



Evaluating the efficiency of Controlled-Release Phosphorus Fertilizers based on biochar's of grape pruning residues, walnut skins and wheat stubble produced at two pyrolysis temperatures (350°C and 650°C)

Amir Khamseh¹✉ | Ahmad Golchin² | Saeid Shafiei³

1. Corresponding Author, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: amir.khamse@gmail.com

2. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: agolchin2011@yahoo.com

3. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran. E-mail: saeid.shafiei@ujiroft.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	<p>The use of common chemical fertilizers such as phosphorous fertilizers improves agricultural production, at the same time, it leads to serious environmental problems and a considerable economic load. Recently, in addition to using biochar as a soil amendment, it has been used to produce biochar-based slow-release fertilizers. The current experiment was conducted to evaluate the behavior of phosphorus release from monopotassium phosphate fertilizers based on the biochars of walnut shell residues, grape pruning and wheat stubble in water and soil. For this purpose, a factorial experiment with a randomized complete design and three replications was performed. The experiment treatments included three types of biochar (residues of grape pruning, walnut shell and wheat stubble) at two pyrolysis temperatures of 350 and 650 degrees and Phosphorous fertilizer (10% and 20% by weight) from the source of monopotassium phosphate. The results showed that the effect of temperature and biochar type on density, apparent density, pH and EC of biochar-based fertilizer tablets was significant. Phosphorus of biochar-based nitrogenous fertilizers was gradually released in water during the experiment in all biochars, but its release rate was higher at the beginning of the experiment. The rate of Phosphorus release during the experiment in biochar-based fertilizer tablets of wheat stubble was lower compared to walnut shell and grape pruning biochars, so that at the end of the experiment, the percentage of Phosphorus release in wheat stubble biochar was 4.6 (1.6) and 8.54 (4.04) percent lower, respectively, compared to walnut shell biochar and grape pruning residues at 350 (or 650) pyrolysis temperature. Also, the lowest and highest percentage of Phosphorus release in soil was observed in wheat stubble biochar and grape pruning residues at both pyrolysis temperatures of 350 and 650 degrees, respectively. Also, the results showed that the effect of the type of biochar on the performance of the corn plant shoot (wet weight, dry weight and relative yield) was significant, and the highest performance was related to the use of Controlled-Release Phosphorus Fertilizers based on wheat stubble biochar. In general, it can be concluded that granulating chemical fertilizers with biochar can be a suitable method for preparing Slow-release fertilizers, which can partially overcome the environmental problems and the economic burden of using chemical fertilizers.</p>
Article history: Received 18 November 2023 Received in revised form 28 February 2024 Accepted 06 May 2024 Published online 31 August 2024	
Keywords: <i>Agricultural waste,</i> <i>Biochar,</i> <i>Environmental problems,</i> <i>Slow-release fertilizer.</i>	

Cite this article: Khamseh, A., Golchin, A., & Shafiei, S. (2024). Evaluating the efficiency of Controlled-Release Phosphorus Fertilizers based on biochar's of grape pruning residues, walnut skins and wheat stubble produced at two pyrolysis temperatures (350°C and 650°C). *Journal of Natural Environment*, 77 (2), 271-284. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.368033.2622>





بررسی کارایی کودهای کندرها فسفوری بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم تولید شده در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد

امیر خمسه^۱ | احمد گلچین^۲ | سعید شفیعی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: amir.khamse@gmail.com
۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: agolchin2011@yahoo.com
۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: saeid.shafiei@tjiroft.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	استفاده از کودهای شیمیایی رایج مانند کودهای فسفردار باعث بهبود تولیدات کشاورزی می‌شود، اما در همان حال مشکلات جدی محیط‌زیستی و بار اقتصادی قابل توجهی به دنبال دارد. اخیراً علاوه بر استفاده از بیوچار به عنوان یک اصلاح کننده خاک، از آن در جهت تولید کودهای کندرها مبتنی بر بیوچار استفاده شده است. بررسی حاضر به منظور ارزیابی رفتار رهاسازی فسفر از کود مونوفتاسیم فسفات بر پایه بیوچارهای بقایای پوست گردو، هرس انگور و کلش گندم در آب و خاک صورت گرفت. به همین منظور آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه نوع بیوچار (بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم) در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد و دو سطح کود فسفردار (۱۰ و ۲۰ درصد وزنی) از منبع مونوفتاسیم فسفات بود. نتایج نشان داد که اثر دما و نوع بیوچار بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص‌های کودی بر پایه بیوچار معنی دار بود. فسفر کودهای فسفردار بر پایه بیوچار در طی آزمایش در همه بیوچارها به تدریج در آب آزادسازی گردید ولی سرعت آزادسازی آن در ابتدای آزمایش بیشتر بود. میزان آزادسازی فسفر در طول آزمایش در قرص‌های کودی بر پایه بیوچار کلش گندم نسبت به بیوچارهای پوست گردو و هرس انگور کمتر بود به طوری که در انتهای آزمایش درصد آزادسازی فسفر در بیوچار کلش گندم نسبت به بیوچار پوست گردو و بقایای هرس انگور در دمای پیرولیز (۳۵۰ و ۶۵۰) به ترتیب ۴/۶ و ۱/۶ و ۸/۵۴ و ۴/۰۴ درصد پایین تر بود. کمترین و بیشترین درصد آزادسازی فسفر در خاک نیز به ترتیب در بیوچار کلش گندم و بقایای هرس انگور در هر دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که اثر نوع بیوچار بر عملکرد اندام هوایی گیاه ذرت (وزن تر، وزن خشک و عملکرد نسبی) معنی دار بود و بیشترین عملکرد نیز مربوط به استفاده از کود کندرها فسفوری بر پایه بیوچار کلش گندم می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که گرانبه نمودن کودهای شیمیایی با بیوچار می‌تواند یک روش مناسبی برای تهیه کودهای کندرها باشد که تا حدودی می‌تواند بر مشکلات محیط‌زیستی (آب‌شویی، آلودگی منابع آبی و ...) و بار اقتصادی استفاده از کودهای شیمیایی غلبه کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰	
کلیدواژه‌ها: بقایای گیاهی، بیوچار، کود کندرها، مشکلات محیط‌زیستی.	

استناد: خمسه، امیر؛ گلچین، احمد؛ و شفیعی، سعید (۱۴۰۳). بررسی کارایی کودهای کندرها فسفوری بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش

گندم تولید شده در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد. محیط زیست طبیعی، ۷۷ (۲)، ۲۸۴-۲۷۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.368033.2622>



مقدمه

با افزایش جمعیت کره زمین و تخریب و فرسایش خاک‌های قابل کشت در اثر عملیات خاک‌ورزی، نیاز است تا عملکرد محصولات کشاورزی در واحد سطح افزایش یابد. این امر باعث استفاده بیشتر کشاورزان از کودهای شیمیایی شده است و در اغلب موارد، استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی، موجب آلودگی محیط‌زیست می‌شود. تهدیدات روز افزون آلودگی‌های به‌وجود آمده از کودهای شیمیایی به‌ویژه در خاک، شبهاتی را در استفاده مداوم و طولانی‌مدت از این کودها به‌وجود آورده است (Ashita *et al.*, 2021). برای رفع کمبود فسفر نیز در بسیاری از خاک‌های جهان از کودهای شیمیایی فسفر استفاده می‌شود که به‌سهولت در آب خاک حل شده و غلظت فسفر محلول و قابل جذب گیاه در خاک و عملکرد گیاهان را افزایش می‌دهد (Havlin *et al.*, 1999; Marschner, 2012). با این حال، مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه فسفر و نیتروژن پدیده غنی‌شدن^۱ آب‌ها را نیز به‌طور گسترده ایجاد کرده است (Withers *et al.*, 2014; Dodds *et al.*, 2009). برای کاهش غنی‌شدن آب‌ها باید از ورود فسفر و نیتروژن به آب‌ها جلوگیری کرد (Conley *et al.*, 2008). در همین راستا، جهت جلوگیری از تخریب خاک و آلودگی‌های محیطی در استفاده از کودهای شیمیایی به‌خصوص کودهای فسفاته، باعث گردیده تا صنعت تولید کود به‌سمت عرضه کودهای کندرها و کنترل‌رها پیشرفت داشته باشد.

