به تولید مطلوب گیاه کلزا نیاز است (Noorgholipour et al., 2014). مقدار نیتروژن جذب شده به وسیله گیاه بسته به گونه، اندام و سن گیاه متفاوت است، ولی در مجموع ۱/۵ تا ۵ درصد وزن خشک گیاه را نیتروژن تشکیل می‌دهد (Havlin et al., 2016).

در اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، زراعت با تنش کم‌آبی^۱ مواجه بوده و کمبود آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده و کاهش رشد در این مناطق است. این خسارت ناشی از تنش کم‌آبی را می‌توان با آبیاری کاهش داد (Naseri et al., 2017). ایران با میانگین ۲۲۰ میلی‌متر و برخی مناطق کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر باران در سال جز مناطق خشک جهان محسوب می‌شود. لذا، وقوع تنش کم‌آبی در دوره رشد گیاه امری اجتناب ناپذیر است. همچنین، پاسخ گیاهان مختلف و حتی ارقام مختلف از یک گونه گیاهی نسبت به کم‌آبی متفاوت است. فعالیت کشاورزی به دلیل وابستگی بیش از حد به ذخیره رطوبت خاک، معمولاً نخستین بخشی است که تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرد. خشکسالی در بخش کشاورزی محسوس‌تر و اثرهای نامطلوب آن بیش‌تر است و به همین دلیل باید به مدیریت خشکسالی توجه زیادی شود (Masomi et al., 2015).

به‌طور کلی، عناصر غذایی مورد استفاده برای رشد گیاه و تولید زیست‌توده به وسیله چرخه درونی مواد ذخیره شده تأمین می‌شود که برای انتقال آن نیاز به آب دارد. معمولاً تنش کمبود رطوبت خاک سبب کاهش تقسیم یاخته‌ها و رشد یاخته‌ها و انتقال مواد غذایی و عناصر معدنی و در نتیجه کاهش رشد می‌شود. رشد برگ به کمبود رطوبت حساس‌تر است. برای گیاهان مختلف میزان تأثیر رطوبت فرق می‌کند. محدودیت رطوبت بر واکنش گیاه به کود مؤثر است. در همان حال نیاز به وجود کود کافی برای افزایش راندمان استفاده از آب اثرهای متقابل بین رطوبت و نیاز غذایی را نشان می‌دهد. همچنین، میزان رطوبت خاک بر جذب عناصر غذایی تأثیر محسوس دارد و همه سازوکارهای جذب عناصر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. وقتی که رطوبت خاک کاهش می‌یابد، لایه رطوبت اطراف ذرات خاک نازک‌تر شده و انتشار یون‌ها از لایه رطوبت بسیار کج و معوج‌دار می‌شود. انتقال عناصر به سمت ریشه وقتی که رطوبت به حول و حوش ظرفیت مزرعه می‌رسد مؤثرتر صورت می‌گیرد (Havlin et al., 2016). Subramanian et al. (2006) گزارش

^۱-Water deficit conditions

کردند که مقدار نیتروژن و فسفر در ریشه و بخش هوایی گوجه فرنگی در شرایط تنش کم آبی کاهش یافت. گزارش شده است که در گیاه رزماری، مقدار جذب فسفر در شرایط تنش کم آبی شدیداً کاهش یافت (Asrar & Elhindi, 2011). کاه گندم یکی از مهمترین منابع تأمین کننده ماده آلی خاکهای کشور است که فراوانتر از سایر پسماندهای کشاورزی است. سالانه حدود هشت میلیون هکتار گندم در کشور کشت می شود که بالغ بر ۱۷/۵ میلیون تن دانه و ۳۵ میلیون تن کاه تولید می شود که متأسفانه در خیلی از مزارع آتش زده می شود (Beheshti & Alikhani, 2015). مزیت های افزودن کاه گندم به خاک عبارتند از افزایش ماده آلی خاک و در نتیجه افزایش جذب و کارایی مصرف عناصر غذایی به وسیله گیاهان، افزایش نفوذپذیری و بهبود تهویه خاک و در نتیجه بهبود حاصلخیزی فیزیکی و شیمیایی خاک و نهایتاً افزایش کارایی مصرف آب. کاه گندم در صورت برگشت به خاک هوموس خاک را ۳۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم بر هکتار در سال افزایش می دهد. بر اثر سوزاندن کاه، پتاسیم و کلسیم همراه با خاکستر به خاک بر می گردند اما با شروع بارندگی دچار آبشویی می شوند. همچنین بخش زیادی از نیتروژن، کربن و فسفر به صورت گاز وارد هوا می شود (Dehzad, 2015). پژوهشگران گزارش کردند که سوزاندن کاه به مدت هفت سال باعث کاهش نفوذپذیری خاک، مقدار نیتروژن و سولفات خاک گردید و در نهایت موجب کاهش عملکرد و درصد پروتئین گندم شد (Toshih et al., 2006). مصرف کاه بدون توجه به فاکتور نیتروژن در خاک سبب بروز مشکلاتی همچون افزایش نسبت C/N و ناپویا شدن نیتروژن خاک و بروز دوره رکود نیترات و تولید اتیلن بر اثر تجزیه آن می شود (Marschner, 2011; Havlin et al., 2016).

یکی از راهکارهای استفاده از بقایای کشاورزی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، فرایند پیرولیز است. تجزیه زیست توده برای بازیافت ترکیبات آلی و پلیمری بر اثر حرارت و در غیاب اکسیژن را پیرولیز می گویند که اساس تولید بیوپچار است. کاه گندم به علت قابلیت تجدیدپذیری سالانه و فراوانی زیاد، ماده اولیه مناسبی برای تولید بیوپچار است. نسبت وزن بیوپچار تولیدی به وزن زیست توده اولیه، عملکرد بیوپچار نامیده می شود. محدوده عملکرد بیوپچار در کاه گندم حدود ۵۹ درصد در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس تا ۲۹ درصد در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس گزارش شده است که البته بستگی به کیفیت فناوری مورد استفاده دارد (Beheshti & Alikhani, 2015). پژوهش های زیادی بیانگر اثرهای مفید کاربرد بیوپچار در خاکهای کشاورزی هستند. گزارش شده است که افزودن بیوپچار غالباً سبب بهبود حاصلخیزی فیزیکی و شیمیایی خاک و بهبود رشد گیاهان به ویژه به همراه افزودن کودهای نیتروژنی در خاکهای با حاصلخیزی کم می شود. بیوپچار دارای ویژگی های منحصر به فردی است که آن را از سایر کودها و اصلاح کنندگان آلی خاک متمایز می کند و به علت پایداری نسبتاً زیاد، دارای اثرهای ماندگار زیادی در خاک می باشد. بیوپچار با بهبود نگه داشت آب خاک و راندمان استفاده از عناصر غذایی از طریق تغییر ویژگی های خاک سبب افزایش توان باروری و حاصلخیزی خاک می شود (Farrell et al., 2013).

بیوپچار دارای جرم مخصوص کم و تخلخل بالا و بسیار شبیه به پیت است و می تواند مقادیر زیادی آب را در خود نگه دارد. اگر چه بیوپچارهای مختلف توانایی متفاوتی در نگهداری آب خاک دارند. اما بیوپچار هنگامی که در خاک شنی استفاده شود، می تواند ظرفیت نگهداری آب را بهبود ببخشد (Briggs et al., 2005). بیوپچار نقش مهمی در ترسیب کربن در خاک دارد که این امر از خروج دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه ای از خاک جلوگیری کرده و از افزایش روند تجمعی غلظت این گازها در اتمسفر که خطرات گرم شدن کره زمین را در پی دارد، جلوگیری می کند. بیوپچارها چگالی بار سطحی بالایی دارند و CEC آنها تا ۱۱۲ سانتی مول بر کیلوگرم گزارش شده است (Cheng et al., 2008). این چگالی بار سطحی بالا اجازه می دهد تا بیوپچار حفظ کاتیون ها را به وسیله تبادل کاتیونی و تخلخل داخلی انجام دهد. بیوپچار ماده ای متخلخل با سطح ویژه بالا است. بیوپچار با افزایش مواد آلی، تخلخل و سطح ویژه خاک و بهبود فعالیت

میکروبی خاک، می‌تواند خاکدانه‌سازی را در خاک تحت تأثیر قرار داده و ساختمان خاک را بهبود بخشد (Downie et al., 2009).

Salimi Tarazoj (2019) با بررسی اثر توأم فسفر و سطوح کاه گندم و بیوپچار حاصل از آن (صفر، دو و چهار درصد) بر رشد گیاه کلزا گزارش کرد که سطوح دو درصد بیوپچار مصرفی همراه با ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، سبب افزایش رشد و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه کلزا شد. (Gavili et al., 2019) با کاربرد بیوپچار کود گاوی بر رشد و عملکرد گیاه سویا در شرایط تنش کم‌آبی در یک خاک رسی سیلتی گزارش کردند که مصرف بیوپچار به میزان ۱/۲۵ درصد سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه شد و با بهبود وضعیت نگهداری آب خاک اثرهای تنش کم‌آبی بر رشد گیاه را کاهش داد. مطالعات نشان دادند که بیش‌تر بیوپچارها به دلیل داشتن سطوح تبدلی زیاد می‌توانند منجر به افزایش نگهداری عناصر غذایی در خاک شوند. افزودن بیوپچار کارایی استفاده از عناصر غذایی خاک را افزایش می‌دهد (Major, 2010). برخی پژوهشگران گزارش کردند که با افزودن بیوپچار به خاک غلظت فسفر قابل استفاده در خاک افزایش می‌یابد (Sohi et al., 2010).

Lentz & Ippolito (2012) گزارش کردند که مصرف بیوپچار حاصل از چوب بلوط در یک خاک قلیایی و در سال اول، در pH و غلظت نیتروژن معدنی خاک تغییر معنادار ایجاد نکرد ولی پس از دو سال، غلظت آمونیوم، فسفر و پتاسیم قابل جذب گیاه در خاک را افزایش داد. (Chintala et al., 2014) گزارش کردند که بیوپچار می‌تواند قابلیت استفاده فسفر را از طریق جذب سطحی افزایش دهد. (Suppadit et al., 2012) با بررسی اثر کود مرغی و بیوپچار آن بر فراهمی عناصر غذایی در یک خاک آهکی گزارش کردند که ترکیب بیوپچار و کود مرغی باعث افزایش نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک شد. (Moradi et al., 2018) گزارش کردند که مصرف بیوپچار تولیدی از زیست‌توده‌های مختلف (پسماند هرس سیب، هرس انگور و کاه گندم) در یک خاک آهکی سبب افزایش معنادار غلظت پتاسیم و فسفر خاک شد. (Xiu et al., 2019) گزارش کردند که کاربرد بیوپچار تولیدی از کاه گندم سبب افزایش پتاسیم و فسفر قابل استفاده در یک خاک اسیدی شد.

با توجه به اهمیت اقتصادی کلزا و به ویژه روغن استحصالی از این گیاه، اهمیت بیوپچار به عنوان ماده آلی نوظهور و اهمیت و نقش ماده آلی خاک در بهبود حاصلخیزی خاک و کاهش نیاز آبی کلزا، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مصرف توأم بیوپچار و نیتروژن بر جذب عناصر غذایی پرمصرف اولیه در شرایط تنش کم‌آبی بر روی گیاه کلزا اجرا شد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه در این پژوهش از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری یک مزرعه در ایستگاه تحقیقاتی کرکج دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به صورت مرکب نمونه‌برداری و پس از هوا خشک کردن و کوبیدن، مقداری از آن از الک دو میلی‌متری برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک و از الک ۴/۷۶ میلی‌متر برای استفاده در گلدان‌ها و کاشت گیاه عبور داده شد. برای تعیین رطوبت معادل ظرفیت مزرعه (FC) از دستگاه صفحات فشاری در مکش ۳۳ کیلوپاسکال (۰/۳ بار) استفاده گردید (Black & Evans, 1965). برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند بافت خاک به روش هیدرومتری چهار زمانه (Gee & Bauder, 1986)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson & Sommers, 1982)، غلظت قابل جذب عناصر غذایی کم‌مصرف کاتیونی (آهن، روی، مس و منگنز) به روش DTPA (Lindsay & Norvell, 1978)، نیتروژن کل به روش میکروکجلال (Jones, 2001)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen & Sommers, 1982)، پتاسیم قابل جذب با استفاده از عصاره‌گیر استات آمونیوم (Jones, 2001)، pH در گل اشباع (Rhoades, 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع (Thomas, 1996) تعیین شدند (جدول ۱).

کاه گندم از ایستگاه تحقیقاتی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز تهیه و برای حذف مواد زائد و گرد و غبار، ابتدا با آب شهری سپس با آب مقطر شستشو داده شد. برای همگن‌سازی نمونه‌ها، یکنواختی فرایند پیرولیز و مصرف کمتر انرژی، پس از خشک شدن به وسیله آسیاب خرد و از الک یک میلی‌متری عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های کاه گندم مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ آمده است. 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 شدند و درب آن کاملاً بسته شد تا از ورود اکسیژن جلوگیری شود. با تزریق گاز آرگون با دبی پنج لیتر بر دقیقه به داخل کوره تا حد ممکن هوای داخل به بیرون هدایت شد و شرایط بهینه برای انجام فرایند پیرولیز فراهم شد. مواد اولیه بعد از حصول دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (با سرعت انتقال گرمای ۱۰ درجه سلسیوس در هر دقیقه) به مدت یک ساعت داخل کوره نگهداری شدند. 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. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچار شامل غلظت عناصر کربن، هیدروژن و نیتروژن به وسیله CHN Elemental Analyzer (Carlo-Erba NA-1500)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH در نسبت ۱۰:۱ بیوپچار به آب (Song & Guo, 2012)، فسفر و پتاسیم کل به روش هضم در اسید (اسید کلریدریک و اسید نیتریک) Olsen (Song & Guo, 2012; Jones, 2001)، درصد خاکستر و عملکرد بیوپچار نیز (Song & Guo, 2012) تعیین شدند (جدول ۲).

