

تأثیر بیوچار غنی شده بر رفتار جذب فسفر در خاک‌های شور و غیر شور حوضه دریاچه ارومیه

رقیه موسوی، میرحسن رسولی صدقیانی*، ابراهیم سپهر و محسن برین^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۲۴)

چکیده

مطالعه همدماهای جذب سطحی، از جمله روش‌های ارزیابی فراهمی فسفر در خاک است که می‌تواند اطلاعات مفیدی در ارتباط با توانایی هر خاک در جذب فسفر و عوامل مؤثر بر آن‌ها ارائه کند. در این پژوهش برای بررسی تأثیر بیوچار تولید شده از پیرولیز در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و غنی شده با انواع ترکیبات، بر رفتار جذب سطحی فسفر یک آزمایش به صورت دسته‌ای با غلظت‌های فسفر (۰ تا ۳۵ میلی‌گرم در لیتر) در دو خاک با قابلیت هدایت الکتریکی متفاوت ($S_1 = 2$ و $S_2 = 15 \text{ dS m}^{-1}$) با انواع تیمارهای بیوچار شامل بیوچار ساده بقایای هرس سیب- انگور (BC)، مخلوط بیوچار با خاک فسفات (BC-RP)، بیوچار غنی شده با اسید فسفریک و خاک فسفات (BC-H₃PO₄-RP)، بیوچار غنی شده با اسید کلریدریک و خاک فسفات (BC-HCl-RP)، سوپرفسفات تریپل (TSP) و شاهد (Cont) انجام شد. بر اساس نتایج، تیمارهای بیوچار در کاهش جذب سطحی فسفر در هر دو خاک مؤثر بودند؛ به طوری که در اثر تیمار انواع بیوچار غنی شده BC-H₃PO₄-RP و BC-HCl-RP حداکثر جذب فسفر خاک S₁ (خاک غیر شور) به ترتیب ۱۴ و ۲۳ درصد و خاک S₂ (خاک شور) به ترتیب ۲۶ و ۱۹ درصد کاهش یافت. همچنین، مصرف این تیمارها پارامترهای شدت جذب لانگمیر (K_L) خاک S₁ را به ترتیب به ۰/۰۸۵ و ۰/۰۶۶ و خاک S₂ به ترتیب به ۰/۱۱ و ۰/۱۵ لیتر بر میلی‌گرم، ظرفیت جذب فروندلیچ (K_F) خاک S₁ به ترتیب به ۱۹/۲ و ۲۲/۵ و خاک S₂ به ۲۸/۲ و ۲۸/۱ لیتر بر کیلوگرم کاهش دادند. در این پژوهش، بیوچارهای غنی شده با بلوک کردن مکان‌های تثبیت فسفر و افزایش فراهمی فسفر، نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده هر دو خاک را بطور معنی‌دار کاهش داد. بنابراین، غنی‌سازی بیوچار می‌تواند به عنوان راهکار مؤثری در افزایش قابلیت فراهمی فسفر و کاهش نیاز به مصرف کود در شرایط شور و غیر شور مطرح باشد که از این رو نیاز به پژوهش‌های گسترده‌تر آزمایشگاهی و مزرعه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: غنی‌سازی بیوچار، کمبود فسفر، کشاورزی در خاک‌های شور

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

مقدمه

استفاده پایدار از سنگ فسفات علاوه بر محدود بودن منابع آن به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی یکی از مسائل مهم کشاورزی است. بنابراین، تدوین راهکارهایی برای اطمینان از استفاده پایدار منابع فسفره الزامی است (۱۴)، به‌تازگی استفاده از بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و ماده اولیه تولید کودهای آلی - معدنی و بعنوان جایگزین مناسب برای منابع تجدیدنپذیر فسفر مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته است. استراتژی تولید بیوچار در حضور انواع مواد معدنی برای دستیابی به محصول جدید (بیوچار غنی‌شده) با هدف افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی به‌ویژه افزایش کارایی کودهای فسفاته در خاک و استفاده از منابع جایگزین فسفر پیشنهاد شده است (۳، ۲۲، ۶ و ۷). بیوچار غنی‌شده معمولاً از پیش‌تیمار زیست توده گیاهی و جانوری با انواع مواد معدنی و پیرولیز در دمای ۳۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و یا تغلیظ بیوچار ساده با انواع کانی‌های رسی و منابع متنوع مواد مغذی مانند کربنات کلسیم، سنگ فسفات، بستر مرغی و کود مایع و سپس خشک کردن مخلوط حاصل در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و یا برشته‌سازی (Torrefaction) در دمای ۱۸۰-۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست می‌آید (۳، ۲۲، ۶ و ۱۹). فعل و انفعالات قوی بین فاز کانی‌های معدنی و اسیدهای آلی در طی فرایند برشته‌سازی، با مسدود کردن مکان‌های جذب فسفات حلالیت فسفر را افزایش می‌دهد، از این رو محصول نهایی دارای فسفر قابل جذب بالا و ارزش کودی و یا جاذب زیستی است (۲۲ و ۷). غنی‌سازی بیوچار با انواع مواد مغذی می‌تواند یک روش رضایت‌بخش در جهت افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی باشد، اما به مطالعات گسترده و منظم نیاز است تا علاوه بر تعیین بهترین روش‌های غنی‌سازی، تأثیر کاربرد بیوچار غنی‌شده به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و منبع مواد غذایی قابل جذب در شرایط خاکی و اقلیمی متفاوت به‌طور گسترده مستندسازی و مورد مطالعه قرار گیرد (۳۷، ۳۸ و ۴۰).

جذب سطحی فسفر محلول خاک یکی از چالش‌های جهانی است. برای مقابله با این چالش و اطمینان از کوددهی کافی فسفر برای رشد بهینه گیاه، اطلاع از فرایندهای مختلف دینامیک فسفر در محلول خاک به‌منظور ارزیابی مقدار فسفر قابل جذب گیاه مورد توجه ویژه قرار گرفته است (۱۰ و ۳۳). برای ارزیابی وضعیت فسفر خاک‌ها روش‌های متعددی بررسی و پیشنهاد شده است. همدم‌های جذب یکی از معیارهای مهم در این زمینه است. فراهمی فسفر در محلول خاک ارتباط نزدیکی با فرایندهای جذب سطحی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (بافت خاک، مواد آلی، pH، CEC، مقدار کربنات کلسیم و اکسیدهای آهن و آلومینیوم) خاک دارد. یکی از عوامل اصلی که جذب سطحی فسفر در خاک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد علاوه بر مقدار و نوع کانی‌های رسی، pH، میزان ماده آلی، زمان و دما، اثر املاح و قدرت یونی است که اغلب به‌عنوان اثر الکترولیت و گونه‌های کاتیونی بیان می‌شود (۹). نتایج اغلب مطالعات نشان داده‌اند که فرایندهای جذب سطحی فسفر با نوع خاک و نوع املاح غالب در محلول خاک‌های شور در ارتباط است. در خاک‌های اسیدی با افزایش غلظت NaCl رسوب فسفات‌های آلومینیوم Al-P، و در خاک‌های آهکی با افزایش غلظت Na^+ و pH خاک مقدار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم (NaHCO_3^-) افزایش می‌یابد. در خاک‌های سدیمی به علت بالا بودن غلظت سدیم، فسفر به شکل فسفات سدیم Na-P محلول حضور دارد. به‌طور کلی آگاهی از رابطه بین خصوصیات خاک و ظرفیت جذب برای درک رفتار جذب فسفر در خاک‌های مختلف ضروری است. بدین منظور در این پژوهش، برای ارزیابی تأثیر انواع بیوچار غنی‌شده بر قابلیت فراهمی فسفر در خاک‌های شور و غیر شور حوضه دریاچه ارومیه، رفتار جذب فسفر به‌وسیله ذرات خاک با استفاده از معادلات جذب لانگمویر و فروندلیچ در شرایط انکوباسیون مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تولید انواع بیوچار ساده و غنی شده

برای تهیه بیوچار ساده (غنی نشده) از بقایای هرس سیب و انگور استفاده شد. بقایای اولیه هرس سیب و انگور بعد از خرد شدن، شسته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خشک شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد داخل آون خشک شد. فرایند پیرولیز در کوره الکتریکی در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت با نرخ افزایش دمایی ۹ درجه سانتی‌گراد در دقیقه انجام گرفت و سپس کوره به آرامی با تبادل گرمایی با محیط خنک شد.