پایه تولیدی کودهای کندرها عموماً مواد شیمیایی است. پایه‌های معدنی و پلیمری، تبعات زیان‌بار متعددی پس از مصرف در خاک دارند؛ بنابراین ساخت کودهای کندرهایی که اثرات جانبی کمتری داشته باشند اهمیت می‌یابد. بنابراین استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر، جهت تولید کودهای کندرها که همزمان بتوانند راه‌حل مرکزی برای مشکلات کشاورزان نیز ارائه دهند، اهمیت ویژه ای دارد. اخیراً به‌دلیل خواص منحصر به‌فرد بیوجار، توجه بیشتری به تولید کودهای کندرها مبتنی بر بیوجار شده است. در برخی از تحقیقات نشان داده‌اند که غنی‌سازی بیوجار با عناصر غذایی، منجر به تولید کود کندرها یا کنترل شده عناصر غذایی گیاهی می‌شود که یک چنین راه‌حلی سبب فراهمی زیستی عناصر غذایی کم‌مصرف و پر مصرف و کاهش خطرات محیط‌زیستی می‌شود (Das and Ghosh, 2021). بیوجار یک ماده غنی از کربن (C) است که از طریق پیرولیز زیست‌توده‌ها در دماهای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و در غیاب اکسیژن تولید می‌شود (Lehmann and Joseph, 2009). استفاده از کودهای مبتنی بر بیوجار یک راه‌حل مؤثر است که عملکرد و خواص خاک را بهبود می‌بخشد (Maikol *et al.*, 2021)، دوستدار محیط‌زیست و اقلیم است (Rombel *et al.*, 2021) و به مدیریت ضایعات و زباله‌ها کمک می‌کند (Czekala *et al.*, 2019). به‌دلیل ویژگی‌های جذب آلاینده‌ها، وجود بیوجار در کود به اصلاح خاک نیز کمک می‌کند (Rombel *et al.*, 2021). پژوهشگران نشان داده‌اند که کودهایی با پایه بیوجار، آزاد شدن عناصر را به‌تأخیر می‌اندازند (Agegnehu *et al.*, 2016). این کودها به‌طور معنی‌داری باعث تنظیم pH خاک، کاهش چگالی ظاهری در راستای بهبود تهویه و نفوذپذیری خاک و افزایش عملکرد می‌گردند (Lee *et al.*, 2019). Gwenzی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که ساختار متخلخل و منافذ زیاد بیوجار، باعث جذب مؤثر نیترات، فسفات و پتاسیم شده و بیوجار غنی از مواد معدنی تولید می‌گردد که مقدار آزادسازی این یون‌ها، نسبت به آزادسازی آنها توسط کودهای معمول رایج، بسیار کمتر است. تحقیقات متعددی دیگری نیز نشان داده‌اند که بیوجار شامل گروه‌های عاملی زیادی می‌باشد که باعث جذب عناصر غذایی نیترات، آمونیوم، فسفات و پتاسیم و در نتیجه کاهش آبشویی آنها می‌شود (Kimetu and Lehmann, 2010). به‌طور کلی کودهای مبتنی بر بیوجار سازگار با محیط‌زیست هستند و یکی از راه‌حل‌های اقتصاد چرخشی است.

پیشرفت‌هایی در توسعه، سنتز، کاربرد، و مکانیسم آزمایشی کودهای کندرها مبتنی بر بیوجار حاصل شده است ولی چالش‌هایی نیز در ارتباط با سنتز آنها (که مؤثر و کارا باشند)، ارزیابی آزادسازی عناصر غذایی و فراهمی زیستی آنها، تأثیر بر رشد و عملکرد گیاهان مختلف و ارزیابی بلندمدت با کاربرد واقعی آنها در شرایط مختلف محیطی هنوز وجود دارد. بنابراین ضرورت ایجاد می‌کند که تحقیقی در ارتباط با ساخت کمپوزیت‌های پایه بیوجار به‌صورت کودهای کندرهایی فسفر طراحی و اجرا گردد و سپس رفتار رهاسازی عنصر فسفر را از کمپوزیت‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت اثر آن را بر رشد و عملکرد گیاه ذرت ارزیابی نمود.

¹Eutrophication

روش‌شناسی پژوهش

به‌منظور بررسی و ارزیابی رفتار رهاسازی فسفر از کودهای فسفردار برپایه بیوچار در آب و خاک، سه آزمایش جداگانه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه گروه خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه نوع بیوچار (بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم)، در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و سه سطح کود مونونیتاسیم فسفات (صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) بود که به هر تیمار ۱۰ درصد وزنی رس مونت‌موریلونایت نیز اضافه شد.

بیوچارها در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد از بقایای هرس درخت انگور، پوست گردو و کاه و کلش گندم به روش گرماکافت در شرایط بدون اکسیژن تهیه شد. به‌طوری‌که کوره با شیب دمایی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، در پانزده دقیقه روشن شد و در زمان رسیدن به دمای نهایی (۳۵۰ یا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) زیست‌توده یک ساعت در دمای مذکور نگهداری شد (Lehmann, 2007; Oleszczuk *et al.*, 2016). به‌منظور دانه‌بندی یکسان بیوچارهای تهیه شده از الک یک میلی‌متری عبور داده شدند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچارها با استفاده از روش‌های استاندارد ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی بیوچار (IBI, 2015 IBI, 2010;)، pH و EC در نسبت ۱ به ۲۰ (بیوچار به آب مقطر)، کربن (C)، نیتروژن (N)، نسبت خاکستر، چگالی ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه‌گیری شد (Song and Guo, 2012) (جدول ۱).

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچارهای تهیه شده از بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد

۶۵۰°C			۳۵۰°C			ویژگی‌ها Characteristics
بیوچار گندم Wheat biochar	بیوچار گردو Walnut biochar	بیوچار انگور Grape biochar	بیوچار گندم Wheat biochar	بیوچار گردو Walnut biochar	بیوچار انگور Grape biochar	
۱۰/۱۳	۸/۵۶	۱۱/۰۴	۸/۶۳	۷/۴	۹/۸۷	pH (1:2)
۶/۶۵	۰/۴۲	۱/۸۷	۵	۰/۲۳	۱/۰۱	EC (dS m ⁻¹)
۵۹/۸	۶۳/۸	۷۲/۷	۵۶/۵۴	۶۱/۶۸	۶۹/۵	کربن کل (%) Total Carbon (%)
۰/۱۲	۰/۲۷	۰/۵۱	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۶۷	نیتروژن کل (%) C/N
۴۹۸	۲۳۶	۱۴۲	۱۷۶	۱۲۷	۱۰۳	چگالی ظاهری (g cm ⁻³) Bulk density (g cm ⁻³)
۰/۱۹	۰/۵۹	۰/۵۱	۰/۱۴	۰/۵۱	۰/۴۶	خاکستر (%) Ash (%)
۲۱/۷	۱۱/۵۶	۱۲/۳	۱۴/۴۷	۸/۴۳	۶/۵۱	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol _c kg ⁻¹) CEC (cmol _c kg ⁻¹)
۴۸/۲۸	۳۶/۶۵	۳۲/۷	۱۲۱/۱۶	۵۴/۴۵	۴۱/۸	

جهت تهیه قرص‌های کودی، میزان ۵۰ درصد وزنی از مخلوط هر تیمار، به‌همراه ۲۰ درصد وزنی نشاسته و ۳۰ درصد وزنی آب، در بشر ریخته شده و به‌مدت پنج دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد هم‌زده شدند. سپس مخلوط حاصل برای هر تیمار پرس شده و در نهایت، قرص‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند (Lee *et al.*, 2019). چگالی قرص از نسبت وزن قرص به حجم قرص با ۱۰ تکرار محاسبه شد (Lee *et al.*, 2019). چگالی ظاهری قرص‌های کودی با روش ضربه‌زنی اندازه‌گیری شد. به‌طوری‌که برای انجام این کار یک لوله با حجم معین از قرص‌های کودی پر شده و با دست به لوله ضربات متوالی زده شد تا جای که تغییر ظاهری در حجم مشاهده نشد. سپس چگالی ظاهری از تقسیم وزن کود درون لوله به حجم لوله محاسبه گردد (Rutland, 1986). میزان pH و EC قرص‌های کودی در نسبت ۱ به ۱۰ قرص به آب مقطر اندازه‌گیری شد (Lee *et al.*, 2019). برای بررسی رفتار کندرها بودن قرص‌های کودی تهیه شده در ارتباط با آزادسازی فسفر در آب، مقدار ۱۰ گرم از قرص‌های کودی تهیه شده پس از قرار داده شدن در نایلون با اندازه ۱۰۰ در ظرفی حاوی ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، اجازه داده شد تا

به مدت ۵۶ روز در دمای اتاق در ظرف، شناور بماند. سپس در زمان‌های یک، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۲۸، و ۵۶ روز بعد از شروع آزمایش از محلول نمونه برداری شد و غلظت فسفر به صورت تجمعی اندازه‌گیری و با رابطه زیر محاسبه گردید:

$$Wt (\%) = (Mt / MO) \times 100$$

که در این رابطه Mt و MO به ترتیب مقدار تجمعی فسفر آزاد شده و مقدار کل فسفر موجود در کود بر حسب گرم بوده و Wt : نسبت آزاد شدن تجمعی فسفر بر حسب درصد می‌باشد (Pang et al., 2018).

