



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

Investigating the behavior of nitrogen release from nitrogen fertilizers based on different biochars

Amir Khamseh^{*1}, Ahmad Golchin², Saeid Shafiei³

1. Corresponding Author, Ph.D. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: amir.khamse@gmail.com
2. Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: agolchin2011@yahoo.com
3. Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Jiroft University, Jiroft, Iran. E-mail: saeid55@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Although using common chemical fertilizers such as nitrogen fertilizers improves agricultural production, at the same time, it leads to serious environmental problems and a considerable economic cost. The low use efficiency of nitrogen chemical fertilizers increases agricultural products' production costs and reduces product yield. Environmental pollution using chemical fertilizers, especially nitrogen fertilizers, has made the fertilizer production industry progress towards the supply of slow-release fertilizers. Recently, in addition to using biochar as a soil amendment, it has been used in the production of biochar-based slow-release fertilizers. The current experiment was conducted to evaluate the behavior of nitrogen release from urea and ammonium nitrate fertilizers based on the biochars of walnut shell residues, grape pruning and wheat stubble in water, different pH and soil.
Article history: Received: 03.11.2023 Revised: 05.27.2024 Accepted: 05.28.2024	
Keywords: Ammonium nitrate, Biochar, Slow-release fertilizer, Urea	
	Materials and Methods: To evaluate the behavior of nitrogen release from nitrogen fertilizers based on different biochars, three experiment, completely randomized split plot design were conducted with three replications in the laboratory of the Soil Department of the Faculty of Agriculture of Zanjan University, Zanjan, Iran. The experiment treatments included three types of biochar (residues of grape pruning, walnut shell and wheat straw) at two pyrolysis temperatures of 350 and 650 degrees and nitrogen fertilizer (20% by weight) from two sources of urea and ammonium nitrate, which were also added to each treatment 10% montmorillonite clay by weight. To investigate the behavior of prepared fertilizer tablets in connection with the release of nitrogen in water, 10 grams of the prepared fertilizer tablets after being placed in 100 mesh nylon in a container containing 200 ml of distilled water were allowed to let it float for 56 days at room temperature in a container. During the experiment, samples were taken from the solution at 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 28, and 56 days after the start of the experiment, and the cumulative nitrogen concentration was measured and its release percentage was calculated.
	Results: The results showed that the effect of temperature and biochar type on density, apparent density, pH and EC of fertilizer tablets based on biochar was significant. Nitrogen from nitrogen fertilizers based on biochar

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 nitrogen release during the experiment in fertilizer tablets based on wheat straw biochar was lower compared to walnut shell and grape pruning biochars, so that at the end of the experiment, the percentage of nitrogen release in wheat straw biochar was lower 8 (7) and 6.6 (5.1) % compared to walnut shell biochar and grape pruning residues at 350^{°C} (or 650^{°C}) pyrolysis temperature, respectively. The lowest and highest percentage of nitrogen release occurred at pH=2 and pH=6, respectively, at both pyrolysis temperatures of 350^{°C} and 650^{°C}. Also, the lowest and highest percentage of nitrogen release in soil was observed in wheat stubble biochar and grape pruning residues at both pyrolysis temperatures of 350^{°C} and 650^{°C}, respectively.

Conclusion: Using a combination of nitrogen fertilizers, such as urea and ammonium nitrate based on biochar and in granulated form, acts as a slow-release fertilizer, which can be a proper way to promote sustainable agriculture.

Cite this article: Khamseh, Amir, Golchin, Ahmad, Shafiei, Saeid. 2025. Investigating the behavior of nitrogen release from nitrogen fertilizers based on different biochars. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (1), 29-53.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.21000.2088

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



بررسی رفتار رهاسازی نیتروژن از کودهای نیتروژن دار بر پایه بیوچارهای مختلف

امیر خمسه^{۱*}، احمد گلچین^۲، سعید شفیعی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

رایانامه: amir.khamse@gmail.com

۲. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: agolchin2011@yahoo.com

۳. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: saeid55@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸ واژه‌های کلیدی: آوره، بیوچار، کود کدرها، نیترات آمونیوم	سابقه و هدف: با این که استفاده از کودهای شیمیایی رایج مانند کودهای نیتروژن دار باعث بهبود تولیدات کشاورزی می شود، اما در همان حال مشکلات جدی زیست محیطی و هزینه اقتصادی قابل توجهی به دنبال دارد. راندمان پایین استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژن دار باعث افزایش هزینه های تولید محصولات کشاورزی و کاهش عملکرد محصولات می شود. آلودگی های زیست محیطی استفاده از کودهای شیمیایی به خصوص کودهای نیتروژن دار باعث شده تا صنعت تولید کود به سمت عرضه کودهای کدرها پیشرفت داشته باشد. اخیراً علاوه بر استفاده از بیوچار به عنوان یک اصلاح کننده خاک، از آن در جهت تولید کودهای کدرها مبتنی بر بیوچار استفاده شده است. آزمایش حاضر به منظور ارزیابی رفتار رهاسازی نیتروژن از کودهای آوره و نیترات آمونیوم بر پایه بیوچارهای بقایای پوست گردو، بقایای هرس انگور و کلش گندم در آب، در pH های مختلف و در خاک صورت گرفت. مواد و روش ها: به منظور بررسی رفتار رهاسازی نیتروژن از کودهای نیتروژن دار بر پایه بیوچارهای مختلف سه آزمایش اسپلیت پلات به صورت 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) تهیه شده در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس و دو نوع کود نیتروژن دار (۲۰ درصد وزنی) از منبع آوره و نیترات آمونیوم بود که به هر تیمار ۱۰ درصد وزنی رس مونت موریلونایت نیز اضافه شد. برای بررسی رفتار کدرها بودن قرص های کودی تهیه شده در ارتباط با آزادسازی نیتروژن در آب، مقدار ۱۰ گرم از قرص های کودی تهیه شده پس از قرار داده شدن در نایلون با اندازه مش ۱۰۰ در ظرفی حاوی ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر، اجازه داده شد تا به مدت ۵۶ روز در دمای اتاق در ظرف، شناور بماند. در طول آزمایش در زمان های ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۲۸، و ۵۶ روز بعد از شروع آزمایش از محلول نمونه برداری شد و غلظت نیتروژن تجمعی اندازه گیری و درصد رهاسازی آن محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که اثر دما و نوع بیوچار بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص‌های کودی بر پایه بیوچار معنادار بود. نیتروژن کودهای نیتروژن‌دار بر پایه بیوچار در طی آزمایش در همه بیوچارها به تدریج در آب آزادسازی گردید ولی سرعت آزادسازی آن در ابتدای آزمایش بیش تر بود. میزان آزادسازی نیتروژن در طول آزمایش در قرص‌های کودی بر پایه بیوچار کلش گندم نسبت به بیوچارهای پوست گردو و هرس انگور کم تر بود به طوری که در انتهای آزمایش درصد آزادسازی نیتروژن در بیوچار کلش گندم نسبت به بیوچار پوست گردو و بقایای هرس انگور در دمای پیرولیز ۳۵۰ (یا ۶۵۰) درجه سلسیوس به ترتیب ۸ (۷) و ۶/۶ (۵/۱) درصد پایین تر بود. کم ترین و بیش ترین درصد آزادسازی نیتروژن به ترتیب در pH=۲ و pH=۶ در هر دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس اتفاق افتاد. همچنین کم ترین و بیش ترین درصد آزادسازی نیتروژن در خاک به ترتیب در بیوچار کلش گندم و بقایای هرس انگور در هر دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس مشاهده شد.

نتیجه گیری: استفاده از مخلوط کودهای نیتروژن‌دار مانند اوره و نترات آمونیوم بر پایه بیوچار به صورت گرانوله به عنوان یک کود کندرها عمل می کند که این موضوع می تواند راهی مناسب برای ترویج کشاورزی پایدار باشد.

استناد: خمسه، امیر، گلچین، احمد، شفیعی، سعید (۱۴۰۴). بررسی رفتار رهاسازی نیتروژن از کودهای نیتروژن‌دار بر پایه بیوچارهای مختلف. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۱)، ۵۳-۲۹.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.21000.2088



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

راندمان پایین استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار باعث افزایش هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی و کاهش عملکرد محصولات می‌شود. آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از کاربرد کودهای شیمیایی به‌خصوص کودهای نیتروژن‌دار باعث گردیده تا صنعت تولید کود به سمت عرضه کودهای کندرها پیشرفت داشته باشد. به‌طور معمول بیش‌تر مباحث تولیدی در کودهای کندرها، بر جلوگیری از رهایش سریع و شسته شدن نیترات در پروفیل خاک متمرکز است (۱). کودهای کندرها عموماً بر پایه مواد شیمیایی است، ولی با این حال استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر مانند بیوچار، جهت تولید کودهای کندرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بیوچار به‌عنوان راه‌حلی ماندگار در عرصه بازیافت ضایعات کشاورزی و تکمیل کردن ترسیب کربن در محیط است و دارای ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مثبتی است که می‌تواند تا صدها سال در خاک ماندگار باشد (۲). افزودن بیوچار به خاک، علاوه بر ترسیب کربن، باعث افزایش حاصلخیزی خاک و تولید محصول، کاهش استفاده از کودهای شیمیایی و آلودگی‌های غیرمتمرکز و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشد (۳).

در واقع به دلیل مقاوم بودن بیوچار به تجزیه سریع، این امکان فراهم شده است که از بیوچار به‌عنوان کود کندرها استفاده گردد. با این حال، بیوچار به تنهایی نمی‌تواند تمامی عناصر مورد نیاز برای رشد گیاهان را فراهم کند. پژوهش‌ها نشان داده است که افزودن بیوچار به تنهایی و بدون منبع کافی نیتروژن، باعث کاهش عملکرد می‌گردد (۴). بنابراین افزودن برخی کودها به بیوچار می‌تواند آن را به منبع بسیار مناسبی جهت تأمین عناصر غذایی مورد نیاز رشد گیاه تبدیل کند. پژوهش‌گران نشان داده‌اند که کودهایی با

پایه بیوچار، آزاد شدن عناصر را به تأخیر می‌اندازند (۵). این کودها به‌طور معنی‌داری باعث تنظیم pH خاک، کاهش چگالی ظاهری در راستای بهبود تهویه و نفوذپذیری خاک و افزایش عملکرد می‌گردند (۶). گونزی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که ساختار متخلخل و منافذ زیاد بیوچار، باعث جذب مؤثر نیترات، فسفر و پتاسیم شده و بیوچار غنی از مواد معدنی تولید می‌گردد که مقدار آزادسازی این یون‌ها، نسبت به آزادسازی آن‌ها توسط کودهای معمول رایج، بسیار کم‌تر است (۷). چن و همکاران (۲۰۱۸) دریافتند که کود نیتروژن‌دار سنتزی بر پایه بیوچار کلش برنج در کاهش آزادسازی نیتروژن به‌خوبی مؤثر بود (۸). پژوهش‌های دیگری نیز نشان داده‌اند که بیوچار شامل گروه‌های عاملی زیادی می‌باشد که باعث جذب عناصر غذایی نیترات، آمونیوم، فسفر و پتاسیم و در نتیجه کاهش آبشویی آن‌ها می‌شود (۹).