سطوح ماده آلی (کاه و بیوپچار) این پژوهش بر طبق نتایج (Salimi Tarazoj, 2019) انتخاب شدند؛ چرا که وی گزارش کرده بود که سطوح دو و چهار درصد کاه گندم باعث کاهش برخی پارامترهای رشدی گیاه کلزا در شرایط گلخانه شدند. به خاک با کلاس بافتی لوم شنی، ماده آلی در پنج سطح (صفر، ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد از دو منبع بیوپچار و کاه گندم)، به همراه ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات آمونیوم افزوده شد و به مدت ۶۰ روز در دامنه رطوبتی بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد FC و در دمای 25 ± 5 درجه سلسیوس در شرایط گلخانه نگهداری شد تا مواد آلی مصرفی با خاک کاملاً مخلوط شود.

بر اساس نتایج آزمون خاک و توصیه‌های رایج کودی، مقدار شش میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین آهن (FeEDDHA)، ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم (K_2SO_4)، ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپر فسفات‌تریپل، ۱۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)، با در نظر گرفتن وزن خاک هر گلدان (سه کیلوگرم خاک) به صورت محلول موقع کشت مصرف شد (Tehrani et al., 2014). کود نیتروژن در دو سطح (۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره) در سه نوبت در طول دوره رشد (نوبت اول موقع کشت، نوبت دوم ۳۰ روز پس از کشت (مرحله استقرار اولیه گیاه) و نوبت سوم ۵۰ روز پس از کشت گیاه (مرحله رزت) مصرف گردید.

تعداد نه عدد بذر جوانه‌دار شده کلزا کشت شدند. بعد از سبز شدن و اطمینان از استقرار آن‌ها، تعداد بوته‌ها در هر گلدان به سه عدد کاهش یافت. رطوبت خاک تا مرحله روزت (چند برگی شدن) گیاهان در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه به روش وزنی نگه‌داشته شد. بعد از رسیدن گیاهان به مرحله روزت، تنش کم‌آبی (۵۰ تا ۶۰ درصد FC) اعمال شد و تا پایان دوره رشد گیاهان (برداشت دانه) ادامه داده شد. پس از سه ماه ماده خشک شاخساره اندازه‌گیری شد. بعد از هضم نمونه‌های گیاهی به روش خشک سوزانی غلظت نیتروژن به روش میکروکجلدال، غلظت فسفر به روش زرد با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Su-6100)، غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه (Corning, Flame Photometer – 410) و غلظت عناصر کلسیم و منیزیم با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Shimadzu, AA – 6300) اندازه‌گیری شدند. تجزیه واریانس با نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد و ترسیم شکل‌ها با نرم‌افزار Excel انجام شدند.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. کلاس بافت خاک مورد استفاده لوم شنی، فقیر از ماده آلی و نیتروژن بود. این کلاس بافت در خاک‌های کشور غالب است (Shahbazi & Besharati, 2013). فسفر، آهن و روی قابل جذب نیز کمتر از سطح بحرانی تعیین شده در خاک‌های ایران برای اکثر گیاهان زراعی بود؛ اما از نظر مس و منگنز قابل جذب خاک تقریباً در وضعیت مطلوبی قرار داشت. از نظر عنصر پتاسیم نیز برای اکثر گیاهان زراعی به ویژه غلات سطح بحرانی همین عدد ۱۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک تعیین شده است. هرچند که برای برخی گیاهان پر نیاز مثل نیشکر و آفتابگردان سطح بحرانی بیشتر از این عدد می‌باشد (Shahbazi & Besharati, 2013). همچنین، خاک مورد استفاده از نظر شوری مشکل نداشت. سطح بحرانی عناصر غذایی برای گیاه کلزا به وسیله مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور فسفر ۱۵، پتاسیم ۲۰۰، آهن ۵، روی ۱، منگنز ۵ و مس ۰/۸ میلی گرم بر کیلوگرم ارائه شده است (Tehrani et al., 2014).

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

بافت خاک	شن	سیلت	رس	OC	CaCO ₃ -eq (درصد)	رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)	pH گل اشباع	EC (dS m ⁻¹)
لوم شنی	۶۲/۶	۲۲/۷	۱۴/۷	۱/۱	۱۳/۴	۱۴	۷/۷	۰/۶۹

ادامه جدول ۱- غلظت عنصرهای غذایی

نیتروژن (درصد)	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس	منگنز
(mg kg ⁻¹)						
۰/۱۳	۴/۸	۱۸۰/۵	۴/۳	۰/۵	۱/۱	۸/۴

برخی ویژگی‌های کاه و بیوچار مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ آمده است. بیوچار حاوی گروه‌های عاملی اسیدی و عامل‌های آلی همانند اسیدهای فنولی است و اگر غلظت فلزات قلیایی و قلیایی خاکی در بیوچار کم باشد انتظار می‌رود که pH بیوچار اسیدی نیز بشود (Singh et al., 2017). واکنش بیوچار مورد استفاده در این پژوهش نیز اسیدی ضعیف بود که در خاک‌های آهکی و قلیایی ایران یک نوع امتیاز تلقی می‌شود. البته هدایت الکتریکی آن به دلیل حضور فلزات و خاکستر بیشتر از مواد اولیه بود. از نظر شکل قابل جذب عناصر نیز بیوچار مورد استفاده دارای مقداری پتاسیم، فسفر و عناصر کم مصرف به ویژه آهن و روی بود که در خاک‌های آهکی می‌توانند باعث بهبود رشد گیاه شوند، همچنین، بر اثر حرارت دادن زیست توده اولیه اندکی آمونیوم و نیترات در بیوچار تولید می‌شود که به عنوان نیتروژن قابل جذب بیوچار شناخته می‌شوند (Reyhanitabar et al., 2020).

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کاه گندم و بیوچار مورد استفاده در این پژوهش.

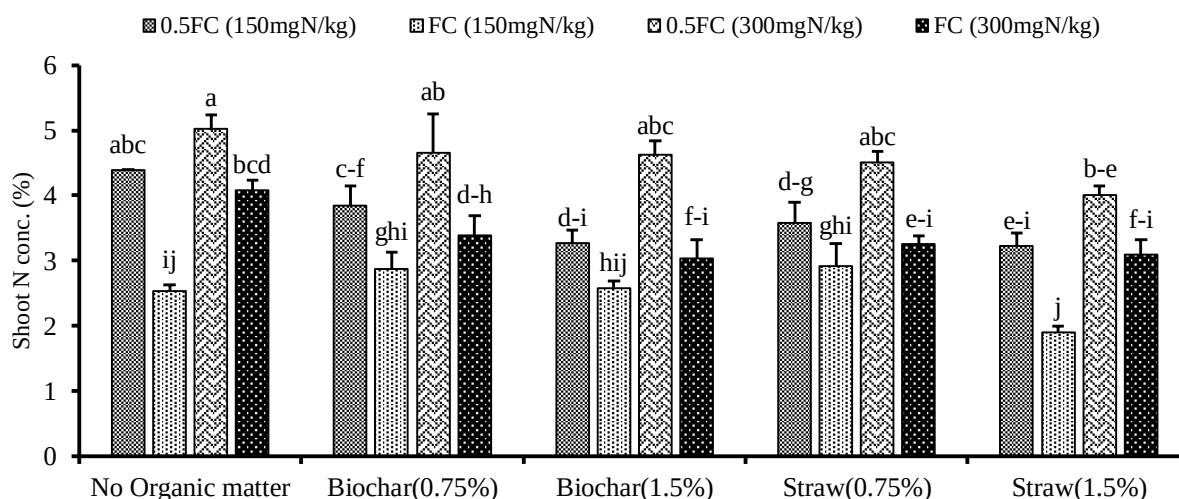
بیوچار	کاه گندم	صفت اندازه‌گیری شده
۶/۳	۷/۵	pH _(1:10)
۴/۴۸	۰/۶۸	EC _(1:10) (dS m ⁻¹)
۲۲/۷	۱۶/۶	مقدار خاکستر (درصد)
۴۷/۷	۳۹/۷	کربن کل (درصد)
۲/۲	۶/۲	هیدروژن کل (درصد)
۷۰/۲	۶۶/۱	C/N
-	۰/۱۵	H/C
۳۷/۴	-	عملکرد بیوچار (درصد)
۰/۶۸	۰/۶	نیتروژن کل (درصد)
۱/۱۸	۰/۷۹	فسفر (g kg ⁻¹)
۴۰/۶۵	۲/۶۶	پتاسیم (g kg ⁻¹)
۲۶/۶۸	۳/۲۷	کلسیم (g kg ⁻¹)
۵/۸۴	۱/۹۲	منیزیم (g kg ⁻¹)
۴۵۰	۴۲۰	آهن (mg kg ⁻¹)
۱۸/۰۹	۱۶/۵۹	روی (mg kg ⁻¹)
۸/۷۱	۷/۶۲	مس (mg kg ⁻¹)
۳۰/۴۴	۳۰/۰۵	منگنز (mg kg ⁻¹)

غلظت نیتروژن شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و سطوح رطوبتی بر غلظت نیتروژن شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار اما اثرهای متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های غلظت نیتروژن شاخساره برای اثر متقابل سه جانبه ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین غلظت نیتروژن شاخساره در تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC حاصل شد که دلیل این امر کاهش رشد گیاه و اثر تغلیظ می‌باشد که البته با تیمارهای ۰/۷۵ درصد بیوچار با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC و ۰/۷۵ درصد کاه با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC تفاوت معنادار نداشت. همچنین، کمترین غلظت نیتروژن شاخساره در تیمار ۱/۵ درصد کاه با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC به‌دست آمد (شکل ۱). با توجه به شکل ۱، اعمال تنش کم‌آبی در تمام سطوح ماده آلی سبب افزایش غلظت نیتروژن شاخساره گیاه کلزا شد. همچنین، با توجه به افزایش وزن خشک شاخساره در تیمارهای حاوی بیوچار و کاه نسبت به تیمار عدم مصرف ماده آلی، به نظر می‌رسد که غلظت نیتروژن در این تیمارها به‌دلیل اثر رقت کاهش یافته است (شکل ۱).

افزایش غلظت نیتروژن شاخساره در شرایط تنش کمبود آب در خاک نسبت به رطوبت ظرفیت مزرعه در گیاه یونجه به‌وسیله Mahmoudi et al. (2015) و Markarian et al. (2015)، در گیاه سیب زمینی به‌وسیله Motalebifard et al. (2016) و در گیاه اسفناج به‌وسیله Gavili et al. (2019) گزارش شده است. آنان دلیل این افزایش غلظت را وقوع پدیده اثر تغلیظ بر اثر کاهش ماده خشک گیاه اعلام کردند (Marschner, 2011). افزایش غلظت نیتروژن در گیاهانی که تحت شرایط تنش کم‌آبی هستند به‌دلیل تجمع سریع اسید آمینه‌هایی است که به پروتئین تبدیل نشده‌اند (Salehi et al., 2013). همچنین Gavili et al. (2019) گزارش کرد که کاربرد ۱/۲۵، ۲/۲۵ و ۵ درصد بیوچار غلظت نیتروژن در گیاه سویا را به‌ترتیب ۱۳، ۲۴ و ۴۸ درصد نسبت به شاهد افزایش داد، هرچند که افزایش تیمار ۱/۲۵ درصد

بیوچار معنادار نبود. این محقق بیان کرد که بیوچار همانند یک منبع حاصلخیزکننده و همچنین نگهدارنده تعادل غذایی در زیست‌بوم خاک با فراهم آوردن و نگهداری عناصر غذایی از جمله نیتروژن سبب افزایش رشد و بازدهی محصول می‌شود. (Azimzadeh et al., 2019). گزارش کردند که مصرف هم‌زمان بیوچار و کود فسفر در خاک، غلظت نیتروژن گیاه ذرت را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. (Darabi Kandlaji et al., 2018). گزارش کردند که با کاهش رطوبت خاک نیترات‌سازی به‌طور معنادار کاهش یافت.



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های غلظت نیتروژن شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر ماده آلی، نیتروژن و رطوبت بر ماده خشک، غلظت و مقدار جذب نیتروژن و فسفر شاخساره گیاه کلزا.