برای بررسی رها سازی فسفر در خاک از مواد کودی تهیه شده یک آزمایش انکوباسیون به مدت ۲۱ روز انجام شد. برای این منظور، یک گرم از مخلوط تیمارها در نایلونی با مش ۴۰۰ ریخته شده و در ظروفی با ۲۰۰ گرم خاک ریخته و در فاصله ۵ سانتی متری از سطح قرار داده شدند به طوری که خاک به خوبی در تماس با نایلون قرار گرفت. رطوبت خاک، در حد ۹۵ درصد رطوبت زراعی قرار داشت. سپس در زمان‌های ۷ و ۲۱ روز، کیسه‌های نایلونی از خاک خارج شده و مقدار باقیمانده فسفر در کمپوزیت‌ها به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور بررسی اثر قرص‌های کودی تهیه شده بر عملکرد گیاه، یک آزمایش گلدانی در شرایط گلخانه‌ای تحت کشت گیاه ذرت انجام شد. به طوری که تیمارهای این آزمایش شامل چهار سطح بیوچار (بدون کاربرد بیوچار، بیوچار بقایای هرس انگور، بیوچار پوست گردو، و بیوچار کلش گندم) به میزان ۷/۵ تن در هکتار (معادل ۱/۹۲ گرم بر کیلوگرم) و سه سطح فسفر (بدون کاربرد کود (صفر درصد کود)؛ ۱۵ میلی بر کیلوگرم فسفر (۵ درصد کود)؛ ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر (۱۰ درصد کود)) از منبع کود مونوفتاسیم فسفات بود. در هر گلدان ۵ عدد بذر ذرت کاشته شد و بعد از جوانه زنی و استقرار گیاهان تعداد آنها به ۱ بوته، تقلیل داده شد. آبیاری گلدان‌ها نیز در طول زمان کشت (۵۶ روز) به طریق توزینی و توسط آب مقطر انجام شد. در طول و انتهای آزمایش، شاخص کلروفیل برگ ذرت، عملکرد اندام هوایی و غلظت فسفر کل و جذب کل فسفر در اندام هوایی ذرت اندازه‌گیری شد.

یافته‌های پژوهش

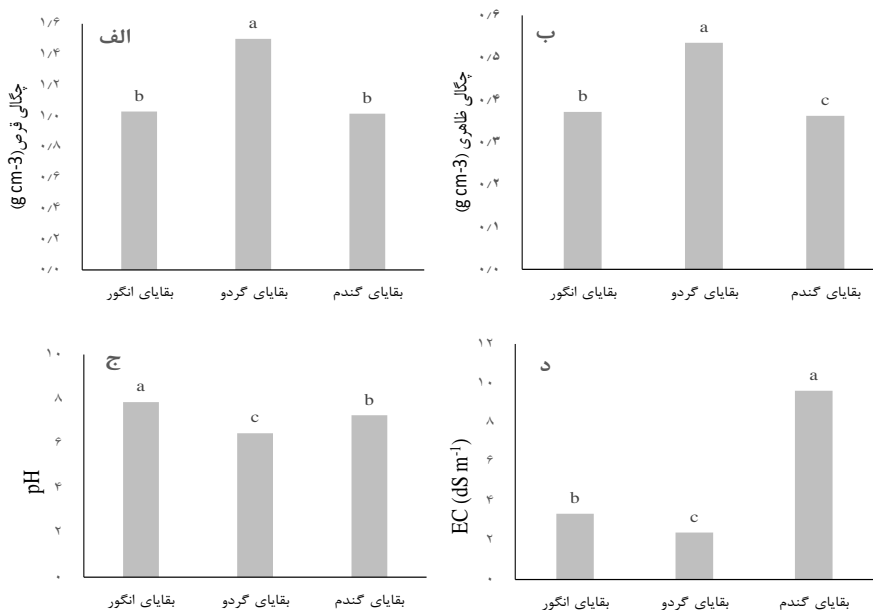
خصوصیات قرص‌های کودی بر پایه بیوچارهای مختلف: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر اصلی دمای پیرولیز و نوع بیوچار بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص‌های کودی بر پایه بیوچار معنی‌دار بود. همچنین اثر برهمکنش دما و نوع بیوچار بر چگالی ظاهری و EC قرص‌های کودی معنی‌دار بود ولی بر میزان مقاومت قرص و pH قرص‌های کودی اثر معنی‌داری نداشت. اثر دمای پیرولیز و نوع بیوچار بر مقاومت قرص اثر معنی‌دار نداشت. مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱) نشان داد که چگالی قرص‌های کودی در بیوچار پوست گردو نسبت به بیوچار بقایای هرس انگور و کلش گندم به طور معنی‌داری بالاتر بود ولی بین بقایای هرس انگور و کلش گندم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱-الف). همچنین چگالی ظاهری قرص‌های کودی در بیوچار گردو نسبت به دو بیوچار دیگر به طور معنی‌داری بیشتر بود و چگالی ظاهری در بیوچار هرس انگور نسبت به بیوچار کلش گندم به طور معنی‌داری بالاتر بود (شکل ۱-ب).

بالاترین pH قرص‌های کودی بر پایه بیوچار مربوط به بیوچار بقایای هرس انگور بود و کمترین آن مربوط به بیوچار پوست گردو (شکل ۱-ج) به طوری که میانگین pH قرص‌های کودی در بیوچار بقایای هرس انگور نسبت به بیوچار پوست گردو و کلش گندم به ترتیب ۱۷/۶۹ و ۷/۴۶ درصد بالاتر بود. همچنین نتایج نشان داد که بالاترین قابلیت هدایت الکتریکی (EC) مربوط به قرص‌های کودی بر پایه بیوچار کلش گندم و کمترین آن مربوط به قرص‌های کودی بر پایه بیوچار پوست گردو بود. میانگین EC قرص‌های کودی در بیوچار بقایای کلش نسبت به بیوچار هرس انگور و پوست گردو به ترتیب ۶۵/۲۱ و ۷۵/۱۳ درصد بالاتر بود (شکل ۱-د). دمای پیرولیز ۶۵۰ درجه نسبت به ۳۵۰ درجه سبب افزایش چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص‌های کودی شد به طوری که میانگین چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص‌های کودی در دمای ۶۵۰ نسبت به دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به طور معنی‌داری به میزان ۲، ۷/۵، ۸/۵ و ۲۴/۷ درصد بالاتر بود (شکل ۲).