استفاده از کودهای گرانوله بر پایه بیوچار در زمین‌های کشاورزی در حال افزایش می‌باشد. در واقع این نوع کودها دارای فضای خالی کم‌تری بوده و چگالی بالاتری دارند که باعث می‌شود حمل و نقل و کار با آن‌ها راحت‌تر باشد. هر چند قرص‌های بیوچار غنی شده با مواد غذایی به‌عنوان منابع کودی، نسبت به کودهای شیمیایی معمول، در تغذیه گیاه مؤثرتر می‌باشند ولی اطلاعات در زمینه عملکرد قرص‌های ساخته شده با ترکیبات آلی و شیمیایی کم می‌باشد (۱۰).

افزودن مواد متخلخلی مانند ژئولیت، به‌عنوان کنترل‌گر در آزادسازی اوره از دیرباز انجام شده است که دارای سطح ویژه و ظرفیت تبادل بالا می‌باشد. این مواد می‌توانند کاتیون‌های تبدالی خود را با یون‌های آمونیوم ناشی از هیدرولیز اوره به‌دست آورند. رس‌های آلومینوسیلیکات طبیعی، ارزان‌تر و عمومی‌تر از سایر کانی‌های معمول کاربرد داشته و به‌عنوان

ماده‌ای جهت افزایش کارایی مصرف اوره استفاده می‌شود. کانی‌های رسی، سیلیکات‌های لایه‌ای آبدار می‌باشند که قابلیت جایگزینی کاتیونی دارند و می‌توانند گونه‌های مولکولی خشتی را در بین لایه‌های درونی، با اتصال به ساختارهای آب، به‌صورت مقطعی نگهداری کنند (۱۱). مونت‌موریلونایت فراوان‌ترین کانی در گروه اسمکتایت‌ها می‌باشد. این گروه از رس‌ها ورقه‌ورقه بوده و قابلیت فشرده شدن دارند و بر خلاف بسیاری از زئولیت‌ها، دارای خواص پلاستیکی هستند. به‌طور ویژه، در مورد این رس‌ها، فرایند جداسازی می‌تواند در دمای پائین نیز ادامه یابد که در مورد اوره و تبدیل بیورت مهم است و امکان تولید گرانول‌های با اندازه‌های مختلف در مقادیر بالا وجود دارد (۱۱).

در پژوهش حاضر قرص‌های کودی نیتروژن‌دار از منابع اوره و نترات آمونیوم بر پایه بیوپچارهای مختلف در دماهای مختلف و حاوی رس مونت‌موریلونایت تولید شد و سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها و رفتار رهاسازی نیتروژن از این قرص‌های کودی در محیط آب، خاک و pH های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی و ارزیابی رفتار رهاسازی نیتروژن از کودهای نیتروژن‌دار بر پایه بیوپچار در آب، در pH های مختلف، و خاک، سه آزمایش جداگانه اسپلینت پلات به‌صورت کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه گروه خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه نوع بیوپچار (بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم)، در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس و کود نیتروژن‌دار (۲۰ درصد وزنی) از دو منبع اوره و نترات آمونیوم بود که به هر تیمار ۱۰ درصد وزنی رس مونت‌موریلونایت نیز اضافه شد.

برای تهیه بیوپچارها، پس از هوا خشک نمودن بقایای موردنظر، به‌منظور همگن‌سازی آن‌ها با آسیاب خرد شدند و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس بیوپچارها در دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس از بقایای هرس درخت انگور، پوست گردو و کاه و کلش گندم به روش گرماکافت در شرایط بدون اکسیژن در ظرف‌های مخصوص در کوره الکتریکی تهیه شدند. به‌طوری‌که کوره با شیب دمایی ۱۰۰ درجه سلسیوس، در پانزده دقیقه روشن شد و در زمان رسیدن به دمای نهایی (۳۵۰ یا ۶۵۰ درجه سلسیوس) زیست‌توده یک ساعت در دمای مذکور نگهداری شد (۱۲ و ۲). به‌منظور دانه‌بندی یکسان بیوپچارهای تهیه شده از الک یک میلی‌متری عبور داده شدند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوپچارها با استفاده از روش‌های استاندارد ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی بیوپچار (۱۳ و ۱۴)، pH و EC در نسبت ۱ به ۲۰ (بیوپچار به آب)، کربن (C)، نیتروژن (N)، نسبت خاکستر، چگالی ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه‌گیری شد (۱۵) (جدول ۱). به‌طور خلاصه، برای اندازه‌گیری pH و EC مقدار یک گرم بیوپچار آن خشک وزن شد و میزان ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد و به مدت ۲۴ شیک شدند و سپس به مدت ۳۰ دقیقه به حال خود رها شدند. پس از این زمان میزان pH و EC نمونه‌ها قرائت شدند. به‌منظور اندازه‌گیری محتوای خاکستر بیوپچار، میزان ۵ گرم نمونه بیوپچار آن خشک را داخل ظرف بوته چینی ریخته و به‌مدت ۸ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه حرارت در محیط با اکسیژن کافی قرار داده شد. بعد از این زمان بوته را داخل دسیکاتور در دمای اتاق قرار داده تا سرد شود و دوباره وزن گردید. محتوای خاکستر با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$100 \times \text{وزن نمونه بیوپچار آون خشک (g)} / \text{وزن خاکستر (g)} = \text{محتوای خاکستر (\%)}$$

چگالی ظاهری یک ماده برابر وزن واحد ماده بر واحد حجم آن می‌باشد. برای این منظور بیوچار را داخل سیلندری شیشه‌ای ۱۰۰ میلی‌لیتری با وزن مشخص ریخته و به مدت ۱ دقیقه روی ویبراتور قرار داده تا بیوچار داخل سیلندر را پر کند. چگالی ظاهری را از وزن کردن مجدد سیلندر به دست آمد. ظرفیت تبادل کاتیونی بیوچارها توسط روش دو مرحله‌ای جایگزینی کاتیون‌ها با استات آمونیوم و سپس استخراج آمونیوم تبادل شده توسط کلرید پتاسیم اندازه‌گیری شد (۱۵).

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 سلسیوس.

Table 1. Some physical and chemical properties of biochars prepared from residues of grape pruning, walnut shell and wheat straw at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C.

650°C			350°C			ویژگی‌ها Characteristics
Wheat biochar	Walnut biochar	Grape biochar	Wheat biochar	Walnut biochar	Grape biochar	
10.13	8.56	11.04	8.63	7.4	9.87	pH (1:20)
6.65	0.42	1.87	5	0.23	1.01	EC (dS m ⁻¹)
59.8	63.8	72.7	56.54	61.68	69.5	کربن کل (%) Total Carbon (%)
0.12	0.27	0.51	0.32	0.45	0.67	نیتروژن کل (%) Nitrogen (%)
498	236	142	176	137	103	C/N
0.19	0.59	0.51	0.14	0.51	0.46	چگالی ظاهری (g cm ⁻³) Bulk density (g cm ⁻³)
21.7	11.56	12.3	14.47	8.43	6.51	خاکستر (%) Ash (%)
48.28	36.65	۳۲/۷	121.16	54.45	41.8	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol _c kg ⁻¹) CEC (cmol _c kg ⁻¹)

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 دیده نشد. سپس چگالی ظاهری از تقسیم وزن کود درون لوله به حجم لوله محاسبه گردد (۱۶). میزان pH و EC قرص‌های کودی در نسبت ۱ به ۱۰ قرص به آب مقطر اندازه‌گیری شد (۶).

برای بررسی رفتار کندها بودن قرص‌های کودی تهیه شده در ارتباط با آزادسازی نیتروژن در آب، مقدار ۱۰ گرم از قرص‌های کودی تهیه شده پس از

جهت تهیه قرص‌های کودی، میزان ۵۰ درصد وزنی از مخلوط هر تیمار آزمایش مورد اشاره در بالا، به همراه ۲۰ درصد وزنی نشاسته و ۳۰ درصد وزنی آب، در بشر ریخته شده و به مدت پنج دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس هم‌زده شدند. سپس مخلوط حاصل برای هر تیمار پرس شده و در نهایت، قرص‌ها در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در آون خشک شدند (۶). چگالی قرص از نسبت وزن قرص به حجم قرص با ۱۰ تکرار محاسبه شد (۶). چگالی ظاهری قرص‌های کودی با روش ضربه‌زنی اندازه‌گیری شد.

(۱۸، ۱۹)، غلظت اوره به روش وات و کریسپ (۲۰) و غلظت آمونیوم و نیترات به روش رنگ‌سنجی و توسط اسپکتروفوتومتر (۲۱ و ۲۲) اندازه‌گیری شد. **تحلیل آماری:** داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و SPSS تجزیه و تحلیل شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال یک و پنج درصد انجام و ترسیم نمودارها و جدول‌های مربوطه با استفاده از برنامه‌های Excel و Word انجام شدند.

نتایج و بحث

خصوصیات قرص‌های کودی بر پایه بیوچارهای مختلف: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده دما و نوع بیوچار بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص‌های کودی بر پایه بیوچار در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنادار بود. همچنین اثر برهمکنش دما و نوع بیوچار بر چگالی، چگالی ظاهری و EC قرص‌های کودی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنادار بود ولی بر میزان pH قرص‌های کودی اثر معناداری نداشت (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های تأثیر دما و نوع بیوچار بر چگالی قرص‌های کودی نشان داد که چگالی قرص‌های کودی برپایه بیوچار پوست گردو در هر دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس نسبت به بیوچار بقایای هرس انگور و کلش گندم به‌طور معناداری بالاتر بود ولی بین بقایای هرس انگور و کلش گندم اختلاف معناداری وجود نداشت (شکل ۱a). همچنین چگالی ظاهری قرص‌های کودی برپایه بیوچار گردو نسبت به دو بیوچار دیگر به‌طور معناداری بیش‌تر بود. چگالی ظاهری در بیوچار هرس انگور نسبت به بیوچار کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بالاتر بود ولی در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس اختلاف معناداری با هم نداشتند (شکل ۱b).

قرار داده شدن در نایلون با اندازه مش ۱۰۰ در ظرفی حاوی ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، اجازه داده شد تا به‌مدت 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 نمونه‌برداری شد (۲۳) و غلظت نیتروژن به‌صورت تجمعی اندازه‌گیری و با رابطه زیر محاسبه گردید:

$$W_t (\%) = (M_t / M_0) \times 100$$

که در این رابطه، M_0 و M_t به ترتیب مقدار تجمعی عناصر آزاد شده و مقدار کل عناصر موجود در کود بر حسب گرم بوده و W_t نسبت آزاد شدن تجمعی عناصر غذایی بر حسب درصد می‌باشد (۱۷).