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییر
مقدار فسفر	غلظت فسفر	مقدار نیتروژن	غلظت نیتروژن		
۲۷/۵۵۷**	۰/۰۰۱ ^{ns}	۲۱۸۲/۱۱۵**	۱/۴۹۸**	۴	ماده آلی
۱۰۰/۱۸۲**	۰/۰۱۱**	۱۸۳۳۱/۹۶۷**	۱۱/۰۴۲**	۱	نیتروژن
۱/۴۴۰ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۳۶۰/۹۵۵ ^{ns}	۰/۱۲۰ ^{ns}	۴	ماده آلی × نیتروژن
۴۹۵/۷۶۵**	۰/۰۰۷*	۱۱۹۴۵/۲۴۴**	۱۹/۷۹۲**	۱	رطوبت خاک
۱۳/۰۲۳**	۰/۰۰۱ ^{ns}	۸۷۸/۱۸۰*	۰/۰۷۴ ^{ns}	۴	ماده آلی × رطوبت خاک
۰/۱۶۵ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۳۸۶/۶۳۹ ^{ns}	۰/۰۳۴ ^{ns}	۱	نیتروژن × رطوبت خاک
۳/۸۲۴ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۸۹۵/۰۲۳*	۰/۴۰۶ ^{ns}	۴	ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک
۳/۳۳۹	۰/۰۰۱	۳۱۵/۳۹۳	۰/۱۸۸	۴۰	خطا
۱۶/۸	۱۷/۲	۱۸/۵	۱۲/۳		ضریب تغییرات (درصد)

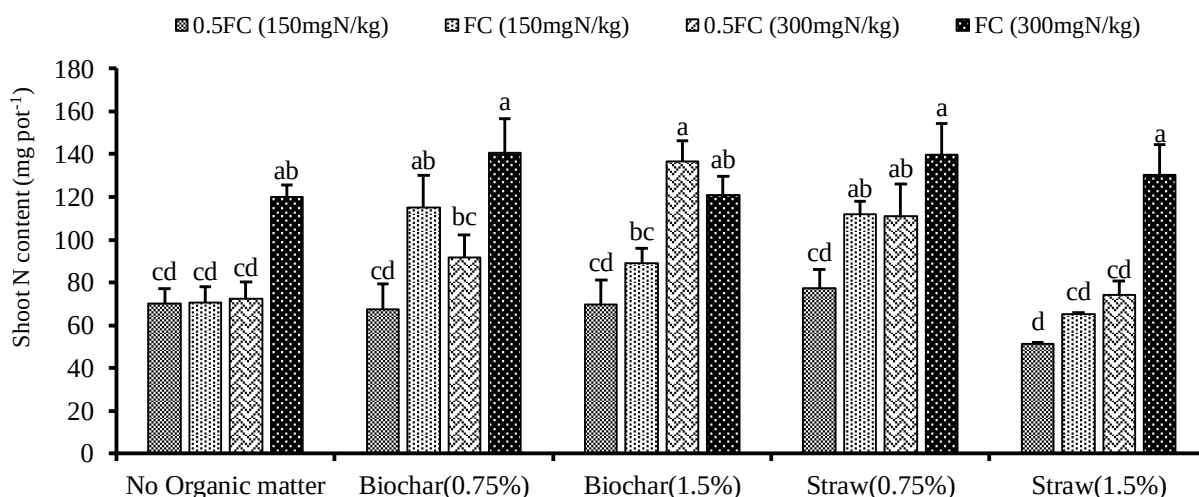
^{ns}, * و ** به ترتیب غیرمعنادار، معنادار در سطح احتمال یک و پنج درصد

(Mohawesh et al., 2018) با بررسی اثر بیوچار ضایعات کلم بروکلی بر رشد و عملکرد گوجه فرنگی گزارش کردند که مصرف سطوح ۲/۵ و ۵ درصد بیوچار سبب افزایش غلظت نیتروژن شاخساره گیاه شده است. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار سبب افزایش و بهبود کارایی کودهای نیتروژنی در خاک‌های مختلف و در نهایت جذب بیشتر آن به وسیله گیاه می‌شود (Ding et al., 2010). در گیاهان غلظت عناصر غذایی بسته به زمان رشد متغیر بوده و برای گیاه کلزا در ابتدای دوره‌ی گل‌دهی در برگ‌های جوان غلظت نیتروژن بین ۴ تا ۵/۵ درصد گزارش شده است (Malakouti & Homaei, 2004). با این حال با گذشت زمان و سپری شدن دوره رشد گیاه از غلظت عناصر غذایی به‌ویژه

نیتروژن کاسته می‌شود. در این پژوهش غلظت نیتروژن شاخساره گیاه کلزا بین ۱/۵ تا ۵/۵ درصد متغیر بود. غلظت نیتروژن در کل گیاه کلزا بین ۲/۵ تا ۴ گزارش شده است. غلظت‌های کمتر از ۲ درصد کمبود نیتروژن را در این گیاه نشان می‌دهد (Grant & Bailey, 1993).

مقدار جذب نیتروژن شاخساره

مقدار جذب نیتروژن از حاصل‌ضرب غلظت در ماده خشک به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و سطوح رطوبتی و همچنین اثر متقابل ماده آلی × رطوبت و ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی در سطح احتمال پنج درصد بر مقدار جذب نیتروژن شاخساره کلزا معنادار ولی سایر اثرهای متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۳).



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب نیتروژن شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

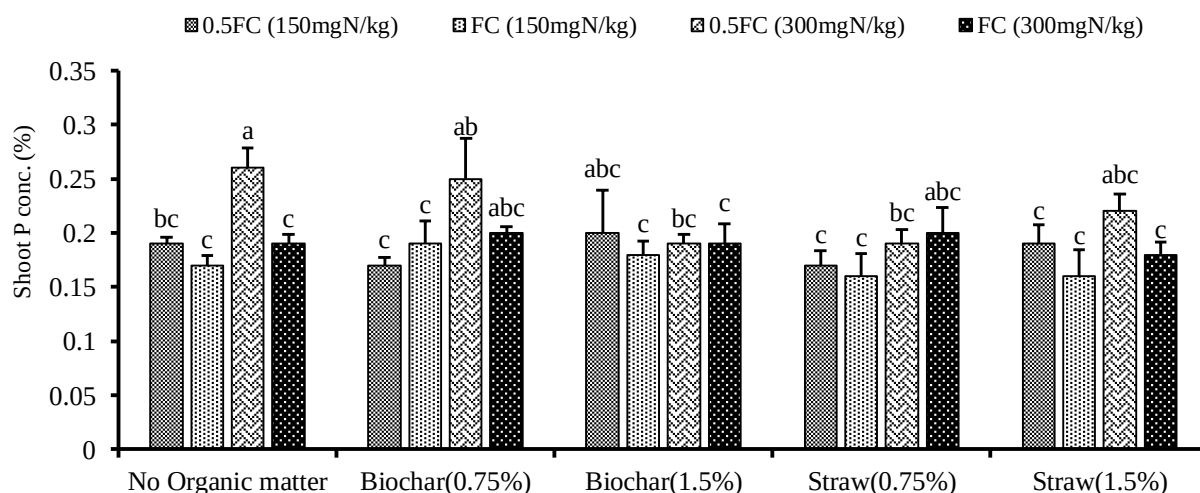
مقایسه میانگین‌های مقدار جذب نیتروژن شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین مقدار نیتروژن شاخساره در تیمار ۰/۷۵ درصد بیوپار با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC اندازه‌گیری شد، در نتیجه سبب افزایش ۱۷ درصدی مقدار نیتروژن شاخساره نسبت به تیمار بدون مصرف ماده آلی شد. ولی با برخی از تیمارها تفاوت معنادار نداشت (شکل ۲). همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در تیمار ۰/۷۵ درصد بیوپار تفاوت معنادار بین دو سطح نیتروژن مصرفی در سطح رطوبت FC وجود نداشت. در تیمار ۱/۵ درصد کاه به‌رغم مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک به‌دلیل نسبت C/N بالا مقدار جذب کاهش یافت و همانند تیمار ۰/۷۵ درصد بیوپار با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC عمل کرد و تفاوت معنادار مشاهده نشد. از نتایج قابل‌توجه این تحقیق گلدانی این است که بیوپار ۱/۵ درصد در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC یعنی وقوع تنش همانند سطح رطوبت بدون تنش FC عمل کرده و سبب نگهداشت آب و در نتیجه سبب افزایش مقدار جذب نیتروژن به همان اندازه در سطح رطوبت FC شده است و این دو سطح از لحاظ آماری با هم تفاوت معنادار ندارند (شکل ۲).

(Lehmann et al. 2011) نیز گزارش کردند که با کاربرد بیوپار، رشد گیاه و در نتیجه مقدار جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم افزایش یافت. (Musa 2017) گزارش کرد که استفاده از ۱۰ تن بر هکتار بیوپار تولیدی از کاه برنج باعث افزایش عملکرد بادام زمینی و تثبیت نیتروژن در منطقه مورد مطالعه شد. (Salimi Tarazoj 2019) گزارش

کرد که کمترین مقدار جذب نیتروژن به وسیله کلزا در شرایط گلخانه در سطح چهار درصد کاه بود. همچنین، در پژوهش آنان بیوچار تولیدی از کاه گندم در سطوح دو و چهار درصد مصرفی نسبت به عدم مصرف ماده آلی هم باعث کاهش غلظت نیتروژن و هم باعث کاهش مقدار جذب نیتروژن شاخساره شد. اما در مقام مقایسه مقدار جذب نیتروژن شاخساره در تیمار حاوی کاه کمتر از بیوچار بود. (Gavili et al., 2019) با بررسی اثر بیوچار کود گاوی بر رشد و عملکرد اسفناج در شرایط تنش کم آبی، گزارش کردند که این تنش به طور معنادار سبب کاهش مقدار جذب نیتروژن شاخساره گیاه شد. این پژوهشگران افزایش غلظت و کاهش جذب نیتروژن شاخساره گیاه در شرایط تنش کم آبی را به دلیل کاهش وزن خشک گیاه و در نتیجه افزایش تجمع نیتروژن در گیاه بیان کردند. همچنین این پژوهشگران بیان کردند که مصرف بیوچار سبب افزایش مقدار جذب نیتروژن شاخساره شد و بیشترین مقدار نیتروژن را با مصرف ۵ درصد بیوچار در سطح رطوبت ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه گزارش کردند. (Maftu'ah & Nursyamsi, 2019) با بررسی اثر سطوح مختلف بیوچار پوست نارگیل بر رشد و عملکرد ذرت گزارش کردند که مصرف ۴ تن بر هکتار بیوچار سبب افزایش مقدار جذب عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه ذرت شد.

غلظت فسفر شاخساره

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر اصلی نیتروژن در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی سطوح رطوبتی در سطح احتمال پنج درصد بر غلظت فسفر شاخساره معنادار اما سایر اثرهای اصلی و متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین های غلظت فسفر شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین غلظت فسفر شاخساره در تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC به دست آمد اگرچه با برخی از تیمارهای دیگر تفاوت معنادار نداشت (شکل ۳). افزایش فراهمی فسفر در خاک سبب اثر بر عملکرد روغن دانه، غلظت فسفر و انتقال آن به دانه گیاه کلزا می شود (Lickfett et al., 1999). با توجه به شکل ۴ مشاهده می شود در شرایط این پژوهش گلخانه ای با افزایش سطح نیتروژن مصرفی غلظت فسفر شاخساره افزایش یافت. این امر نشان دهنده تأثیر غیرمستقیم نیتروژن در بهبود اجزای عملکرد ریشه و کمک به جذب فسفر است. با کاربرد کود اوره، pH خاک به طور موضعی هم که شده کاهش یافته و فراهمی فسفر در خاک قلیایی افزایش می یابد (Marschner, 2011).



شکل ۳- مقایسه میانگین های غلظت فسفر شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

Salimi Tarazoj (2019) گزارش کرد مصرف توأم بیوپچار و فسفر سبب افزایش غلظت فسفر شاخساره گیاه کلزا در یک خاک قلیایی شد. البته در مقایسه با پژوهش حاضر، (Salimi Tarazoj (2019) از سطوح بالای ماده آلی (۲ و ۴ درصد) استفاده کرده بود. با این حال، این پژوهشگر دلیل افزایش غلظت فسفر گیاه کلزا را، مصرف بیوپچار حاوی فسفر اعلام کرد. ولی کاهش غلظت فسفر در تیمارهای حاوی کاه گندم را به دلیل کاهش رشد گیاه بیان کرد. (Mbah et al. (2017 تأثیر بیوپچار حاصل از چوب جنگلی را بر رشد خیار بررسی و گزارش کردند که افزودن بیوپچار حاصل از چوب جنگلی به خاک سبب افزایش غلظت فسفر در شاخساره خیار شد. (Major et al. (2010 با کاربرد کود مرغی و بیوپچار حاصل از آن، افزایش در غلظت فسفر، پتاسیم، آهن، روی، منگنز و مس در گیاه را گزارش کردند. علاوه بر این بیان کردند که بیوپچار مذکور دارای مقادیر زیادی از عناصر ذکر شده بود و با تأثیر بر pH، فعالیت ریزجانداران، ظرفیت تبادل کاتیونی و حفظ رطوبت خاک در افزایش فراهمی عناصر غذایی نقش بسزایی دارد. (Madiba et al. (2016 با بررسی اثر بیوپچار حاصل از کود مرغی و کاه گندم بر غلظت فسفر گیاه گندم گزارش کردند که کاربرد بیوپچار سبب افزایش غلظت فسفر در گیاه گندم شد. (Azimzadeh et al. (2019 گزارش کردند که مصرف هم‌زمان بیوپچار و کود فسفر در خاک، غلظت فسفر گیاه ذرت را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. (Najafi et al. (2020 گزارش کردند که با کاهش رطوبت خاک، غلظت فسفر ریشه گیاه یونجه کاهش یافت.