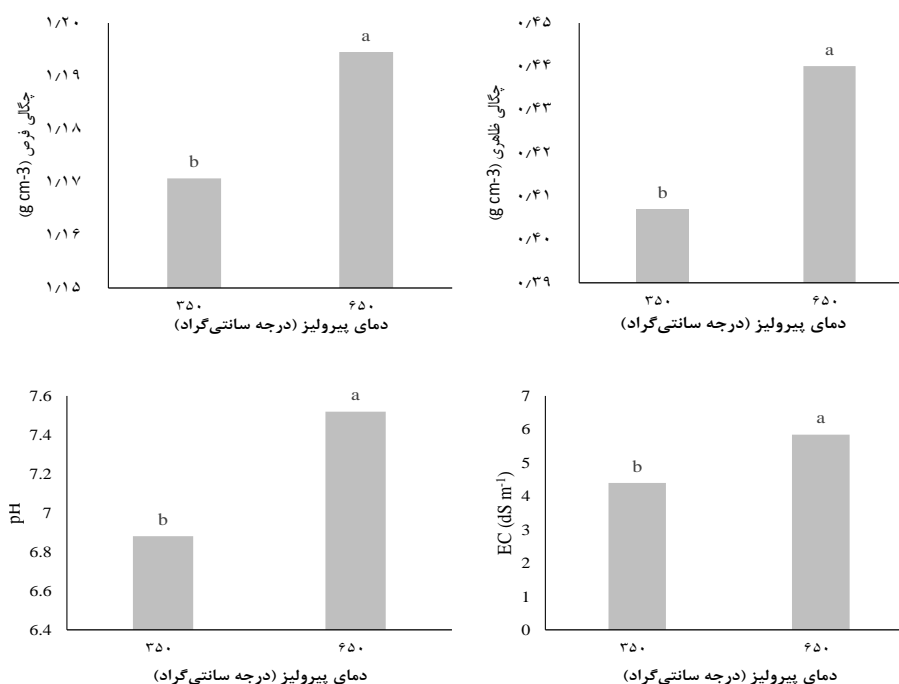
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر دما و نوع بیوجار بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص های کودی فسفر بر پایه بیوجار

میانگین مربعات		درجه آزادی			منابع تغییر
EC	pH	چگالی ظاهری	مقاومت قرص	چگالی قرص	
۲۸/۲**	۵/۵۱*	۰/۰۱۴۸**	۰/۰۴۴ns	۰/۰۰۷**	۱ دما
۲۷۷/۳۵**	۸/۷۶*	۰/۱۶۹**	۰/۰۱۱ns	۱/۴۲**	۲ بیوجار
۷/۷۵**	۰/۰۹۸ns	۶/۶۱**	۰/۰۱۳ns	۰/۰۰۴ns	۲ دما×بیوجار
۱/۴۸	۱/۷۵	۸/۹۷	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۸	۴۸ خطای باقیمانده
۲۳/۸	۱۸/۴	۰/۷۰۷	۰/۱۱۳	۵/۸۸۸	ضریب تغییرات

*: معنی داری در سطح ۵ درصد؛ **: معنی داری در سطح ۱ درصد؛ ns: عدم معنی داری



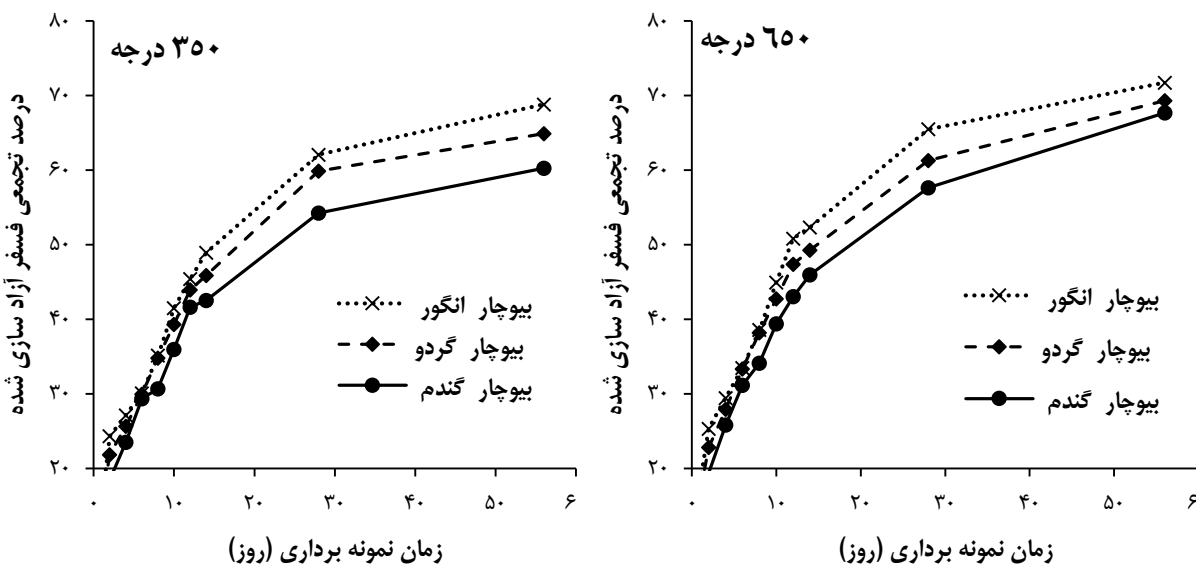
شکل ۱- مقایسه میانگین اثر بیوجارهای مختلف بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص های کودی فسفردار بر پایه بیوجارهای مختلف



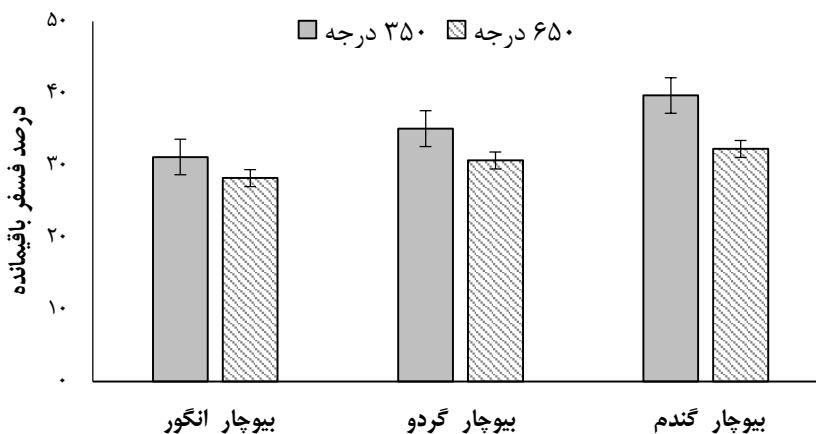
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر دما بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص های کودی فسفردار بر پایه بیوجارهای مختلف

درصد آزادسازی فسفر از قرص های کودی در آب: نتایج نشان داد (شکل ۳) که فسفر کودهای فسفردار مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچار در طی آزمایش به تدریج در آب آزادسازی گردید ولی میزان آزادسازی فسفر در ابتدای آزمایش بیشتر بود، به طوری که یک روز بعد از شروع آزمایش درصد فسفر آزادسازی شده در بیوچارهای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دمای پیرولیز ۳۵۰ (یا ۶۵۰) درجه سانتی گراد به ترتیب ۱۵/۲۷ (۱۸/۲۶)، ۱۴/۴۹ (۱۶/۹) و ۱۲/۲۱ (۱۵/۴۸) درصد بود. همچنین در ۱۴ روز اول آزمایش میزان فسفر تجمعی آزادسازی شده در بیوچارهای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دمای ۳۵۰ (یا ۶۵۰) درجه سانتی گراد به ترتیب ۴۸/۹۲ (۵۲/۳۴)، ۴۵/۸۷ (۴۹/۲۹) و ۴۲/۵۴ (۴۵/۹۶) درصد بود.

میزان آزادسازی فسفر در تمام طول آزمایش در بیوچار کلش گندم در هر دو دمای ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد نسبت به بیوچارهای پوست گردو و هرس انگور کمتر بود به طوری که در انتهای آزمایش درصد آزاد سازی فسفر در بیوچار گندم نسبت به بیوچار هرس انگور و پوست گردو به ترتیب ۸/۵۴ (۴/۰۴) و ۴/۶ (۱/۶) درصد در دمای ۳۵۰ (یا ۶۵۰) درجه سانتی گراد کمتر بود (شکل ۳). همچنین درصد فسفر آزادسازی شده در بیوچارهای تهیه شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد نسبت به بیوچارهای تهیه شده در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد کمتر بود به طوری که درصد فسفر باقیمانده در انتهای آزمایش در کودهای تهیه شده بر پایه بیوچار در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد در بیوچارهای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم به ترتیب ۳۱/۱۷، ۳۵/۱۱ و ۳۹/۷۱ درصد بود در حالی که در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد ۲۸/۲۵، ۳۰/۶۹ و ۳۲/۲۹ درصد بود (شکل ۴).