برای بررسی رفتار قرص‌های کودی تهیه شده در ارتباط با آزادسازی نیتروژن در pHهای مختلف، محلول‌های ۰/۰۰۱ مولار از نمک‌های $CaCl_2$ ، $NaCl$ ، $FeCl_3$ در pHهای ۲، ۶ و ۱۰ تهیه شدند. سپس یک گرم از کودها در ظرف ریخته و ۳۰ میلی‌لیتر از محلول‌ها بر روی آن ریخته شدند. سپس درصد رهاسازی نیتروژن از کودها در زمان‌های یک، ۴، ۸ ساعت و یک، ۲، ۶، ۱۰، ۱۴ و ۲۱ روز بعد از شروع آزمایش اندازه‌گیری شد. همچنین برای بررسی رفتار کندرها بودن مخلوط تیمارها یک گرم از ترکیبات تیمارها (قبل از تهیه قرص کودی) در نایلونی با مش ۴۰۰ ریخته شده و در ظرفی با ۲۰۰ گرم خاک ریخته و در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح قرار داده شدند به‌طوری‌که خاک به خوبی در تماس با نایلون قرار گرفت. برای بررسی رهاسازی یون‌های نیتروژن (نیترات و آمونیوم) از مواد کودی تهیه شده یک آزمایش انکوباسیون به مدت ۲۱ روز انجام شد. 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 نیتروژن اندازه‌گیری شد. نیتروژن کل به روش کج‌جلال

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر دما، نوع بیوچار و اثرات متقابل آن‌ها بر چگالی، چگالی ظاهری، pH و EC قرص‌های کودی بر پایه بیوچار.
Table 2. Variance analysis of the effect of temperature and type of biochar on density, bulk density, pH and EC of biochar-based fertilizer.

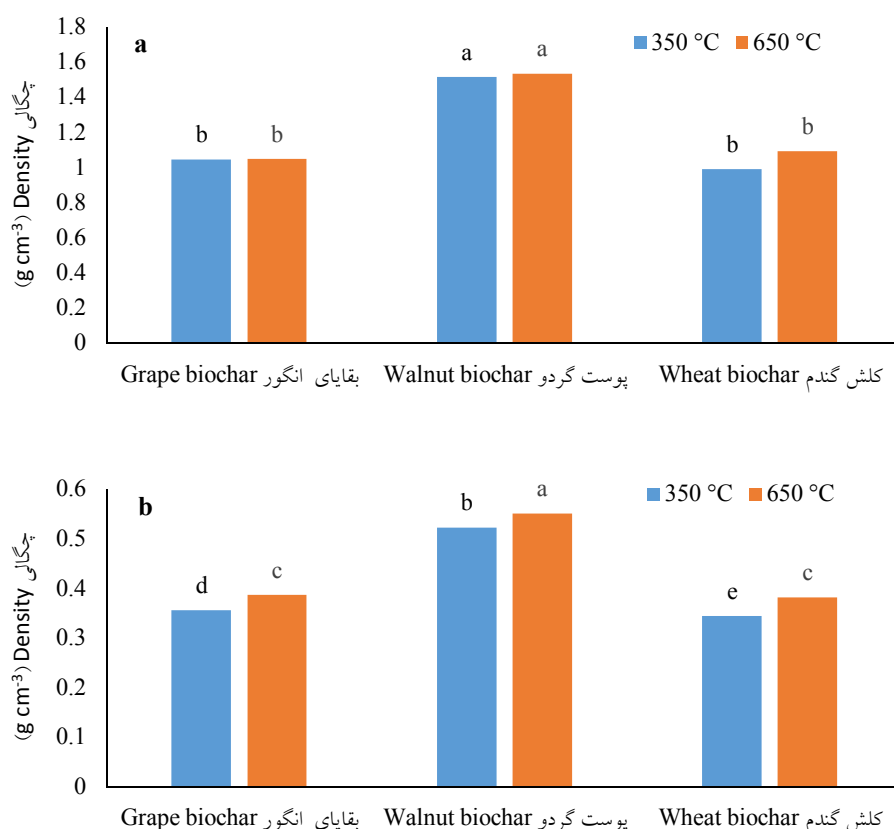
میانگین مربعات Mean squares				درجه آزادی Df	منابع تغییرات C.O.V
EC	pH	چگالی ظاهری Bulk density	چگالی Density		
62.9292**	29.2968**	0.02879**	0.04875**	1	دما Temperature
0.066	0.076	1.74	0.0032	34	خطا (دما) Error (Temperature)
865.899**	64.4393**	0.345166**	2.779**	2	بیوچار Biochar
16.0691**	0.0057 ^{ns}	0.000175**	0.02481**	2	دما × بیوچار Temperature × Biochar
0.0108	0.0337	0.00001	0.00384	68	خطا Error
2.565	2.106	0.975	5.15		ضریب تغییرات (%) C.V. (%)

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنادار و ^{ns} اختلاف معنادار نیست

** , * and ^{ns} significant at $P \leq 0.01$, significant at $P \leq 0.05$ and non-significant, respectively

همان‌طور که در شکل ۲b مشاهده می‌شود بالاترین EC مربوط به قرص‌های کودی بر پایه بیوچار کلش گندم در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس و کم‌ترین آن مربوط به قرص‌های کودی بر پایه بیوچار پوست گردو در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بود. میانگین EC قرص‌های کودی در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به‌طور معناداری به میزان ۱/۵۳ دسی‌زیمنس بر متر بالاتر بود. همچنین میانگین EC قرص‌های کودی در بیوچار بقایای کلش نسبت به بیوچار هرس انگور و پوست گردو به ترتیب ۷/۹۲ و ۸/۹۷ دسی‌زیمنس بر متر بالاتر بود (شکل ۲b).

بالاترین pH قرص‌های کودی بر پایه بیوچار مربوط به بیوچار بقایای هرس انگور در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس (pH=۱۰/۵) و کم‌ترین آن مربوط به بیوچار پوست گردو در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس (pH= ۶/۸) بود (شکل ۲a). میانگین pH قرص‌های کودی در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به‌طور معناداری به میزان ۱/۰۴ واحد بالاتر بود. همچنین میانگین pH قرص‌های کودی در بیوچار بقایای هرس انگور نسبت به بیوچار پوست گردو و کلش گندم به ترتیب ۲/۶۷ و ۱/۲۶ واحد بالاتر بود (شکل ۲a).

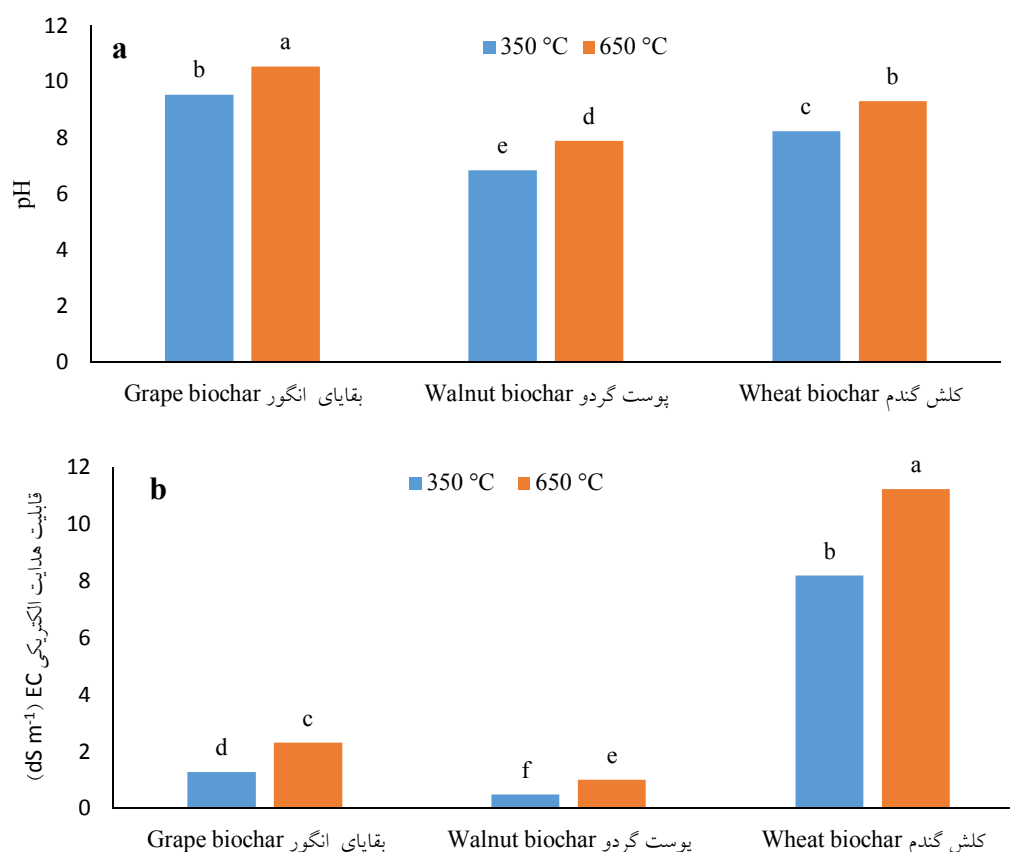


شکل ۱- چگالی (a) و چگالی ظاهری (b) قرص های کودی نیتروژن دار بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و گلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس.

Figure 1. Density (a) and bulk density (b) of nitrogen fertilizer tablets based on biochars of residues of grape pruning, walnut shell and wheat straw at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C.

نتایج نشان می دهد که با افزایش دمای پیرولیز pH بیوچار نیز افزایش می یابد (۲۶). افزایش pH بیوچار با افزایش دمای پیرولیز به طور کلی با افزایش محتوای خاکستر ارتباط دارد (۲). افزایش pH بیوچار با افزایش دمای پیرولیز احتمالاً به دلیل از بین رفتن گروه های عاملی اسیدی و تشکیل فازهای معدنی اکسید، هیدروکسید و کربنات حاوی کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم می باشد (۲۷ و ۲۸). در مطالعات دیگر پژوهشگران گزارش نموده اند که قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار با افزایش دما افزایش می یابد (۲۵ و ۲۹) که این افزایش در قابلیت هدایت الکتریکی با افزایش درجه کربنی شدن، همان طور که با محتوای کربن اندازه گیری می شود، مرتبط است (۳۰ و ۳۱).

