

Research Article

Agricultural Engineering., 46(1) (2023) 83-99
DOI: 10.22055/AGEN.2023.43567.1665

ISSN (E): 2588-526X

ISSN (P): 2588-5944

The combined effect of sugarcane bagasse biochar and compost on the adsorption and desorption characteristics of phosphorus in calcareous soil

Kh. Betyar¹, N. Moradi^{2*}, A. Moezzi³ and Sh. Khajavi-Shojaei⁴

1. M.S Graduate of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4. Ph.D. Graduate of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received: 24 April 2023

Accepted: 12 June 2023

Abstract

Introduction: Phosphorus deficiency is one of the major problems of calcareous soils and a limiting factor for crop production in these soils and excessive use of phosphate fertilizers can cause pollution in soil and water. The use of organic amendments such as compost, biochar or a combination of them can be effective in improving the amount of available phosphorus of the soil. For this purpose, the effect of combined application of compost and biochar of sugarcane bagasse on phosphorus sorption and desorption were investigated.

Materials and Methods: Sugarcane bagasse and compost were provided from Debal Khozaei agro-industry Company. The oven-dried sugarcane bagasse 105 °C were pass through 2 mm sieve and slow pyrolysed at 500 °C using a laboratory muffle furnace with a heating rate of 5 °C min⁻¹ and presence of N₂ flow to provide an anoxic condition. Some physico-chemical properties of samples were determined. The soil sample was collected from 0-30 cm of the campus of Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan province, SW Iran (48° 65'91.12"E31°30'53.82"N). The studied soil classified as a Typic Haplocalcids. The air-dried soil samples were sieved (< 2 mm) and used for physico-chemical analysis. The incubation experiment was conducted with 7 treatments. The treatments including (1) control (without any amendments), (2) 100% sugarcane bagasse, (3) 100% sugarcane bagasse compost, (4) 100% sugarcane bagasse biochar, (5) 50% compost +50% biochar, (6) 75% compost + 25% biochar, (7) 25% compost + 75% biochar were added as 2% w/w to soil. The 200 g air-dried soil and treatments were mixed and kept in poly-ethylene containers for 120 days. Samples were incubated in 25 ± 2 °C and soil moisture was adjusted to soil field capacity using distilled water during the incubation time. At the end of incubation time, soil phosphorus sorption isotherm was measured. A 2.5 g of each treatment was transferred to a 50 ml centrifuge tube. Then, a 25 mL of CaCl₂ 0.01 M containing 0, 10, 20, 40, 60, 80, and 100 mg P L⁻¹ (prepared from KH₂PO₄) was added to each centrifuge tube. Two drops of chloroform were added to each centrifuge tube to inhibit microbial growth. Samples were equilibrated at 25 ± 1 °C for 24 h on shaker at 150 rpm, and then centrifuged for 5 min at 3000 rpm and pass through 0.45-µm filter paper. The phosphate desorption was conducted on soil remaining in the filter immediately after sorption experiment. For this purpose, each treatment was resuspended with 25 ml of CaCl₂ 0.01 M solution without phosphate and shaken for 24 h. after collecting the supernatant, desorbed phosphate was measured. For assessing the adsorbed phosphate, the difference between the initial phosphate



concentration and the phosphate concentration at equilibrium was calculated. The Langmuir, Freundlich and temkin isotherm models were used to describe the sorption of phosphate. In addition, some phosphorus buffering indices including maximum buffering capacity (MBC), standard buffering capacity (SBC), equilibrium buffering capacity (EBC) and standard phosphorus requirement (SPR) were obtained from P sorption equations at 0.2 mg P L^{-1} concentration in soil solution. The experimental data were fitted by Microsoft Excel-SOLVER and graphs were plotted by Microsoft Excel.

Results and Discussion: The soil was had loam texture, with low SOC content and high pH and calcium carbonate content, also the results of the characteristics of sugarcane bagasse compost and biochar showed that the compost had high salinity and the biochar had high pH and C/N ratio. The amount of phosphorus absorption increased with increasing the initial concentration of phosphorus in the treated soils. The highest and lowest amount of phosphorus absorption were in the control in compost treatments, respectively. In general, different levels of biochar and compost treatments caused a decrease in phosphorus absorption compared to the control treatment. The results showed that P sorption and desorption are described well by the Freundlich and Langmuir equations with a high correlation coefficient; however, the Temkin equation described the P sorption and desorption in the soils poorly. Biochar and compost treatments significantly decreased the Freundlich n parameter. Results showed that the effects of compost and 75% compost + 25% biochar were significantly greater than the effects of other treatments on the n parameter exponential adsorption equation. Application of different treatments of sugarcane bagasse compost and biochar application caused a significant increase in MBC (25.4-70.7%) and EBC (33.1-69.4%). The standard P requirements (SPR) were lower in soils treated than in control soil.

Conclusion: The results showed that the combined application of biochar-compost of sugarcane bagasse reduced the sorption and increased desorption of phosphorus. The maximum buffering capacity (MBC) and equilibrium buffering capacity (EBC), standard buffering capacity (SBC) and standard phosphorus requirement (SPR) in compost and compost 75% + biochar 25% showed more decrease than the control. In general, the results of this study indicate that the combined application of biochar-compost of sugarcane bagasse reduces phosphorus sorption in soil in calcareous soils, which can increase the availability phosphorus for plants.

Keywords: *Organic amendments, sugarcane bagasse, adsorption isotherm, phosphorus availability*

اثر تلفیقی بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر بر ویژگی‌های جذب و واجذب فسفر در خاک آهکی

خسرو بتیار^۱، ندا مرادی^{۲*}، عبدالامیر معزی^۳ و شیلا خواجوی شجاعی^۴

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
 ۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
 ۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
 ۴- دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

| تاریخچه مقاله | چکیده |
|--|---|
| دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲ | کمبود فسفر یکی از مشکلات عمده خاک‌های آهکی و عامل محدوده-کننده تولید محصول در این خاک‌ها است و مصرف بی‌رویه کودهای فسفاته می‌تواند سبب ایجاد آلودگی در خاک و آب گردد. استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند کمپوست، بیوجار و یا استفاده تلفیقی از آن‌ها می‌تواند در بهبود مقدار فسفر قابل جذب خاک موثر باشد. به این منظور، تأثیر کاربرد تلفیقی کمپوست و بیوجار باگاس نیشکر بر ویژگی‌های جذب و واجذب فسفر در خاک آهکی مورد بررسی قرار گرفت. تیمارها شامل: ۱- شاهد، ۲- کمپوست باگاس نیشکر ۱۰۰٪، ۳- بیوجار باگاس نیشکر ۱۰۰٪، ۴- کمپوست ۵۰٪ + بیوجار ۵۰٪، ۵- کمپوست ۷۵٪ + بیوجار ۲۵٪ و ۶- کمپوست ۲۵٪ + بیوجار ۷۵٪ بود که تیمارها در سه تکرار به مدت ۱۲۰ روز انکوباسیون شدند. هم‌دماهای جذب بعد از اتمام مدت انکوباسیون در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس و غلظت اولیه ۰ تا ۶۰ میلی‌گرم فسفر در لیتر بررسی شدند. سپس داده‌ها با مدل‌های فروندلیچ، لانگمویر و تمکین برازش داده شدند. نتایج نشان داد که کاربرد تلفیقی بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر منجر به کاهش جذب و افزایش واجذب فسفر گردید. حداکثر جذب فسفر (q_{max}) در تیمار کمپوست و بیوجار ۲۵ + کمپوست ۷۵ مشاهده شد که در مقایسه با شاهد به ترتیب ۳۹/۲۸ و ۳۳/۰۳ درصد کاهش یافت. حداکثر ظرفیت بافری (MBC)، ظرفیت بافری تعادلی (EBC)، ظرفیت بافری استاندارد (SBC) و نیاز استاندارد فسفر (SPR) در تیمار کمپوست و کمپوست ۷۵٪ + بیوجار ۲۵٪ نسبت به شاهد کاهش بیش‌تری نشان دادند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد تلفیقی تیمارهای بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر با کاهش جذب سطحی فسفر در خاک آهکی می‌تواند موجب سبب افزایش فراهمی فسفر برای گیاهان شود. |
| کلمات کلیدی: اصلاح‌کننده آلی، باگاس نیشکر، هم‌دماهای جذب، فراهمی فسفر | |
| * عهده دار مکاتبات Email: n.moradi@scu.ac.ir | |