شکل ۳- درصد تجمعی فسفر آزادسازی شده در آب از قرص های کودی مونو پتاسیم فسفات بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم تولید شده در دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد در طی ۵۶ روز

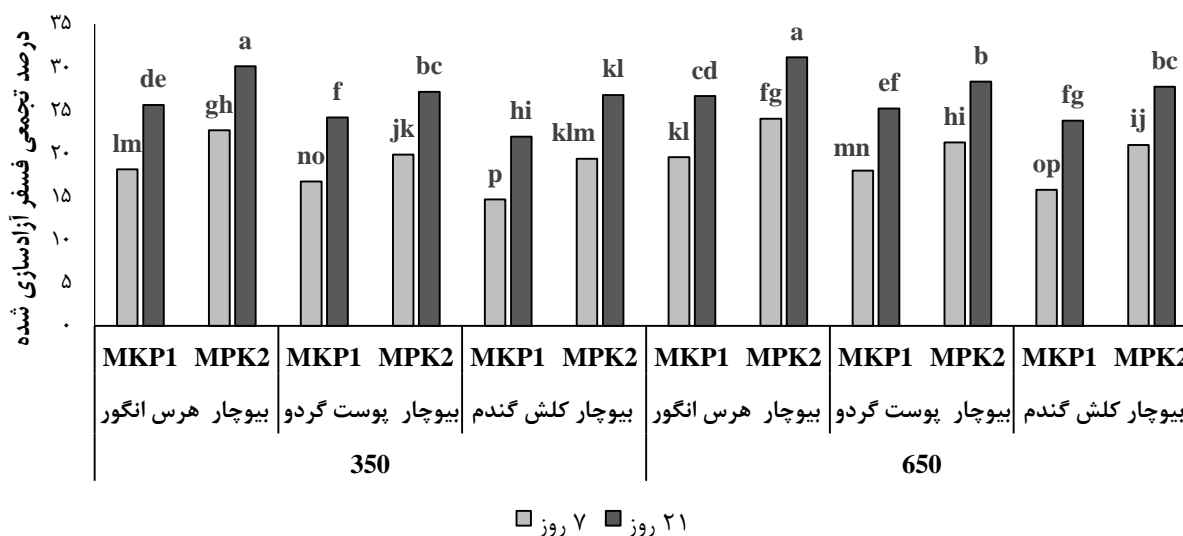


شکل ۴- درصد باقیمانده فسفر در قرص های کودی مونو پتاسیم فسفات بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد در بعد از ۵۶ روز از شروع آزمایش

درصد آزادسازی فسفر از قرص‌های کودی بر پایه بیوچار در خاک: نتایج نشان داد (شکل ۵) که میزان فسفر رهاسازی شده از کود مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچار در زمان ۲۱ روز بعد از انکوباسیون نسبت به زمان ۷ روز به‌طور معنی‌داری در تمامی بیوچارها و سطوح کود بالاتر بود به‌طوری‌که کمترین غلظت فسفر باقیمانده در کود مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچار هرس انگور در هر دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۲۱ روز بود. بالاترین غلظت فسفر باقیمانده در کود مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچار کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۷ روز بود. در زمان ۷ روز بعد از انکوباسیون بالاترین درصد آزادسازی فسفر از کود مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچار مربوط به بیوچار هرس انگور در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد در سطح ۱۰ درصد کود مونوپتاسیم فسفات بود و کمترین درصد آزادسازی مربوط به بیوچار کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در سطح ۵ درصد کود مونوپتاسیم فسفات بود. همچنین در زمان ۲۱ روز بعد از انکوباسیون بالاترین درصد آزادسازی فسفر در بیوچار هرس انگور در هر دو دمای ۶۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در سطح ۱۰ درصد کود مونوپتاسیم فسفات و کمترین ترین آن در بیوچار کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در سطح ۵ درصد کود مونوپتاسیم فسفات اتفاق افتاد (شکل ۵).

اثر قرص‌های کود مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچارهای مختلف بر رشد گیاه ذرت

عملکرد اندام هوایی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۳) که اثر نوع بیوچار و سطوح کودی هر یک به‌تنهایی بر عملکرد وزن تر، وزن خشک و عملکرد نسبی معنی‌دار بود و اثر برهمکنش بیوچار و سطوح کود مونوپتاسیم فسفات (MKP) نیز معنی‌دار بود. با توجه نتایج ارائه شده در شکل ۶ بالاترین وزن تر و خشک و عملکرد نسبی اندام هوایی ذرت در تیمار دارای قرص کودی حاوی بیوچار کلش گندم و ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات به‌دست آمد، در حالی‌که کمترین آن در سطح بدون کاربرد کود به‌دست آمد. در سطح بدون کود مونوپتاسیم فسفات تیمار حاوی بیوچار کلش گندم عملکرد تر و خشک و عملکرد نسبی را در مقایسه با سطح شاهد (بدون بیوچار و کود) و بیوچار بقایای هرس انگور و پوست گردو به‌طور معنی‌داری افزایش داد. همچنین در هر دو سطح حاوی قرص‌های کودی ۵ و ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات وزن تر و خشک و عملکرد نسبی در بیوچار کلش گندم نسبت به سطح بدون بیوچار و بیوچارهای هرس انگور و پوست گردو به‌طور معنی‌داری بالاتر بود.

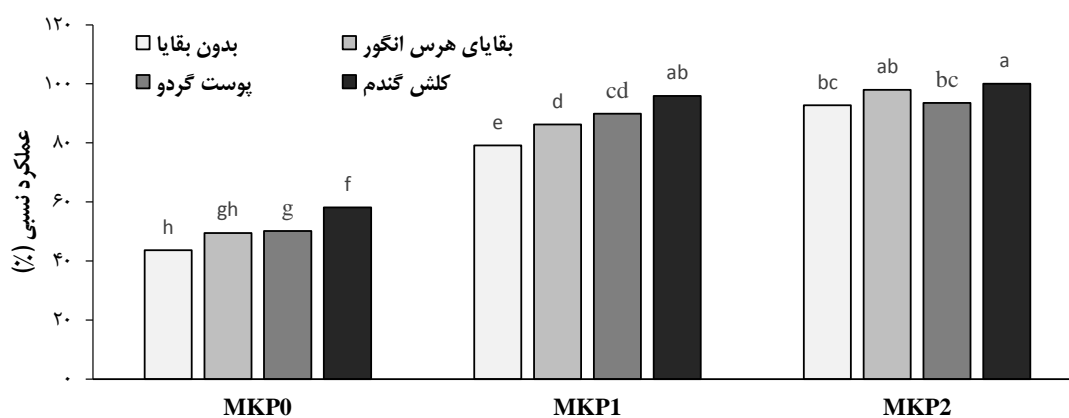
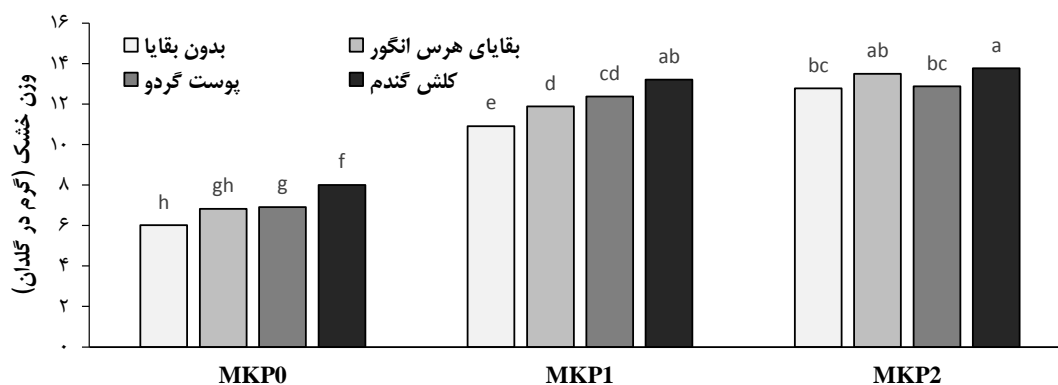
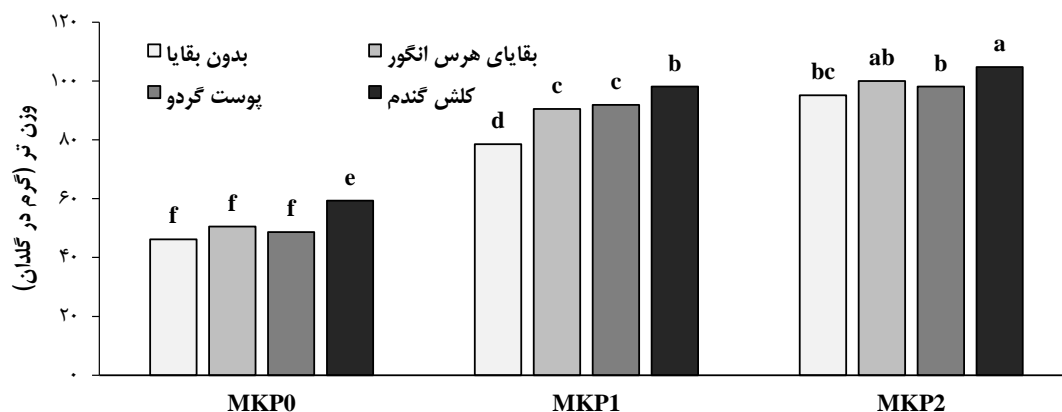