به منظور تغییر ویژگی‌های سطحی بیوچار و تهیه انواع بیوچار غنی شده، از خاک فسفات، اسید فسفریک و اسید کلریدریک (پنج و دو دهم نرمالته) استفاده شد. ابتدا بیوچارهای تولید شده از الک یک میلی‌متری عبور داده شدند، سپس برای تهیه بیوچار - اسید فسفریک ($BC-H_3PO_4$)، یک واحد مخلوط بیوچار سیب و انگور با یک واحد اسید فسفریک (۱۰ درصد) مخلوط شد. بدین ترتیب در تهیه بیوچار - اسید کلریدریک ($BC-HCl$)، نیز از نسبت وزنی ۱:۱ مخلوط بیوچار سیب - انگور و اسید کلریدریک (۱۰ درصد) استفاده شد. بعد از ۲ ساعت هم‌زدن، بیوچارهای اسیدی حاصل به‌طور جداگانه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در داخل آون خشک شدند.

برای غنی‌سازی بیوچارهای اسیدی با خاک فسفات ($BC-HCl-RP$ و $BC-H_3PO_4-RP$)، بیوچارهای اسیدی با نسبت وزنی ۴:۱ (۴ گرم بیوچار اسیدی، ۱ گرم خاک فسفات) مخلوط شد سپس نسبت ۲۰:۶ به مخلوط حاصل آب جوش اضافه شد و بعد از ۲ ساعت هم‌زدن، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در داخل آون خشک شد و در نهایت در کوره با نرخ افزایش دمایی ۹ درجه در دقیقه تا دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند.

برای اندازه‌گیری pH و EC بیوچارهای تولیدی، بعد از عبور از الک یک میلی‌متری، از نسبت ۱:۵ (بیوچار/ آب مقطر دیونیزه) بعد از ۳۰ دقیقه تکان دادن، استفاده شد (۴۱). ظرفیت تبادل کاتیونی از روش جایگزینی آمونیوم (۴۱) و کربنات کلسیم معادل

به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (۳۲)، و فسفر قابل جذب با روش اولسن (۲۸) و فسفر کل بیوچارها پس از هضم با اسید نیتریک، به روش رنگ‌سنجی زرد اندازه‌گیری شد (۱۱). مقادیر کربن، هیدروژن و نیتروژن کل در بیوچار با آنالیز عنصری (ECS 4010 CHNSO Analyzer) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های بیوچار با پراش سنج اشعه X-ray (Shimadzu 6000) با استفاده از منبع تابش Cu-Ka انجام شد.

آزمایش‌های آنکوباسیون

از بین ۲۵ نمونه خاک نمونه‌برداری شده از افق سطحی (۰-۳۰ cm) اراضی اطراف دریاچه ارومیه (از نظر جغرافیایی در مختصات $12^{\circ} 12' 51''$ تا $15^{\circ} 34' 51''$ طول شرقی و $37^{\circ} 39' 6''$ تا $40^{\circ} 51' 37''$ عرض شمالی)، دو نمونه خاک با EC متفاوت و مقدار فسفر اولسن کم ($S1=5$ mg/kg و $S2=7$) انتخاب شد. پس از هواخشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری (۵)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH در عصاره گل اشباع خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جایگزینی با استات آمونیوم (۵)، درصد کربن آلی (۲۷)، کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (۲۶)، فسفر قابل جذب نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد سدیم تبادل (ESP) اندازه‌گیری و محاسبه شد (جدول ۲).

مقدار ۱۰۰ گرم خاک هواخشک درون ظروف پلاستیکی درپوش‌دار ریخته سپس تیمارها مطابق جدول ۳ اعمال و به مدت یک ماه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد خوابانیده شد. آزمایش به صورت فاکتوریل (فاکتور اول نوع خاک براساس EC ($S1$) با قابلیت هدایت الکتریکی ۲ دسی زیمنس بر متر، $S2$ با قابلیت هدایت الکتریکی ۱۵ دسی زیمنس بر متر) و فاکتور دوم شامل انواع تیمارها (بیوچار ساده سیب - انگور (BC)، مخلوط بیوچار با خاک فسفات (BC-RP)، بیوچار اسیدی غنی شده با خاک فسفات ($BC-H_3PO_4-RP$)، بیوچار اسیدی غنی شده با خاک فسفات ($BC-HCl-RP$)، سوپرفسفات تریپل (TSP) و شاهد

جدول ۱. برخی ویژگی‌های شیمیایی بیوچارهای مورد استفاده

ویژگی‌های بیوچار	واحد	بیوچار سیب	بیوچار انگور	بیوچار اسیدی (BC-H ₃ PO ₄ -RP)	بیوچار اسیدی (BC-HCl-RP)
pH	—	۷/۶	۸/۲	۵/۱	۴/۹
EC	(dS/m)	۱/۲	۱/۶	۱/۸	۲/۱
کربن آلی	%	۶۶	۷۶	۶۵	۶۱
نیتروژن کل	%	۱	۰/۸۵	۲/۵	۱/۷
هیدروژن	%	۳/۹	۳/۶	-	—
کربنات کلسیم	%	۴	۵	۰	۰
فسفر قابل جذب	g/kg	۷/۲	۱۲	۴۳	۲۵
سطح ویژه	m ² g ⁻¹	۲۶۶	۲۷۷	-	-
خاکستر	%	۱	۱	-	-

BC-H₃PO₄-RP: بیوچار غنی شده با اسید فسفریک و خاک فسفات، BC-HCl-RP: بیوچار غنی شده با اسید کلریدریک و خاک فسفات

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در این آزمایش

خاک (soil)	پهش (dS/m)	قابلیت هدایت الکتریکی (cmol+kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی	کربن آلی %	درصد سدیم تبادلی %	نسبت جذب سدیم (meq/l) ^{0.5}	کربنات کلسیم معادل %	درصد شن (%)	درصد سیلت (%)	درصد رس (%)	بر کیلوگرم فسفر اوسن میلی گرم (mg/kg)	فسفر اوسن میلی گرم (mL/100g soil)	رطوبت ظرفیت زراعی
S ₁	۸/۱	۲	۱۹	۰/۱۶	۳	۳/۰۸	۵/۵	۳۶	۳۰	۳۴	۵	۲۸	
S ₂	۷/۶	۱۵	۱۵	۰/۰۹	۹	۶/۷	۹/۵	۳۶	۳۴	۳۰	۷	۲۶	

جدول ۳. مقادیر بیوچار مصرفی بر حسب گرم فسفر در ۱۰۰ گرم خاک

خاک (Soil)	بیوچار ساده (BC)	بیوچار خاک فسفات (BC-RP)	بیوچار غنی شده با اسید کلریدریک و خاک فسفات (BC-HCl-RP)	بیوچار غنی شده با اسید فسفریک و خاک فسفات (BC-H ₃ PO ₄ -RP)	سوپرفسفات تریپل (TSP)	شاهد (Cont)
S ₁	۴/۱	۱/۹	۱/۹	۰/۸۳	۰/۰۷۳	—
S ₂	۳/۳	۱/۵	۱/۵	۰/۷	۰/۰۶	—

معادل ۳۶ میلی گرم فسفر در کیلوگرم خاک اندازه گیری شد. بر این اساس مقدار تیمارها برای هر دو خاک در جدول ۳ آورده شده است.