مقدمه

فسفر از عناصر اصلی مورد نیاز گیاهان است که به مقدار ۰/۸ - ۰/۲ درصد برای رشد مناسب گیاهان لازم است (۲۳). بیشتر از ۷۰ درصد از خاک‌های کشور دارای فسفر قابل استفاده کمتر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم هستند که این مقدار کمتر از حد بهینه فسفر خاک است (۴۱). کودهای فسفوره در خاک‌های آهکی به علت بالا بودن مقدار کلسیم در نهایت تبدیل به اکتا کلسیم فسفات و آپاتیت می‌شوند (۳۴). کرنات کلسیم به عنوان جاذب فسفر با تأثیر بر دیگر ویژگی‌های خاک مانند pH و غلظت کلسیم در واکنش فسفر خاک نقش مهمی دارد. فسفر علاوه بر اینکه از جنبه تغذیه‌ی گیاه حائز اهمیت است، از نظر آلودگی محیط‌زیست نیز از اهمیت بالای برخوردار است. سالانه تقریباً ۱۵ میلیون تن کود فسفر در سطح جهان مصرف می‌شود که از این مقدار فقط ۳۰-۵ درصد آن توسط گیاه برداشت می‌شود (۲۱). بنابراین بخش زیادی از کودهای فسفر مصرفی در خاک‌های سطحی اراضی کشاورزی تجمع می‌یابد و در نتیجه سبب حرکت فسفر به آب‌های سطحی از طریق فرسایش و آبخوبی به آب‌های زیرزمینی شود (۲). رهاسازی (Release) فسفر جذب شده نه تنها فراهمی فسفر را برای گیاهان ممکن می‌سازد بلکه کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آگاهی درباره مقدار فسفر رها شده از خاک‌ها، می‌تواند به طور موثری در مدیریت حاصلخیزی خاک‌ها کمک کند (۱۲).

جذب و واجذب فسفر از مهم‌ترین فرآیندهای کنترل‌کننده غلظت فسفر در محلول خاک هستند. با افزودن کودهای فسفر به خاک مقدار غلظت فسفر محلول خاک به سرعت افزایش می‌یابد اما بعد از زمان کوتاهی به علت واکنش فسفر با خاک مقدار آن کاهش می‌یابد و بخش عمده آن اصولاً در فاز جامد نگهداری می‌شود. قابلیت استفاده فسفر خاک برای گیاه اصولاً به وسیله اندازه‌گیری مقدار فسفر در فاز جامد بررسی می‌شود، اما مطالعات مختلف نشان داده است که خاک‌هایی با مقدار فسفر یکسان این عنصر را به مقدار مشابه و با سهولت در اختیار گیاه

قرار نمی‌دهند (۴۵). عوامل مختلفی نظیر مقدار قدرت یونی، کرن آلی، pH، بافت و کرنات کلسیم بر فرآیندهای جذب فسفر در خاک‌های آهکی موثر هستند. در خاک‌های آهکی، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی به دلیل کارایی پایین کودهای فسفر و ایجاد آلودگی این کودها در خاک (تجمع کادمیوم در خاک) می‌تواند روشی برای افزایش کرن آلی خاک و فسفر قابل استفاده باشد (۷). یکی از روش‌های افزودن مواد آلی خاک، استفاده از کمپوست است که به‌عنوان موثرترین روش برای کنترل و مدیریت بقایای آلی گزارش شده است (۳۰). باگاس نیشکر یکی از محصولات جانبی نیشکر است که به‌مقدار زیادی در استان خوزستان تولید می‌شود. در واقع باگاس نیشکر یک ماده لیگنوسلولوزی است که از تفاله نیشکر به‌دست می‌آید. براساس گزارش‌ها بخش بیشتری از باگاس نیشکر تولید شده سوزانده می‌شود. بنابراین یکی از روش‌های مدیریت بهینه باگاس نیشکر، تبدیل آن به کمپوست خواهد بود. کمپوست فرآورده حاصل از تجزیه زیستی مواد آلی تحت شرایط هوایی است که حاوی مقادیر فراوانی عناصر معدنی است (۳۸). افزودن کمپوست به خاک با تولید اسید کربنیک و تجزیه ترکیبات مختلف فسفوهمیک، سبب افزایش قابلیت جذب فسفر توسط گیاه می‌شود. یکی دیگر از راهکارهای کاهش خطرات احتراق و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سوزاندن باگاس نیشکر، گرماکافت و تبدیل آن در شرایط کم‌هوازی یا بی‌هوازی به بیوجار است. عواملی مختلفی مانند دمای گرماکافت، مدت زمان حرارت‌دهی و نوع زیست‌توده بر ویژگی‌های بیوجار موثر هستند (۱). شفرد و همکاران^۱ (۳۴) با کاربرد بیوجار به‌عنوان ماده آلی در خاک دریافتند که بیوجار با پوشش دادن یا اتصال به مکان‌های جذبی فسفر باعث افزایش فراهمی فسفر در خاک می‌شود. بیوجار فعالیت کاتیون‌هایی مثل Fe و Al و Ca را که تثبیت‌کننده فسفر هستند، کاهش می‌دهد که در نتیجه سبب آزاد کردن فسفر از مکان‌های تثبیت شده به محلول خاک می‌گردد. بطو کلی بیوجار ماده‌ای است که تأثیر فوق‌العاده‌ای بر چرخه‌ی

کج‌لداً اندازه‌گیری شد (۶)، پتاسیم قابل دسترس خاک به‌روش استخراج با اسنات آمونیوم یک مولار عصاره‌گیری شد و غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (Corning 410) اندازه‌گیری شد. غلظت قابل دسترس آهن، منگنز، روی توسط دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری (Shimadzu-6300 AA) اندازه‌گیری شد (۱۹).

تهیه کمپوست و بیوجار باگاس نیشکر

کمپوست باگاس نیشکر از شرکت کشت و صنعت دعبل خزائی خوزستان تهیه گردید و برخی از ویژگی‌های آن بر اساس روش‌های آزمایشگاهی استاندارد اندازه‌گیری شدند (۱۳). برای تولید بیوجار از زیست‌توده باگاس نیشکر تهیه شده از شرکت کشت و صنعت دعبل خزائی خوزستان استفاده گردید. بدین منظور باگاس نیشکر ابتدا هوا خشک شده و پس از آسیاب کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، در آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شد. سپس باگاس نیشکر برای تبدیل به بیوجار در کوره الکتریکی در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در شرایط بدون اکسیژن به مدت ۳ ساعت با نرخ افزایش دمای ۵ درجه سلسیوس در دقیقه تهیه شد (۲۹). پس از تهیه بیوجار برخی از ویژگی‌های آن شامل pH در نسبت ۱ به ۱۰ بیوجار به آب مقطر، هدایت الکتریکی (EC)، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن، نیتروژن و مقدار فسفر کل بیوجار با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۳۵).

آزمایش انکوباسیون

اثر کمپوست و بیوجار باگاس نیشکر بر جذب و واجذب فسفر خاک به‌صورت آزمایش انکوباسیون بررسی شد. این پژوهش با ۶ تیمار شامل: ۱- شاهد، ۲- کمپوست باگاس نیشکر ۱۰۰٪، ۳- بیوجار باگاس نیشکر ۱۰۰٪، ۴- کمپوست ۵۰٪ + بیوجار ۵۰٪، ۵- کمپوست ۷۵٪ + بیوجار ۲۵٪ و ۶- کمپوست ۲۵٪ + بیوجار ۷۵٪ به مدت ۱۲۰ روز ۳ تکرار اجرا شد. برای اجرای آزمایش مقدار ۲ درصد وزنی از تیمارهای مورد مطالعه به ۲۰۰ گرم از نمونه خاک هوا خشک، اضافه شد. پس از مخلوط شدن، نمونه‌ها در ظروف پلی‌اتیلنی ریخته شدند و رطوبت نمونه‌ها با افزودن آب مقطر به‌صورت اسپری در حد رطوبت ظرفیت مزرعه رسانده شدند. برای جلوگیری از اتلاف

عناصر و جلوگیری از هدررفت کربن، نیتروژن و فسفر خاک دارد (۱۷). ماسو و همکاران^۱ (۲۲)، نیز افزایش فسفر قابل استفاده خاک را با کاربرد بیوجار گزارش کردند.