شمس الدین سعید و رمودی (۲۰۲۲) نشان دادند که با افزایش دمای پیرولیز، قابلیت هدایت الکتریکی و pH بیوچار افزایش ولی چگالی ظاهری بیوچار کاهش یافت (۲۴). در راستای نتایج آزمایش حاضر، روشن و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه متاآنالیزی گزارش نمودند که ۳۷/۳۵ درصد از pH بیوچارهای مورد مطالعه توسط پژوهشگران دیگر در دمای پایین پیرولیز (کمتر از ۴۵۰ درجه سلسیوس) در محدوده ۵/۲-۱۰/۶ بوده است (۲۵). در مقابل، ۲۹/۹۲ درصد از مطالعات محدوده pH ۶/۶-۱۲/۳ در دمای پیرولیز بالا (بیشتر از ۵۵۰ درجه سلسیوس) داشته اند و برای دمای پیرولیز متوسط (۴۵۰-۵۵۰ درجه سلسیوس) محدوده pH ۸/۵-۱۱/۱ گزارش کردند. در واقع این



شکل ۲- (a) pH و (b) EC قرص‌های کودی نیتروژن‌دار بر پایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس.

Figure 2. pH (a) and EC (b) of nitrogen fertilizer tablets based on biochars of residues of grape pruning, walnut shell and wheat straw at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C.

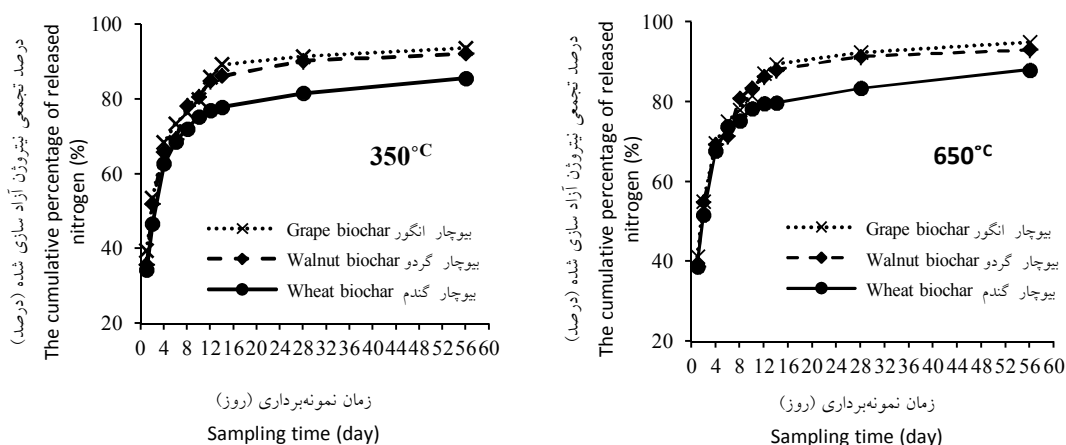
۸۹/۴، ۸۶/۲ و ۸۷/۹، ۷۷/۸ و ۷۹/۶ درصد بود (شکل ۳). این نتایج با نتایج پژوهش‌گران دیگر مطابقت دارد. بکشی و همکاران (۳۲) نشان دادند که میزان آزادسازی اوره در آب در طول دوره آزمایش از کود اوره سنتز شده بر پایه بیوچار نسبت به تیمار شاهد به‌طور معناداری کاهش یافت. همچنین آن‌ها نشان دادند که میزان آبشویی نیتروژن در ستون خاک در تیمار اوره دارای بیوچار نسبت به تیمار بدون بیوچار ۳۱ تا ۲۹ درصد کاهش یافت (۳۲). مقصودی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که میزان آزادسازی اوره در آب از بیوچار کلش برنج آغشته شده به اوره، به میزان ۶/۵ مرتبه نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. این پژوهش‌گران به این نتیجه رسیدند که استفاده از

درصد آزادسازی نیتروژن از قرص‌های کودی در آب: نتایج حاصل نشان داد که نیتروژن کودهای نیتروژن‌دار بر پایه بیوچار در طی آزمایش به تدریج در آب آزادسازی گردید ولی میزان آزادسازی نیتروژن در ابتدای آزمایش بیش‌تر بود، به‌طوری‌که یک روز بعد از شروع آزمایش درصد نیتروژن آزادسازی‌شده در بیوچارهای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۳۹/۴ و ۴۱/۲، ۳۵/۶ و ۳۸/۷، ۳۴/۴ و ۳۸/۶ درصد بود (شکل ۳). همچنین در دو هفته اول آزمایش میزان نیتروژن تجمعی آزادسازی‌شده در بیوچارهای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۸۹/۲ و

نسبت به سایر بیوچارها بیشتر بود. از طرف دیگر درصد نیتروژن آزادسازی شده در بیوچارهای تهیه شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس نسبت به بیوچارهای تهیه شده در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس کم تر بود. به طوری که درصد نیتروژن باقی مانده در انتهای آزمایش در کودهای تهیه شده بر پایه بیوچار در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در بیوچارهای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم به ترتیب ۶/۶، ۷/۹ و ۱۲ درصد بود در حالی که در دمای ۶۵۰ درجه ۴/۸، ۶/۸ و ۹/۹ درصد بود (شکل ۴).

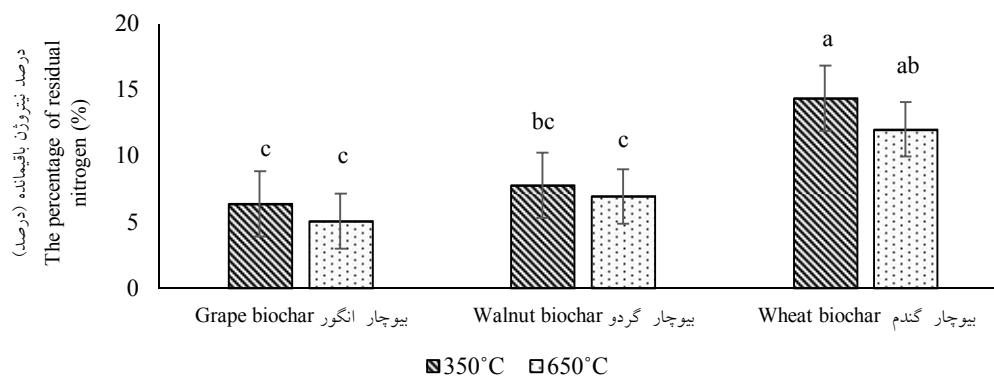
کودهای کندرها بر پایه بیوچار می تواند در کاهش آشنویی نیتروژن و افزایش کارایی استفاده از کود در خاک های آهکی مؤثر باشد (۳۳).

میزان آزادسازی نیتروژن در تمام طول آزمایش در بیوچار کلش گندم در هر دو دمای ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس نسبت به بیوچارهای پوست گردو و هرس انگور کم تر بود. به طوری که در انتهای آزمایش درصد آزادسازی نیتروژن در بیوچار گندم نسبت به بیوچار گردو و انگور به ترتیب ۸ و ۷، ۶/۶ و ۵/۱ درصد در دماهای ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس کم تر بود. در این بین سرعت آزادسازی نیتروژن در بیوچار هرس انگور



شکل ۳- درصد تجمعی نیتروژن آزادسازی شده از کودهای نیتروژن دار برپایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم تولید شده در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس در طی ۵۶ روز.

Figure 3. Cumulative percentage of nitrogen fertilizer tablets based on biochars of residues of grape pruning, walnut shell and wheat straw at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C during 56 days.



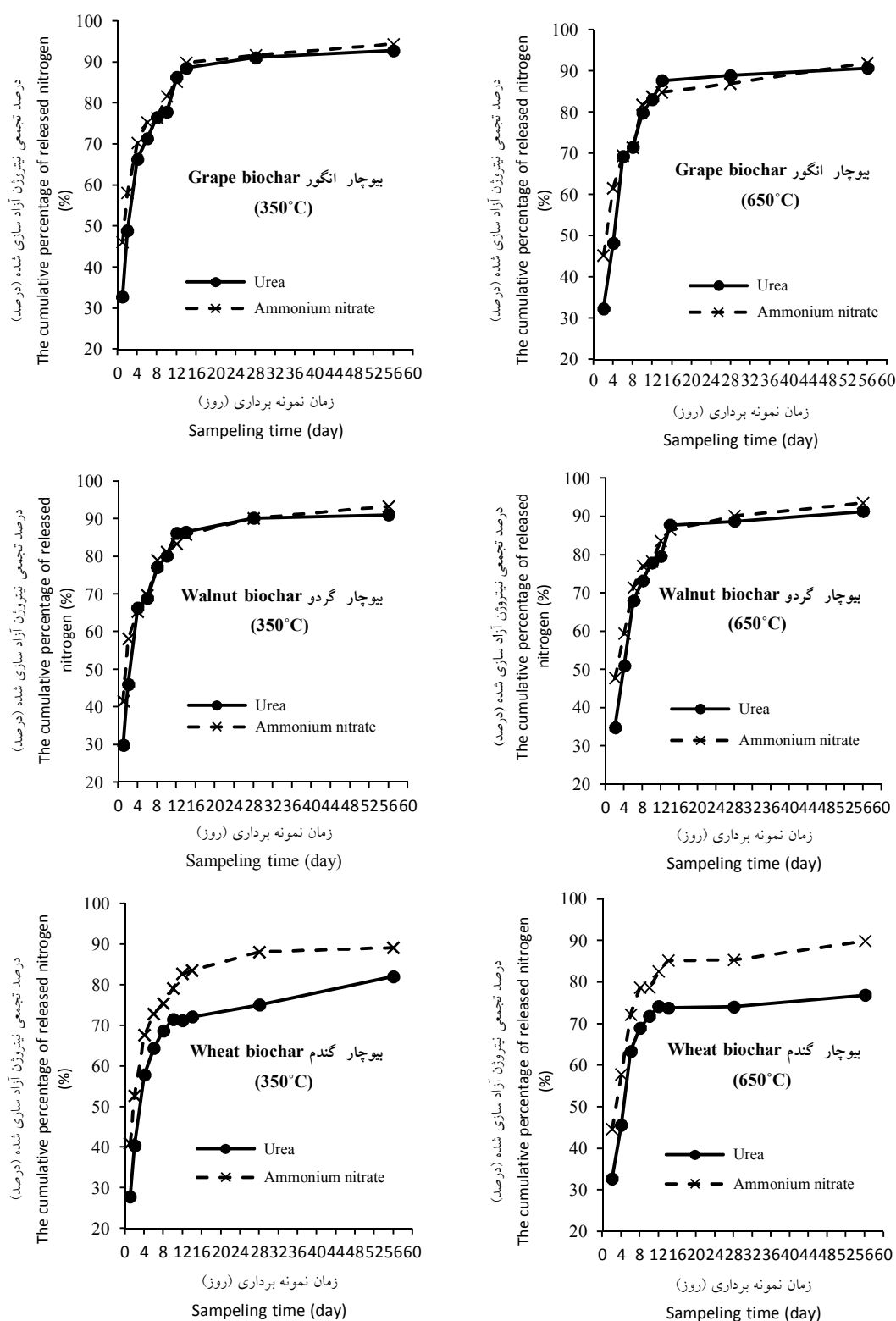
شکل ۴- درصد نیتروژن باقی مانده در کودهای نیتروژن دار برپایه بیوچارهای بقایای هرس انگور، پوست گردو و کلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس بعد از ۵۶ روز.