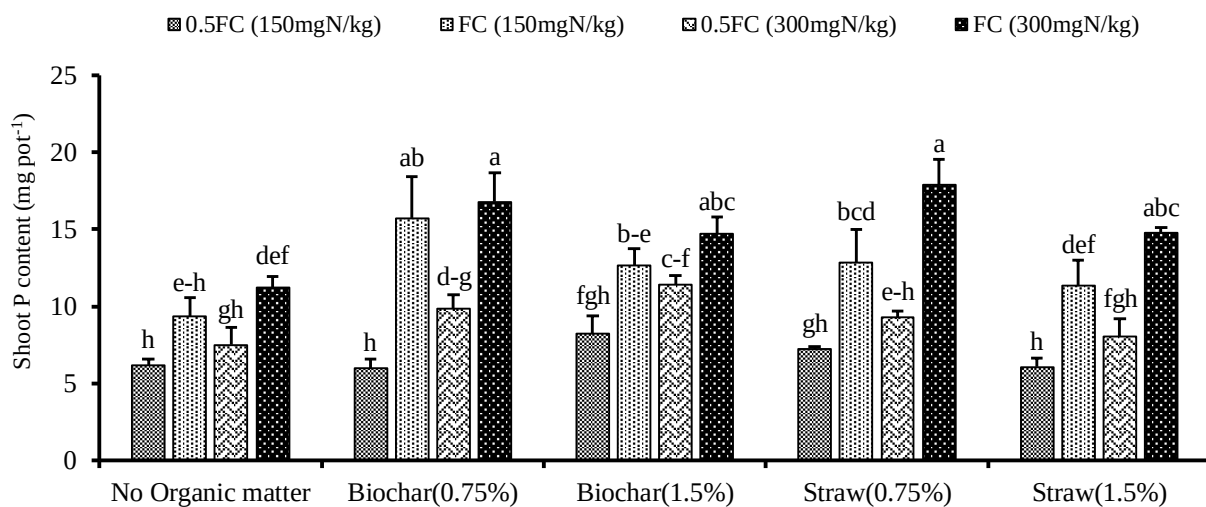
مقدار جذب فسفر شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن، سطوح رطوبتی و اثر متقابل ماده آلی × رطوبت در سطح احتمال یک درصد بر مقدار فسفر شاخساره معنادار ولی سایر اثرهای متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب فسفر شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین مقدار جذب فسفر در تیمار ۰/۷۵ درصد کاه با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC به‌دست آمد که با تیمار ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد بیوپچار و ۱/۵ درصد کاه با ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبت FC و با تیمار ۰/۷۵ درصد بیوپچار با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC تفاوت معنادار نداشت. دلیل این افزایش را می‌توان افزایش وزن ماده خشک شاخساره در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک به دلیل اثر متقابل مثبت شناخته شده بین دو عنصر نیتروژن و فسفر بیان کرد. نیتروژن به‌طور غیرمستقیم از طریق بهبود اجزای عملکرد ریشه کمک زیادی به جذب فسفر می‌کند (Pirzad et al., 2015).

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر ماده آلی، نیتروژن و رطوبت بر غلظت و مقدار جذب پتاسیم و کلسیم شاخساره گیاه کلزا.

منابع تغییر		درجه آزادی		میانگین مربعات	
غلظت پتاسیم	مقدار پتاسیم	غلظت کلسیم	مقدار کلسیم	غلظت پتاسیم	مقدار کلسیم
۴	۲/۲۵۵**	۱۹۵۵۹/۶۶**	۰/۳۸۷**	۲۷۹۰/۴۱**	ماده آلی
۱	۰/۷۸۲*	۱۶۹۹۸/۶۳**	۱/۶۵۷**	۱۸۵۳۲/۱۳**	نیتروژن
۴	۰/۰۲۳ ^{ns}	۱۶۲۵/۶۶ ^{ns}	۰/۰۵۶ ^{ns}	۸۵۴/۹۸ ^{ns}	ماده آلی × نیتروژن
۱	۶/۳۷۰**	۶۴۲۲۸/۷۰**	۱/۰۱**	۱۲۷۱۹۹/۳۱**	رطوبت خاک
۴	۰/۱۲۴ ^{ns}	۱۱۵/۳۰ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۱۳۲۷/۷۵ ^{ns}	ماده آلی × رطوبت خاک
۱	۰/۰۰۴ ^{ns}	۴۸۱/۷۲ ^{ns}	۰/۰۱۹ ^{ns}	۱۸۶۱/۲۷ ^{ns}	نیتروژن × رطوبت خاک
۴	۰/۱۰۰ ^{ns}	۳۲۹/۹۵ ^{ns}	۰/۰۰۷ ^{ns}	۲۰۳/۰۰۱ ^{ns}	ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک
۴۰	۰/۱۳۸	۹۲۰/۳۸	۰/۰۳۲	۵۴۵/۰۲	خطا
ضریب تغییرات (درصد)		۱۳/۲	۱۸/۹	۸/۱	۱۸/۱

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



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب فسفر شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

همچنین کمترین مقدار جذب فسفر اندازه‌گیری شده نیز در تیمار ۰/۷۵ درصد بیوچار با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC حاصل شد. البته با تیمارهای ۱/۵ درصد کاه و عدم مصرف ماده آلی با همان مقدار نیتروژن مصرفی در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC تفاوت معنادار نداشت (شکل ۴). تنش کمبود رطوبت خاک اغلب به دلیل کاهش تعرق، مختل شدن سامانه انتقال فعال و نفوذپذیری غشاء و کاهش سرعت انتشار عناصر غذایی از محیط خاک به سطح جذب کننده ریشه سبب کاهش جذب عنصر به وسیله ریشه می‌شود و کارایی ریشه گیاه نیز در نتیجه کمبود رطوبت کاهش می‌یابد. البته خاک‌های مختلف به علت توانایی متفاوتی که از نظر تثبیت فسفر دارند از این نظر متفاوت‌اند. همچنین توانایی گیاهان برای مدارا کردن با تنش کم‌آبی با میزان فسفر کافی افزایش می‌یابد. با این حال، واکنش گیاهان به فراهمی فسفر و آب در ویژگی‌های ریشه و اندام هوایی هم متفاوت است (Pirzad et al., 2015).

Agbna et al. (2017) گزارش کردند که استفاده از بیوچار کاه گندم (۲۵ تن بر هکتار) همراه با آبیاری متناوب در گیاه گوجه فرنگی منجر به نتایج مشابه استفاده از آبیاری کامل بدون مصرف بیوچار شد. آنان چنین نتیجه گرفتند که کاربرد بیوچار با روش آبیاری متناوب می‌تواند کاهش تولید گوجه فرنگی و همچنین بهبود کیفیت میوه‌ها را در شرایط کم‌آبی جبران کند. در پژوهش حاضر مشاهده شد که تیمار ۰/۷۵ درصد بیوچار با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC با نگهداری رطوبت خاک تا حدودی سبب کاهش اثرهای تنش کم‌آبی بر گیاه شده و در نتیجه منجر به افزایش مقدار فسفر شاخساره همانند سطح رطوبت FC شده است و تفاوت معنادار بین این دو تیمار وجود نداشت.

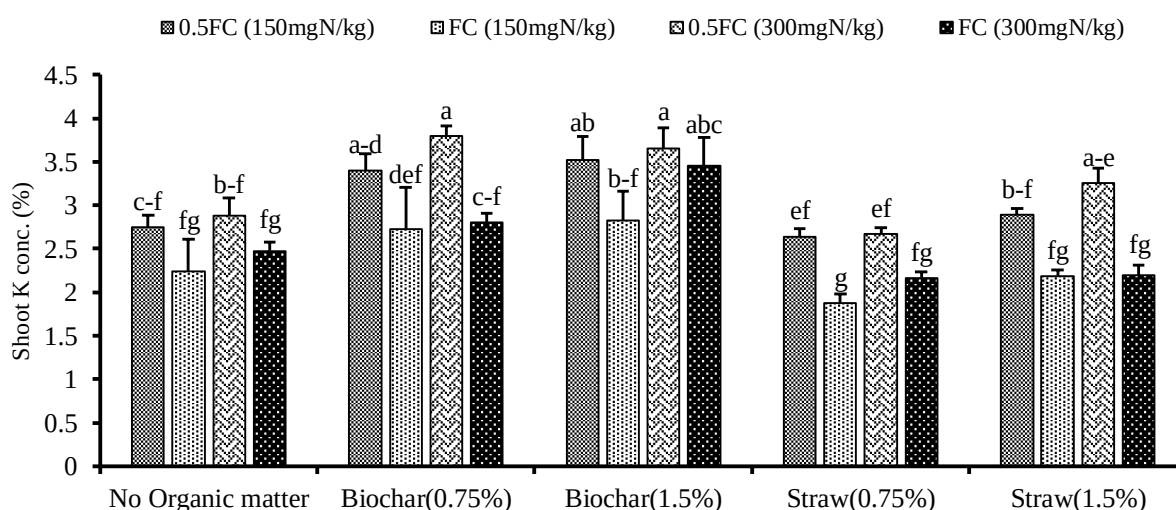
Madiba et al. (2016) با کاربرد بیوچار حاصل از کود مرغی و کاه گندم، افزایش در مقدار فسفر شاخساره گندم را گزارش کردند. آنان همچنین بیان کردند که افزایش در مقدار فسفر شاخساره در بیوچار کود مرغی بیشتر از بیوچار کاه گندم بود که دلیل آن استفاده از منو کلسیم فسفات در تغذیه مرغ و همچنین نسبت C/N کمتر در بیوچار کود مرغی نسبت به بیوچار کاه گندم عنوان شد. با این حال اثر بیوچار بر مقدار جذب فسفر در گیاه به نوع و مقدار بیوچار مصرفی و البته مدت زمان بستگی دارد. بدیهی است که تأثیر سال اول در سالهای آتی ممکن است مشاهده نشود. Mbah et al. (2017) با بررسی اثر بیوچار چوب جنگل بر عملکرد خیار گزارش کردند که مصرف بیوچار سبب افزایش مقدار فسفر شاخساره در خیار شد. Amin et al. (2018) نیز با بررسی اثر بیوچار حاصل از ساقه ذرت بر رشد

ذرت گزارش کردند که با افزایش سطوح بیوپچار مصرفی از ۶/۵ تا ۱۸ گرم بر کیلوگرم خاک مقدار جذب فسفر شاخساره ذرت به صورت معنادار افزایش یافت.

Gavili et al. (2019) نیز گزارش کردند که مصرف ۲/۵ و ۵ درصد بیوپچار کود گاوی در شرایط تنش کم آبی سبب افزایش ۳۷ و ۸۴ درصدی مقدار جذب فسفر شاخساره گیاه اسفناج نسبت به تیمار شاهد شد. همچنان بیان کردند که در تیمارهای بدون ماده آلی تنش کم آبی از طریق کاهش ماده خشک گیاه سبب کاهش مقدار فسفر شاخساره شد. این پژوهشگران افزایش مقدار فسفر را با مصرف بیوپچار به غنی بودن بیوپچار از فسفر که به نوبه خود سبب افزایش فسفر قابل جذب در خاک می شود و همچنین بهبود شرایط تبدیل فسفر آلی به معدنی بیان کردند. Azimzadeh et al. (2020) گزارش کردند که مصرف بیوپچار در خاک، جذب فسفر به وسیله گیاه ذرت را نسبت به شاهد به طور معنادار افزایش داد.

غلظت پتاسیم شاخساره

پتاسیم از عناصر پر مصرف اولیه است که از نظر کمیت جذب پس از نیتروژن قرار دارد. این عنصر در همه گیاهان بیشتر از فسفر جذب می شود و اگرچه جزء ساختار گیاهان نیست اما در ساختمان بیش از ۸۰ آنزیم مهم دخالت دارد. پتاسیم در تنظیم روابط آبی گیاهان و مقاومت به سرما عنصر شناخته شده ای است (Havlin et al., 2016). نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و سطوح رطوبتی در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی نیتروژن مصرفی در سطح احتمال پنج درصد بر غلظت پتاسیم شاخساره کلزا معنادار اما اثرهای متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین های غلظت پتاسیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین غلظت پتاسیم در تیمار ۰/۷۵ درصد بیوپچار با مصرف ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC به دست آمد. کمترین مقدار پتاسیم نیز در تیمار ۰/۷۵ درصد کاه با مصرف ۱۵۰ میلی گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC حاصل شد (شکل ۵).



شکل ۵- مقایسه میانگین های غلظت پتاسیم شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

Gonzales & Salas (1995) دلیل افزایش جذب پتاسیم به وسیله گیاه در شرایط تنش کم آبی در گیاهانی همانند ذرت را جذب فعال این یون دانستند. آنان معتقد بودند که گیاه برای افزایش مقاومت خود در شرایط تنش کم آبی بر خلاف پدیده انتشار با مصرف انرژی، پتاسیم را جذب فعال می کند. Logan et al. (1997) گزارش کردند که دلیل افزایش جذب پتاسیم

در شرایط تنش کم آبی این است که تر و خشک شدن متوالی و طولانی مدت در خاک سبب آزاد شدن پتاسیم از بین لایه‌های رسی شده و سبب افزایش غلظت پتاسیم در خاک و افزایش جذب پتاسیم به وسیله گیاه می‌شود. افزایش غلظت پتاسیم با مصرف نیتروژن می‌تواند ناشی از دو عامل باشد. اول اینکه جذب آمونیوم به وسیله ریشه گیاه و آزادسازی H^+ به محلول خاک باعث کاهش pH خاک می‌شود و کاهش pH خاک در خاک ریزوسفر ممکن است به آزادسازی K^+ غیرتبادلی شده بیانجامد. دوم اینکه تبادل کاتیونی میان آمونیوم حاصل از هیدرولیز اوره و پتاسیم، سبب آزاد شدن پتاسیم به محلول خاک و افزایش فراهمی آن برای ریشه گیاه می‌شود (Marschner, 2011).