استفاده از هم‌دماهای جذب سطحی فسفر جهت تعیین مقدار فسفر مورد نیاز برای رشد مطلوب گیاهان پیشنهاد شده است. معادلات رایجی که برای توصیف جذب سطحی فسفر به‌وسیله خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل معادلات فروندلیچ، لانگ‌مویر و تمکین می‌باشد (۱۷). واکنش جذب، انتقال یون‌های فسفر را از فاز محلول بر روی سطوح جامد خاک توصیف می‌کند، درحالی‌که واکنش واجذبی فرآیند عکس یعنی انتقال فسفر از فاز جامد خاک به سمت محلول خاک را توصیف می‌کند (۱۶). بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی جذب فسفر صورت گرفته است و واجذب که از فرآیندهای مهم است، نادیده گرفته شده است. بنابراین با توجه به اهمیت فسفر در حاصلخیزی خاک به‌ویژه در خاک‌های آهکی و نقش این عنصر در افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، در این پژوهش کارایی استفاده همزمان از کمپوست و بیوجار باگاس نیشکر به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های آلی در جذب و واجذب فسفر و نقش آن‌ها در تامین نیاز فسفر خاک بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

مونه‌برداری خاک و تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

خاک مورد مطالعه در این تحقیق از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز نمونه‌برداری گردید که دارای فسفر قابل استفاده پایین بود. نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نظیر بافت به‌روش هیدرومتری (۵)، pH و EC خاک در عصاره گل اشباع، کربن آلی با روش والکلی و بلک (۴۳)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به‌روش تیتراسیون (۲۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به‌روش اسنات سدیم (۳۱)، فسفر قابل جذب به‌روش اولسن (۲۸)، نیتروژن کل خاک به‌روش

جهت خارج کردن فسفر محلول و جذب نشده، شسته شدند و سپس به نمونه‌ها ۲۵ میلی‌لیتر از محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار اضافه شد. سپس لوله‌ها تا رسیدن به زمان تعادل و جذب فسفر، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انکوباتور در ۱۲۰ دور رفت و برگشت در دقیقه تکان داده شدند. نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه با ۳۰۰۰ rpm سانتریفیوژ و صاف شدند. مقدار فسفر محلول اندازه‌گیری شده در آزمایش جذب و واجذب به‌عنوان مقدار فسفر جذب شده و واجذب شده از خاک در نظر گرفته شد (رابطه ۱).

$$q_e = (C_i - C_e) \times \left(\frac{V}{m}\right) \quad (1)$$

C_i و C_e به ترتیب غلظت اولیه و غلظت تعادلی فسفر (میلی‌گرم بر لیتر)، q_e مقدار یون جذب و واجذب شده (میلی‌گرم بر گرم)، m جرم خاک (گرم) و V حجم محلول (لیتر) است. مقدار نگهداشت فسفر نیز از رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$P_{ret} = P_{ads} - P_{des} \quad (2)$$

که P_{ret} نشان‌دهنده مقدار فسفر نگهداشت شده، P_{ads} نشان‌دهنده مقدار فسفر جذب شده و P_{des} نشان‌دهنده مقدار فسفر واجذب شده است و واحد آن‌ها میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است. سپس نتایج آزمایش جذب و واجذب فسفر بر روی معادلات لانگمویر، فروندلیچ و تمکین برازش داده شدند (جدول ۱). داده‌های آزمایشی با روش بهینه‌سازی حداقل مربعات بر مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین برازش غیرخطی داده شدند.

رطوبت در دوره انکوباسیون دهانه ظروف پلی‌اتیلنی به‌وسیله درپوش پلاستیکی بسته شدند و روی درپوش‌ها جهت انجام تبدلات گازی، ۴ منفذ ریز یکنواخت تعبیه شد. تیمارها به مدت ۱۲۰ روز در شرایط کنترل شده با دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس قرار گرفتند. در طول مدت انکوباسیون ظروف توزین شد تا در صورت کاهش وزن نمونه‌ها، به‌وسیله آب مقطر جبران گردد. بعد از ۱۲۰ روز نمونه‌ها هوا خشک شدند و آزمایش‌های جذب و واجذب فسفر بررسی گردید.

آزمایش جذب و واجذب فسفر خاک

برای مطالعه همدم‌های جذب مقدار ۲/۵ گرم از تیمارها را در لوله‌های آزمایش ریخته و ۲۵ میلی‌لیتر محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار حاوی غلظت‌های فسفر (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر از منبع (KH_2PO_4) به نمونه‌ها اضافه شد و سوپانسیون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس تکان داده شدند تا به تعادل برسند. برای متوقف کردن فعالیت میکروبی به هر لوله دو قطره تولوئن اضافه گردید. بعد از رسیدن به تعادل، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه با ۳۰۰۰ rpm سانتریفیوژ و با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شدند. غلظت فسفر محلول با استفاده از روش رنگ‌سنجی مولیبدات آمونیوم (۲۵) و با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۸۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و از تفاوت غلظت اولیه و نهایی، مقدار جذب فسفر تعیین گردید. آزمایش واجذب بلافاصله در ادامه آزمایش جذب انجام گرفت. ابتدا نمونه‌های خاک باقیمانده در لوله، با آب مقطر

جدول (۱) مدل‌های جذب مورد استفاده در مطالعه

Table (1) Absorption models used in the study

| مدل | معادله | پارامترها |
|------------------------|---|---|
| فروندلیچ Freundlich | $q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$ | K_F : ثابت معادله فروندلیچ ($L \cdot Kg^{-1}$) n : پارامتر شدت جذب |
| لانگمویر Langmuir | $q_e = q_{max} \frac{K_L C_e}{(1 + K_L C_e)}$ | q_{max} : حداکثر ظرفیت جذب توسط جاذب ($mg \cdot g^{-1}$) K_L : ثابت تعادل معادله ($L \cdot mg^{-1}$) |
| تمکین Temkin | $q_e = B \ln K_T + B \ln C_e$ | B : ظرفیت جذب K_T : شدت جذب |

استفاده کم بود (جدول ۲). همچنین نتایج برخی ویژگی‌های بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است. کمپوست تهیه شده دارای شوری بالا بود، همچنین بیوجار باگاس نیشکر نیز دارای pH نسبتاً بالا و نسبت C/N بالا بود.

ایزوترم جذب فسفر

مقادیر فسفر جذب شده در مقابل غلظت تعادلی فسفر محلول در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه فسفر، مقدار جذب فسفر نیز در خاک‌های تیمار شده افزایش یافت. در این بین بیشترین مقدار جذب فسفر در خاک شاهد و کمترین مقدار جذب فسفر در تیمار کمپوست و بیوجار ۲۵ + کمپوست ۷۵ بود. به طور کلی سطوح مختلف تیمارهای بیوجار و کمپوست در مقایسه با تیمار شاهد سبب کاهش جذب فسفر گردیدند. همچنین غلظت تعادلی فسفر محلول در همه تیمارها در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. کاهش جذب فسفر با کاربرد تیمارهای کمپوست و بیوجار می‌تواند به دلیل رقابت آنیون فسفات برای مکان‌های جذب با آنیون‌های آلی تولید شده در طی تجزیه مواد آلی اضافه شده به خاک باشد. هورتا (۱۱) بیان کردند که جذب اسیدهای فولویک یا هیومیک کمپوست نیز ممکن است بار منفی سطح خاک را افزایش دهد یا نقطه بار صفر (PZC) را کاهش دهد و بنابراین سبب کاهش جذب فسفر گردد. نلسون و همکاران^۵ (۲۷) با افزودن بیوجار به خاک آهکی به نتایج مشابهی دست یافتند و مشاهده کردند با افزودن بیوجار به خاک جذب فسفر کاهش و واجذب آن افزایش می‌یابد و با افزایش سطح کاربرد بیوجار، فسفر موجود در فاز محلول افزایش می‌یابد. باو و همکاران^۶ (۳) نیز بیان کردند که کاربرد بیوجار تولید شده از پوسته قهوه در دمای گرماکافت ۳۵۰ درجه سلسیوس سبب کاهش جذب فسفر و افزایش قابلیت استفاده فسفر در خاک آهکی گردید. زو و همکاران^۷ (۴۶) در مطالعه‌ای بر روی اثر بیوجار روی جذب و واجذب فسفر در سه خاک با اسیدیته مختلف انجام دادند، بیان کردند که کاربرد بیوجار سبب کاهش جذب فسفر در خاک‌های قلیایی گردید.