شکل ۵- درصد آزادسازی فسفر از قرص‌های کودی مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچار در طول انکوباسیون در خاک (MKP1): قرص کودی حاوی ۵ درصد مونوپتاسیم فسفات و MKP2: قرص کودی حاوی ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر نوع بیوجار و سطوح کودی بر عملکرد اندام هوایی گیاه ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		وزن تر (گرم در گلدان)	عملکرد نسبی (%)
نوع بیوجار	۳	۲۹۹/۶۲**	۲۴۶/۲۶**
سطوح کودی	۲	۷۸۳۸/۴۵**	۷۱۱۸/۰۲**
سطوح کودی × نوع بیوجار	۶	۲۳/۵۸*	۲۱/۲۴*
خطای باقیمانده	۲۴	۸/۶۸	۹/۴۱
ضریب تغییرات		۳/۶۷	۳/۹۳

*: معنی‌داری در سطح ۵ درصد و **: معنی‌داری در سطح ۱ درصد



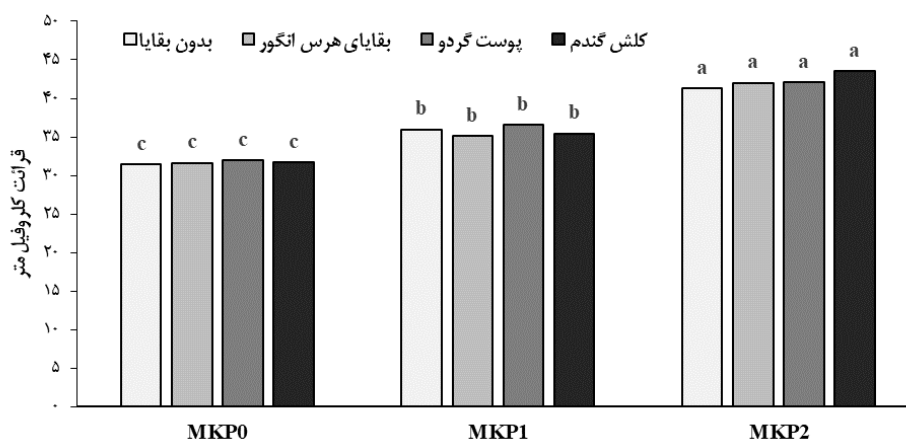
شکل ۶- اثر قرص های کودمونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوجارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم بر وزن تر و خشک اندام هوایی ذرت (MKP0: قرص کودی بدون مونوپتاسیم فسفات؛ MKP1: قرص کودی حاوی ۵ درصد مونوپتاسیم فسفات و MKP2: قرص کودی حاوی ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات)

کلروفیل برگ ذرت (قرائت کلروفیل متر دستی): نتایج آنالیز تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۴) که اثر کاربرد کود مونوپتاسیم فسفات بر میزان کلروفیل برگ ذرت معنی دار بود. با توجه به نتایج شکل ۷، بیشترین و کمترین میزان کلروفیل در تیمارهای دارای بیوچار کلش گندم در سطح ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات و سطح شاهد (بدون کاربرد کود) به دست آمد. بین بیوچارهای مختلف اثر معنی داری از لحاظ میزان کلروفیل وجود نداشت. تحت تأثیر کاربرد ۵ و ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات، میانگین میزان کلروفیل نسبت به سطح بدون کود به ترتیب ۱۱/۴ و ۲۵ درصد بالاتر بود.

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر نوع بیوچار و سطوح کودی بر میزان کلروفیل برگ ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
نوع بیوچار	۳	۱/۱۸ns
سطوح کودی	۲	۳۳۹/۵۹**
سطوح کودی × نوع بیوچار	۶	۱/۳۵ns
خطای باقیمانده	۲۴	۲/۳۶
ضریب تغییرات		۴/۲۰

** معنی داری در سطح ۱ درصد و ns: عدم معنی داری



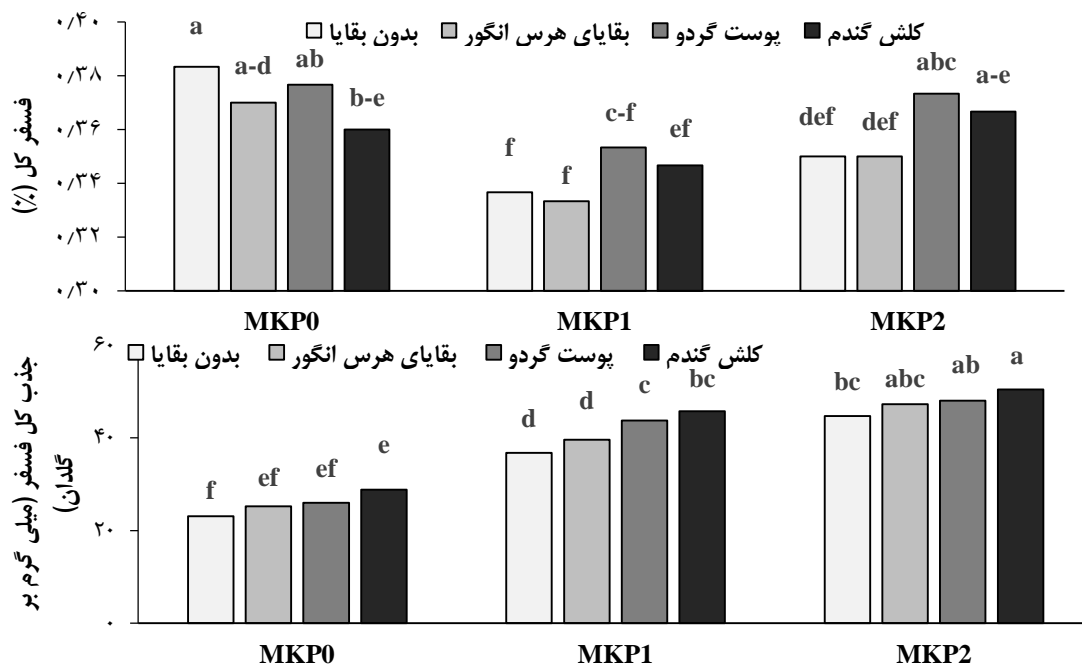
شکل ۷- اثر قرص های کودمونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم میزان کلروفیل (MKP0): قرص کودی بدون مونوپتاسیم فسفات؛ MKP1: قرص کودی حاوی ۵ درصد مونوپتاسیم فسفات و MKP2: قرص کودی حاوی ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات)

غلظت فسفر کل و جذب کل فسفر در اندام هوایی ذرت: نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۵) که اثر بیوچار و سطوح کود بر غلظت فسفر و جذب کل فسفر در اندام هوایی ذرت معنی دار بود ولی بر همکنش آنها معنی دار نبود. بالاترین غلظت فسفر کل در تیمار بدون بیوچار و کود به دست آمد هر چند اختلاف معنی داری با برخی از تیمارهای دیگر نداشت، در مقابل بالاترین جذب کل فسفر در تیمار دارای بیوچار کلش گندم و سطح ۱۰ درصد کود مونوپتاسیم فسفات به دست آمد (شکل ۸). با توجه به مقایسه میانگینها (شکل ۹)، غلظت فسفر در سطح بدون کود نسبت به سطح ۵ درصد مونوپتاسیم فسفات به طور معنی داری بالاتر بود ولی اختلاف معنی داری با سطح ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات نداشت. در مقابل جذب کل فسفر در سطح ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات نسبت به سطح بدون کود و ۵ درصد مونوپتاسیم فسفات به ترتیب ۴۶/۷ و ۱۰/۸ درصد بالاتر بود. (شکل ۹).