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش نیتروژن مصرفی در هر دو سطح بیوچار غلظت پتاسیم شاخساره نسبت به تیمار شاهد در سطح رطوبت FC افزایش معنادار داشت. همچنین در سطوح دارای تنش کم آبی نیز تیمارهای بیوچار مصرفی سبب افزایش غلظت پتاسیم نسبت به تیمار بدون ماده آلی و تیمارهای کاه شدند. (Inal et al. 2015) گزارش کردند که کاربرد بیوچار سبب افزایش غلظت عناصر پتاسیم، کلسیم، منیزیم، فسفر و نیتروژن در گیاه لوبیا شد. (Lal Arab et al. 2015) گزارش کردند که با افزودن دو سطح بیوچار چوب (۵ و ۱۰ تن بر هکتار) غلظت پتاسیم شاخساره گیاه سویا افزایش یافت. این پژوهشگران دلیل این امر را به بهبود فراهمی پتاسیم در خاک‌های تیمار شده با بیوچار نسبت دادند. همچنین آنان گزارش کردند که بیوچار با افزایش پتاسیم قابل جذب خاک سبب افزایش فراهمی آن و در نتیجه افزایش رشد گیاه شد.

Mbah et al. (2017) با بررسی اثر بیوچار تولید شده از چوب جنگل بر رشد و عملکرد خیار گلخانه‌ای گزارش کردند که افزودن بیوچار به خاک به طور معنادار سبب افزایش غلظت پتاسیم شاخساره در خیار شد. (Mohawesh et al. 2018) نیز افزایش غلظت پتاسیم شاخساره گوجه فرنگی را با مصرف سطوح یک درصد بیوچار ضایعات کلم بروکلی گزارش کردند. (Gavili et al. 2019) گزارش کردند که در شرایط تنش کم آبی (۷۰ و ۵۵ درصد ظرفیت مزرعه) غلظت پتاسیم شاخساره اسفناج افزایش ۱ و ۱۸ درصدی نشان داد. البته آنان دلیل این امر را کاهش ماده خشک تولیدی در شرایط تنش کم آبی و اثر تغلیظ بیان کردند. همچنین این پژوهشگران افزایش غلظت پتاسیم با کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار کود گاوی را گزارش و بیان کردند که بهبود شرایط حاصلخیزی و افزایش غلظت پتاسیم قابل استفاده خاک بر اثر افزودن بیوچار دلیل افزایش غلظت پتاسیم در گیاهان رشد کرده در خاک‌های تیمار شده با بیوچار است.

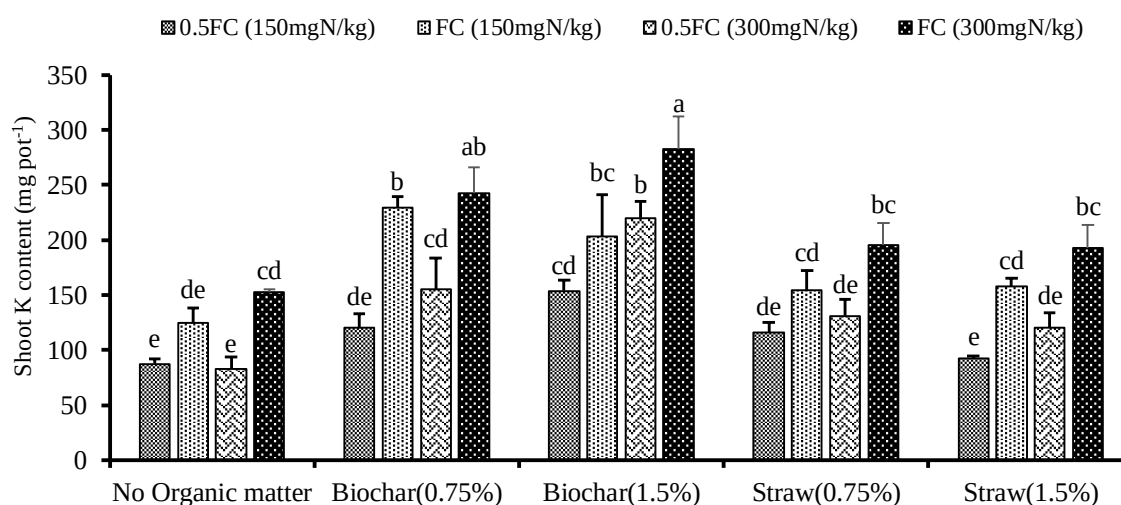
Salimi Tarazoj (2019) گزارش کرد که تیمار چهار درصد کاه گندم سبب افزایش غلظت پتاسیم شاخساره کلزا شد که دلیل آن را به کاهش رشد گیاه و اثر تغلیظ ربط داد. درحالی‌که در پژوهش گلخانه‌ای حاضر به دلیل کاهش مقدار مصرف ماده آلی (۷۵/۰ و ۱/۵ درصد) نسبت به پژوهش یاد شده رشد گیاه بر اثر مصرف کاه افزایش یافته و در نتیجه بیشترین غلظت در تیمار ۱/۵ درصد بیوچار مشاهده شد. پژوهشگران متعددی گزارش کرده‌اند که مصرف بیوچار میزان پتاسیم کل و پتاسیم قابل جذب خاک را افزایش می‌دهد. به ویژه افزایش دمای پیرولیز باعث افزایش غلظت نسبی پتاسیم در بیوچار می‌شود (Liu et al., 2014). (Azimzadeh et al. 2019) گزارش کردند که مصرف بیوچار در خاک، غلظت پتاسیم گیاه ذرت را نسبت به شاهد به طور معنادار تغییر نداد.

مقدار جذب پتاسیم شاخساره

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و سطوح رطوبتی در سطح احتمال یک درصد بر مقدار پتاسیم شاخساره معنادار ولی اثرهای متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۴). در خاک مورد استفاده در این پژوهش غلظت پتاسیم قابل جذب خاک (۱۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم) نزدیک به سطح بحرانی تعیین شده برای غلات (۱۸۰ تا ۲۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های آهکی ایران قرار داشت. خاک مورد استفاده از نظر پتاسیم قابل جذب دچار کمبود نبود. با این حال، اثر مثبت بیوچار و نیتروژن مصرفی بر جذب پتاسیم قابل توجه است. پتاسیم

از طریق مکانسیم پخشیدگی به سمت ریشه حرکت می‌کند و لذا هر گونه تنش کم‌آبی سبب کاهش ضریب پخشیدگی مؤثر این عنصر و در نهایت کاهش میزان انتقال آن می‌شود.

مقایسه میانگین‌های مقدار جذب پتاسیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی جهت معرفی بهترین ترکیب تیماری نشان داد که بیشترین مقدار پتاسیم در تیمار ۱/۵ درصد بیوپچار با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC اندازه‌گیری شد که البته با تیمار ۰/۷۵ درصد بیوپچار با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC تفاوت معنادار نداشت. کمترین مقدار جذب پتاسیم نیز در تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC به‌دست آمد (شکل ۶).



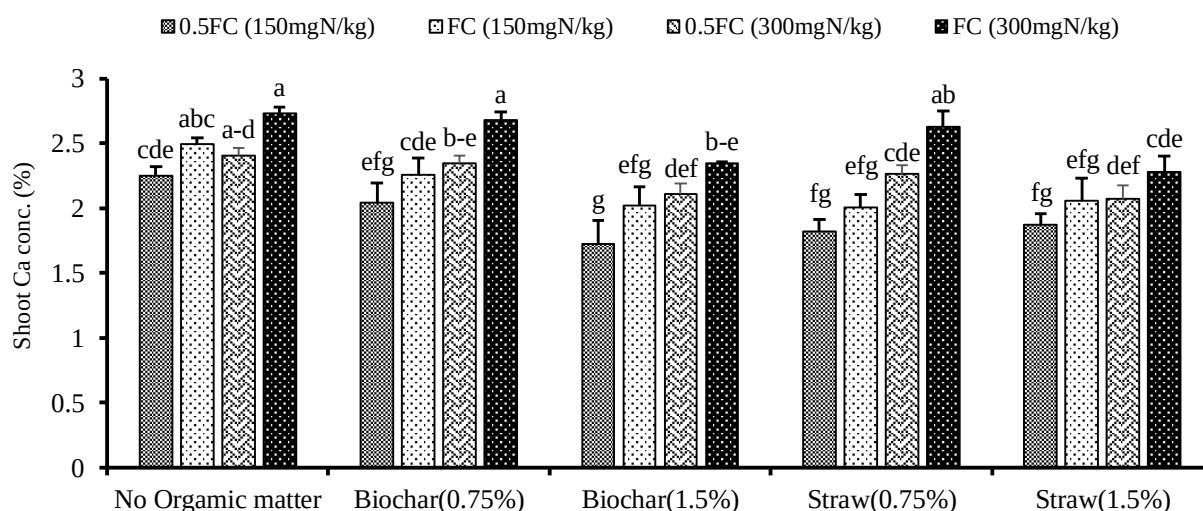
شکل ۶- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب پتاسیم شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

کاهش مقدار جذب پتاسیم در تیمارهای حاوی تنش کم‌آبی را می‌توان به کاهش رشد شاخساره گیاه نسبت داد که این نیز سبب کاهش مقدار جذب پتاسیم می‌شود. در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود که بیوپچار مصرفی (هر دو سطح ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد) با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن سبب افزایش مقدار پتاسیم نسبت به تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن شده است که نتیجه قابل توجهی است. به این معنا که با مصرف بیوپچار به رغم کاهش ۱۰۰ درصدی نیتروژن مصرفی در مورد مقدار جذب پتاسیم تفاوت معنادار مشاهده نشد. (Zemanová et al., 2017) با بررسی اثر کاربرد بیوپچار بر عناصر غذایی در گیاه اسفناج و خردل گزارش کردند که استفاده از بیوپچار در خاک در مقدار پنج درصد سبب افزایش مقدار جذب پتاسیم شاخساره گیاه نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین پژوهشگران با بررسی اثر بیوپچار بر جذب عناصر غذایی پر مصرف به‌وسیله گندم گزارش کردند که کاربرد دو سطح یک و دو درصد از دو بیوپچار مختلف (کاه گندم و تفال پسته) سبب افزایش مقدار جذب پتاسیم شاخساره گندم شد (Karam et al., 2018). (Salimi Tarazoj, 2019) نیز با بررسی اثر توأم بیوپچار حاصل از کاه گندم و فسفر بر رشد و عملکرد کلزا تحت شرایط گلخانه‌ای گزارش کرد که بیوپچار در سطوح دو و چهار درصد سبب افزایش مقدار جذب پتاسیم نسبت به شاهد شد. در پژوهش گلخانه‌ای حاضر نیز همانند پژوهش (Salimi Tarazoj, 2019) هر دو سطح بیوپچار سبب افزایش مقدار پتاسیم شد. بیوپچار از طریق ذخیره عناصر غذایی، تقویت تأثیر کودی، بهبود شرایط فیزیکی و کاهش آبشویی عناصر غذایی باعث افزایش باروری خاک می‌شود. همچنین این اصلاح کننده می‌تواند سبب تقویت نگهداشت. عناصر غذایی و جذب کاتیونی شود (Lehmann et al., 2011). (Maftu'ah & Nursyamsi, 2019) با بررسی اثر سطوح مختلف بیوپچار پوست

نارگیل بر رشد و عملکرد ذرت گزارش کردند که مصرف ۴ تن بر هکتار بیوچار سبب افزایش مقدار جذب عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه ذرت شد.

غلظت کلسیم شاخساره

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و رطوبت در سطح احتمال یک درصد معنادار ولی سایر اثرهای غیرمعنادار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین‌های غلظت کلسیم شاخساره برای اثر متقابل سه جانبه ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک جهت مشخص شدن بهترین ترکیب تیماری نشان داد که بیشترین غلظت کلسیم شاخساره در تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC اندازه‌گیری شد که با تیمارهای ۰/۷۵ درصد بیوچار و کاه در همان سطح نیتروژن و رطوبت تفاوت معنادار نداشت. کمترین غلظت کلسیم نیز در تیمار ۱/۵ درصد بیوچار با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC اندازه‌گیری شد (شکل ۷).



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های غلظت کلسیم شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

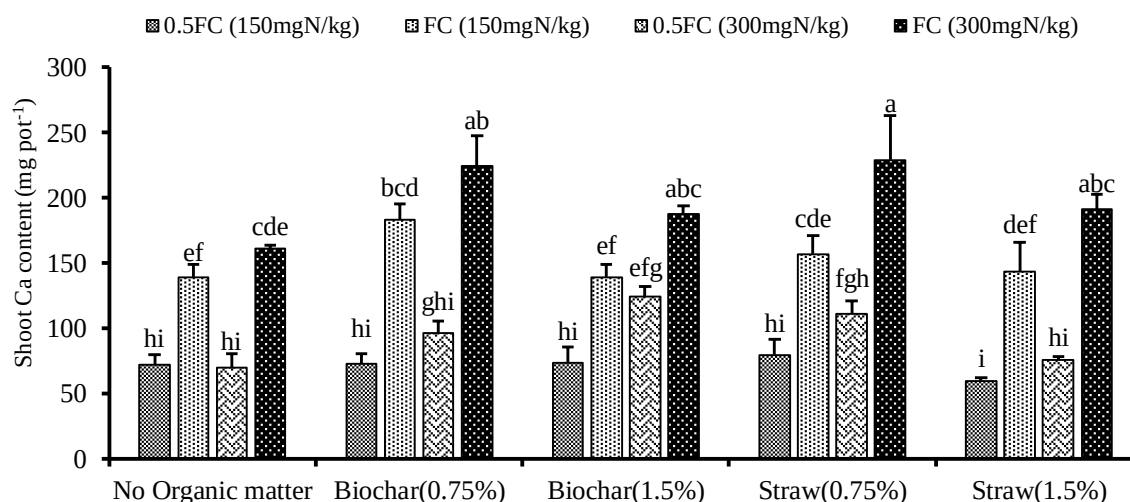
در برگ کاملاً توسعه یافته بر روی ساقه اصلی در ابتدای دوره رشد ساقه کلزا حدود بهینه غلظت کلسیم از ۱ تا ۲/۲ درصد گزارش شده است (Malkouti et al., 2000). اگرچه در این پژوهش کل شاخساره تجزیه شده و در منابع اعدادی برای مقایسه وجود ندارد، اما غلظت کلسیم بین ۱/۷۲ تا ۲/۷۳ درصد به دست آمد و در هیچ تیماری این غلظت از ۱/۷۲ درصد کمتر نبود. نقش اصلی کلسیم در پایداری غشاء و سلامت سلول‌های گیاهی اثبات شده است. در بافت‌های مبتلا به کمبود کلسیم میزان تنفس افزایش و میزان سنتز پروتئین کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که نقش کلسیم در پایداری غشاهای سلولی منحصر به فرد بوده و سایر کاتیون‌ها مثل پتاسیم و سدیم دو ظرفیتی نمی‌توانند جایگزین کلسیم شوند (Marschner, 2011). Setayesh-Mehr & Ganjeali (2013) گزارش کردند که با کاهش رطوبت خاک حرکت کلسیم از خاک به سطح ریشه کاهش می‌یابد و چون جذب کلسیم به سرعت تعرق بستگی دارد در نتیجه در شرایط تنش کم‌آبی محدود شدن سرعت تعرق سبب کاهش جذب کلسیم می‌شود.