همچنین از ضریب رگرسیونی (R^2) برای پی بردن به نحوه برازش مدل‌های استفاده گردید. برای برازش بهتر با مدل مورد نظر، مقدار ضریب رگرسیونی باید به یک نزدیک‌تر باشد (رابطه ۳). برای برازش بهتر بین نتایج حاصل از آزمایش و داده‌های تخمین شده توسط مدل نیز از اشتباه استاندارد (SE) استفاده گردید:

$$R^2 = \frac{\sum(q_{mod} - \bar{q}_{exp})^2}{\sum(q_{mod} - \bar{q}_{exp})^2 + \sum(q_{mod} - q_{exp})^2} \quad (3)$$

$$ES = \left(\frac{(q_{exp} - q_{mod})^2}{n-2} \right)^{0.5} \quad (4)$$

که در آن، q_{exp} مقدار فسفر جذب شده بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش (میلی گرم بر کیلوگرم) و q_{mod} مقدار فسفر جذب شده بر اساس داده‌های تخمینی حاصل از مدل (میلی گرم بر کیلوگرم) و n تعداد سری غلظتی است.

ظرفیت بافری حداکثر^۱ (MBC)، که از حاصل ضرب $q_{max} \times K_L$ معادله لانگمویر محاسبه شد. ظرفیت بافری استاندارد (SBC)^۲، شیب هم‌دماهای جذب در غلظت ۰/۳ میلی گرم فسفر در لیتر (Holford, 1979). ظرفیت بافری تعادلی^۳ (EBC)، شیب معادله فروندلیچ در غلظت تعادلی فسفر خاک می‌باشد (۳۹). نیاز استاندارد فسفر^۴ (SPR)، مقدار فسفر جذب شده به وسیله خاک در غلظت ۰/۲ میلی گرم فسفر در لیتر محلول خاک از هم‌دمای فروندلیچ استخراج شد (۱۰).

مطالعات آماری

برازش غیرخطی داده‌های آزمایش با معادلات ذکر شده با برنامه EXCEL- SOLVER و ترسیم نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار EXCEL صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. خاک مورد مطالعه دارای بافت لومی، آهکی، غیر شور، دارای مقدار فسفر قابل

5- Nelson *et al.*

6- Bayu *et al.*

7- Xu *et al.*

1- Maximum Buffering Capacity
2- Standardized Buffering Capacity
3- Equilibrium Buffering Capacity
4- Standard P Requirement

جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

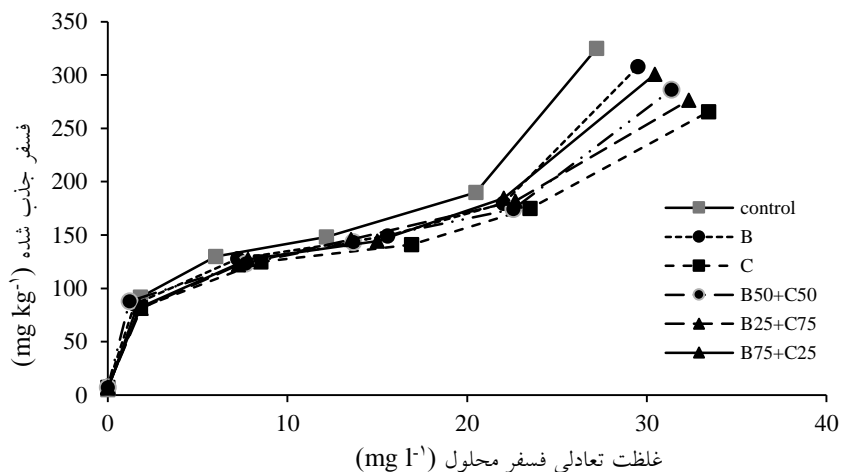
Table (2) Physical and chemical properties of the studied soil

| غلظت قابل دسترس (mg kg ⁻¹) | | | | | | N (%) | OC (%) | CCE (%) | EC (dS m ⁻¹) | pH | بافت خاک |
|--|-----|------|------|----|-----|-------|--------|---------|--------------------------|-----|----------|
| Cu | Zn | Mn | Fe | K | P | | | | | | |
| 0.76 | 0.5 | 4.12 | 1.25 | 98 | 7.5 | 0.07 | 0.81 | 43.9 | 1.2 | 7.6 | loam |

جدول (۳) ویژگی‌های شیمیایی کمپوست و بیوچار باگاس نیشکر

Table (3) Chemical properties of sugarcane bagasse compost and biochar

| | pH | EC (dS m ⁻¹) | C/N | N | | | CEC (cmol _c kg ⁻¹) |
|------------------|-------------|--------------------------|------|-------|-------|-------|---|
| | | | | N (%) | C (%) | P (%) | |
| بیوچار (Biochar) | 8.04 (1:10) | 1.1 (1:10) | 55.2 | 0.69 | 38.1 | 0.7 | 22.9 |
| کمپوست (Compost) | 6.9 (1:5) | 6.61 (1:5) | 24.1 | 1.12 | 27.03 | 0.62 | - |



شکل (۱) تأثیر کمپوست و بیوچار باگاس نیشکر بر جذب فسفر

Figure (1) Effect of sugarcane bagasse compost and biochar on phosphorus absorption

حاصل از داده‌های جذب به معادله‌های فروندلیچ، لانگمویر و فروندلیچ برآزش شدند که نتایج حاصل از بررسی ضریب تبیین (R²) معادلات نشان داد که مدل فروندلیچ (۰/۹۹-۰/۹۰) و مدل لانگمویر (۰/۹۱-)

معادلات جذب فسفر

معادلات متعددی برای توصیف ایزوترم‌های جذب فسفر به صورت کمی وجود دارد که مدل‌های معمول شامل معادله لانگمویر و فروندلیچ است (۱۷). نتایج

فسفر کاهش یافته و مقدار زیادی از فسفر موجود در سیستم وارد فاز محلول می شود.

پارامترهای برآورد شده از معادله لانگمویر در خاک مورد مطالعه در جدول ۵ نشان داده شده است. با استفاده از معادله لانگمویر می توان حداکثر جذب فسفر (q_{max}) و ثابت انرژی پیوند فسفر جذب شده (K_L) را برآورد نمود (۳۶). ظرفیت حداکثر جذب فسفر (q_{max}) نشان دهنده تعداد مکانهای جذب فسفر در واحد وزن خاک است و برای ارزیابی ظرفیت جذب خاک برای فسفر استفاده می شود (۴۷). نتایج نشان داد که حداکثر جذب فسفر در تیمارهای مختلف بیوچار و کمپوست باگاس نیشکر در مقایسه با خاک شاهد کاهش یافت.

به طوری که که کمترین مقدار حداکثر جذب فسفر در تیمار کمپوست و بیوچار ۲۵ + کمپوست ۷۵ مشاهده شد که در مقایسه با شاهد به ترتیب ۳۹/۲۸ و ۳۳/۰۳ درصد کاهش یافت. پارامتر دیگر در معادله لانگمویر K_L است که نشان دهنده قدرت نگهداری فسفر به وسیله ذرات خاک است و هر عاملی که بر جذب فسفر توسط خاک تأثیر گذارد، این پارامتر را نیز تغییر خواهد داد. در اثر کاربرد تیمارهای مختلف بیوچار و کمپوست باگاس نیشکر مقدار این پارامتر نیز کاهش یافت، که بیانگر کاهش قدرت جذب فسفر توسط خاک های تیمار شده است. نتایج تحقیق هورتا (۱۱) نیز نشان داد که کاربرد کمپوست در خاک سبب کاهش حداکثر جذب فسفر و انرژی پیوند فسفر جذب شده گردید. نتایج حاصل از برآزش داده های جذب به معادله تمکین نشان داد که در محدود غلظتی مورد مطالعه در این تحقیق، این مدل برآزش خوبی با داده ها نشان نداد چون ضریب تبیین (R^2) پایین و خطای استاندارد (SE) بالا بود.