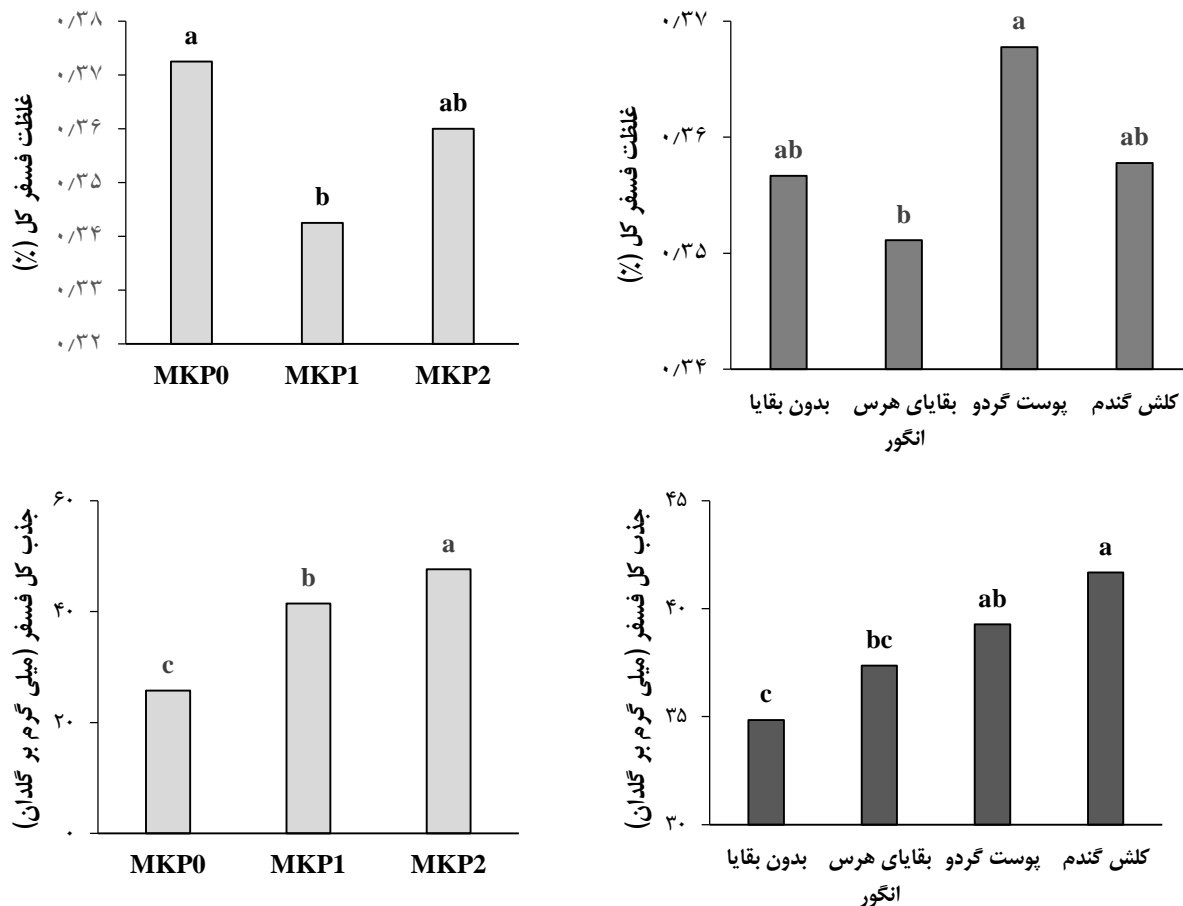
جدول ۵- تجزیه واریانس اثر نوع بیوچار و سطوح کودی بر میزان غلظت فسفر کل و جذب کل فسفر در اندام هوایی ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
نوع بیوچار	۳	۷۵/۳۳**
سطوح کودی	۲	۱۵۲۲/۳۵**
سطوح کودی × نوع بیوچار	۶	۳/۷۹*
خطای باقیمانده	۲۴	۴/۹۳
ضریب تغییرات		۵/۷۹

** معنی داری در سطح ۵ درصد و * معنی داری در سطح ۱ درصد



شکل ۸- اثر قرص های کود مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوجارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم بر فسفر کل و جذب کل فسفر اندام هوایی ذرت (MKP0: قرص کودی بدون مونوپتاسیم فسفات؛ MKP1: قرص کودی حاوی ۵ درصد مونوپتاسیم فسفات و MKP2: قرص کودی حاوی ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات)



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر قرص های کود مونوپتاسیم فسفات بر پایه بیوجارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم بر فسفر کل و جذب کل فسفر اندام هوایی ذرت (MKP0: قرص کودی بدون مونوپتاسیم فسفات؛ MKP1: قرص کودی حاوی ۵ درصد مونوپتاسیم فسفات و MKP2: قرص کودی حاوی ۱۰ درصد مونوپتاسیم فسفات)

بحث و نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که قرص‌های کودی تهیه شده از بیوچارهای تولید شده از زیست‌توده‌های بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت بودند. در واقع با افزایش دمای پیرولیز از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد میزان pH، EC و چگالی ظاهری نیز افزایش یافت. در این ارتباط Cheng و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که با افزایش دمای پیرولیز کلش گندم از ۲۵۰ به ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد میزان pH از ۵/۴ واحد به ۹/۷ واحد افزایش یافت. Lehmann و Joseph (۲۰۱۹) نیز گزارش کرده‌اند که با افزایش دمای پیرولیز خصوصیات بیوچار به سمت قلیایی شدن پیش می‌رود که این هم با نتایج آزمایش حاضر مطابقت دارد.

نتایج تغییرات رهاسازی فسفر با زمان در بررسی نشان داد که تهیه کمپوزیت‌های کودهای فسفردار بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم میزان رهاسازی فسفر را در محلول‌های آبی و در شرایط خاک را کاهش داد که این هم با نتایج محققان دیگر مطابقت داشت به طوری که در تحقیقی که کود مبتنی بر بیوچار (کلش کتان) غنی شده با فسفر (H_3PO_4) تولید شد (با نسبت وزنی ۱:۱)، رهاسازی آهسته‌تر فسفر در بررسی‌های آبشویی تأیید شده است (An et al., 2021). در تحقیقی که توسط لی و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، دو نوع بیوچار از ساقه‌های ذرت از طریق پیرولیز در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت به دست آوردند. بیوچار با فسفر با استفاده از محلول KH_2PO_4 به مدت ۲۴ ساعت غنی شد. به عنوان یک نتیجه، کود فسفر کندهش مقرون به صرفه به دست آمد (Li et al., 2020). پس با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر می‌توان عنوان نمود که کودهای کندها فسفردار بر پایه بیوچار، رهاسازی تدریجی فسفر را برای تأمین طولانی مدت آنها برای رشد گیاه، جلوگیری از آبشویی، بهبود کارایی کود، و کاهش تهدیدات بالقوه برای محیط‌زیست را امکان‌پذیر می‌کند. پتانسیل بیوچار به عنوان یک حامل عناصر غذایی، باعث کاهش سرعت آزادسازی عناصر غذایی و بهبود بهره‌وری استفاده از عناصر غذایی به دلیل مساحت سطح بالا و ریزساختارهای متخلخل، بار سطحی مطلوب، گروه‌های سطحی فراوان و کربن فعال می‌شود (Jia et al., 2021). Ye و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند بیوچار یک حامل مناسب برای عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم است به طوری که دارای توانایی جذب قوی برای نیترات، آمونیوم، فسفات، و غیره می‌باشد. در واقع بیوچار حاوی گروه‌های سطحی و فعال زیادی برای جذب پتاسیم، نیتروژن و فسفر است. جذب عناصر غذایی در کامپوزیت‌های بیوچار و مونتوریلونیت نشان داد که جذب سطحی آمونیوم عمدتاً مرتبط با تبادل یونی بوده است، در حالی که جذب سطحی فسفات توسط جذب الکترواستاتیک یا پیوند یونی بین فسفات و کاتیون‌های فلزی کنترل می‌شود (Chen et al., 2017). همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که قرص‌های کودی پایه بیوچار در مقایسه با کودهای رایج شیمیایی عملکرد و کارایی استفاده از کود را به طور معنی‌داری افزایش داد. در ارتباط با این موضوع محققان دیگری نیز به این نتایج رسیده‌اند. به طوری که Chew و همکاران (۲۰۲۰) با تهیه یک کود NPK مبتنی بر بیوچار حاوی N (۲/۷ درصد)، P (۱/۴ درصد)، K (۲ درصد) و C (۴۳ درصد)، بر نشاء برنج، یک آزمایش گلدانی را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که کود جدید زیست‌توده برنج را تا ۶۷ درصد افزایش داد و جذب نیتروژن (۴۰ درصد)، فسفر (۴۶ درصد) و پتاسیم (۲۶ درصد) را در مقایسه با شاهد افزایش داد. در تحقیق دیگر ضایعات بستر مرغداری را به عنوان مواد خام جهت تهیه بیوچار مورد استفاده قرار دادند و زیست‌توده را با نسبت ۱ به ۵/۰ با اسید فسفریک غلیظ و اکسید منیزیم (نسبت ۱:۱ وزنی) مخلوط و تحت پیرولیز در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دادند. سپس کود جدید را در آزمایشات گلخانه‌ای روی بذر علف مومباسا، ذرت و لوبیا معمولی مورد آزمایش قرار دادند. افزایش عملکرد محصول در کوتاه‌مدت و بلندمدت در انواع محصولات زراعی (علف، ذرت و لوبیا) مشاهده شد (Carneiro et al., 2021). این محققان به این نتیجه رسیدند که رهاسازی آهسته‌تر فسفر در کود مبتنی بر بیوچار با رشد بهتر گیاه مرتبط است.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که گرانوله نمودن کودهای شیمیایی با بیوچار می‌تواند یک روش مناسبی برای تهیه کودهای کندها باشد که تا حدودی می‌تواند بر مشکلات محیط‌زیستی و بار اقتصادی استفاده از کودهای شیمیایی غلبه کرد. همچنین بیوچار به دلیل توانایی بالا در جذب ترکیبات آسیب‌زا مانند آفت‌کش‌ها، هیدروکربن‌های حلقوی و فلزات سنگین، در بسیاری از مسائل محیط‌زیستی مانند کاهش میزان آلودگی و خطر غنی‌شدن آب‌ها، می‌تواند مفید و مؤثر واقع شود. با این وجود، توسعه