Yoldas et al. (2008) گزارش کردند که افزایش سطح نیتروژن از صفر تا ۶۰۰ کیلوگرم بر هکتار، با افزایش رشد گیاه باعث افزایش غلظت عناصر پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن و روی در برگ کلم بروکلی شد. Mbah et al. (2017) با بررسی اثر بیوچار تولیدی از چوب جنگل بر رشد و عملکرد خیار گلخانه‌ای، گزارش کردند که افزودن بیوچار سبب

افزایش غلظت کلسیم در گیاه می‌شود. (Mohawesh et al. (2018) با بررسی اثر بیوپچار بقایای کلم بروکلی بر رشد و عملکرد گیاه فلفل دلمه‌ای گزارش کردند که مصرف یک درصد بیوپچار سبب افزایش غلظت کلسیم شاخساره گیاه و مصرف ۲/۵ درصد بیوپچار سبب افزایش غلظت کلسیم شاخساره فلفل دلمه‌ای شد. (Salimi Tarazoj (2019) کاهش غلظت کلسیم شاخساره کلزا بر اثر کاربرد بیوپچار در مقایسه با کاه گندم را گزارش کرد. در پژوهش گلخانه‌ای حاضر نیز با افزایش مقدار بیوپچار مصرفی غلظت کلسیم شاخساره کاهش یافت اما به‌جز تیمار ۰/۷۵ بیوپچار بین سایر تیمارهای بیوپچار و کاه از لحاظ اثر بر غلظت کلسیم تفاوت معنادار وجود نداشت.

مقدار جذب کلسیم شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و سطوح رطوبتی در سطح احتمال یک درصد بر مقدار جذب کلسیم شاخساره معنادار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب کلسیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین مقدار جذب کلسیم شاخساره در تیمار ۰/۷۵ درصد کاه با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC به‌دست آمده است که با تیمار ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد بیوپچار و ۱/۵ درصد کاه با همان مقدار نیتروژن مصرفی و در همان سطح رطوبت FC تفاوت معنادار ندارد. کمترین مقدار کلسیم نیز در تیمار ۱/۵ درصد کاه با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC اندازه‌گیری شد (شکل ۸).



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت برای مقدار جذب کلسیم شاخساره کلزا

در خاک‌های آهکی انتظار بر این است که کلسیم قابل‌جذب به قدر کفایت در خاک وجود داشته و لذا به‌رغم اینکه بیوپچار مورد استفاده در این پژوهش حدود ۲/۷ درصد کلسیم کل داشت تأثیر آن بر مقدار جذب کلسیم چشمگیر نبود. (Sousa & Figueiredo (2016) با بررسی اثر بیوپچار تولیدی از لجن فاضلاب بر رشد و عملکرد تربچه گزارش کردند که افزایش در مصرف بیوپچار از ۱۰ تا ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک سبب افزایش مقدار کلسیم شاخساره در گیاه شد. (Salimi Tarazoj (2019) نیز افزایش مقدار کلسیم شاخساره کلزا را با مصرف بیوپچار حاصل از کاه گندم در مقایسه با کاه را گزارش کرد. (Gavili et al. (2019) بیان کردند که به رغم این که تنش رطوبتی اثر معناداری بر غلظت کلسیم داشت ولی به‌دلیل وابستگی جذب کلسیم به تعرق گیاه و در نتیجه وابستگی آن به تنش رطوبتی اعمال شده مقدار جذب کلسیم شاخساره اسفناج در مقایسه با شرایط بدون تنش رطوبتی به‌طور معنادار کاهش یافت.

غلظت منیزیم شاخساره

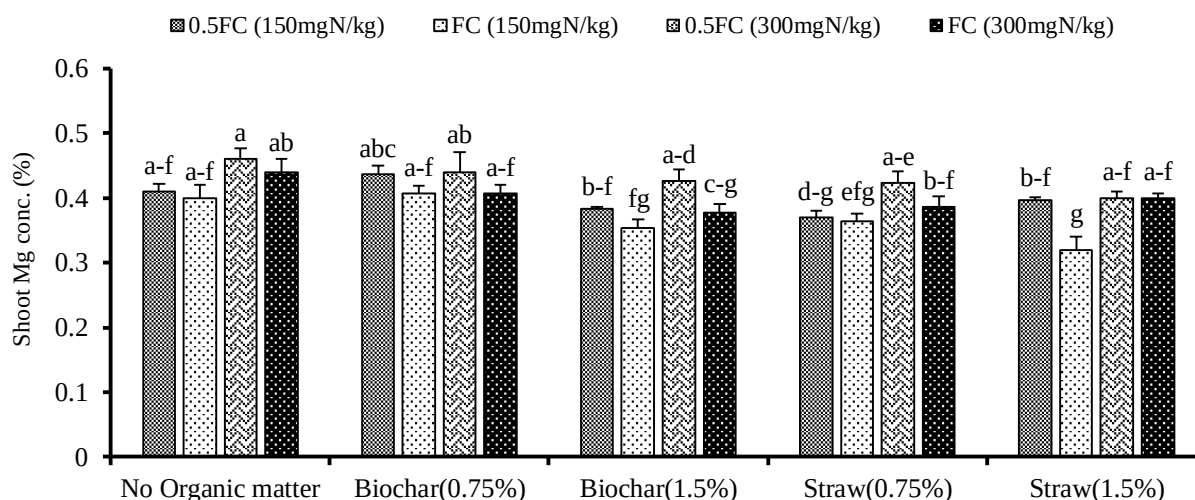
منیزیم تنها جزء فلزی کلروفیل و جزء عناصر پرمصرف ثانویه است. ضرورت حضور منیزیم در شمار زیادی از واکنش های آنزیمی (به عنوان مثال فسفاتاز قلیایی و یا کربوکسیلاز) شناخته شده است. در ریشه های ذرت مشخص شده است که ترکیب $Mg-ATP$ و ATP سوبستری آنزیم $ATPase$ چسبیده به غشای سیتوپلاسمی است (Marschner, 2011). نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و سطوح رطوبتی در سطح احتمال یک درصد معنادار اما سایر اثرهای غیرمعنادار بودند (جدول ۵). مقایسه میانگین های غلظت منیزیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی $\times$ نیتروژن $\times$ سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین غلظت منیزیم شاخساره در تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC به دست آمد که با تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC تفاوت معنادار نداشت. کمترین غلظت منیزیم نیز در تیمار ۱/۵ درصد کاه با مصرف ۱۵۰ میلی گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC حاصل شد (شکل ۹).

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر ماده آلی، نیتروژن و رطوبت بر غلظت و مقدار جذب منیزیم و ماده خشک شاخساره گیاه کلزا.

منابع تغییر	درجه آزادی	غلظت منیزیم	مقدار منیزیم	میانگین مربعات	ماده خشک شاخساره
ماده آلی	۴	۰/۰۰۶**	۹۱/۵۳۹**	۸/۰۶۰**	
نیتروژن	۱	۰/۰۱۵**	۳۰۸/۴۴۸**	۷/۴۱۳**	
ماده آلی $\times$ نیتروژن	۴	۰/۰۰۱ ^{ns}	۲۰/۱۵۶ ^{ns}	۰/۷۶۹ ^{ns}	
رطوبت خاک	۱	۰/۰۱۳**	۲۱۹۳/۰۰۵**	۱۸۰/۵۰۹**	
ماده آلی $\times$ رطوبت خاک	۴	۰/۰۰۰ ^{ns}	۴۱/۰۶۳**	۲/۳۶۴*	
نیتروژن $\times$ رطوبت خاک	۱	۰/۰۰۰ ^{ns}	۱۰/۴۳۳ ^{ns}	۰/۱۱۲ ^{ns}	
ماده آلی $\times$ نیتروژن $\times$ رطوبت خاک	۴	۰/۰۰۱ ^{ns}	۱۶/۷۱۰ ^{ns}	۰/۳۱۹ ^{ns}	
خطا	۴۰	۰/۰۰۱	۱۰/۳۹۶	۰/۸۸۷	
ضریب تغییرات (درصد)		۶/۷	۱۴/۳	۱۶/۴	

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

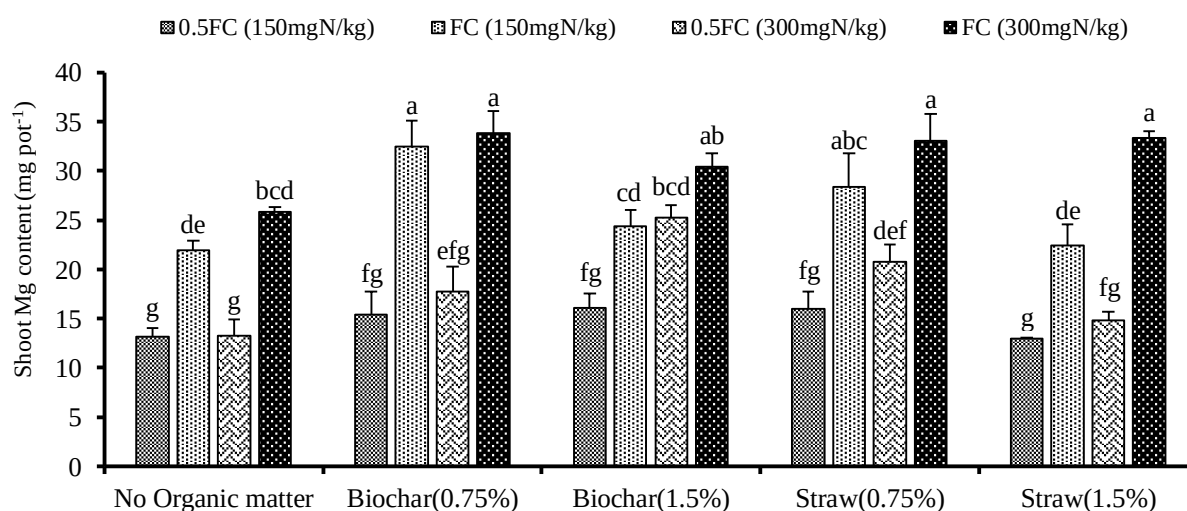
(Ma et al. (2004) افزایش غلظت منیزیم شاخساره در براسیکا را تحت تنش خشکی گزارش کردند. همچنین آنان بیان کردند که علاوه بر فراهمی آب در اطراف ریشه، عواملی دیگر همچون ضریب انتشار و توازن عناصر در خاک، میزان تقاضای گیاه و شرایط خاکی و اقلیمی بر جذب عناصر تأثیر دارد. (Inal et al. (2015) گزارش کردند که افزودن بیوچار کود مرگی به یک خاک قلیایی غلظت منیزیم شاخساره لوبیا را نسبت به تیمار شاهد به طور معنادار افزایش داد. چنین افزایشی می تواند به دلیل رهاسازی عناصر غذایی از جمله منیزیم به وسیله بیوچار افزوده شده به خاک و در نتیجه بهبود حاصلخیزی خاک باشد. (Habibi et al. (2017) گزارش کردند که تیمارهای حاوی بیوچار کمپوست زباله شهری سبب افزایش غلظت منیزیم شاخساره گیاه تاج خروس شد. این پژوهشگران بیان کردند دلیل این امر، بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و ریزوسفر است که می تواند به افزایش جذب آب و فراهمی عناصر غذایی و همین طور افزایش فعالیت جانداران در حضور بیوچار و ترشحات گیاهی و تأثیر سینرژیک منجر شود. (Gavili et al. (2019) گزارش کردند که مصرف سطوح ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد بیوچار کود گاوی به ترتیب سبب افزایش ۱۲، ۲۱ و ۲۲ درصدی غلظت منیزیم شاخساره گیاه اسفناج نسبت به تیمار شاهد شد. این پژوهشگران دلیل این امر را افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود حاصلخیزی خاک بر اثر افزودن بیوچار بیان کردند.



شکل ۹- مقایسه میانگین‌های غلظت منیزیم شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

مقدار جذب منیزیم شاخساره

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و سطوح رطوبتی و اثر متقابل ماده آلی × رطوبت در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های مقدار جذب منیزیم شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی نشان داد که بیشترین مقدار جذب منیزیم شاخساره در تیمار ۰/۷۵ درصد بیوجار با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC به‌دست آمده است که البته با تیمار ۰/۷۵ درصد بیوجار با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC تفاوت معنادار نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار ۱/۵ درصد کاه با مصرف ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC به‌دست آمد (شکل ۱۰).