برآزش خوبی بر داده های جذب داشتند اما مدل تمکین ($R^2=0.58-0.99$) برآزش خوبی بر داده های جذب نشان نداد (جدول ۴).

برآزش بهتر داده های جذب بر معادله فروندلیچ به دلیل ماهیت تجربی و لگاریتمی این مدل است که در اکثر موارد توصیف قابل قبولی از داده های جذب فسفر نشان می دهد. مقدار پارامترهای برآورد شده از معادله فروندلیچ در جدول ۴ نشان داده شده است.

پارامتر K_f که نشان دهنده فسفر جذب سطحی شده در غلظت فسفر واحد (ظرفیت جذب جاذب) است در تیمارهای مختلف بیوچار و کمپوست باگاس نیشکر در مقایسه با تیمار شاهد کاهش یافت. ضریب K_f در معادله فروندلیچ در دامنه ۳۶/۰۶ تا ۸۳/۵۳ لیتر بر کیلوگرم بود. بیشترین مقدار K_f در تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در تیمار کمپوست باگاس نیشکر بود. کاهش مقدار K_f بیانگر حضور بیشتر فسفر موجود در فاز محلول است و جذب کمتر فسفر در خاک است که در این حالت فسفر برای جذب توسط گیاه در دسترس است (۱۵). پارامتر n معادله فروندلیچ نیز با کاربرد تیمارهای بیوچار و کمپوست باگاس نیشکر در خاک کاهش یافت که بیانگر کاهش تمایل خاک به جذب فسفر در خاک های تیمار شده است. بطور کلی با کاهش مقدار n در یک غلظت تعادلی مشخص مقدار کمتری از فسفر جذب خواهد شد که نشان دهنده کاهش جذب فسفر در تیمارهای آلی مورد استفاده است. زبردست و سپهر (۴۸) در بررسی تأثیر اسید هومیک بر روی پارامترهای جذب مقدار کاهش n را در اثر افزودن اسید هومیک به خاک گزارش کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش مواد آلی تمایل به جذب یونهای

جدول (۴) تأثیر بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر بر پارامترهای مدل‌های ایزوترمی جذب فسفر
 Table (4) Effect of sugarcane bagasse biochar and compost on the parameters of phosphorus absorption isotherm models

| مدل ایزوترمی | ضرایب مدل | تیمارها | | | | | |
|------------------------|--------------------------------|---------|--------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | شاهد | بیوجار | کمپوست | بیوجار +۵۰ کمپوست ۵۰ | بیوجار +۲۵ کمپوست ۷۵ | بیوجار +۷۵ کمپوست ۲۵ |
| فروندلیچ Freundlich | $K_f (L \text{ kg}^{-1})$ | 69.04 | 62.24 | 36.06 | 43.84 | 49.83 | 53.82 |
| | n | 1.95 | 1.75 | 1.28 | 1.63 | 1.55 | 1.68 |
| | R^2 | 0.95 | 0.94 | 0.93 | 0.99 | 0.92 | 0.95 |
| | SE | 8.1 | 18.2 | 13.4 | 10.1 | 17.5 | 9.6 |
| لانگمویر Langmuir | $q_{max} (mg \text{ kg}^{-1})$ | 998.59 | 861.34 | 606.33 | 756.17 | 668.12 | 845.57 |
| | $K_L (L \text{ mg}^{-1})$ | 0.089 | 0.077 | 0.043 | 0.069 | 0.054 | 0.073 |
| | R^2 | 0.87 | 0.87 | 0.89 | 0.87 | 0.91 | 0.90 |
| | SE | 8.4 | 18.5 | 16.2 | 14.2 | 7.6 | 10.3 |
| تمکین Temkin | $K_T (L \text{ mg}^{-1})$ | 68.28 | 56.55 | 18.47 | 19.58 | 19.36 | 61.26 |
| | A | 23.87 | 38.67 | 116.13 | 122.32 | 55.01 | 22.58 |
| | R^2 | 0.71 | 0.58 | 0.70 | 0.68 | 0.69 | 0.73 |
| | SE | 21.09 | 50.69 | 23.05 | 58.48 | 56.79 | 46.05 |

جدول (۵) تأثیر بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر بر روی ظرفیت بافری حداکثر (MBC)، ظرفیت بافری استاندارد (SBC)، ظرفیت بافری تعادلی (EBC) و شاخص استاندارد فسفر (SPR).

Table (5) Effect of sugarcane bagasse biochar and compost on maximum buffering capacity (MBC), standard buffering capacity (SBC), equilibrium buffering capacity (EBC) and standard phosphorus Requirement (SPR).

| تیمار | MBC | SBC | EBC | SPR |
|----------------------|-----------------------|-------|-------|------------------------|
| | (L kg ⁻¹) | | | (mg kg ⁻¹) |
| شاهد | 88.87 | 51.34 | 86.12 | 29.79 |
| بیوجار | 66.32 | 50.03 | 52.11 | 22.89 |
| کمپوست | 26.07 | 40.11 | 26.32 | 10.53 |
| بیوجار +۵۰ کمپوست ۵۰ | 52.17 | 49.11 | 40.66 | 19.16 |
| بیوجار +۲۵ کمپوست ۷۵ | 36.08 | 45.34 | 37.70 | 11.43 |
| بیوجار +۷۵ کمپوست ۲۵ | 61.73 | 49.61 | 57.61 | 21.23 |

سبب کاهش حداکثر ظرفیت بافری (MBC)، ظرفیت بافری استاندارد (SBC)، ظرفیت بافری تعادلی (EBC) و نیاز استاندارد فسفر (SPR) گردید (جدول ۵).

حداکثر ظرفیت بافری (MBC) از حاصل ضرب حداکثر جذب فسفر (q_{max}) و ثابت متناسب با انرژی پیوند (K_L) در معادله لانگمویر محاسبه گردید. کمترین مقدار MBC در تیمار کمپوست مشاهده شده که در مقایسه با تیمار شاهد ۳/۴ برابر کاهش یافت. کاهش مقدار MBC

تأثیر بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر بر شاخص‌های بافری فسفر

از مهم‌ترین کاربردهای هم‌دماهای جذب فسفر تعیین شاخص‌های ظرفیت بافری خاک‌هاست که بیان‌کننده مقاومت خاک در برابر هرگونه تغییرات است، به ویژه افزایش یا کاهش فسفر در محلول خاک که جذب فسفر توسط گیاه را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج مطالعه نشان داد که افزودن تیمارهای مختلف بیوجار و کمپوست

یافت (جدول ۵). این امر بخاطر آن است که با افزودن کمپوست و بیوجار مکان‌های تبادل‌ی خاک پر شده و فسفر بیشتری وارد فاز محلول خاک می‌شود و با افزودن تیمارهای مختلف کمپوست و بیوجار باگاس نیشکر مقدار لازم برای رسیدن به غلظت تعادلی کاهش پیدا می‌کند. تحقیقات مختلف بیان کردند که با کاربرد کمپوست (۱۱) و بیوجار (۴۴) در خاک نیاز استاندارد فسفر خاک کاهش یافت.