همدماهای جذب سطحی

برای مطالعه همدماهای جذب فسفر، بعد از ۳۰ روز مقداری از

(Cont) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. برای اعمال تیمارها بر اساس نیاز استاندارد فسفر (SPR)، با استفاده از همدمای لانگمویر مقدار فسفر لازم برای رسیدن به غلظت تعادلی ۰/۳ میلی گرم فسفر بر لیتر به عنوان نیاز استاندارد فسفر تعیین شد (۴۳). بر این اساس SPR برای خاک S₁ معادل ۴۵ و برای خاک S₂

به ترتیب نمایانگر تمایل و شدت جذب معادله هستند.

پارامترهای نیاز استاندارد فسفر (SPR) Standard Phosphorus Requirement، مقدار فسفر جذب شده به وسیله خاک در غلظت تعادلی ۰/۳ میلی گرم فسفر در لیتر محلول خاک از همدماهای لانگمویر و فروندلیچ استخراج شد (۱۶) و برخی شاخص های بافری خاک از قبیل: ظرفیت بافری تعادلی Equilibrium Buffering Capacity (EBC)، با استفاده از معادله فروندلیچ از حاصلضرب K_F در $1/n$ محاسبه شد (۱۶).

$$EBC = K_F * 1/n \quad (4)$$

ظرفیت بافری استاندارد (SBC) Standard Buffering Capacity، شیب همدماهای جذب در غلظت تعادلی ۰/۳ میلی گرم فسفر در لیتر بدست آمد (۱۶).

ظرفیت بافری فسفر Phosphorus Buffering Capacity (PBC)، شیب همدماهای جذب در غلظت تعادلی یک میلی گرم فسفر در لیتر (۲۷) و ظرفیت بافری حداکثر Maximum Buffering Capacity (MBC)، از حاصلضرب شدت و حداکثر مقدار جذب محاسبه شد و عبارت است از بیشترین شیب معادله لانگمویر (۱۶).

$$MBC_L = K_L * q_{max} \quad (5)$$

تجزیه داده ها

تجزیه و تحلیل آماری داده ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد. تجزیه واریانس (ANOVA) برای تعیین اختلاف معنی دار بین تیمارها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. برای رسم نمودارها از برنامه اکسل استفاده شد.

نتایج و بحث

الگوهای پراش پرتو ایکس انواع مختلف بیوچار در شکل ۱ نشان داده شده است. تعدادی ترکیبات معدنی دارای ساختار بلوری شامل MgO ، $CaCO_3$ و KCl در محدوده زاویه ۲۰ برابر با $(37/7)^\circ$ ، $(43/9)^\circ$ و $(64/3)^\circ$ در بیوچار ساده سیب و انگور شناسایی شد. تشکیل این کانی ها می تواند نتیجه واکنش بین CO_2 ، فلزات قلیایی

خاک داخل ظروف برداشته و بعد از هواخشک کردن، ۲/۵ گرم خاک برای آزمایش های جذب از هر نمونه وزن شد.

محلول زمینه مورد استفاده برای خاک S1 با $EC=2dS/m$ ، کلرید کلسیم $(CaCl_2)$ ۰/۰۱ مولار (g ۱/۱۱ کلرید کلسیم در mL ۱۰۰۰ آب مقطر)، و برای خاک S2 با $EC=15dS/m$ ، کلرید کلسیم $(CaCl_2)$ ۰/۰۱ مولار، کلرید سدیم $(NaCl)$ ۰/۰۳ مولار و کلرید منیزیم $(MgCl_2)$ ۰/۰۰۵ مولار انتخاب شد. ۲/۵ گرم خاک به لوله های سانتریفیوژ ۵۰ mL منتقل و مقدار ۲۵ میلی لیتر محلول زمینه مورد نظر هر خاک حاوی سری غلظت های ۰، ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۵ میلی گرم در لیتر از منبع KH_2PO_4 به نمونه خاک ها اضافه شده برای جلوگیری از فعالیت میکروبی، از دو قطره تولوئن استفاده شد. بعد از ۲۴ ساعت و برقراری تعادل، لوله های آزمایش در ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس محتویات لوله ها از کاغذ صافی عبور داده شد و غلظت فسفر در مایع رویی به روش رنگ سنجی (۲۵) در طول موج ۸۸۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین شد. مقدار فسفر جذب شده از اختلاف بین مقدار فسفر اضافه شده و مقدار فسفر تعادلی محاسبه شد:

$$S = \frac{(C_0 - C_e) V}{W} \quad (1)$$

S: مقدار فسفر جذب شده بر حسب mg/Kg ، C_0 : غلظت اولیه فسفر در محلول بر حسب mg/L ، C_e : غلظت تعادلی فسفر بر حسب mg/L ، حجم محلول بر حسب L ، W: جرم خاک بر حسب kg

داده های جذب بر معادلات لانگمویر و فروندلیچ برآزش داده شدند.

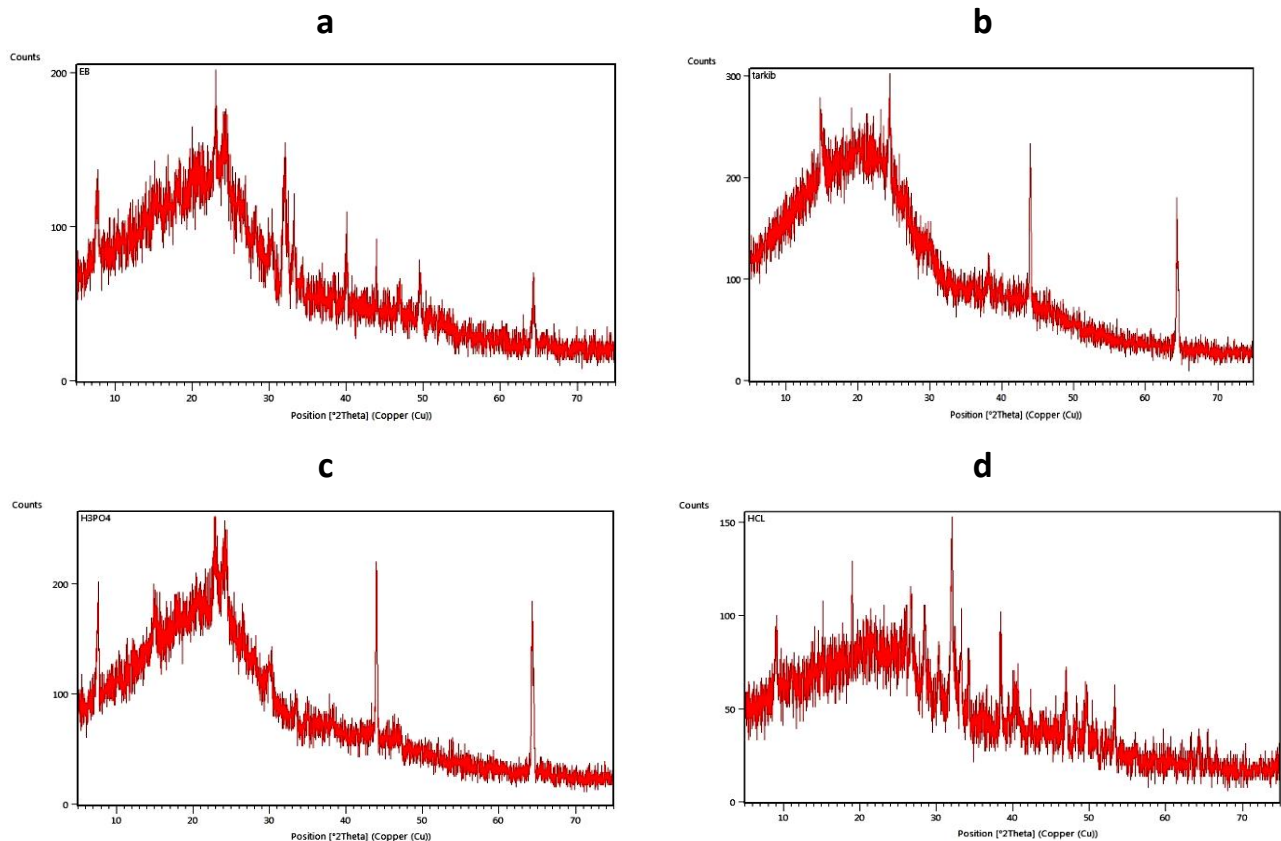
$$Q_e = \frac{(q_m \times K_L \times C_e)}{(1 + K_L \times C_e)} \quad (2)$$