Figure 4. The percentage of residual nitrogen in nitrogen fertilizer based on biochars of residues of grape pruning, walnut shell and wheat straw at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C after 56 days.

تأثیر بیوچار بر آزادسازی نیتروژن در آب از منابع اوره و نترات آمونیوم نشان داد که میزان آزادسازی نترات آمونیوم نسبت به اوره بیش‌تر بود و این اختلاف در بیوچار کلش گندم بیش‌تر خودش را نشان داده است (شکل ۵). به‌طوری‌که در انتهای آزمایش درصد نیتروژن آزادسازی‌شده از کود نیتروژن برپایه بیوچار گندم در دمای ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس از منابع اوره و نترات آمونیوم به ترتیب ۸۴/۷ و ۸۷/۱ ۹۰/۹ و ۹۳ بود (شکل ۵). اگرچه از آب می‌توان برای دانه‌بندی یا گرانوله کردن بیوچار استفاده کرد، ولی مخلوط کردن کودهای کندرها برپایه بیوچار با خاک رس، سیپولایت، بنتونیت، ورمیکولایت، مونت‌موریلونایت، نشاسته و غیره به ترکیب استحکام مکانیکی می‌بخشد (۳۴). این موضوع در پژوهش حاضر نیز مشهود بود و گرانوله کردن کود نیتروژن‌دار بر پایه بیوچارهای مختلف بر میزان آزادسازی نیتروژن مؤثر بود. در این رابطه پژوهش‌گران دیگر گزارش نموده‌اند که گرانوله کردن مخلوط بیوچار و عناصر غذایی به‌طور مؤثر باعث افزایش مقاومت در برابر انتشار و در نتیجه کاهش آزادسازی عناصر غذایی می‌شود (۳۵). هم‌چنین قرص‌های کودی تولید شده از اختلاط بیوچار و کمپوست کود دامی برای جذب نیتروژن آمونیومی مؤثر بوده است و قرص‌های بیوچار غنی شده با نیتروژن رشد گیاه را افزایش داده است (۳۶).

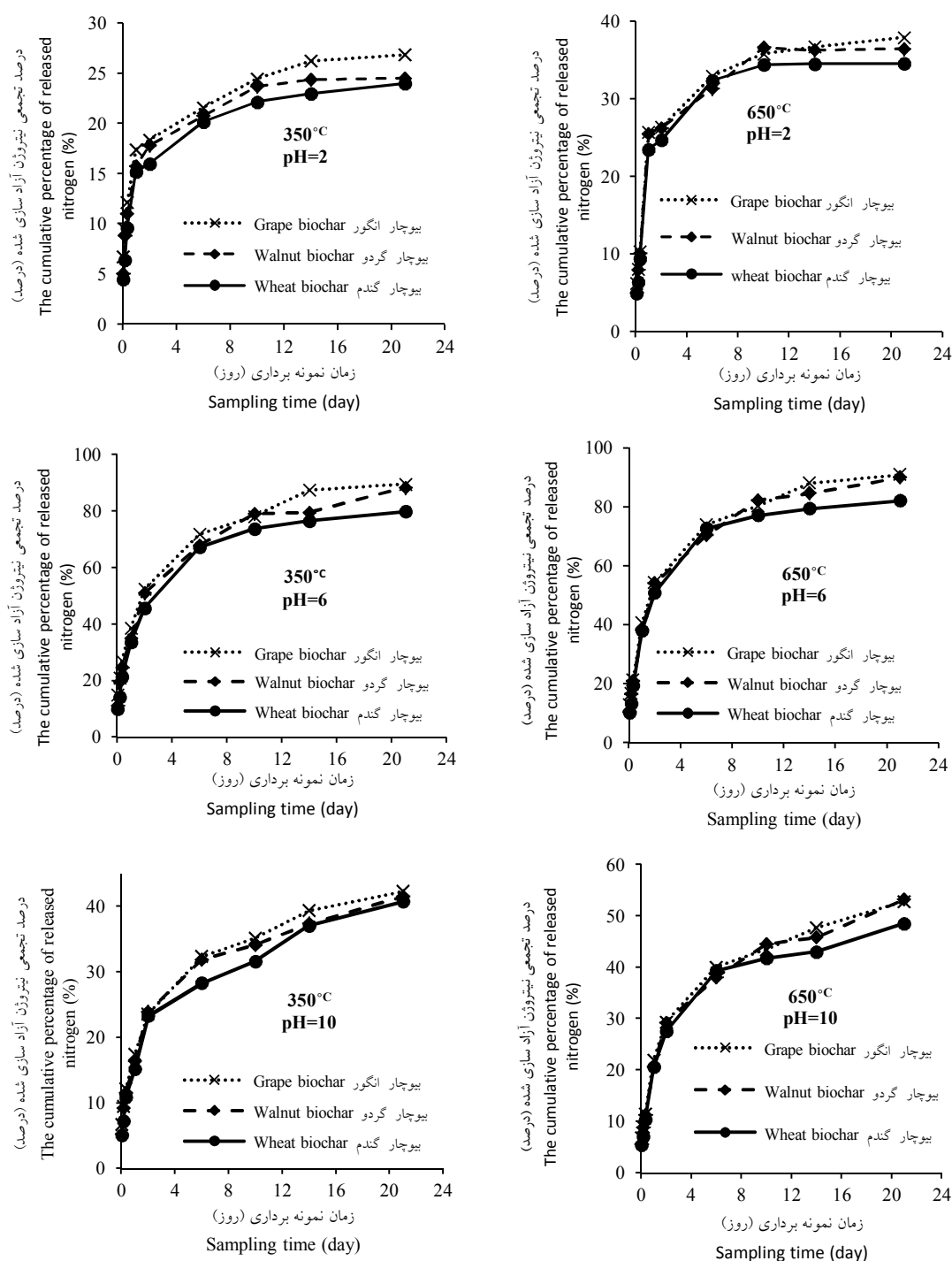
شی و همکاران (۳۷) با گرانوله نمودن مخلوط بیوچار و کانی‌های رسی بنتونیت و سیپولایت و اوره، گزارش نمودند که سطح ذرات کامپوزیت بیوچار و کانی‌های رسی سبب نگهداری اوره شده است. به‌طوری‌که طی آزمایش‌های آبشویی نشان دادند که آزادسازی تجمعی نیتروژن از بیوچار گرانوله نسبت به اوره به‌طور معناداری (بیش از ۷۰ درصد) کاهش یافت (۳۷). در مطالعه دیگری فرآیند گرانوله‌سازی بیوچار کلش برنج و اوره سبب کاهش رهاسازی نیتروژن به میزان ۱۷/۷۳ درصد شده است (۸). یو و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که پس از اختلاط بیوچار با کودهای تجاری و گرانوله‌سازی آن، اثر میزان کندرها بودن عناصر غذایی از الگوی $P > N > K$ پیروی کرد (۳۸).

درصد آزادسازی نیتروژن در pHهای مختلف:
آزادسازی نیتروژن از قرص‌های کودی نیتروژن بر پایه بیوچار در آزمایش حاضر تحت pHهای مختلف به‌صورت الگوی نمایی بود و نتایج حاصل نشان داد که کم‌ترین و بیش‌ترین درصد آزادسازی نیتروژن به‌ترتیب در $pH=2$ و $pH=6$ در هر دو دمای ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس اتفاق افتاد (شکل ۶). هم‌چنین کم‌ترین و بیش‌ترین درصد آزادسازی نیتروژن به‌ترتیب در بیوچار کلش گندم و هرس انگور در هر دو دمای ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس مشاهده شد (شکل ۶).



شکل ۵- اثر بیوجار بقایای انگور، گردو و گندم تولیدشده در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس بر درصد تجمعی نیتروژن آزادسازی شده از منبع اوره و نترات آمونیوم در آب طی ۵۶ روز.

Figure 5. The effect of grape, walnut and wheat residue biochar produced at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C on the cumulative percentage of released nitrogen from the source of urea and ammonium nitrate in water during 56 days.



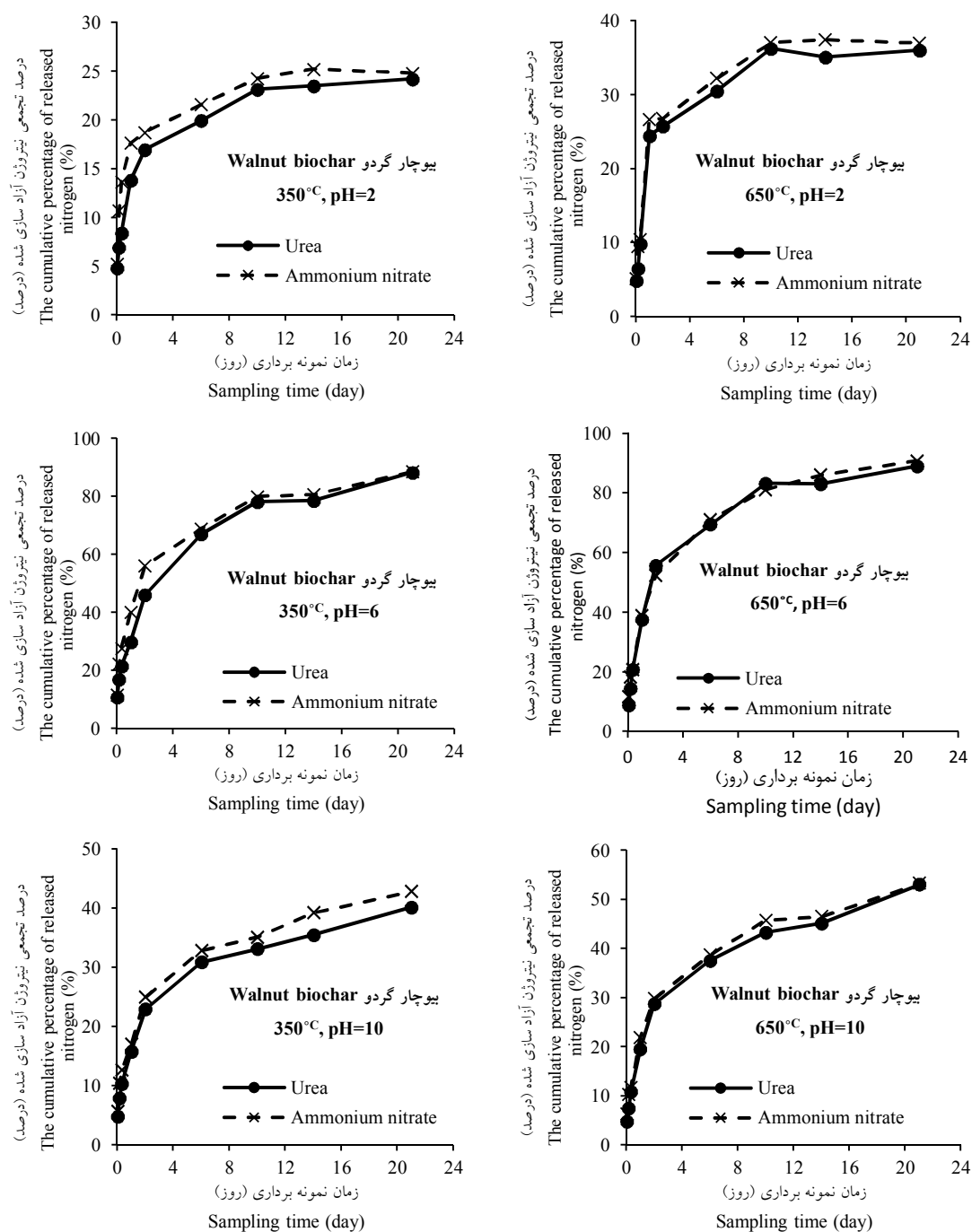
شکل ۶- درصد تجمعی نیتروژن آزادسازی شده از بیوچارهای مختلف تهیه شده در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس در pHهای اسیدی (pH=۲)، خنثی (pH=۶) و بازی (pH=۱۰).