هم‌دمای واجذب فسفر در خاک تیمار شده با بیوجار و کمپوست

بیشتر مطالعات شیمی خاک در زمینه جذب یون‌ها و مولکول‌ها در خاک انجام گرفته است، در حالی که واجذب نیز از فرآیندهای مهم است. جذب و واجذب فسفر مهم‌ترین فرآیندهایی هستند که غلظت فسفر در محلول خاک را کنترل می‌کنند. بنابراین به سبب پیچیده بودن فرآیندهای نگهداری عناصر در خاک، مطالعه همزمان هم‌دمای جذب و واجذب می‌تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار بگذارد (۳۷). از هم‌دمای واجذب برای محاسبه سرعت انتشار فسفر به سوی ریشه گیاهان استفاده می‌شود. در حالت کلی واجذب فسفر به‌طور عمده تابع pH خاک هست (۱۴). شکل ۲ نشان‌دهنده هم‌دمای واجذب تیمارهای مورد مطالعه است. مقدار واجذب فسفر با افزایش مقدار فسفر اضافه شده به خاک، افزایش یافت. نتایج نشان داد که تیمارهای بیوجار و کمپوست سبب افزایش واجذب فسفر گردیدند و بیش‌ترین افزایش واجذب در تیمار کمپوست ۱۰٪ و بیوجار ۲۵٪ + کمپوست ۷۵٪ مشاهده شد. دلسا و همکاران^۲ (۸) گزارش کردند که افزودن بیوجار سبب افزایش فسفر قابل استفاده و رهاسازی قابل توجه فسفر گردید. در این تحقیق به‌منظور بررسی مقدار واجذب در خاک‌های تیمار شده با بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر، مقدار نگهداشت فسفر از تفاضل مقدار فسفر جذب شده و فسفر واجذب شده

نشان‌دهنده حضور فسفر بیشتری در فاز محلول خاک است که پس از خارج شدن فسفر از فاز محلول، جایگزینی فسفر خارج شده در خاک‌های با MBC کمتر با سهولت انجام می‌شود (۱۵). بنابراین دلیل کاهش مقدار MBC در تیمارهای مورد مطالعه احتمالاً به دلیل کمتر شدن قدرت پیوند مکانهای جذب فسفر می‌باشد.

شاخص ظرفیت بافری استاندارد (SBC) یکی دیگر از شاخص‌های پر کاربرد است که از شیب هم‌دمای جذب در غلظت ۰/۳ میلی گرم فسفر در لیتر بدست می‌آید (۴۴). مقدار SBC نیز در تیمارهای مختلف بیوجار و کمپوست در مقایسه با تیمار شاهد کاهش یافت. کمترین و بیشترین مقدار SBC به ترتیب در تیمارهای کمپوست و شاهد مشاهده شد. پارامتر EBC شیب معادله فروندلیچ است و شاخصی برای ارزیابی توانایی خاک در حفظ شدت فسفر در محلول خاک می‌باشد (۳۲). مقدار EBC در تیمارهای بیوجار، کمپوست، بیوجار ۵۰ + کمپوست ۵۰، بیوجار ۲۵ + کمپوست ۷۵ و بیوجار ۷۵ + کمپوست ۲۵ در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور متوسط به ترتیب ۳۹/۴۹، ۶۹/۴۴، ۵۲/۷۸ و ۵۶/۲۲ و ۳۳/۱۰ درصد کاهش یافت. مرادی و همکاران^۱ (۲۴) نیز نشان داد که با کاربرد اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم (اسید اگزالیک، سیتریک و مالیک) مقدار EBC کاهش یافت.

نیاز استاندارد فسفر (SPR) پارامتری است که به شدت تحت تأثیر مقدار رس، آهک و ظرفیت بافری خاک است. نیاز استاندارد فسفر به‌طور معمول در مطالعات هم‌دمای جذب در غلظت تعادلی ۰/۲ میلی گرم فسفر بر لیتر در نظر گرفته می‌شود (۴). در این مطالعه نیز غلظت ۰/۲ میلی گرم بر لیتر به‌عنوان شدت مناسب فسفر در محلول خاک در نظر گرفته شد. محاسبه شاخص استاندارد فسفر براساس آن و با استفاده از مدل فروندلیچ صورت گرفت و به‌طور کلی ملاحظه شد که مقدار SPR با افزودن تیمارهای مختلف بیوجار و کمپوست کاهش

بود. بیشترین مقدار ضرایب فروندلیچ در تیمار شاهد و کمترین مقدار آنها در تیمار کمپوست مشاهده شد. مقدار n در تیمار کمپوست در مقایسه شاهد $24/68$ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد روند تغییر تیمارهای مختلف بیوجار و کمپوست در مقایسه با شاهد، کاهش بود که نشان دهنده تحرک بیشتر و جذب کمتر فسفر در خاک است. در این تحقیق با افزودن تیمارهای آلی، جذب فسفر کاهش یافت و در نتیجه شدت جذب (n) و انرژی پیوندی (K_f) کاهش یافت. این تأثیر می‌تواند به واسطه نقش مواد آلی در بلوکه کردن سطوح معدنی جذب کننده فسفات یا رقابت آنیون‌های آلی با فسفات برای مکان‌های جذب باشد (۲۰).

پارامترهای برآورد شده از معادله لانگمویر برای تیمارهای مختلف مورد مطالعه دارای تغییرات زیادی بودند (جدول ۶). حداکثر نگهداشت فسفر (q_{max}) در دامنه $746/84$ تا $399/56$ بود که به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار آن مربوط به تیمار شاهد و کمپوست بود که مقدار حداکثر نگهداشت فسفر در تیمار کمپوست نسبت به شاهد $1/87$ برابر کاهش یافت. نتایج نشان‌دهنده کاهش حداکثر نگهداشت فسفر با کاربرد تیمارهای بیوجار و باگاس نیشکر است که بهترین تلفیق بیوجار و کمپوست در نسبت کمپوست $75\% +$ بیوجار 25% به دست آمد. پارامتر K_L نیز که نشان‌دهنده قدرت نگهداری فسفر به وسیله ذرات خاک است در همه تیمارهای بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر در مقایسه با شاهد کاهش یافت.

نتایج حاصل از برازش داده‌های جذب به معادله تمکین نشان داد که در محدود غلظتی مورد مطالعه در این تحقیق، این مدل برازش خوبی با داده‌ها نشان نداد چون ضریب تبیین (R^2) پایین و خطای استاندارد (SE) بالا بود (جدول ۶). بنابراین نتایج حاصل از مدل تمکین مورد بررسی قرار نگرفت.

انجام گردید. همچنین هم‌دماهای فسفر در تیمارها بر هم-دماهای جذب منطبق نشد که نشان‌دهنده وجود پدیده پسماند یا هیستریس است. وگا و همکاران^۱ (۴۲) نیز بیان کردند که واکنش‌های جذب و واجذب به دلیل وجود پدیده پسماند یا هیستریس، به طور کامل برگشت پذیر نیستند. عوامل غیرطبیعی مربوط به شرایط آزمایشگاهی مثل عدم برقراری حالت تعادل در جذب سطحی و دگرگونی شیمیایی و میکروبی که در روند آزمایش اتفاق می‌افتد، می‌تواند از دلایل مشاهده پسماند در آزمایشات جذب و واجذب باشد (۴۰). بنابراین، مشاهده هیستریس بر ضرورت استفاده از هم‌دماهای جذب به جای هم‌دماهای واجذب در مدل‌سازی جذب فسفر توسط گیاه تأکید دارد (۲۰).

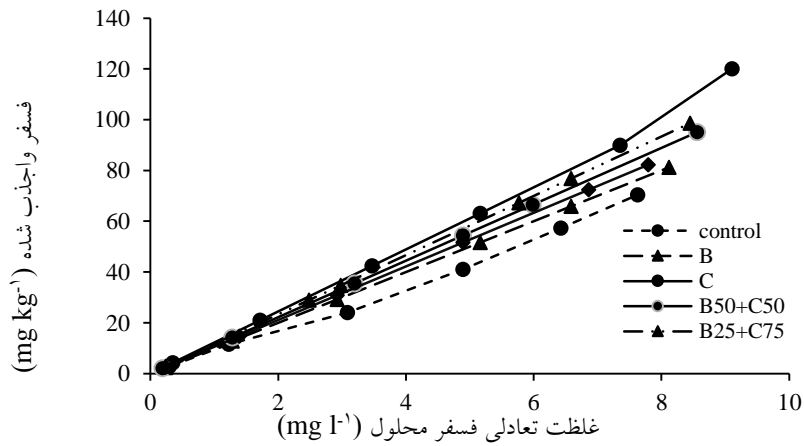
نتایج ارائه شده در شکل ۳ نشان داد که درصد واجذب در تیمارهای بیوجار و کمپوست در مقایسه با تیمار شاهد روند افزایشی داشت. این تأثیر می‌تواند به واسطه بالا بودن ماده آلی در این تیمارها باشد که سبب بلوکه شدن سطوح معدنی جذب کننده فسفر و رقابت آنیون‌های آلی با فسفات برای مکان‌های جذب باشد (۹).