(۲) معادله لانگمویر

$$Q_e = K_f \times C_e^{1/n} \quad (3)$$

(۳) معادله فروندلیچ

که در این معادلات C_e : غلظت فسفر محلول تعادلی (mg/L)، Q_e : مقدار فسفر جذب شده بر واحد وزن خاک (mg/kg)، K_L : ضریب لانگمویر و نشانگر انرژی پیوند، q_{max} : حداکثر جذب تک لایه ای (mg/kg)، K_f و n : ضرایب معادله فروندلیچ که



شکل ۱. الگوی XRD بیوچارهای ساده و اصلاح شده با اسیدهای معدنی (a: بیوچار سیب، b: بیوچار انگور، c: بیوچار اسیدی با H_3PO_4 ، d: بیوچار غنی شده با HCl) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

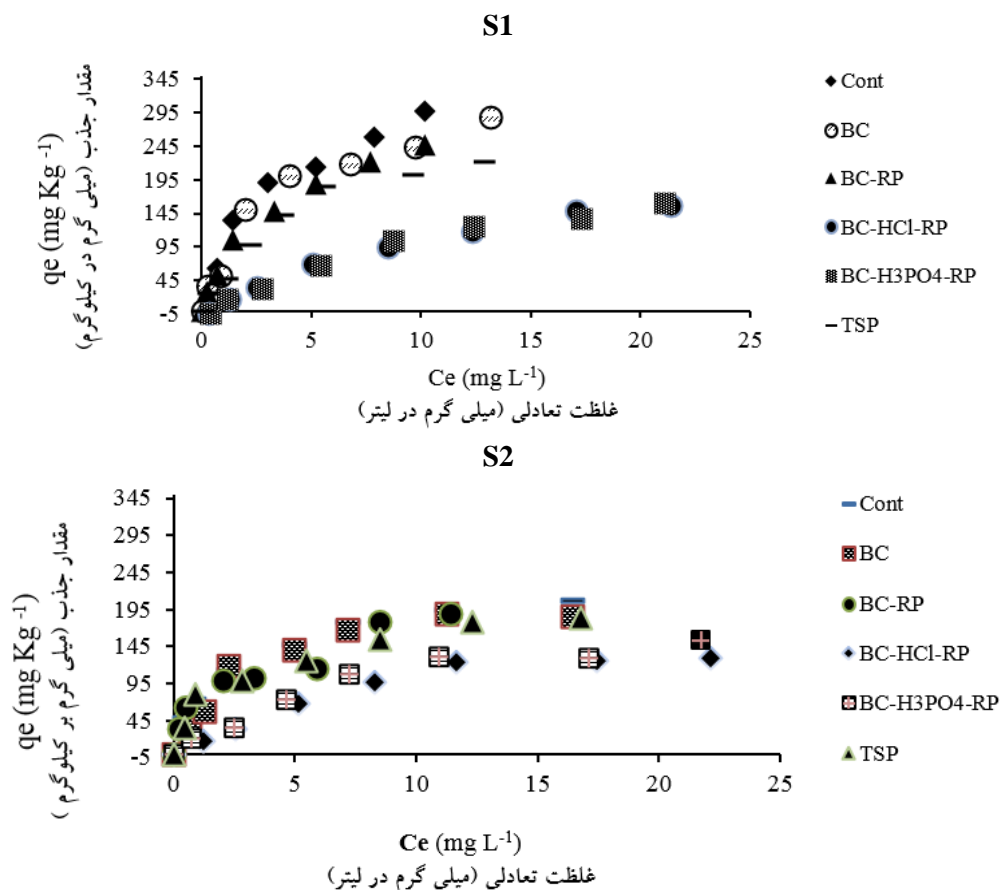
سوپرفسفات و سنگ فسفات این پیک را مشاهده کردند که به متافسفاتها، گروه‌های C-O- PO_3 و گروه‌های C- PO_3 ارتباط دادند (۴۲ و ۲۱).

توصیف رفتار جذب

بر اساس نتایج شکل ۲، ظرفیت جذب فسفر بین دو خاک متفاوت بود. با وجود بالابودن قابلیت هدایت الکتریکی خاک S2 (EC=۱۵) میزان جذب در خاک S1 (EC=۲) بیشتر بود. دلیل این امر بالابودن مقدار کربنات کلسیم معادل و مقدار رس خاک S1 می‌تواند باشد. کربنات‌های کلسیم هم به‌عنوان جاذب فسفر عمل می‌کنند و هم با تأثیر روی خصوصیات خاک مثل pH و غلظت کلسیم و کاهش فعالیت فسفر در اثر واکنش با کلسیم و تشکیل فسفات‌های کلسیم میزان تثبیت و

خاکی و اکسی‌هیدروکسیدهای قلیایی باشد که در طی فرایند پیرولیز تشکیل می‌شوند و افزایش غلظت جرمی آن‌ها منجر به افزایش میل کریستالی بیوچار می‌شود (۱۲). پیک‌های در محدوده زاویه ۲۰ برابر با ۵۰ تا ۷۵ درجه کوارتز و سیلیکات‌های کلسیم، منیزیم و منگنز را به تصویر می‌کشند. پیک‌های به‌دست آمده از آنالیز XRD نشانه‌ای از وجود اجزای معدنی متفرقه در بیوچارها بودند. نتایج ما در توافق با نتایج ساهو همکاران (۳۶) بود.

در بیوچارهای تیمار شده با اسیدهای معدنی HCl و H_3PO_4 و RP پیک‌های جدید در محدوده ۷/۵، ۱۵ و ۲۳ مشاهده شد که به انواع ترکیبات فسفات کلسیم Ca-P مربوط بود. در بیوچار غنی شده با HCl یک پیک جدید در $2\theta=26/6$ مشاهده شد. ژائو و همکاران (۴۵) نیز در بیوچارهای غنی شده با اسید فسفریک و



شکل ۲. تأثیر تیمارهای آزمایش بر مقدار جذب فسفر خاک غیر شور (S1) و خاک شور (S2) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

تأثیر تیمارها در کاهش جذب سطحی فسفر و اهمیت آن‌ها در افزایش فراهمی فسفر است (شکل ۲).