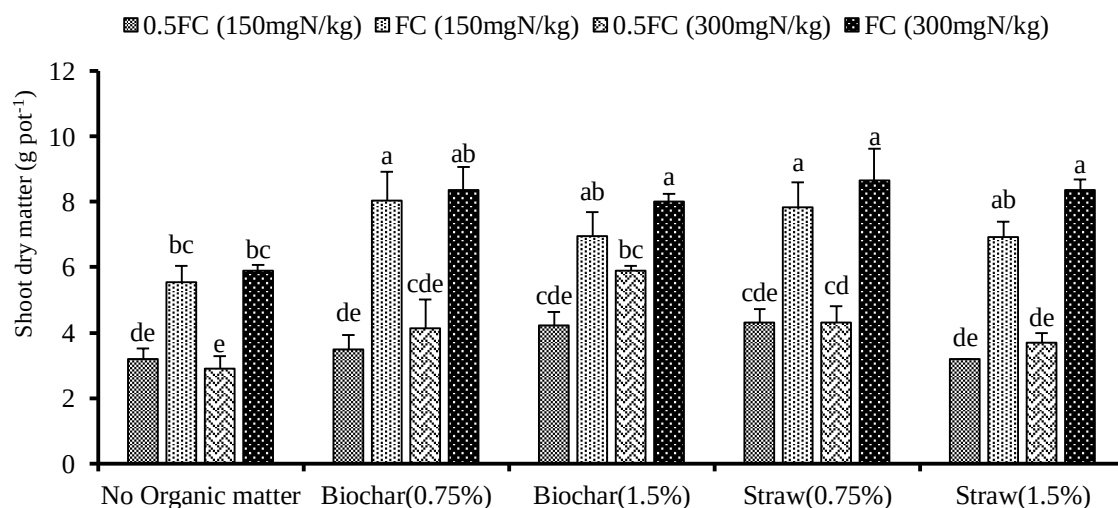


شکل ۱۰- مقایسه میانگین‌های مقدار جذب منیزیم شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که مصرف ماده آلی سبب افزایش مقدار منیزیم شاخساره شده است. Woldetsadik et al. (2016) گزارش کردند که کاربرد بیوپچار حاصل از کود گاوی با افزایش رشد و عملکرد گیاه سبب افزایش مقدار منیزیم در گیاه کاهو شد. Gavili et al. (2019) با بررسی اثر سطوح مختلف بیوپچار کود گاوی (صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد) بر رشد و عملکرد اسفناج گزارش کردند که در تمام سطوح غلظت منیزیم شاخساره در شرایط تنش کم‌آبی افزایش یافت درحالی‌که مقدار جذب منیزیم فقط در شرایط بدون تنش کم‌آبی با مصرف بیوپچار افزایش یافت و در سطوح دارای تنش به دلیل کاهش ماده خشک گیاه افزایش غلظت منیزیم حاصل از کاربرد بیوپچار نتوانست سبب افزایش مقدار جذب منیزیم گیاه شود.

ماده خشک شاخساره

از مهم‌ترین صفات هر گیاه زراعی وزن ماده خشک شاخساره است. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که در شرایط این پژوهش گلدانی، اثر اصلی ماده آلی، نیتروژن و سطوح رطوبتی در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل ماده آلی × سطوح رطوبتی در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنادار ولی سایر اثرهای متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های ماده خشک شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × سطوح رطوبتی برای یافتن بهترین ترکیب تیماری نشان داد که بیشترین ماده خشک شاخساره در تیمار ۰/۷۵ درصد کاه با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۸۵ تا ۱۰۰ درصد FC به‌دست آمد. همچنین، کمترین مقدار ماده خشک نیز در تیمار بدون ماده آلی با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در سطح رطوبتی ۵۰ تا ۶۰ درصد FC اندازه‌گیری شد. این موضوع نشان می‌دهد در شرایط تنش آبی و عدم مصرف ماده آلی، کود نیتروژن از کارایی لازم برخوردار نیست (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- مقایسه میانگین‌های ماده خشک شاخساره کلزا برای اثر متقابل ماده آلی × نیتروژن × رطوبت خاک.

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با اعمال تنش کم‌آبی، وزن ماده خشک شاخساره در تیمار بدون ماده آلی نسبت به سایر سطوح ماده آلی کمتر است. Molla et al. (2017) گزارش کردند که افزودن ۱۵ تن بیوپچار به خاک سبب افزایش ماده خشک شاخساره گیاه تاج خروس شد. Shaban et al. (2017) در شرایط گلخانه‌ای گزارش کردند که افزودن ۴۰ تن بر هکتار بیوپچار سبب افزایش کارایی مصرف آب و وزن ماده خشک شاخساره گندم شد. همچنین آنان گزارش کردند که افزایش سطح بیوپچار مصرفی (۸۰ تن بر هکتار) به دلیل افزایش شوری سبب کاهش وزن خشک گیاه شد. Gavili et

al. (2019) گزارش کردند که مصرف ۱/۲۵ درصد بیوپچار کود گاوی در شرایط تنش کم آبی سبب افزایش معنادار وزن خشک گیاه سویا شد، در حالی که با مصرف ۲/۵ درصد همان بیوپچار وزن ماده خشک گیاه کاهش یافت. این پژوهشگران بیان کردند که افزایش ماده خشک شاخساره گیاه بر اثر کاربرد بیوپچار می‌تواند به دلیل افزایش دسترسی عناصر غذایی در خاک باشد. همچنین کاهش ماده خشک شاخساره با افزایش بیوپچار مصرفی را به افزایش شوری خاک در سطوح بالای بیوپچار نسبت دادند. افزایش مصرف نیتروژن سبب افزایش جذب آن به وسیله گیاه و در نتیجه سبب بهبود رشد شد (Zabit et al., 2014). (Zabit et al., 2014). اثر تنش آبی بر توسعه سلولی آشکارتر از تقسیم سلولی است زیرا بزرگتر شدن شاخساره شد، در حالی که افزایش نیتروژن خاک تا حدودی این کاهش را جبران و با افزایش میزان نیتروژن خاک وزن خشک شاخساره افزایش یافت. اثر تنش آبی بر توسعه سلولی آشکارتر از تقسیم سلولی است زیرا بزرگتر شدن سلول به دنبال فشار تورژسانس ناشی از جذب آب است. لذا هر گونه کاهش در مقدار آب موجب توقف رشد و کاهش وزن گیاه می‌شود (Javadi & Jafari, 2016). (Motalebifard et al. (2013) گزارش کردند که با کاهش مقدار آب خاک، محصول غده سیب زمینی هم کاهش یافت.

Salimi Tarazoj (2019) گزارش کرد که بیشترین ماده خشک شاخساره کلزا در سطح چهار درصد بیوپچار و کمترین آن نیز در تیمار چهار درصد کاه به دست آمد. با مقایسه نتایج پژوهش حاضر که سطوح کاه و بیوپچار ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد بودند با نتایج (Salimi Tarazoj (2019) که سطوح کاه و بیوپچار ۲ و ۴ درصد بودند تأثیر مقدار مصرف بیوپچار و کاه بر این صفت مهم مشخص می‌شود. (Salimi Tarazoj (2019) برای اثر منفی کاه دلایی همچون نامتحرک شدن میکروبی برخی عناصر ضروری و تولید اسیدهای آلی با جرم مولکولی بالا بر اثر تجزیه را عنوان کرد. این اسیدها در غلظت کم برای رشد طولی ریشه مفید اما در غلظت‌های بیش‌تر از رشد ریشه جلوگیری می‌کنند. همچنین ایجاد شرایط بی‌هوایی یا بی‌هوایی موضعی در خاک به هنگام تجزیه کاه و تولید اسیدهای فنولیک، آلیفاتیک و اسیدهای چرب، مختل شدن تنفس ریشه و مختل شدن تشکیل تارهای کشنده از عواقب مصرف زیاد کاه عنوان شده است (Marschner, 2011). برخلاف پژوهش (Salimi Tarazoj (2019) با کاهش سطح مصرف کاه از ۲ و ۴ درصد به ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد در این پژوهش، مشاهده شد که اثرهای مثبت تجزیه کاه در حضور نیتروژن کافی همانند افزایش فعالیت میکروبی و احتمالاً فعالیت آنزیم‌های خاک بر اثرهای منفی غلبه کرده و کاه تأثیر مثبتی بر ماده خشک شاخساره داشته است. (Azimzadeh et al. (2020) گزارش کردند که مصرف بیوپچار در خاک، ماده خشک گیاه ذرت را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. (Maghsoodi et al. (2025) گزارش کردند که مصرف بیوپچار و اوره و مصرف توأم آن‌ها در خاک، ماده خشک گیاه برنج را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش دادند. (Salimi Tarazoj et al. (2025) مشاهده کردند که با مصرف بیوپچار در خاک ماده خشک گیاهان کلزا به‌طور معنادار نسبت به شاهد افزایش یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق گلدانی نشان داد که کاربرد بیوپچار حاصل از کاه گندم تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و کاه گندم سبب افزایش ماده خشک شاخساره کلزا نسبت به شاهد شد. بین بیوپچار و کاه گندم فقط در سطح ۱/۵ درصد و در شرایط کم آبی تفاوت معنادار به نفع بیوپچار در مورد ماده خشک مشاهده شد. اگرچه نیمه عمر کاه در خاک کم است به ویژه در اثر مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنه و پایداری بیوپچار بسیار بیشتر است و همچنین به دلایل متعدد زیست محیطی مخصوصاً به دلیل چرخه کربن و گرمایش زمین بیوپچار مورد توجه متخصصان محیط زیست است اما در این تحقیق یا بین بیوپچار و کاه گندم از لحاظ مهمترین صفت اندازه‌گیری شده یعنی ماده خشک شاخساره اختلاف معنادار وجود نداشت و یا در یک مورد در شرایط تنش کم آبی بیوپچار بهتر از کاه گندم عمل کرد. لذا تبدیل کاه به بیوپچار از این منظر هم قابل توصیه است. همچنین، اعمال تنش کم آبی با افزایش سطح نیتروژن مصرفی از ۱۵۰ به

۳۰۰ میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک سبب کاهش ماده خشک شاخساره شد. مصرف ماده آلی اعم از کاه و یا بیوچار در هر دو سطح (۰/۷۵ و ۱/۵ درصد) با اعمال تنش کم آبی به دلیل اثر تغلیظ سبب افزایش غلظت همه عناصر مورد تحقیق به جز کلسیم شد. در رطوبت ۸۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای، ۳۰۰ میلی گرم نیتروژن و در رطوبت ۵۰ تا ۶۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای، ۱۵۰ میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک در شرایط مشابه می‌تواند توصیه شود. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق استفاده از بیوچار جذب عناصر غذایی را افزایش و نقش مهمی در مقابله با تنش کم آبی و بهبود خصوصیات رشد گیاه کلزا داشت.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

- Agbna, G.H., Dongli, S., Zhipeng, L., Elshaikh, N.A., Guangcheng, S., & Timm, L.C. (2017). Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*, 222: 90-101.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.004>
- Amin, A.A. (2018). Phosphorus dynamics and corn growth under applications of corn stalks biochar in a clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11:379.
<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3719-8>
- Asrar, A.W.A., & Elhindi, K.M. (2011). Alleviation of drought stress of marigold (*Tagetes erecta*) plants by using arbuscular mycorrhizal fungi. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 18:93-98.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2010.06.007>
- Azimzadeh Y., Najafi N., Reyhanitabar A., Oustan S., & Khataee A. (2019). Effects of layered double hydroxide functionalized biochars and hydrochars on dry matter and N, P, and K concentrations of corn. *Journal of Agricultural Engineering*, 42(1), 127–146. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22055/agen.2019.26602.1441>
- 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>
- Bai, S.H., Dempsey, R., Reverchon, F., Blumfield, T.J., Ryan, S., & Cernusak, L.A. (2017). Effects of forest thinning on soil-plant carbon and nitrogen dynamics. *Plant and Soil*, 411:437-449.
<https://doi.org/10.1007/s11104-016-3052-5>
- Beheshti, M., & Alikhani, H. (2015). Quality variations of biochar generated from wheat straw during slow pyrolysis process at different temperatures. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 26: 189-201. (In Persian with English abstract)
- Briggs, C. M., Breiner, J., & Graham, R. (2005). Contributions of Pinus Ponderosa charcoal to soil chemical and physical properties. *Paper read at The ASACSSA-SSSA International Annual Meetings Salt Lake City, USA*.
- Black, C.A., & Evans, D.D. (1965). Particle size analysis. Pp. 770. In: White, J.L., Ensminger, L.E., & Clark, F.E. (Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 1, *Physical and Mineralogical Properties*, including statistics of measurement and sampling. *American Society of Agronomy*, Madison.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1>
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T.E., Malo, D.D., & Julson, J.L. (2014). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60:393–404.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2014.1002189>