برازش معادلات به داده‌های نگهداشت فسفر

نتایج حاصل از داده‌های نگهداشت فسفر به معادله‌های فروندلیچ، لانگمویر و تمکین برازش داده شد. نتایج حاصل از برازش به معادله‌ها نشان داد که مدل فروندلیچ در تیمارهای مختلف $R^2=0/86-0/94$ و مدل لانگمویر $0/99-$ $R^2=0/85$ برازش بهتری نسبت به مدل تمکین $0/99-$ $R^2=0/48$ بر داده‌های نگهداشت داشت (جدول ۶).

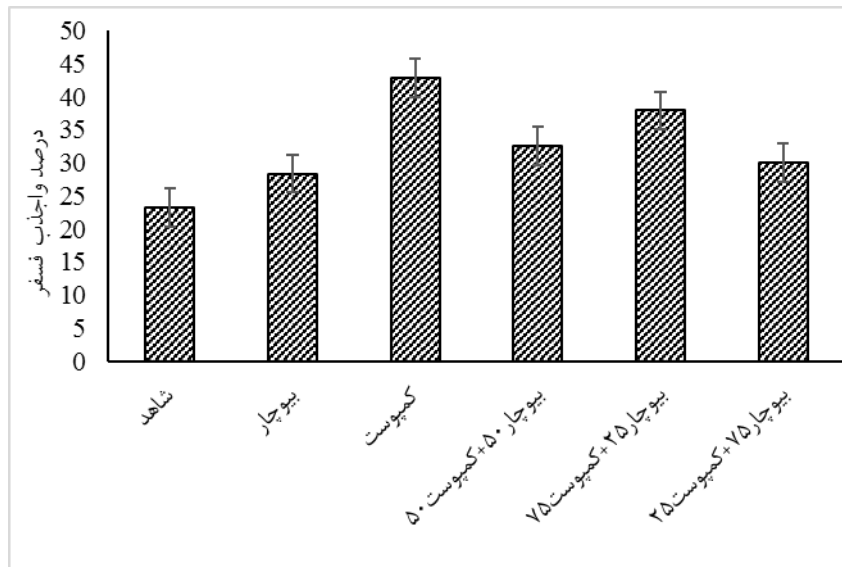
برازش مدل فروندلیچ به داده‌های نگهداشت فسفر

پارامترهای به دست آمده برای داده‌های نگهداشت فسفر با استفاده از معادله فروندلیچ در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقدار پارامتر K_f در تیمارهای مورد مطالعه در دامنه $53/92$ تا $26/76$ بود. به طوری که بیشتر مقدار آن در تیمار شاهد و کم‌ترین مقدار آن در تیمار کمپوست مشاهده گردید. همچنین مقدار n نیز در دامنه $2/07$ تا $1/19$



شکل (۲) تأثیر کمپوست و بیوجار باگاس نیشکر بر منحنی واجذب فسفر

Figure (2) Effect of sugarcane bagasse compost and biochar on phosphorus desorption



شکل (۳) تأثیر بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر بر درصد واجذب در خاک مورد مطالعه.

Figure (3) Effect of sugarcane bagasse biochar and compost on the desorption percentage in the studied soil.

جدول (۶) تأثیر بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر بر داده‌های نگهداشت فسفر در مدل‌های ایزوترمی
 Table (6) Effect of sugarcane bagasse biochar and compost on phosphorus retention in isotherm models

| مدل ایزوترمی | ضرایب مدل | تیمارها | | | | | |
|------------------------|--------------------------------|---------|--------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | شاهد | بیوجار | کمپوست | بیوجار +۵۰ کمپوست ۵۰ | بیوجار +۲۵ کمپوست ۷۵ | بیوجار +۷۵ کمپوست ۲۵ |
| فروندلیچ Freundlich | $K_f (L \text{ kg}^{-1})$ | 44.35 | 35.12 | 26.76 | 31.23 | 30.22 | 34.82 |
| | n | 1.58 | 1.49 | 1.19 | 1.37 | 1.30 | 1.43 |
| | R^2 | 0.93 | 0.94 | 0.91 | 0.94 | 0.93 | 0.94 |
| | SE | 19 | 17 | 12 | 14 | 29 | 23 |
| لانگمویر Langmuir | $q_{\max} (\text{mg kg}^{-1})$ | 746.84 | 696.16 | 399.56 | 529.51 | 496.39 | 670.94 |
| | $K_L (L \text{ mg}^{-1})$ | 0.049 | 0.041 | 0.21 | 0.033 | 0.029 | 0.039 |
| | R^2 | 0.95 | 0.85 | 0.93 | 0.96 | 0.92 | 0.95 |
| | SE | 17 | 9 | 13 | 10 | 7 | 19 |
| تمکین Temkin | $K_T (L \text{ mg}^{-1})$ | 50.04 | 37.38 | 15.15 | 16.55 | 16.58 | 41.88 |
| | A | 54.92 | 67.27 | 97.16 | 106.96 | 103.86 | 53.29 |
| | R^2 | 0.65 | 0.48 | 0.75 | 0.71 | 0.73 | 0.64 |
| | SE | 48 | 48 | 37 | 46 | 43 | 44 |

نتیجه‌گیری

نیشکر سبب کاهش حداکثر ظرفیت بافری خاک، ظرفیت بافری تعادلی و ظرفیت بافری استاندارد گردید. به‌طور کلی استفاده تلفیقی از بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر به‌ویژه در نسبت بیوجار ۲۵٪ + کمپوست ۷۵٪ در کاهش جذب فسفر و افزایش قابلیت استفاده فسفر خاک توصیه می‌شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار جذب و واجذب فسفر با کاربرد تیمارهای مختلف بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب کاهش و افزایش یافت که تیمار کمپوست باگاس نیشکر و بیوجار ۲۵ + کمپوست ۷۵، بیش‌ترین تأثیر را در کاهش جذب فسفر نشان دادند. مدل فروندلیچ در تیمارهای مختلف $R^2 = (0/0 - 9/99)$ برآزش بهتری بر داده‌های جذب و واجذب داشت. نتایج نشان داد که کاربرد تیمارهای مختلف بیوجار و کمپوست باگاس نیشکر سبب کاهش نیاز استاندارد فسفر (SPR) گردید که نشان‌دهنده کاهش نیاز به کوددهی با کاربرد این تیمارها است. همچنین کاربرد تیمارهای مختلف بیوجار و کمپوست باگاس

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی، فناوری و ارتباط با جامعه دانشگاه شهید چمران اهواز جهت حمایت‌های مالی از این پژوهش (پژوهانه به شماره SCU.AS99.38670) تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

1. Abarca, R.R., deLuna, M.D., Chakraborty, S., Curcio, S., and Candamano, S. 2020. Utilization of response surface methodology in optimization of deoiled olive pomace activated biochar production. E3S Web of Conferences, 148: 02006.
2. Alzeyadi, A., Al-Ansari, N., Laue, J., and Alattabi, A. 2019. Study of biomass bottom ash efficiency as phosphate sorbent material. Civil Engineering Journal, 11(5): 2392–2401. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091419>.