تأثیر بیوچارهای غنی شده بر ضرایب معادلات جذب فسفر معادله جذب لانگمویر

مقدار ضریب تبیین (R^2) معادله لانگمویر در هر دو خاک نشان داد این مدل می‌تواند ارتباط بین مقدار فسفر جذب سطحی شده با غلظت تعادلی فسفر را هم در خاک شاهد و هم در خاک‌های تیمار شده با انواع بیوچار ساده و غنی شده به خوبی توصیف کند (جدول ۴). حداکثر میزان جذب فسفر لانگمویر (q_{max}) برای خاک S1 و S2 به ترتیب بین ۳۲۳/۹-۲۱۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۳۰۷/۰-۱۷۱/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. اختلاف بین حداکثر جذب خاک‌ها، نشان‌دهنده توان متفاوت خاک‌ها در جذب سطحی فسفر است. بنابراین، میزان

جذب سطحی فسفر را افزایش می‌دهند (۲۳ و ۲۵). در همه تیمارها، با افزایش میزان غلظت تعادلی فسفر شیب جذب کاهش یافت دلیل این امر کاهش مکان‌های جذب فسفر بر روی سطوح ذرات خاک است. این روند در هر دو خاک یکسان بود (شکل ۲). به عبارتی در هر دو خاک در غلظت‌های کم، میزان جذب فسفر زیاد بود که می‌تواند بخاطر بالای بودن تعداد مکان‌های جذب و تشکیل کمپلکس‌های دودندانه آنیون فسفات در سطوح جذب پراثری جاذب باشد. در غلظت‌های بالا تشکیل کمپلکس‌های تک‌دندانه قابل تبادل همراه با کمپلکس‌های دودندانه توسط یون‌های فسفات در سطح جاذب ممکن است در مخزن فسفر قابل جذب نقش داشته باشد (۱). در پژوهش حاضر مشاهده شد در اثر اعمال تیمارها به‌ویژه انواع بیوچار غنی شده منحنی جذب فسفر در هر دو خاک بعد از ۳۰ روز انکوباسیون به‌طور معنی‌دار کاهش یافت که بیانگر

جدول ۴. تأثیر تیمارهای آزمایش بر پارامترهای معادله لانگمویر بعد از ۳۰ روز انکوباسیون

S2				S1				تیمارها
SE	qmax mg/kg	R ² %	K _L L/kg	SE	qmax mg/kg	R ² %	K _L L/kg	
۳/۵	۲۴۵b	۰/۹۸	۰/۲۷a	۱/۷۴	۲۸۱b	۰/۹۹	۰/۲۵b	Cont
۱/۸	۲۴۷b	۰/۹۸	۰/۲۴c	۴/۲	۲۸۲b	۰/۹۹	۰/۲۵b	BC
۳/۲	۳۰۷a	۰/۹۹	۰/۲۷a	۳/۷	۳۲۴a	۰/۹۹	۰/۲۸b	BC-RP
۳/۴	۱۹۲d	۰/۹۷	۰/۱۱e	۲/۵۵	۲۱۷d	۰/۹۸	۰/۸۵۰d	BC-HCl-RP
۳/۴	۱۷۲e	۰/۹۶	۰/۱۵d	۲/۴۶	۲۴۱c	۰/۹۸	۰/۰۶۶e	BC-H ₃ PO ₄ -RP
۲/۲	۲۲۷c	۰/۹۹	۰/۲۵b	۴/۲	۲۸۹b	۰/۹۸	۰/۲۴c	TSP
	۵/۷		۰/۰۱۲		۹		۰/۰۰۸	LSD
	۳		۲/۲		۲/۲		۲	CV

K_L: ضریب لانگمویر نشانگر انرژی پیوند، q_{max}: حداکثر میزان جذب بصورت تک‌لایه، حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار به روش آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪.

معادله جذب فروندلیچ

ضریب تبیین (R²) معادله نشان داد این معادله به خوبی رفتار جذب فسفر در هر دو خاک را توصیف می‌کند (جدول ۵). ظرفیت جذب فروندلیچ (K_F) معیاری از تعداد مکان‌های جذب در خاک است. میزان آن در هر دو خاک در اثر اعمال انواع بیوپچار غنی‌شده (BC-HCl-RP و BC-H₃PO₄-RP) به‌طور معنی‌دار کاهش یافت (جدول ۵). بین خاک‌ها از نظر میزان K_F نیز اختلاف معنی‌دار (P<0.05) وجود داشت. به‌طور متوسط خاک S1 ظرفیت جذب فسفر بیشتری (۷۷/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) نسبت به خاک S2 (۷۲/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) داشت. حداکثر جذب سطحی فسفر لانگمویر و ظرفیت جذب فروندلیچ به‌عنوان شاخص‌های کمیت جذب فسفر محسوب می‌شوند از این‌رو کاهش این پارامترها بیانگر کاهش تثبیت و اشغال مکان‌های جذب فسفر است (۸). ضریب K_F با جذب گیاه و آلودگی محیط در ارتباط است. کاهش این ضریب نشان می‌دهد که بخش عمده فسفر موجود در سیستم در فاز

فسفر به کار برده شده برای افزایش و نگهداری غلظت فسفر در سطح مشخص، با توجه به متفاوت بودن حداکثر جذب فسفر خاک‌ها، متفاوت است. بیشترین مقدار q_{max} در خاک S1 و S2 به‌ترتیب در تیمار BC-RP، کمترین مقدار آن در تیمارهای BC-HCl-RP و BC-H₃PO₄-RP به‌دست آمد (جدول ۴). کاهش معنی‌دار q_{max} هر دو خاک در اثر اعمال بیوپچارهای غنی‌شده می‌تواند بیانگر اشغال مکان‌های تثبیت‌کننده فسفر و افزایش فراهمی فسفر باشد. ثابت انرژی پیوند لانگمویر (K_L) که نشان‌دهنده قدرت نگهداری فسفر توسط ذرات خاک است، به‌ترتیب برای خاک S1 در دامنه ۰/۲۸-۰/۰۶۶ و برای خاک S2 در دامنه ۰/۲۷-۰/۱۱ لیتر بر کیلوگرم بود. به‌طوری‌که حداکثر مقدار آن برای هر دو خاک در شاهد و حداقل مقدار آن برای خاک S1 در تیمار BC-H₃PO₄-RP و برای خاک S2 در تیمار BC-HCl-PR مشاهده شد (جدول ۴). کاهش K_L در اثر انواع بیوپچار غنی‌شده بیانگر این است که یون‌های فسفر با قدرت کمتری (نیروهای الکترواستاتیکی) جذب خاک شده و فراهمی فسفر افزایش می‌یابد.

جدول ۵. تأثیر تیمارهای آزمایش بر پارامترهای معادله فروندلیچ بعد از ۳۰ روز انکوباسیون

S2				S1				تیمارها
SE	1/n	R ² %	K _f L/kg	SE	1/n	R ² %	K _f L/kg	
۹/۴	۰/۵b	۰/۹۴	۵۶/۴b	۵/۴	۰/۵۱e	۰/۹۷	۶۶/۲B	Cont
۸/۲	۰/۴۶g	۰/۹۳	۵۵/۳b	۵/۳	۰/۵۱e	۰/۹۷	۶۲/۸b	BC
۳/۳	۰/۴۹e	۰/۹۹	۷۷/۷ a	۳/۹	۰/۵۱e	۰/۹۸	۷۷/۸a	BC-RP
۵/۶	۰/۵۳a	۰/۹۴	۲۸c	۴/۸	۰/۶۱b	۰/۹۵	۲۲/۵g	BC-HCl-RP
۶/۵	۰/۴۸f	۰/۹۲	۲۸/۲c	۴/۲	۰/۶۶a	۰/۹۶	۱۹/۹h	BC-H ₃ PO ₄ -RP
۴/۳	۰/۴۵h	۰/۹۸	۵۵/۸c	۸/۱	۰/۵۱e	۰/۹۵	۶۳/۲b	TSP
	۰/۱۲		۲/۴	۰/۰۹			۰/۷	LSD
	۲/۲		۲/۱	۲/۲			۲/۱	CV

K_f: ضریب معادله فروندلیچ بیانگر تمایل جذب، n بیانگر شدت جذب، حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار به روش آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪.