Figure 6. The cumulative percentage of released nitrogen from different biochars prepared at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C in pH of acidic (pH=2), neutral (pH=6) and alkaline (pH=10).

تأثیر بیوچار بر آزادسازی نیتروژن از منابع اوره و نیتрат آمونیوم در pHهای مختلف نشان داد که میزان آزادسازی نیتروژن در نیترات آمونیوم نسبت به اوره بیش‌تر بوده است (شکل‌های ۷، ۸ و ۹). در قرص‌های کودی بر پایه بیوچار پوست گردو بعد از ۲۱ روز از شروع آزمایش میزان آزادسازی نیتروژن از منبع اوره و نیترات آمونیوم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در pHهای ۲، ۶ و ۱۰ به‌ترتیب برابر با ۲۴/۴ و ۲۴/۸، ۸۸/۲ و ۸۸/۵ و ۴۰/۰۹ و ۴۴/۸ درصد بود که این میزان در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۳۶/۱۵ و ۳۷، ۸۸/۰۸ و ۹۰/۷۹، ۵۳/۰۵ و ۵۳/۲۹ درصد بود (شکل ۷).

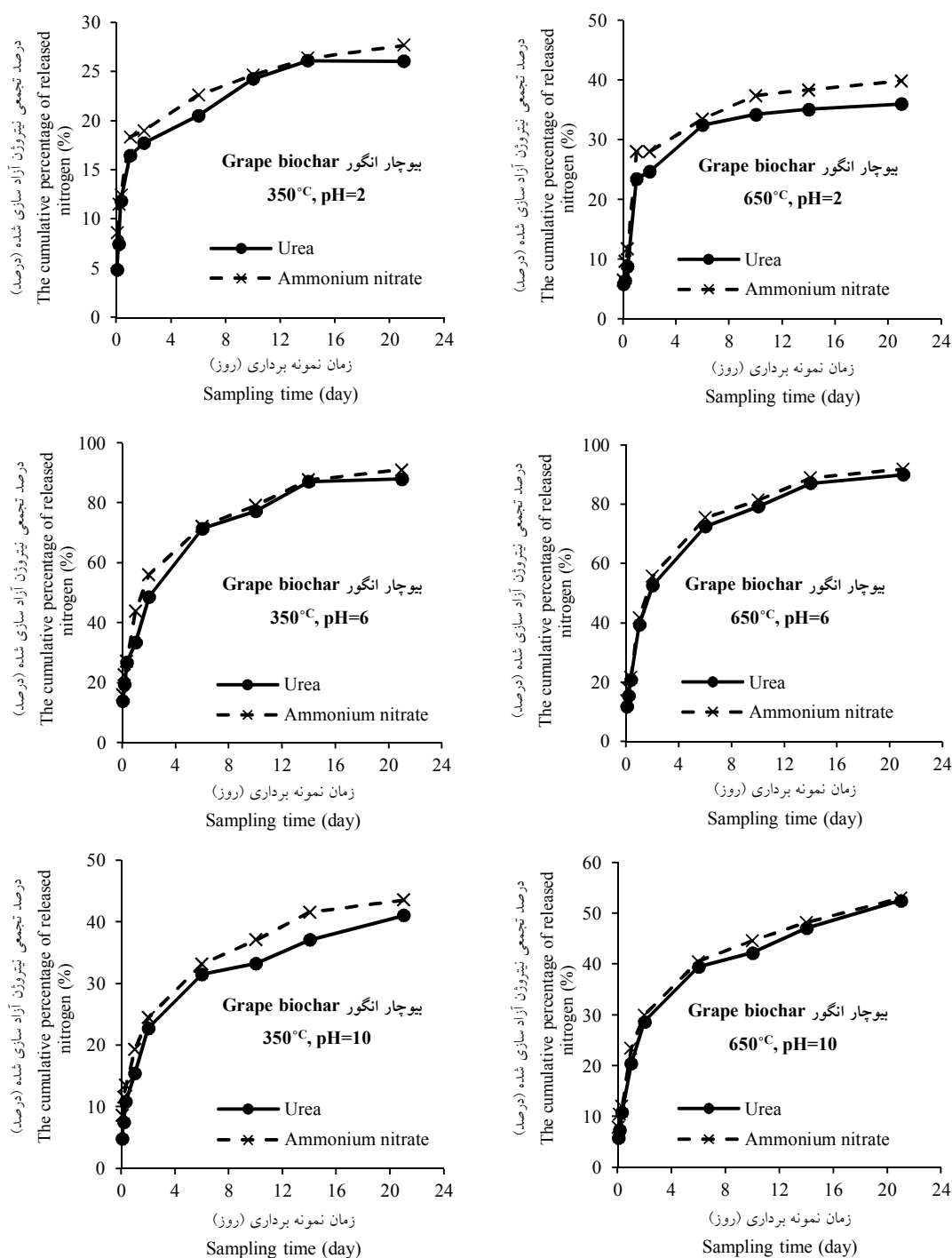
در قرص‌های کودی بر پایه بیوچار بقایای هرس انگور بعد از ۲۱ روز از زمان شروع آزمایش میزان آزادسازی نیتروژن از منبع اوره و نیترات آمونیوم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در pHهای ۲، ۶ و ۱۰ به‌ترتیب برابر با ۲۶/۱ و ۲۷/۶۷ و ۸۸/۲، ۹۱/۰۶ و ۴۱/۶ و ۴۳/۵۴ درصد بود که این میزان در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۳۶/۲ و ۳۹/۸۷ و ۹۰/۱ و ۹۱/۸۹، ۵۲/۵۵ و ۵۳/۴ درصد بود (شکل ۸). در یک آزمایش سلیمی و همکاران (۲۰۲۰) به این نتیجه رسیدند که آزاد شدن نیتروژن از یک کود سنتزی اوره با نانوذرات ذغال طبیعی تابعی از pH محیط است. آن‌ها نشان دادند که مقدار جذب آب توسط دانه‌های کودی و در نتیجه آزادسازی اوره از دانه‌های کامپوزیتی تهیه شده می‌تواند بین ۱۰ تا ۲۵ درصد در pH اسیدی (pH=۲)

و ۲۵ تا ۵۵ درصد در pH بازی (pH=۱۰) تغییر یابد (۲۳). هم‌چنین در قرص‌های کودی بر پایه بیوچار بقایای کلش گندم بعد از ۲۱ روز از شروع آزمایش میزان آزادسازی نیتروژن از منبع اوره و نیترات آمونیوم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در pHهای ۲، ۶ و ۱۰ به ترتیب برابر با ۲۳/۵ و ۲۴/۸۹، ۷۵/۰۸ و ۸۴/۷ و ۴۰/۱ و ۴۱/۴۶ درصد بود که این میزان در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۳۲/۱ و ۳۷/۱ و ۷۸/۲ و ۸۶/۱۲، ۴۸/۵۳ و ۴۹/۰۳ درصد بود (شکل ۹). دمای پیرولیز برای تهیه بیوچارهای مختلف در آزمایش حاضر نشان داد که می‌تواند اثرات متفاوتی بر آزادسازی نیتروژن داشته باشد. در این رابطه پژوهش‌گران دیگری مانند چنگ و همکاران (۲۰۱۸) به این نتیجه رسیدند که میزان آبشویی نیتروژن نیتراتی با افزایش دمای بیوچار در تیمارهای حاوی بیوچار کاهش یافت در حالی میزان آبشویی آمونیوم با افزایش دمای بیوچار از ۲۵۰ تا ۵۵۰ درجه سلسیوس افزایش یافت (۳۹). مانی کند و سابرامانیان (۲۰۱۵) گزارش نمودند که بیوچار میزان آزادسازی اوره از کود اوره بر پایه بیوچار را تا ۱۸ روز به تاخیر انداخته است (۴۰) که مقدار برای آزمایش ما ۲۱ روز بود. چن و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که ۷۰ درصد نیتروژن از کود کندرها نیتروژن‌دار بر پایه بیوچار در آب بعد از ۱۲ روز آزادسازی شده است که نشان‌دهنده افزایش زمان آزادسازی نیتروژن به واسطه جذب آن توسط بیوچار می‌باشد (۴۱).