- Cheng, C.H., Lehmann, J., & Engelhard, M.H. (2008). Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72:1598-1610.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.010>
- Darabi Kandlaji R., Oustan S., Aliasgharzad N., & Najafi N. (2018). Effects of moisture conditions and ammonium concentration on nitrification in two soils with different textures. *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 22(3), 177-195. (in Persian with English abstract)
<http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.3.177>
- Dehzad, B. (2015). Environmental considerations in crop harvesting and plant residue management. *The first applied science conference on plant residue management*. (In Persian with English abstract)
<https://civilica.com/doc/309206>
- Ding, Y., Liu, Y.X., Wu, W.X., Shi, D.Z., Yang, M., & Zhong, Z.K. (2010). Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213:47-55.
<https://dx.doi.org/10.1007/s11270-010-0366-4>
- 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>
- Downie, A., Crosky, A., & Munroe, P. (2009). Physical properties of biochar. Pp. 13- 32. In: Lehmann, J. & Joseph, S. (Eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan: London, UK.
- Farrell, M., Rangott, G., & Krull, E. (2013). Difficulties in using soil-based methods to assess plant availability of potentially toxic elements in biochars and their feedstocks. *Journal of hazardous materials*, 250: 29-36.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.073>
- Gavili, E., Moosavi, A.A., & Haghighi, A.A.K. (2019). Does biochar mitigate the adverse effects of drought on the agronomic traits and yield components of soybean. *Industrial Crops and Products*, 128:445-454.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.047>
- Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis, hydrometer methods. Pp. 383-411. In: Sparks, D.L. (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Gonzales, P.R., & Salas, M.L. (1995). Improvement of the growth, grain yield, and nitrogen, phosphorus, and potassium nutrition of grain corn through weed control. *Journal of Plant Nutrition*, 18: 2313-2324.
<https://doi.org/10.1080/01904169509365067>
- Grant, C.A., & Bailey, L.D. (1993). Fertility management in canola production. *Canadian Journal of Plant Science*, 73:651-670.
<https://doi.org/10.4141/cjps93-087>
- Habibi, A., Motesharezadeh, B., & Alikhani, H. (2017). Effect of biochar and biological treatments on nutrient elements content (P, K, Ca, Mg, Fe and Mn) of Amaranthus in oil polluted soil. *Iranian Journal of Water Research*, 48:369-384.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.62645>
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson, W.L. (2016). Soil fertility and fertilizers, 6 (Eds). *Soil Science Society of America*. Madison, Wisc.
- Inal, A., Gunes, A., Sahin, O.Z.G.E., Taskin, M.B., & Kaya, E.C. (2015). Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil Use and Management*, 31:106-113.
<https://doi.org/10.1111/sum.12162>
- Javadi, T., & Jafari, M. (2016). Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of Sour Cherry cv. "Mykrez" saplings. *Research in Pomology*, 70-88. (In Persian with English abstract)
<https://civilica.com/doc/944795>

- Jones, J.B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC press, Boca Raton, FL.
<https://doi.org/10.1201/9781420025293>
- Karam, S., & Ronaghi, A. (2018). Influence organic wastes application (sewage sludge, wheat biochar and pistachio biochar) on the concentration of some nutrients in soil after harvesting wheat. *15th Iran Soil Science Congress*, Isfahan, (in Persian with English abstract)
<https://civilica.com/doc/729848>
- Lal Arab, M., Astarai, A., & Lekzian, A. (2015). The effect of different levels of biochar and vermicompost on vegetative growth and absorption of some nutrients in soybean, *2nd National Conference on Sustainable Management of Soil Environment Resources* (Soil Quality, Health And Security), Kerman. (In Persian with English abstract)
<https://civilica.com/doc/558083>
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1812-1836.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Lentz, R.D., & Ippolito, J.A. (2012). Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *Journal of Environmental Quality*, 41:1033-1043.
<https://doi.org/10.2134/jeq2011.0126>
- Lickfett, T., Matthaus, B., Velasco, L., & Mollers, C. (1999). Seed yield, oil and phytate concentration in the seeds of two oilseed rape cultivars as affected by different phosphorus supply. *European Journal of Agronomy*, 11:293-299.
[https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00038-6)
- Lindsay, W.L., & Norvell, W. (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>
- Liu, T., Liu, B.X., & Zhang, W. (2014). Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: It's application in soil amendment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23: 271-275.
- Logan, T.J., Goins, L.E., & Lindsay B.J. (1997). Field assessment of trace element uptake by six vegetables from N-Viro soil. *Water Environment Research*, 69:28-33.
<https://doi.org/10.2175/106143097X125155>
- Ma, Q.F., Turner, D.W., Levy, D., & Cowling, W.A. (2004). Solute accumulation and osmotic adjustment in leaves of Brassica oilseeds in response to soil water deficit. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55:939-945.
<https://doi.org/10.1071/AR03183>
- Madiba, O.F., Solaiman, Z.M., Carson, J.K., & Murphy, D.V. (2016). Biochar increases availability and uptake of phosphorus to wheat under leaching conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 52:439-446.
<https://doi.org/10.1007/s00374-016-1099-3>
- Maftu'ah, E., & Nursyamsi, D. (2019). Effect of biochar on peat soil fertility and NPK uptake by corn. *Agrivita, Journal of Agricultural Science*, 41:64-73.
<https://doi.org/10.17503/agrivita.v41i1.854>
- Maghsoodi M.R., Najafi N., Reyhanitabar A., & Oustan S. (2025). 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*, 25, 450–464.
<https://doi.org/10.1007/s42729-024-02143-8>
- Mahmoudi S., Najafi N., & Reyhanitabar A. (2015). Effect of soil moisture and sewage-sludge compost on some soil chemical properties and alfalfa forage macronutrients concentrations in greenhouse conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 6(22), 37–55. (in Persian with English abstract)
<http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37>
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333:117-128.
<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0>

- Malakouti, M.J., & Homaei, M. (2004). Soil fertility of Arid and semi - Arid Regions difficulties and solutions. 2nd edition with full revision, Tarbiat Modares University Press, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Malkouti, M.J., Khademi, Z., & Mohajermilani, P. (2000). Optimum fertilizer recommendation for canola in the country. *Soil and Water Sciences*, 12:1-6. (In Persian with English abstract)
- Markarian, S., Najafi, N., Aliasgharzad, N., & Oustan, S. (2015). Effects of *Sinorhizobium meliloti* bacterium and phosphorus on leaf chlorophyll index, nitrogen and phosphorus concentrations in alfalfa shoot and root under drought stress conditions. *Journal of Water and Soil Science*, 24(4/1), 27-45. (In Persian with English abstract)
- Marschner, H. (2011). Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Ed, Academic Press. London. 889p.
- Masomi, T., Rahimikhoob, A., Ghorbanijavid, M., & Nazarifar, M.H. (2015). The Effect of Intermittent Deficit Irrigation on Yield, Yield Components and Water Productivity of Maize Sc-704. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8: 810-816. (In Persian with English abstract)
<https://civilica.com/doc/1210774>
- Mbah, C., Njoku, C., Okolo, C., Attoe, E., & Osakwe, U. (2017). Amelioration of a degraded ultisol with hardwood biochar: Effects on soil physicochemical properties and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *African Journal of Agricultural Research*, 12:1781-1792.
<https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11654>
- Mohawesh, O., Coolong, T., Aliedeh, M., & Qaraleh S. (2018). Greenhouse evaluation of biochar to enhance soil properties and plant growth performance under arid environment. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24:1012-1019.
- 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.
- Moradi, N., Sadaghiani-Rasouli, M., & Sepehr, E. (2018). Effects of biochar type and rate on soil organic carbon and availability of macro nutrient in calcareous soil. 15th Iranian Soil Science Congress, Isfahan, Iran. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jsw.v31i4.61298>
- Musa, M. (2017). Growth variables, yield and nitrogen fixation of bambara groundnut (*Vigna subterranea* L. Verdc.) landraces at different rates of Christmas Island Rock Phosphate and rice biochar on tropical acid soils. (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
<https://eprints.nottingham.ac.uk/id/eprint/39204>
- Motalebifard R., Najafi N., & Oustan S. (2016). Effects of zinc and phosphorus on nutrients, starch and reducing sugar concentrations of potato tubers under with or without water deficit stress. *Journal of Water and Soil*, 30(2), 497-510. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.39588>
- Motalebifard, R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., & Valizadeh M. (2013). The combined effects of phosphorus and zinc on evapotranspiration, leaf water potential, water use efficiency and tuber attributes of potato under water deficit conditions. *Scientia Horticulturae*, 162, 31-38.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.043>
- Najafi N., Mahmoudi Sh., Neyshabouri M., & Reyhanitabar A. (2020). Effects of soil moisture and sewage sludge on water use efficiency and concentrations of some elements in alfalfa. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(1), 61-80. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2020.122141>
- Naseri, A., Abbasi, F., & Akbari, M. (2017). Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18:17-32.
<https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057>
- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp: 539-579. In: Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney D.R (Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. *Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Series 5, Madison, USA.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Noorgholipour, F., Rezaei, H., Mirzashahi, K., Hakitnia, H., Ramzanpour, M.R., Arzanesh, M.J., Asadi Rahmani, H., Mirzapour, M.H., Afzali, H., Tehrani, M.M., Ghaibi, M.N. (2014). The recipe for the

- integrated management of soil fertility and rapeseed nutrition. *Soil and Water Research Institute of Iran*. 10-30. (In Persian with English abstract)
- Olsen, S., & Sommers, L. (1982). Phosphorus. Pp. 403-430. In: Page, A.L. Miller, R.H. & Keeney, D.R. (Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. *Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, USA.
- <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9066-2>
- Pirzad, A., Shakiba, M.R., Zehtab-Salmasi, S., & Mohammadi, S.A. (2015). Effects of water stress on some nutrients uptake in *Matricaria chamomilla* L. *Agronomy Journal* (Pajouhesh and Sazandegi), 104: 1-7. (In Persian with English abstract)
- <https://doi.org/10.22092/AJ.2015.105662>
- 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.
- <http://jast.modares.ac.ir/article-23-26722-en.html>
- Rhoades, J. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. Pp. 417-435. In: Sparks, D.L. (Eds). *Methods of soil analysis*. Part 3. *Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, USA.
- <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
- Salehi, f., Bahrani, M.J., Kazemieni, S.A., Pak, Nit H., & Karimian, N. (2013). Influence of soil incorporating wheat residue rates on seed yield components and biological nitrogen fixation in two red bean cultivars in greenhouse. *Journal of Applied Crop Research*, 26: 34. (In Persian with English abstract)
- Salimi Tarazoj, S. (2019). Dual application effects of biochar and phosphorus on rapeseed (*Brassica napus* L.) growth and nutrition in greenhouse conditions. *Master of Science*. Thesis University of Tabriz
- Salimi Tarazoj, 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. (in Persian with English abstract)
- <https://doi.org/10.22034/sps.2024.19185>
- Setayesh-Mehr, Z., & Ganjeali, A. (2013). Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of dill (*Anethum graveolens* L.). *Journal of Horticultural Science*, 27:27-35. (In Persian with English abstract)
- <https://civilica.com/doc/1468239>
- Shaban, M.R., & Razzaghi, F. (2017). The effect of different levels of biochar, low irrigation and salinity on water use efficiency and wheat yield in greenhouse conditions, *Shahid Bahonar University of Kerman*. (In Persian with English abstract)
- <https://civilica.com/doc/693417>
- Shahbazi, K., & Besharati, H. (2013). Overview of agricultural soil fertility status of Iran. *Land Management Journal*, 1: 1-15. (In Persian with English abstract)
- <https://doi.org/10.22092/LMJ.2013.100072>
- Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann J. (2017). Biochar: A guide to analytical methods. Csiro Publishing.
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105:47-82.
- [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- 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>

- Subramanian, K., Santhanakrishnan, P., & Balasubramanian P. (2006). Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. *Scientia Horticulturae*, 107(3), 245-253.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.07.006>
- Suppadit, T., Phumkokrak, N., & Pongsuk P. (2012). The effect of using quail litter biochar on soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) production. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72:244.
<http://hdl.handle.net/1807/45980>
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. Pp. 475-490. In: Sparks, D.L. (Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. *Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, USA.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Toshih, V., Sadari, M.H., Kohsar, B.M., Hassan, R., & Seyyed, J. (2006). Plant residue management with emphasis on the destructive role of burning in wheat farming. *First Applied Scientific Conference on Plant Residue Management*, Tehran. (In Persian with English abstract)
<https://civilica.com/doc/309243>
- Tehrani, M.M., Moshiri, F., Ghaibi, M.N., Rezaei, H., Keshavarz, P., Datoudi, M.H., Ziaian, A., Noorgholipour, F., Amiri, R., Hosseini, S.M., Saadat, S., Rahmani, H.A., Khademi, Z., Belali, M., Mastashiri, M. (2014). Comprehensive Soil Fertility and Plant Nutrition Program (Volume 2). *Soil and Water Research Institute*, 418.
- Woldetsadik, D., Drechsel, P., Keraita, B., Marschner, B., Itanna, F., & Gebrekidan, H. (2016). Effects of biochar and alkaline amendments on cadmium immobilization, selected nutrient and cadmium concentrations of lettuce (*Lactuca sativa*) in two contrasting soils. *SpringerPlus*, 5:397.
<https://doi.org/10.1186/s40064-016-2019-6>
- Xiu, L., Zhang, W., Sun, Y., Wu, D., Meng, J., & Chen, W. (2019). Effects of biochar and straw returning on the key cultivation limitations of Albic soil and soybean growth over 2 years. *Catena*, 173:481-493.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.041>
- Yoldas, F., Ceylan, S., Yagmur, B., & Morologan, N. (2008). Effect of nitrogen fertilizer on yield quality and nutrient content in broccoli. *Journal of Plant Nutrition*. 31:1333-1343.
<https://doi.org/10.1080/01904160802135118>
- Zabit, M., Bahamin, S., Qureshi, S., Sadeghi, H., & Mousavi, A.R. (2014). The effect of low irrigation and nitrogen fertilizer on the quantitative yield of fodder millet shoots in Birjand. *Environmental Stresses in crop sciences*. 7:187-194. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22077/escs.2015.175>
- 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.
<https://doi.org/10.17221/318/2017-PSE>