۱۳). در حالی که مهادی و همکاران (۲۶) مقادیر ۰/۳۱ و ۰/۴۵، و اوزان و شاو (۳۲) مقدار ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر را به‌عنوان غلظت مناسب فسفر به‌منظور رشد بهینه گیاه گندم تعیین کردند. در پژوهش حاضر نیز غلظت ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان غلظت مناسب فسفر در محلول خاک در نظر گرفته شد، و محاسبه شاخص SPR (نیاز استاندارد فسفر) بر پایه آن و با استفاده از معادلات لانگمویر و فروندلیچ صورت گرفت (جدول ۶ و ۷). نیاز استاندارد فسفر نشانگر مقدار فسفری است که باید به‌وسیله یک خاک جذب شود تا غلظت ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر را در محلول خود ایجاد کند. SPR به‌عنوان پتانسیل جذبی فسفر محسوب می‌شود که می‌تواند فسفر مورد نیاز گیاهان را تأمین کند (۳۰). در پژوهش حاضر بین دو خاک مورد استفاده، از نظر میزان SPR اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. SPR خاک کنترل S1 و S2 بر اساس معادله لانگمویر به‌ترتیب در محدوده ۳۶/۹-۴۶/۷ و ۳۷/۷-۴۶/۷ و بر اساس معادله فروندلیچ در محدوده ۳۶/۹ و ۲۰/۸ برآورد شد. در هر دو مدل SPR خاک S2 کمتر از خاک S1 بود. در اثر اعمال تیمارها نیاز استاندارد فسفر خاک‌ها بطور معنی‌دار کاهش یافت. به‌طوری که در اثر اعمال تیمارهای BC-HCl-RP و BC-H₃PO₄-RP نیاز

محلول بوده و قابل دسترس برای جذب گیاه است؛ افزایش این ضریب نشان‌دهنده کاهش تحرک و جذب سطحی بیشتر فسفر در خاک است (۳۹). ضریب 1/n معادله فروندلیچ بین صفر تا ۱ متغیر است و به‌عنوان معیار سنجش شدت جذب سطحی و غیرهمگنی سطح است. با افزایش شدت غیرهمگنی این مقدار به عدد صفر نزدیک می‌شود (۱۷). ضریب 1/n خاک‌ها بین ۰/۰-۶۶/۴۵ متغیر بود. در خاک S1، تیمارهای BC-HCl-RP و BC-H₃PO₄-RP ضریب 1/n را بطور معنی‌دار افزایش دادند ولی در خاک S2 تأثیر تیمارها بر مقدار 1/n روند ثابتی نداشت. سپهر و موسوی (۳۸) در بررسی تأثیر اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های جذب فسفر در خاک آهکی گزارش کردند اسید آلی بر ضریب شدت جذب (1/n) تأثیر نداشت.

تأثیر بیوچارهای غنی شده بر نیاز استاندارد فسفر

از مهمترین کاربرد همدماه‌های جذب برآورد نیاز کودی خاک‌ها است (۸). گیاهان از لحاظ نیاز به غلظت فسفر در محلول خاک برای رسیدن به حداکثر رشد متفاوت هستند. غلظت ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر به وسیله برخی پژوهشگران به‌عنوان میزان فسفر لازم برای حداکثر رشد گیاه پیشنهاد شده است (۳۵) و

جدول ۶. تأثیر تیمارهای آزمایش بر شاخص‌های فسفوری و نیاز استاندارد فسفر در خاک S1

SPR _F	SPR _L	PBC _F	PBC _L	SBC _F	SBC _L	EBC	MBC	تیمارهای آزمایش
mgP/kg soil		ml P/g soil						
۳۶/۹	۴۶/۷	۳۷/۱	۴۵/۲	۵۷/۴	۶۱/۲	۳۱/۷	۷۰/۸	Cont
۳۷/۲	۴۶/۷	۳۷/۱	۴۵/۱	۵۷/۵	۶۱/۰	۳۱/۷	۷۰/۵	BC
۴۵	۵۰/۵	۳۹/۸	۵۵/۹	۷۱/۶	۷۸/۵	۳۹/۸	۹۲/۵	BC-RP
۱۳/۷	۲۳/۴	۱۳/۸	۱۵/۷	۲۲/۱	۱۷/۶	۱۳/۸	۲۸/۵	BC-HCl-RP
۱۳/۱	۲۱/۷	۱۳/۱	۱۴/۲	۱۹/۸	۱۵/۵	۱۳/۱	۲۶/۲	BC-H ₃ PO ₄ -RP
۳۶/۸	۴۵/۸	۳۲/۸	۴۵/۲	۵۸/۶	۵۹/۱	۳۲/۸	۷۱/۲	TSP
۴	۳/۳	۱/۳۶	۲/۴	۰/۸۴	۱/۲	۰/۵۶	۱/۳۵	LSD
۱/۲	۲/۲	۲	۲/۱	۲/۲	۳	۲/۲	۲/۱	CV(%)

MBC: حداکثر ظرفیت بافری، EBC: ظرفیت بافری تعادلی، SBC_L و SBC_F: به ترتیب ظرفیت بافری استاندارد محاسبه شده با معادله لانگمویر و فروندلیچ، PBC_L و PBC_F: ظرفیت بافری فسفر محاسبه شده با معادله لانگمویر و فروندلیچ

جدول ۷. تأثیر تیمارهای آزمایش بر شاخص‌های فسفوری و نیاز استاندارد فسفر در خاک S2

SPR _F	SPR _L	PBC _F	PBC _L	SBC _F	SBC _L	EBC	MBC	تیمارهای آزمایش
mgP/kg soil		ml P/g soil						
۲۰/۸	۳۷/۷	۲۹/۳	۴۱/۵	۵۳/۴	۵۷/۶	۲۹/۳	۶۲/۵	Cont
۲۱/۵	۳۶/۷	۲۶/۷	۳۸/۷	۵۱/۳	۵۱/۸	۲۶/۷	۵۵/۶	BC
۳۱/۶	۴۲/۸	۳۶/۳	۵۱/۲	۶۷/۴	۷۰/۵	۳۶/۳	۷۷/۲	BC-RP
۹/۹	۱۶/۳	۱۴/۸	۱۷/۴	۶۲/۷	۲۰/۲	۱۴/۸	۲۱/۵	BC-HCl-RP
۱۰/۷	۱۷/۲	۱۶/۵	۲۱/۴	۳۱/۸	۲۶/۲	۱۶/۵	۲۸/۸	BC-H ₃ PO ₄ -RP
۳۲/۷	۱۵/۷	۲۴/۸	۳۶/۲	۴۸/۴	۴۹/۲	۲۴/۸	۵۶/۷	TSP
۱۱	۶/۵	۰/۷۶	۲/۴	۱/۱	۱/۶	۵/۸	۰/۷۴	LSD
۱/۲	۲/۲	۲	۲/۱	۲/۲	۳	۲/۲	۲/۱	CV

MBC: حداکثر ظرفیت بافری، EBC: ظرفیت بافری تعادلی، SBC_L و SBC_F: به ترتیب ظرفیت بافری استاندارد محاسبه شده با معادله لانگمویر و فروندلیچ، PBC_L و PBC_F: ظرفیت بافری فسفر محاسبه شده با معادله لانگمویر و فروندلیچ

دیگر، خاک‌های با درصد رس و CCE بیشتر، به منظور نگهداری غلظت فسفر در محلول در یک حد مطلوب برای تغذیه گیاه، نیاز به افزودن فسفر بیشتری به‌ازای واحد وزن خاک دارند. چنین خاک‌هایی دارای توانایی جذب فسفر زیاد بوده و حداکثر جذب و انرژی پیوند بیشتری نیز دارند.