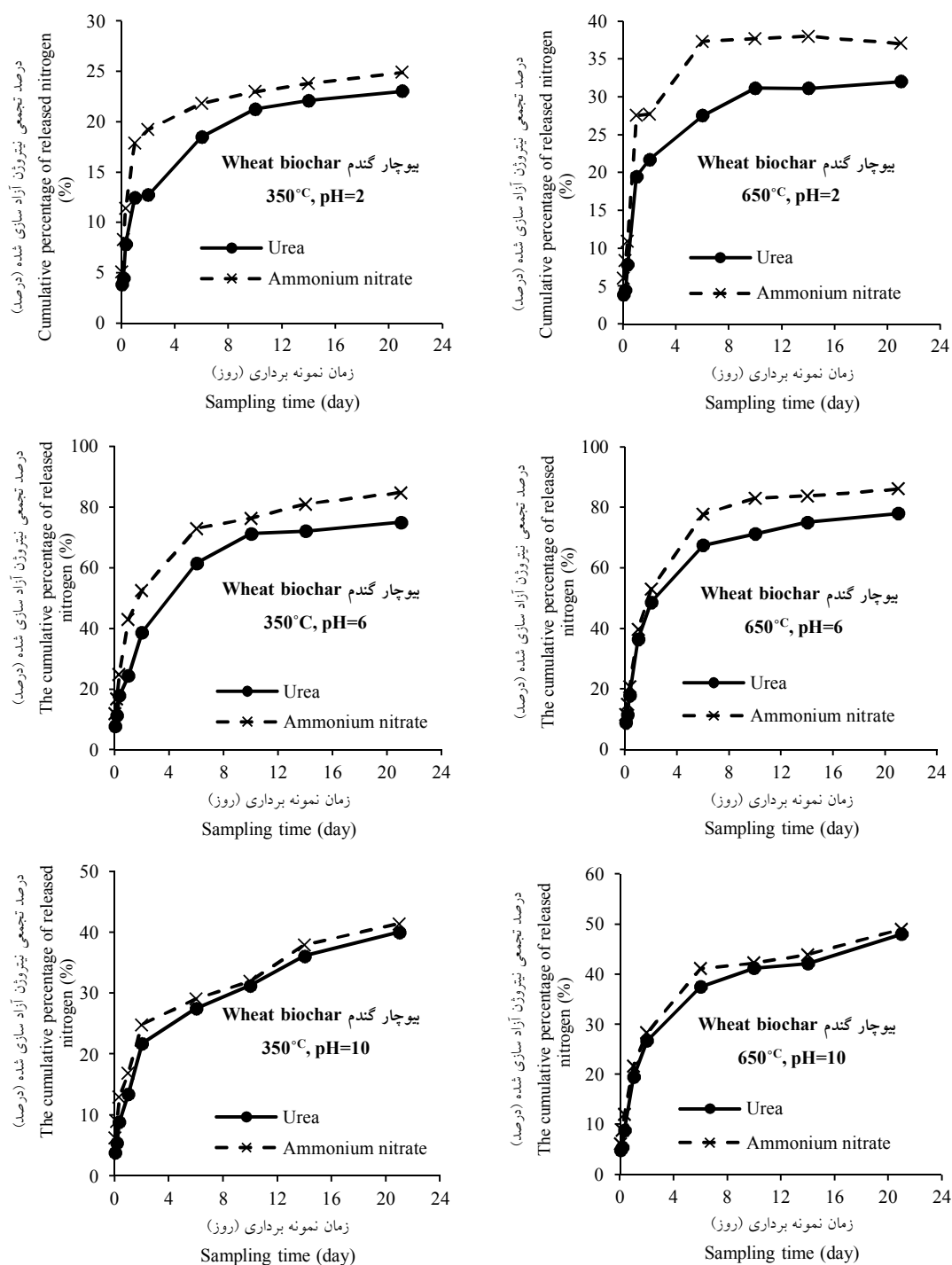
شکل ۷- درصد تجمعی نیتروژن آزادسازی شده از بیوچار پوست گردو در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس در pHهای اسیدی (pH=۲)، خنثی (pH=۶) و بازی (pH=۱۰).

Figure 7. Cumulative percentage of released nitrogen from walnut biochar at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C in pH of acidic (pH=2), neutral (pH=6) and alkaline (pH=10).



شکل ۸- درصد تجمعی نیتروژن آزادسازی شده از بیوچار بقایای هرس انگور در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس در pHهای اسیدی (pH=۲)، خنثی (pH=۶) و بازی (pH=۱۰).

Figure 8. Cumulative percentage of released nitrogen from grape pruning biochar at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C in pH of acidic (pH=2), neutral (pH=6) and basic (pH=10).

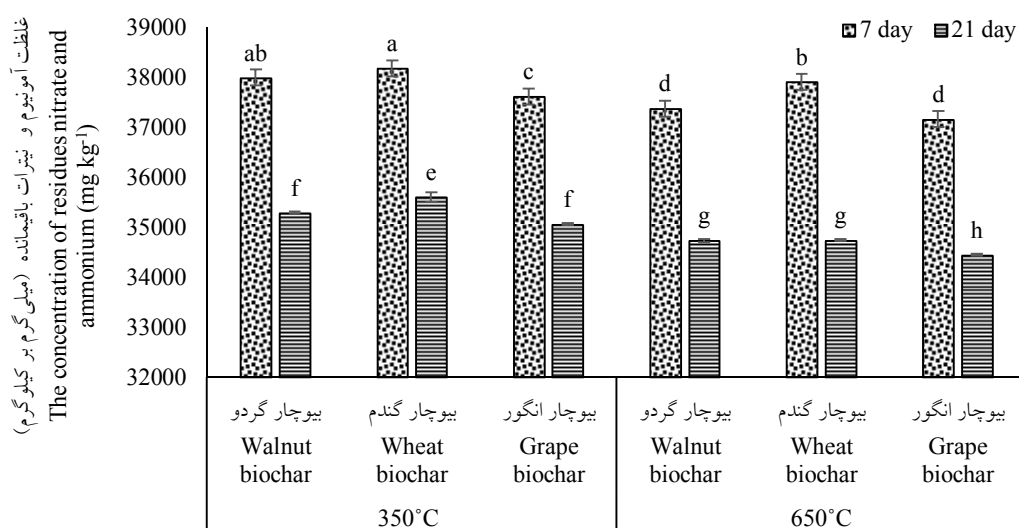


شکل ۹- میزان آزادسازی نیتروژن (از منبع اوره و نیترات آمونیوم) از بیوچار کلش گندم در دماهای پیرولیز ۳۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس در pHهای اسیدی (pH=۲)، خنثی (pH=۶) و بازی (pH=۱۰).

Figure 9. Nitrogen release rate (sources of urea and ammonium nitrate) from wheat stubble biochar at pyrolysis temperatures of 350°C and 650°C in pH of acidic (pH=2), neutral (pH=6) and alkaline (pH=10).

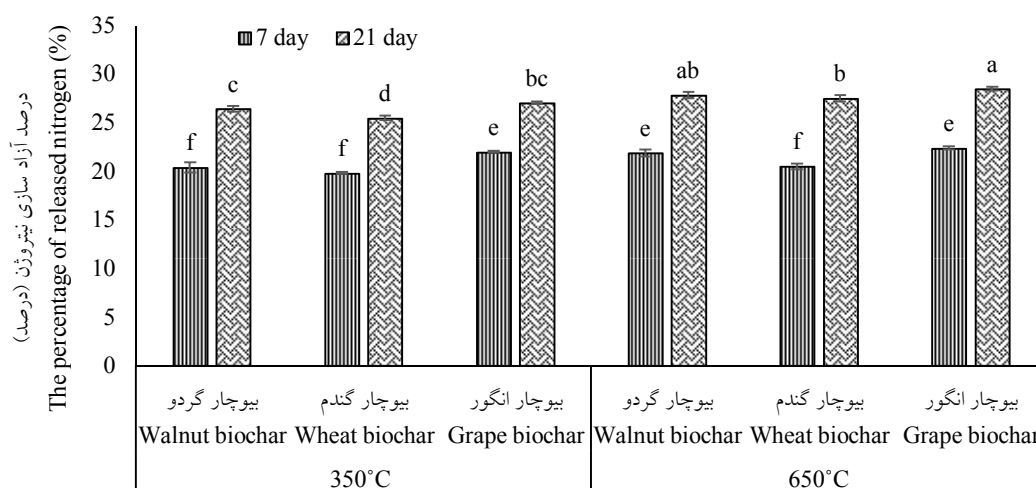
درصد آزادسازی نیتروژن از قرص‌های کودی بر پایه بیوچار در خاک: نتایج حاصل نشان داد که غلظت نیتروژن باقی‌مانده در کود نیتروژن‌دار بر پایه بیوچار در زمان ۲۱ روز بعد از خوابانیدن نسبت به زمان ۷ روز به‌طور معناداری در تمامی بیوچارها و سطوح نیتروژن کاهش داشت. کم‌ترین غلظت نیتروژن باقی‌مانده در کود نیترات آمونیوم بر پایه بیوچار هرس انگور در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس در زمان ۲۱ روز بود و بالاترین غلظت نیتروژن باقی‌مانده در کود نیترات آمونیوم بر پایه بیوچار کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در زمان ۷ روز بود (شکل ۱۰). پژوهش‌های کمی در ارتباط با کمپوزیت‌های کانی رسی و بیوچار مانند بتونیت/بیوچار و کلسیت/بیوچار (۴۲)، بتونیت/بیوچار (۴۳)، مونت‌موریلونایت/بیوچار (۴۴) و آتاپولگیت/بیوچار (۴۵) گزارش شده است. چن و همکاران (۲۰۱۷) گزارش نمودند که کمپوزیت بیوچار و مونت‌موریلونایت مکان جذب را برای یون‌های آمونیوم و فسفات به‌ترتیب به ۱۲/۵۲ و ۱۰۵/۲۸ میلی‌گرم بر گرم رسانید (۴۶). این پژوهش‌گران هم‌چنین گزارش نمودند که میزان آزادسازی آمونیوم و فسفات از کمپوزیت‌های بیوچار غنی شده با عناصر غذایی به‌ترتیب به میزان ۰/۳ تا ۴/۹۲ درصد و ۲/۶۳ تا ۵/۰۹ درصد بود که اثر کندرهایی خوبی برای نیتروژن و فسفر داشت. ان و همکاران (۲۰۲۰) استفاده از کمپوزیت بیوچار و بتونیت را برای سنتز کود کندرها پیشنهاد نمودند به‌طوری این ترکیب کارایی استفاده از فسفر را افزایش داد (۴۷). کود کندرها سنتز شده بر پایه بیوچار کنجاله بذر کلزا و آلژینات سدیم میزان نگهداری آب، محتوای نیتروژن و خاصیت کندرها بودن را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید (۴۸).

مطابق نتایج حاصل از این پژوهش در زمان ۷ روز بعد از خوابانیدن بالاترین درصد آزادسازی نیتروژن از کود نیتروژن‌دار بر پایه بیوچار مربوط به بیوچار هرس انگور و بقایای پوست گردو در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس بود و کم‌ترین درصد آزادسازی مربوط به بیوچار کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بود. هم‌چنین در زمان ۲۱ روز بعد از خوابانیدن بالاترین درصد آزادسازی نیتروژن در بیوچار گندم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس و بالاترین آن در بیوچار هرس انگور در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس مشاهده گردید (شکل ۱۱). پس می‌توان عنوان نمود که کودهای کندرها نیتروژن‌دار بر پایه بیوچار، رهاسازی تدریجی نیتروژن را برای تأمین طولانی‌مدت آن‌ها برای رشد گیاه، جلوگیری از آبشویی، بهبود کارایی کود و کاهش تهدیدات بالقوه برای محیط زیست را امکان‌پذیر می‌کند. پتانسیل بیوچار به‌عنوان یک حامل عناصر غذایی، باعث کاهش سرعت آزادسازی عناصر غذایی و بهبود بهره‌وری استفاده از عناصر غذایی به‌دلیل مساحت سطح بالا و ریزساختارهای متخلخل، بار سطحی مطلوب، گروه‌های سطحی فراوان و کربن فعال می‌شود (۴۹). یی و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند بیوچار یک حامل مناسب برای عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم می‌باشد و حاوی گروه‌های سطحی و فعال زیادی برای جذب پتاسیم، نیتروژن و فسفر می‌باشد (۵۰). جذب عناصر غذای در کامپوزیت‌های بیوچار و مونت‌موریلونیت 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 (۴۶).



شکل ۱۰- غلظت نیترات و آمونیوم باقی مانده در کودهای نیتروژن دار بر پایه بیوچار (از منبع نیترات آمونیوم) در طول دوره خواباندن.