کودهای کندرهای مبتنی بر بیوجار برای کاربرد عملی در زمین‌های کشاورزی هنوز در مراحل اولیه می‌باشد به طوری که نیازمند انجام کارهای میدانی و تکمیلی بیشتر و نیز ارزیابی بلندمدت استفاده از یک چنین کودهایی در محیط رشد گیاهان است.

References

- Agegehu, G., Bass, A.M., Nelson P.N., Bird, M.I., 2016. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment* 543(Part A), 295-306.
- An, X., Wu, Z., Shi, W., Qi, H., Zhang, L., Xu, X., Yu, B., 2021. Biochar for simultaneously enhancing the slow-release performance of fertilizers and minimizing the pollution of pesticides. *Journal of Hazardous Materials* 407, 124865.
- Ashitha, Arakhimol, K.R., Juothis, M., 2021. Fate of the conventional fertilizers in environment. In book: *Controlled release fertilizers for sustainable agriculture*, Edited: Lewu, F.B. CRC Press. pp. 25-39.
- Carneiro, J.S. da S., Ribeiro, I.C.A., Nardis, B.O., Barbosa, C.F., Lustosa Filho, J.F., Melo, L.C.A., 2021. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: agronomic efficiency and phosphorus availability. *Science of the Total Environment* 760, 143955.
- Chen, L., Chen, X.L., Zhou, C.H., Yang, H.M., Ji, S.F., Tong, D.S., Zhong, Z.K., Yu, W.H., Chu, M.Q., 2017. Environmental-friendly montmorillonite-biochar composites: Facile production and tunable adsorption-release of ammonium and phosphate. *Journal of Cleaner Production* 156, 648-659.
- Cheng, H., Jones, D.L., Hill, P., Bastami, M.S., Tu, C.L., 2017. Influence of biochar produced from different pyrolysis temperature on nutrient retention and leaching. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64(6), 850-859.
- Chew, J., Zhu, L., Nielsen, S., Graber, E., Mitchell, D.R.G., Horvat, J., Mohammed, M., Liu, M., van Zwieten, L., Donne, S., Munroe, P., Taherymoosavi, S., Pace, B., Rawal, A., Hook, J., Marjo, C., Thomas, D.S., Pan, G., Li, L., Bian, R., McBeath, A., Bird, M., Thomas, T., Husson, O., Solaiman, Z., Joseph, S., Fan, X., 2020. Biochar based fertilizer: supercharging root membrane potential and biomass yield of rice. *Science of the Total Environment* 713,136431.
- Conley, D.J., Paer, H.W., Howarth, R.W., Boesch, D.F., Seitzinger, S.P., Havens, K.E., Lancelot, C., Likens, G.E., 2009. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science* 323(5917), 1014-1015.
- Czekała, W., Jezowska, A., Chełkowski, D., 2019. The use of biochar for the production of organic fertilizers. *Journal of Ecological Engineering* 20(1), 1-8.
- Das, S.K., Ghosh, G.K., 2021. Development and evaluation of biochar-based secondary and micronutrient enriched slow release nano-fertilizer for reduced nutrient losses. *Biomass Conversion and Biorefinery* 13(13), 12193-12204.
- Dodds, W.K., W.W. Bouska, J.L. Eitzmann, T.J. Pilger, K.L. Pitts, A.J. Riley, J.T. Schloesser, and D.J. Thornbrugh. 2009. Eutrophication of U.S. freshwaters: analysis of potential economic damages. *Environmental Science & Technology* 43 (1),12-19.
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., and Mukome, F.N.D. 2017. Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *Journal of Environmental Management* 197, 732-749.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., 1999. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. Sixth Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- IBI (International Biochar Initiative). 2010. IBI Guidelines for the Development and Testing of Pyrolysis Plants to Produce Biochar. <http://www.biochar-international.org/sites/default/files/IBI-Pyrolysis-Plant-Guidelines>.
- IBI (International Biochar Initiative). 2015. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil (aka IBI Biochar Standards) Version 2.1.
- Jia, Y., Hu, Z., Ba, Y., Qi, W., 2021. Application of biochar-coated urea controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 8, 1-11.

- Kimetu, A., Lehmann, J., 2010. Stability and Stabilisation of Biochar and Green Manure in Soil with Different Organic Carbon Contents. *Soil Research* 48(7), 577-585.
- Lee, Y.L., Ahmed, O.H., Wahid, S.A., Ab-Aziz, Z.F., 2019. Characterization of tablets made from mixture of charred agricultural residues with and without embedded fertilizer. *Acta Technologica Agriculturae* 22(3),70-74.
- Lehmann, J., Joseph, S., 2009. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 1-12.
- Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(7), 381-387.
- Li, W., Wang, S., Xu, E., Xu, G., Zhang, X., Zhao, L., 2020. Biochar-based Ecological Fertilizer Forming Device Capable of Increasing Sugar Content of Watermelons and Use Method of Biochar-Based Ecological Fertilizer Forming Device. Patent application no. CN112742306A.
- Maikol, N., Haruna, A.O., Maru, A., Asap, A., Medin, S., 2021. Utilization of urea and chicken litter biochar to improve rice production. *Scientific Reports* 11(1), 9955.
- Marschner, P., 2012. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Third Edition, Elsevier, Academic Press, Waltham, USA.
- Oleszczuk, P., Cwiłka-Bundyra, W., Bogusz, A., Skwarek, E., Ok, Y.S., 2016. Characterization of nanoparticles of biochars from different biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 121,165-172.
- Pang, W., Hou, D., Wang, H., Sai, S., Wang, B., Ke, J., Wu, G., Li, Q., Holtzaple, M.T., 2018. Preparation of Microcapsules of Slow-Release NPK Compound Fertilizer and the Release Characteristics. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 29, 2397-2404.
- Rombel, A., Krasucka, P., Oleszczuk, P., 2021. Sustainable biochar-based soil fertilizers and amendments as a new trend in biochar research. *Science of the Total Environment* 816, 151588.
- Rutland, D.W., 1986. *Manual for Determining Physical Properties of Fertilizer*. International Fertilizer Development Center.
- 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.
- Withers, P.J.A., Neal, C., Jarvie, H.P., Doody, D.G. 2014. Agriculture and eutrophication: where do we go from here? *Sustainability* 6(9), 5853-5875.
- Ye, Z., Zhang, L., Huang, Q., Tan, Z., 2019. Development of a carbon-based slow release fertilizer treated by bio-oil coating and study on its feedback effect on farmland application. *Journal of Cleaner Production* 239, 118085.