استاندارد فسفر خاک S1 به ترتیب به ۲۳/۴ و ۲۱/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و SPR خاک S2 به ترتیب به ۱۶/۳ و ۱۷/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک کاهش یافت (جدول ۶ و ۷). پژوهشگران عنوان کردند مقدار شاخص SPR به شدت تحت تأثیر میزان رس، آهک و ظرفیت بافری خاک است. به سخن

یک محدوده محاسبه شد (جدول‌های ۶ و ۷). شاخص ظرفیت بافری تعادلی (EBC) یکی دیگر از شاخص‌هایی است که برای بیان ظرفیت بافری فسفر خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق نتایج در اثر اعمال بیوچارهای غنی شده EBC هر دو خاک به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. به‌نظر می‌رسد بالابودن درصد رس، کربنات کلسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی سبب افزایش جذب سطحی فسفر و افزایش این شاخص بافری در خاک S1 شده باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد در غلظت‌های مختلف فسفر، جذب فسفر در خاک غیر شور (S1) به‌دلیل بالابودن درصد کربنات کلسیم و pH بیشتر از خاک شور (S2) بود. در هر دو خاک، میزان جذب فسفر در خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای غنی شده به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. بر اساس ضرایب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) دو معادله فروندلیچ، لانگمویر به خوبی ارتباط بین فسفر محلول و فسفر جذب سطحی شده را توصیف کردند. پارامترهای معادلات جذب فسفر لانگمویر (K_L, q_{max}) و فروندلیچ ($1/n, K_F$) در اثر اعمال بیوچارهای غنی شده به‌طور معنی‌دار کاهش یافتند. شاخص‌های بافری و نیاز استاندارد فسفر در خاک‌های تیمار شده با انواع بیوچار نسبت به خاک شاهد روند کاهشی نشان دادند. بنابراین، با توجه به مزیت بالای انواع بیوچارهای غنی شده در افزایش فراهمی فسفر در خاک شور و غیر شور با پوشش دادن یا رقابت بر سر مکان‌های جذب فسفر استفاده از آنها برای افزایش فراهمی فسفر می‌تواند قابل توصیه باشد.

محاسبه شاخص‌های بافری (حداکثر ظرفیت بافری خاک، ظرفیت بافری تعادلی و ظرفیت بافری استاندارد)

با توجه بر نتایج جدول‌های ۶ و ۷، به استثنای تیمار BC-RP، در اثر اعمال تیمارها به‌ویژه بیوچارهای غنی شده ظرفیت بافری فسفر خاک‌ها بطور معنی‌دار کاهش یافت (جدول ۶ و ۷). ظرفیت بافری فسفر بیانگر تغییرات فاکتور کمیّت (فسفر ذخیره شده در خاک) به ازای واحد تغییرات در فاکتور شدت (فعالیت فسفر در فاز محلول) است (۳۵). بنابراین، کاهش این شاخص نشان‌دهنده کاهش مقدار جذب سطحی فسفر است. در اثر اعمال بیوچارهای غنی شده، حداکثر ظرفیت بافری (MBC) خاک‌ها بطور معنی‌دار کاهش یافت به‌طوری که در اثر تیمار BC-H₃PO₄-RP، MBC خاک S1 از ۷۰/۸ به ۲۶/۲ میلی‌لیتر فسفر در گرم خاک و در خاک S2 از ۶۲/۵ به ۲۸/۸ میلی‌لیتر فسفر در گرم خاک کاهش یافت. با کاهش حداکثر ظرفیت بافری در حضور بیوچارهای غنی شده، پایداری فسفر خاک در برابر تغییرات فسفر افزایش می‌یابد. به‌عبارتی، پس از خروج فسفر از فاز محلول جایگزینی فسفر خارج شده و افزایش فسفر در فاز محلول به مقدار اولیه به راحتی انجام می‌گیرد.

شاخص بافری دیگری که در پیش‌بینی قابلیت استفاده فسفر خاک برای گیاه استفاده می‌شود ظرفیت بافری استاندارد (SBC) است. به استثنای تیمارهای BC و BC-RP، سایر تیمارها شیب معادلات لانگمویر و فروندلیچ را به‌طور معنی‌دار کاهش داد. کاهش این پارامتر به معنی کاهش جذب فسفر در نتیجه مسدود شدن مکان‌های جذب در اثر اعمال تیمارها است. ظرفیت بافری استاندارد با استفاده از معادلات لانگمویر و فروندلیچ تقریباً در

منابع مورد استفاده

1. Amer, F., A. A. Mahmoud and V. Sabet. 1985. Zeta potential and surface area of calcium carbonate as related to phosphate sorption. *Soil Science Society of America Journal* 49: 1137-1142.
2. Beckwith, R. S. 1965. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 5: 52-58.
3. Blackwell, P., S. P. Joseph, H. M. Munroe, P. Anawar, R. Storer, J. Gilkes and Z. M. Solaiman. 2015. Influences of biochar and biochar-mineral complex on mycorrhizal colonisation and nutrition of wheat and sorghum. *Pedosphere* 25: 686-695.