3. Bayu, D., Dejene, A., and Gezahegn, B. 2017. Effects of Biochar on Phosphorus Sorption and Desorption in Acidic and Calcareous Soils. *Environmental Research*, 9(5): 2224-5790.
4. Beckwith, R.S. 1965. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 5(16): 52-8. <https://doi.org/10.1071/EA9650052>
5. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
6. Bremner, J. M. 1996. Nitrogen- Total. p. 1085- 1122. In: Sparks D.L. et al., (eds) *Methods of Soil Analysis. Part III. 3rd Ed.*, American Society of Agronomy, Madison. WI.
7. Delgado, A., and Torrent, J. 2000. Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6): 2031-2037. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462031x>
8. Deluca, T.H., Mackenzie, M.D., and Gundale, M.J. 2009. Biochar effects on soil nutrient transformation. P. 251-270. In: Lehmann J., Joseph S. (ed.). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. London: Earthscan.
9. Ghodszad, L., Reyhanitabar, A., and Oustan, S. 2021. Biochar effects on phosphorus sorption desorption kinetics in soils with dissimilar acidity. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(366): 366-383. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06629-y>.
10. Holford, I.C., Wedderburn, M., and Mathingly, G.E. 1974. A Langmuir two-surface equation as a model for phosphate adsorption by soils. *Journal of Soil Science*, 25(2): 242-254. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1974.tb01121.x>
11. Horta, C. 2019. Fertilisation with Compost: Effects on Soil Phosphorus Sorption and on Phosphorus Availability in Acid Soils. *Open Journal of Soil Science*, 9(12): 255-268. <https://doi.org/10.4236/ojss.2019.912016>
12. Jalali, M., and Ranjbar, F. 2009. Rates of decomposition and phosphorus release from organic residues related to residue composition. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3): 353-359. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800032>
13. Jindo, K., Sonoki, T., Matsumoto, K., Canellas, L., Roig, A., & Sanchez-Monedero, M. 2016. Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures. *Waste Management*, 49: 545-552. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.007>
14. Jun, W., Wen-Zhao, L., Han-Feng, M., and Ting-Hui, D. 2010. Inorganic Phosphorus Fractions and Phosphorus Availability in a Calcareous Soil Receiving 21-Year Superphosphate Application. *Journal of Pedosphere*, 20(3): 304-310. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60018-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60018-5)
15. Khorshid, M., Hoseinpour, A., and Oustan, S. 2010. Influence of Poultry Manure on Sorption Characteristics and Standard Phosphorus Requirement in Some Calcareous Soils of Hamadan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 40(2): 139-148. <https://doi.org/10.1001.1.2008479.1388.40.2.6.0>. (In Persian)
16. Kuo, S., Jellum, E.J., and Pan, V.L. 1988. Influence of phosphate sorption parameters of soils on the desorption of phosphate by various extractants. *Soil Science Society of America Journal*, 52(4): 974-979. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200040014x>
17. Lair, G.J., Zehetner, F., Khan, Z.H., and Gerzabek, M.H. 2009. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. *Geoderma*, 149(1-2): 39-144. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.11.011>

18. Liang, X., Jin, Y., He, M., Niyungeko, C., Zhang, J., Liu, C., Tian, G., and Arai, Y. 2018. Phosphorus speciation and release kinetics of swine manure biochar under various pyrolysis temperatures. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 25780-25788. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0640-8>
19. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3): 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
20. Mahdizadeh, M., Reyhanitabar, A., Oustan, S., and Heidari, S. 2015. The effect of organic matter removal on desorption and retention characteristics of phosphorus in some calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(2): 315-330. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2015.55936>. (In Persian)
21. Maluf, H.J.G.M., Silva, C.A., Curi, N., Norton, L.D., and Rosa, S.D. 2018. Adsorption and availability of phosphorus in response to humic acid rates in soils limed with CaCO₃ or MgCO₃. *Ciência e Agrotecnologia*, 42(1): 7–20. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018421014518>.
22. Masto, R.E., Ansari M.A., George J., Selvi V., and Ram L. 2013. Co-application of biochar and lignite fly ash on soil nutrients and biological parameters at different crop growth stages of *Zea mays*. *Ecological Engineering*, 58: 314–322. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.07.011
23. Mengel, K., and Kirkby, E.A. 2004. Principles of plant nutrition. *Annals of Botany*, 93(4): 479-480. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>
24. Moradi, N., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Sepehr, E., and Abdolahi-Mandoulakani, B. (2012). Effect of low molecular weight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(4): 1106-38. <https://doi.org/10.3906/tar-1106-38>
25. Murphy, J.A.M.E.S., and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta* 27: 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
26. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L. (ed.) *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods*. SSSA and ASA.
27. Nelson, N.O., Agudelo, S.C., Yuan, W., and Gan, J. 2011. Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils. *Soil Science*, 176(5): 218-226. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3182171eac>
28. Olsen, S., Cole, C., Watanabe, F., and Dean, L. 1954. Estimation of available phosphorus by extraction with sodium bicarbonate (Circular 39). Washington DC: USDA.
29. Park, J.H., Ok, Y.S., Kim, S.H., Cho, J.S., Heo, J.S., Delaune, R.D., and Seo, D.C. 2015. Evaluation of phosphorus adsorption capacity of sesame straw biochar on aqueous solution: influence of activation methods and pyrolysis temperatures. *Environmental geochemistry and health*, 37(6): 969-983. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9709-9>
30. Quiquampoix, H., and Mousain, D. 2005. Enzymatic hydrolysis of organic phosphorus. P. 89–112. In: Turner BL, Frossard E, Baldwin D.S. (eds.) *Organic phosphorus in the environment*. CABI, Wallingford.
31. Rhoades, J. 1986. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods (methods of soil an3)*, 417-435.
32. Samadi, A. 2006. Phosphorus sorption characteristics in relation to soil properties in some calcareous soils of Western Azarbaijan province. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 8(3): 251-264. <https://doi.org/20.1001.1.16807073.2006.8.3.4.6>
33. Schneider, F., and Haderlein, S.B. 2016. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus—mechanistic insights. *Geoderma*, 277: 83–90.

34. Shepherd, J.G., Joseph, S., Sohi, S.P., and Heal, K.V. 2017. Biochar and Enhanced Phosphate Capture: Mapping Mechanisms to Functional Properties. *Chemosphere*, 179: 57–74. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.123>
35. Singh, B., Camps-Arbestain, M., and Lehmann, J. 2017. *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro Publishing.
36. Sibbesen, E. 1981. Some new equations to describe phosphate sorption by soils. *European Journal of Soil Science*, 32(1): 67–74. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1981.tb01686.x>
37. Sipos, M., Kincves, I., and Szabo, E.B. 2009. Study of the effect of limiting production factors – hybrid, nutrient supply level and irrigation on the yield and starch content of maize (*Zea mays* L.). *Cereal Research Communications*, 37: 145-148.
38. Smith, J.L. Collins, H.P., and Bailey, V.L. 2010. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 2345–2347. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.013>
39. Solis, P., and Torrent, J. 1989. Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2):456– 459. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020024x>
40. Sparks, D.L. 1989. *Kinetics of Chemical Processes*. San Diego, Academic Press Inc., 180. ISBN: 9781483183978
41. Tehrani, M.M., Balali, M.R., Moshiri, F., and Daryashnas, A.M. 2012. Recommendations and estimates of fertilizer in Iran: challenges and solutions. *Journal of soil Research*, 20(2): 123-144. (In Persian)
42. Vega, F.A., Covelo, E.F., and Andrade, M. L. 2009. Hysteresis in the individual and competitive sorption of cadmium, copper and lead by various soil horizons. *Journal of Colloid and Interface Science*, 331(2): 312-317. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.11.047>
43. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1): 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
44. Wang, Y., Lin, Y., Chiu, P.C., Imhoff, P.T., and Guo, M. 2015. Phosphorus release behaviors of poultry litter biochar as a soil amendment. *Science of the total Environment*, 512-513: 454-463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.093>
45. Whalen, J.K., Chang, C.H., and Olsen, B.M. 2001. Nitrogen and phosphorous mineralization potentials of soil receiving repeated annual cattle manure applications. *Journal of Biology and Fertility of Soils*, 34: 334-341. <https://doi.org/10.1007/s003740100416>
46. Xu, G., Sun, J., Shao, H., and Chang, S.X. 2014. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering*, 62: 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.027>
47. Yan, Z., Liu, P., Li, Y., Ma, L., Alva, A., Dou, Z., Chen, Q., and Zhang, F. 2013. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications. *Journal of Environmental Quality*, 42: 982–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0463>
48. Zebardast, R., and Sepehr, E. 2013. Effect of Humic Acid on Adsorption Behavior of Phosphorus in a Calcareous Soil. *Water and Soil*, 27(4): 720-731. <https://doi: 10.22067/jsw.v0i0.28095>. (In Persian)