Figure 10. The concentration of residues of nitrate and ammonium in nitrogen fertilizers based on biochar (as source of ammonium nitrate) during incubation.



شکل ۱۱- درصد آزادسازی نیتروژن از کودهای نیتروژن دار بر پایه بیوچار در طول دوره خواباندن.

Figure 11. Percentage of released nitrogen from nitrogenous fertilizers based on biochars during incubation.

قابل توجه آنها است، گرانوله نمودن این نوع کودها با بیوچار می تواند یک روش مناسب برای تهیه کودهای کندرهای نیتروژن دار باشد. با این وجود، توسعه کودهای کندرهای مبتنی بر بیوچار برای کاربرد عملی در زمین های کشاورزی هنوز در مراحل اولیه می باشد و نیازمند انجام کارهای میدانی و تکمیلی بیش تر و نیز ارزیابی بلندمدت استفاده از چنین کودهایی در محیط رشد گیاهان می باشد.

نتیجه گیری کلی

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد بیوچار در سنتز کود نیتروژن دار از منابع اوره و نیترات آمونیوم بر پایه بیوچارهای مختلف میزان آزادسازی نیتروژن در آب و همچنین در خاک را کاهش داد. با توجه به این که برخی از معایب کودهای شیمیایی رایج نیتروژن دار شستشوی سریع نیتروژن در خاک، آلوده نمودن محیط زیست و بار اقتصادی

منابع

1. Ashitha, A., 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.
2. Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 5 (7), 381-387. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[381:BITB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2).
3. Lone, A. H., Najar, G. R., Ganie, M. A., Sofi, J. A., & Ali, T. (2015). Biochar for sustainable soil health: a review of prospects and concerns. *Pedosphere*. 25 (5), 639-653. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30045-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30045-X).
4. Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Khanguthor, K. S., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., & Horie, T. (2009). Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*. 111 (1-2), 81-84. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008>.
5. Agegnehu, 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 (A), 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>.
6. 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. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0013>.
7. Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.087>.
8. Chen, L., Chen, Q., Rao, P. Yan, L., Shakib, A., & Shen, G. (2018). Formulating and optimizing a novel biochar-based fertilizer for simultaneous slow-release of nitrogen and immobilization of cadmium. *Sustainability*. 10 (8), 2740. <https://doi.org/10.3390/su10082740>.
9. Kimetu, A., & Lehmann, J. (2010). Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents. *Australian Journal of Soil Research*. 48 (7), 577-585. <https://doi.org/10.1071/SR10036>.
10. Zheng, J., Han, J., Liu, Z., Xia, W., Zhang, X., Li, L., Liu, X., Bian, R., Cheng, K., Zheng, J., & Pan, G. (2017). Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 241, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.034>.
11. Pereira, E. I., Minussi, F. B., da Cruz, C. C. T., Bernardi, A. C. C., & Ribeiro, C. (2012). Urea-montmorillonite-extruded nanocomposites: A novel slow-release material. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60 (21), 5267-5272. DOI: 10.1021/jf3001229.
12. Oleszczuk, P., Ćwikła-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. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.017>.
13. IBI (International Biochar Initiative). (2010). Guidelines for the development and testing of pyrolysis plants to produce biochar. <http://www.biocharinternational.org/sites/default/files/IBI-Pyrolysis-Plant-Guidelines>.
14. 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.

15. 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>.
16. Rutland, D. W. (1986). Manual for determining physical properties of fertilizer. International Fertilizer Development Center. 91p.
17. Pang, W., Hou, D., Wang, H., Sai, S., Wang, B., Ke, J., Wu, G., Li, Q., & Holtzapple, M. T. (2018). Preparation of microcapsules of slow-release npk compound fertilizer and the release characteristics. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 29 (11), 2397-2404. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180117>.
18. Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen total. In: Page, A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison. pp. 595-624.
19. Estefan, G., Sommer, R., & Ryan, J. (2013). *Methods of soil, plant, and water analysis: A manual for the west asia and north africa region*. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). Beirut, Lebanon. 243p.
20. Watt, G. W., & Chrisp, J. D. (1954). Spectrophotometric method for determination of urea. *Analytical Chemistry*. 26 (3), 452-453. <https://doi.org/10.1021/ac60087a006>.
21. Keeney, D. R., & Nelson, D. W. (1982). Nitrogen-inorganic forms, In: A. L. Page et al., (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2*. American Society of Agronomy. Madison, WI. USA. pp. 643-698.
22. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. 576p.
23. Salimi, M., Motamedi, E., Motesharezadeh, B., Hosseini, H. M., & Alikhani, H. A. (2020). Starch-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide) composites reinforced with natural char nanoparticles toward environmentally benign slow-release urea fertilizers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 8 (3), 103765. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103765>.
24. Shamsaddin Saied, M., & Ramroudi, M. (2022). Evaluation of the effect of biochar obtained from different pyrolysis temperatures on the marigold growth under salt stress. *Journal of Horticultural Science*. 35 (4), 591-604. DOI: 20.1001.1.20084730.1400.35.4.11. [In Persian]
25. Roshan, A., Ghosh, D., & Kumar Maiti, S. (2023). How temperature affects biochar properties for application in coal mine spoils? A meta-analysis. *Carbon Research*. 2 (3), 2-17. <https://doi.org/10.1007/s44246-022-00033-1>.
26. El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M., & Sik Ok, Y. (2019). Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects. *Geoderma*. 337, 536-554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>.
27. Ding, W., Dong, X., Ime, I. M., Gao, B., & Ma, L. Q. (2014). Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars. *Chemosphere* 105, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.042>.
28. Jin-Hua, Y., Ren-Kou, X., Ning, W., & Jiu-Yu, L. (2011). Amendment of acid soils with crop residues and biochars. *Pedosphere*. 21 (3), 302-308. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60130-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60130-6).
29. Fooladi Dorhani, M., Shayannejad, M., Mosaddeghi, M. R., & Shariatmadari, H. (2019). The effect of temperature and composition of various raw materials on some physicochemical properties of biochar. 16th Iranian soil science congress.
30. Rehrach, D., Reddy, M. R., Novak, J. M., Bansode, R. R., Schimmel, K. A., Yu, J., Watts, D. W., & Ahmedna, M. (2014).

- Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 108, 301-309. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.03.008>.
31. Gabhi, R., Basile, L., Kirk, D. W., Giorcelli, M., Tagliaferro, A., & Jia, C. Q. (2020). Electrical conductivity of wood biochar monoliths and its dependence on pyrolysis temperature. *Biochar*. 2 (3), 369-378.
32. Bakshi, S., Banik, C., Laird, D. A., Smith, R., & Brown, R. C. (2021). Enhancing biochar as scaffolding for slow release of nitrogen fertilizer. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 9 (24), 8222-8231. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02267>.
33. Maghsoodi, M. R., Najafi, N., Reyhanitabar, A., & Oustan, S. (2020). Hydroxyapatite nanorods, hydrochar, biochar, and zeolite for controlled release urea fertilizers. *Geoderma*. 379, 114644. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114644>.
34. Xiang, A., Qi, R., Wang, M., Zhang, K., Jiang, E., Ren, Y., & Hu, Z. (2021). Study on the infiltration mechanism of molten urea and biochar for a novel fertilizer preparation. *Industrial Crops and Products*. 153, 112558. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112558>.
35. Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: a mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*. 10, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2022.100167>.
36. Shin, J., & Park, S. (2018). Optimization of blended biochar pellet by the use of nutrient releasing model, *Appl. Sci*. 8 (11), 2274. <https://doi.org/10.3390/app8112274>.
37. Shi, W., Ju, Y., Bian, R., Li, L., Joseph, S., Mitchell, D. R., Munroe, P., Taherymoosavi, S., & Pan, G. (2020). Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*. 701, 134424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134424>.
38. Yu, Z., Zhao, J., Hua, Y., Li, X., Chen, Q., & Shen, G. (2021). Optimization of granulation process for binder-free biochar-based fertilizer from digestate and its slowrelease performance. *Sustainability*. 13 (15), 8573. <https://doi.org/10.3390/su13158573>.
39. Cheng, H., Jones, D. L., Hill, P., Bastami, M. S., & Tu, C. L. (2018). Influence of biochar produced from different pyrolysis temperature on nutrient retention and leaching. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 64 (6), 850-859. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1384545>.
40. Manikandan, A., & Subramanian, K. (2015). Ability of urea impregnated biochar fertilizers for securing the slow release of nitrogen in soils—preliminary study. *International Journal of Agriculture Sciences*. 7 (11), 750-756. DOI:10.9735/0975-3710.7.11.
41. Cen, Z., Wei, L., Muthukumarappan, K., Sobhan, A., & McDaniel, R. (2021). Assessment of a biochar-based controlled release nitrogen fertilizer coated with polylactic acid. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 21 (3), 2007-2019. DOI:10.1007/s42729-021-00497-x.
42. Ramola, S., Belwal, T., Li, C. J., Wang, Y. Y., Lu, H. H., Yang, S. M., & Zhou, C. H. (2020). Improved lead removal from aqueous solution using novel porous bentonite and calcite-biochar composite. *Science of the Total Environment*. 709, 136171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136171>.
43. Ashiq, A., Adassooriya, N. M., Sarkar, B., Rajapaksha, A. U., Ok, Y. S., & Vithanage, M. (2019). Municipal solid waste biochar-bentonite composite for the removal of antibiotic ciprofloxacin from aqueous media. *Journal of Environmental Management*. 236, 428-435. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.006>.

44. Premarathna, K. S. D., Rajapaksha, A. U., Adassoriya, N., Sarkar, B., Sirimuthu, N. M., Cooray, A., Ok, Y. S., & Vithanage, M. (2019). Clay-biochar composites for sorptive removal of tetracycline antibiotic in aqueous media. *Journal of Environmental Management*. 238, 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.069>.
45. Wang, Z., Yang, X., Qin, T., Liang, G., Li, Y., & Xie, X. (2019). Efficient removal of oxytetracycline from aqueous solution by a novel magnetic clay-biochar composite using natural attapulgite and cauliflower leaves. *Environmental Science and Pollution Research*. 26 (8), 7463-7475. DOI: **10.1007/s11356-019-04172-8**.
46. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.050>.
47. An, X., Yu, J., Yu, J., Tahmasebi, A., Wu, Z., Liu, X., & Yu, B. (2020). Copyrolysis of biomass, bentonite, and nutrients as a new strategy for the synthesis of improved biochar-based slow-release fertilizers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 8 (8), 3181-3190. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06483>.
48. Baki, M., & Abedi-Koupai, J. (2018). Preparation and characterization of a superabsorbent slow release fertilizer with sodium alginate and biochar. *Journal of Applied Polymer Science*. 135 (10), 45966. <https://doi.org/10.1002/app.45966>.
49. 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), 1-11. DOI: **10.1186/s40538-020-00205-4**.
50. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118085>.