4. Borling, K., E. Ottabong and E. Barberis. 2001. Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59: 39-46.
5. Chapman, H. D. 1965. Cation-exchange capacity. PP. 891-901. In: Black, C. A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
6. Chia, C. H., B. Gong, S. D. M. E. Joseph, P. Munroe and A. M. Rich. 2012. Imaging of mineral-enriched biochar by FTIR, Raman and SEM-EDX. *Vibrational Spectroscopy* 62: 248-257.
7. Chia, C. H., B. P. Singh, S. Joseph, E. R. Graber and P. Munroe. 2014. Characterization of an enriched biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 108: 26-34.
8. Chintala, R., T. E. Schumacher, L. M. McDonald, D. E. Clay, D. D. Malo, S. K. Papiernik and J. L. Julson. 2014. Phosphorus Sorption and Availability from Biochars and Soil/Biochar Mixtures. *Clean-Soil, Air, Water* 42: 626-634.
9. Cho-ruk, K. R. and J. Morrison. 2004. Soil phosphorous adsorption and salinity influence. *Malaysian Journal of Soil Science* 8: 1-11.
10. Cordell, D., J. O. Drangert and S. White. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Change Biology Bioenergy* 19: 292-305.
11. Dehghani, W. I. and F. S. Saadat. 2019. Handbook of Use Gypsum to Remediate Sodic Soils, Iran.
12. El-Bassi, L., A. A. Azzaz, S. Jellali, H. Akrouf, E. A. Marks, C. M. Ghimbeu and M. Jeguirim. 2021. Application of olive mill waste-based biochars in agriculture: Impact on soil properties, enzymatic activities and tomato growth. *Science of the Total Environment* 755: 142531.
13. Fox, R. L. and E. J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirement of soils. *Soil Science Society of America Proceeding* 34: 902-907.
14. Gunes, A., A. Inal, M. Alpaslan and I. Cakmak. 2006. Genotypic variation in phosphorus efficiency between wheat cultivars grown under greenhouse and field conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* 52:470-478.
15. Haghseresht, F. and G. Q. Lu. 1998. Adsorption characteristics of phenolic compounds onto coal-reject-derived adsorbents. *Energy and Fuels* 12: 1100-1107.
16. Halford, I. C. R. 1979. Evaluation of Soil Phosphate Buffering Indices. *Australian Journal Soil Research* 17: 495-504.
17. Harmsen, J. 2007. Measuring bioavailability: from a scientific approach to standard methods. *Journal of Environmental Quality* 36: 1420-1428
18. Jalali, M. and S. S. Tabar. 2011. Chemical fractionation of phosphorus in calcareous soils of Hamedan, western Iran under different land use. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174: 523-531.
19. Khorshid, M., A. S. Hosseinpur and S. Oustan. 1387. Impacts of sewage sludge on phosphorus sorption characteristics and availability in some calcareous soils. *Journal of Science and Technology Agriculture and Natural Resources* 7: 791-802.
20. Kim, K. H., J. Y. T. Kim, S. Cho and W. Choi. 2012. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource Technology* 118: 158-162.
21. Kim, P., D. Hensley and N. Labbe. 2014. Nutrient release from switch grass-derived biochar pellets embedded with fertilizers. *Geoderma* 234: 341-351.
22. Klute, A. 1986. *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin USA.
23. LeCroy, C., C. A. Masiello, J. A. Rudgers, W. C. Hockaday and J. J. Silberg. 2013. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface. *Soil Biology and Biochemistry* 58: 248-254
24. Lin, Y., P. Munroe, S. Joseph, A. Ziolkowski, L. van Zwieten, S. Kimber and J. Rust. 2013. Chemical and structural analysis of enhanced biochars: thermally treated mixtures of biochar, chicken litter, clay and minerals. *Chemosphere* 91: 35-40.
25. Mahmoud, M., I. Lamyaa, A. El-Rahman and A. Khader. 2016. Effects of biochar and phosphorus fertilizers on phosphorus fractions, wheat yield and microbial biomass carbon in Vertic Torrifluvents. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50: 362-372.
26. Mehadi, A. A., R. W. Taylor and J. W. Shuford. 1990. Prediction of fertilizer phosphate requirement using the Langmuir adsorption maximum. *Plant and Soil* 122: 267-270.
27. Murphy, I. C. R. and J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27: 31-143.
28. Nelson, D. W. and L. Sommers. 1983. Total carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 539-579. In: Black, C. A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
29. Nelson, R. E. 1982. Carbonate and gypsum. In: Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

30. Olsen, S. R. and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403-429. In: Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Agronomy No. 9, Part 2, 2nd ed., American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
31. Ozanne, P. G and T. C. Shaw. 1967. Phosphate sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. *Australian Journal of Agricultural Research* 18: 601-612.
32. Ozanne, P. G. and T. C. Shaw. 1968. Advantages of the recently developed phosphate sorption test over the older extractant methods for soil phosphate. In: *Proceeding of 9th International Congress of Soil Science Adelaide, Australia*.
33. Rajkovich, S., A. Enders, K. Hanley, C. Hyland, A. R. Zimmerman and J. Lehmann. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* 48: 271-284.
34. Rayment, G. E. and Higginson F. R. 1992. Oxalate extractable Fe and Al. PP. 137-150. In: Rayment, G. E. and F. R. Higginson (Eds.), *Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods*, Kate Press.
35. Rengel, Z. and P. Marschner. 2005. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. *New Phytologist* 168: 305-312.
36. Sahoo, S. S., V. K. Vijay, R. Chandra and H. Kumar. 2021. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology* 3: 100101.
37. Samadi, A. and E. Sepehr. 2013. Use of phosphorus adsorption isotherms for determining fertilizer requirement of wheat. *Journal of Water and Soil Science* 65: 173-184
38. Sepehr, E. and R. Mousavi. 2013. Effect of salicylic acid on phosphorus sorption characteristics in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 44: 281-288.
39. Shaaban, M., L. V. Zwieten, S. Bashir, A. Youna, A. Nunez-Delgado, M. A. Chhajro, K. A. Kubar, U. Ali, M. S. Rana and M. A. Mehmood. 2018. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of Environmental Management* 228: 429-440
40. Sohi, S. P., E. E. Krull, L. Capel and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105: 47-82.
41. Solis, P. and J. Torrent. 1989. Phosphate fractions in calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. *Soil Science Society of America Journal* 53: 462-466.
42. Spokas, K. A., K. B. Cantrell, J. M. Novak, D. W. Archer, J. A. Ippolito, H. P. Collins, A. A. Boateng, I. M. Lima, M. C. Lamb, A. J. McAloon and R. D. Lentz. 2012. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality* 41: 973-989.
43. Xiang, Y., Q. Deng, H. Duan and Y. Guo. 2017. Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy* 9:1563-1572.
44. Yao, F. X., M. C. Arbestain, S. Virgel, F. Blanco and J. Arostegui. 2010. Simulated geochemical weathering of a mineral ash-rich biochar in a modified soxhlet reactor. *Chemosphere* 80: 724-732.
45. Zhao, L., X. Cao, W. Zheng and Y. Kan. 2014. Phosphorus-assisted biomass thermal conversion: reducing carbon loss and improving biochar stability. *PLoS One* 9: 153-173.

Effects of Enriched-Biochar on Phosphorus Adsorption Behavior in Saline and Non-Saline Soils of Lake Urmia Basin

R. Mousavi, M. H. Rasouli-Sadaghiani*, E. Sepehr and M. Barin¹

(Received: April 24-2022 ; Accepted: November 15-2022)

Abstract

can provide useful information about P adsorption and the factors affecting it. A batch experiment was performed with phosphorus concentrations (0 to 35 mg/L) in two soils with different electrical conductivity (EC) (2 and 15 dSm⁻¹) by a variety of biochar treatments including simple apple-grape biochar (BC), rock phosphate- biochar (BC-RP), enriched-biochar (BC-H₃PO₄-RP), enriched-biochar (BC-HCl-RP), triple superphosphate (TSP), and control (Cont). The results indicated that phosphorus sorption capacity varied between the soils. Biochar treatments were effective in reducing the phosphorus adsorption of both soils. Due to BC-H₃PO₄-RP and BC-HCl-RP treatments, the maximum phosphorus adsorption of soils decreased in S1 soil by 14 and 23 % and in S2 soil by 26 and 19%, respectively. Also, the use of these treatments decreased the parameters of Langmuir absorption intensity (K_L) of S1 soil to 0.085 and 0.066, respectively and S2 soil to 0.11 and 0.15, L/mg respectively, and Freundlich absorption capacity (K_F) of S1 soil decreased to 19.2 and 22.5 and S2 soil to 28.2 and 28.1 L/kg, respectively. Enriched biochars significantly reduced the buffering indices of both soils indicating phosphorus adsorption decreased and increased the availability of phosphorus for the plant. The standard phosphorus requirement of S2 soil was lower than S1 soil by both equations. Therefore, enriched biochar can be an effective strategy to increase phosphorus availability and reduce the use of chemical fertilizers in saline and non-saline conditions; however, more field studies are needed for a clear understanding of the potential of P-enriched biochar as a fertilizer alternative.

Keywords: Biochar enrichment, phosphorus deficiency, Agriculture in saline soils

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

*: Corresponding author, Email: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir