

تأثیر کمپوست قارچ مصرفی و بیوجار باگاس نیشکر بر قابلیت استفاده و جزءبندی فسفر معدنی در یک خاک آهکی

ارژنگ فتیحی گردلیدانی^۱، حسین میرسید حسینی^{۲*} و محسن فرحبخش^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۸ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۶/۰۸	مطالعه اتکوباسیون به منظور بررسی اثر کمپوست قارچ مصرفی (SMC) و بیوجار باگاس نیشکر (B) بر فراهمی اجزاء مختلف فسفر معدنی در یک خاک آهکی انجام گرفت. تیمارها شامل B1 و B2 (معادل ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار)، SMC1، SMC2 (معادل ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار) و شاهد (C) بودند. فسفر قابل جذب و محلول در آب، pH و شکل‌های فسفر معدنی شامل دی‌کلسیم فسفات (Ca ₂ -P)، اکتاکلسیم فسفات (Ca ₈ -P)، فسفات آلومینیم (Al-P)، فسفات آهن (Fe-P)، فسفر-محبوس (OC-P) و آپاتیت (Ca ₁₀ -P) در زمان‌های ۱۴، ۶۰ و ۱۲۰ روز اندازه‌گیری و از لحاظ آماری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که فسفر قابل جذب از ۸/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شاهد به ۱۷/۸، ۲۸/۸ و ۱۲/۴ به ترتیب در SMC1، SMC2 و B2 به طور معنی‌داری افزایش یافت ($p < 0.01$) که با گذشت زمان در B2 روند افزایشی بود؛ ولی در SMC2 بیشترین مقدار در زمان ۶۰ روز مشاهده شد. فسفر محلول در آب نیز از ۲/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شاهد به ۲/۸ و ۲/۷ به ترتیب در SMC2 و B2 افزایش معنی‌داری نشان داد و با گذشت زمان در SMC2 روند افزایشی بود. تیمار SMC2 به طور معنی‌داری pH خاک را از ۷/۲ در شاهد به ۷/۱ کاهش داد. با گذشت زمان pH در همه تیمارها افزایش نشان داد. با گذشت زمان، SMC1 و SMC2 شکل Ca ₂ -P را در مقایسه با شاهد به طور معنی‌داری افزایش دادند. همچنین، شکل‌های Ca ₈ -P و Al-P از ۱۵۸ و ۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شاهد به ترتیب به ۱۸۶ و ۳۵ در SMC2 افزایش یافت ($p < 0.01$). این نتایج بر اثر گذاری بیشتر SMC در تغییرات فسفر معدنی در مقایسه با بیوجار تأکید دارد؛ اگرچه مصرف بیوجار در سطوح بالا نیز مثبت بود.
کلمات کلیدی: کمپوست قارچ مصرفی، بیوجار باگاس، فسفر قابل جذب، شکل‌های فسفر معدنی	
* عهده دار مکاتبات Email: mirseyed@ut.ac.ir	

مقدمه

کمبود فسفر یکی از مشکلات عمده خاک‌های آهکی می‌باشد. طبق آمار موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، بیش از ۷۰ درصد از کل خاک‌های ایران از نظر فسفر قابل جذب زیر سطح بحرانی (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) قرار دارند (۵۰). نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد کاربرد مواد آلی در خاک می‌تواند حلالیت فسفر را افزایش دهد (۲، ۴۲ و ۴۵). سه مکانیسم برای توضیح تاثیر ماده آلی محلول و اسیدهای آلی بر افزایش قابلیت جذب فسفر پیشنهاد شده است (۲۲). اول، مولکول‌های آلی ممکن است به طور خاص جذب مواد معدنی خاک شوند و با فسفر برای مکان‌های جذب رقابت کنند. دوم، ماده آلی محلول ممکن است با آلومینیم (Al) و یا آهن (Fe) پیوند سطحی شده کمپلکس آلی-فلزی محلول تشکیل دهد و با کاهش فعالیت آهن و آلومینیم در محلول موجب انحلال ترکیبات دیگر آهن و آلومینیم، از جمله ترکیبات حاوی فسفر می‌گردد. در مکانیزم سوم، ماده آلی ممکن است روی مکان‌های جذب غیر اختصاصی کلوئیدها جذب شود، که بار منفی سطح ذرات را افزایش می‌دهد. این عمل جاذبه الکترواستاتیکی فسفر به خاک را کاهش و فسفوری بیشتری را در محلول حفظ می‌کند. بیوجار یک ترکیب کربنی آلی عمدتاً پایدار و مقاوم است که از حرارت دادن زیست توده^۱ معمولاً در دماهای بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس تحت اکسیژن کم (ترجیحاً نبود اکسیژن) تولید می‌شود. درجه حرارت، مدت زمان نگهداری و نرخ حرارت دادن به طور مستقیم ویژگی‌های شیمیایی بیوجار را تحت تاثیر قرار می‌دهند (۲۹). تحقیقات نشان داده است که بیوجار با بهبود نگهداشت آب خاک و راندمان استفاده از مواد مغذی از طریق تغییر خواص شیمیایی، زیستی و فیزیکی خاک سبب افزایش توان باروری و حاصلخیزی خاک می‌شود (۱۴). بیوجار می‌تواند ظرفیت تبادل یونی بالایی داشته باشد و ممکن است فراهمی فسفر را با ایجاد ظرفیت تبادل آنیونی و

با تاثیر بر فعالیت کاتیون‌هایی مثل Al^{3+} ، Fe^{3+} و Ca^{2+} که با فسفر برهمکنش دارند، تغییر دهد (۲۹). محل‌های تبدلی مثبت برای جذب فسفر از محلول با اسیدهای آلومینیم و آهن (به عنوان مثال گیسایت و گوتایت) رقابت می‌کنند، شبیه به آنچه که برای اسیدهای هیومیک و فولویک مشاهده شده است (۲۰). برخی محققان با کاربرد بیوجار، افزایش در pH خاک را گزارش کردند (۲۸ و ۴۱). بنابراین افزودن بیوجار به خاک‌های آهکی می‌تواند سبب افزایش pH خاک شود و از این نظر ممکن است تاثیر منفی بر فراهمی فسفر داشته باشد، ولی همیشه افزودن بیوجار به خاک سبب افزایش pH نمی‌شود. به عنوان مثال، مشاهده شده است که کاربرد بیوجار چوب کاج با $pH=7/5$ اثر کاهشی روی pH خاک با pH اولیه ۶/۴ داشته است (۱۶). در تحقیقی دیگر با کاربرد بیوجار در خاک آهکی تغییر معنی داری در pH خاک مشاهده نشد (۳۰). بنا به گزارش‌های موجود افزودن بیوجار به خاک‌ها سبب افزایش زیست فراهمی فسفر شده است. سوژانا^۲ و همکاران (۴۸) با کاربرد بیوجار کود مرغی و بیوجار پوسته برنج گزارش کردند که فسفر قابل جذب افزایش معنی‌دار پیدا کرد. ژای^۳ و همکاران (۵۳) نیز با بررسی اثر کاربرد سطوح مختلف بیوجار بقایای ذرت بر فراهمی فسفر در دو خاک اسیدی و قلیایی مشاهده کردند که فسفر اولسن افزایش یافت. هر چند افزودن بیوجار همیشه فراهمی فسفر خاک را افزایش نمی‌دهد. در یک آزمایش ستون خاک، کاربرد بیوجار به طور قابل توجهی فسفر نگهداشته شده در خاک اسیدی را به دلیل افزایش ظرفیت تبادل آنیونی، افزایش و مقادیر فسفر زه آب را کاهش داد (۳۷). اثرات کوتاه مدت افزودن بیوجار به خاک‌های مختلف با توجه سطح فسفر موجود در آنها می‌تواند متفاوت باشد، هر چند این اثرات قابل پیش بینی نیستند (۵۳).

کمپوست قارچ مصرفی (SMC^۴) باقی‌مانده بسترهایی است که برای کشت قارچ استفاده می‌شود. کمپوست قارچ

2- Sujana et al.

3- Zhai et al.

4- Spent Mushroom Compost

1- Feedstock

خاص تغییر شکل می‌دهند (۴۶). برای تشخیص میزان تحرک فسفر، علاوه بر اندازه‌گیری غلظت کل، میزان توزیع آن‌ها در بین اجزا مختلف نیز حائز اهمیت است. آگاهی از تغییر شکل‌های فسفر برای درک شیمی فسفر در خاک‌ها ضروری است. بنابراین روش جزءبندی فسفر در خاک‌ها کمک می‌کند تا مقدار فسفر قابل دسترس و سایر اجزاء اصلی آن در خاک و همچنین سرنوشت عرضه آن از طریق کود یا بازیافت از بقایای محصول را مشخص کند. این اطلاعات به طور بالقوه برای پیش‌بینی تغییر شکل فسفر بین شکل‌های شیمیایی، در خاک‌های کشاورزی با ارزش هستند. هدف از این مطالعه ارزیابی اثرات سطوح مختلف کاربرد کمپوست قارچ مصرفی و بیوجار باگاس نیشکر به عنوان محصولات جانبی و تا حدی زائد بخش کشاورزی بر اجزاء مختلف فسفر معدنی در یک نمونه خاک آهکی منطقه کرج (استان البرز) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه در این تحقیق از عمق ۳۰-۰ سانتیمتری مزرعه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با ارتفاع ۱۲۹۶ متر از سطح دریا و طول جغرافیایی (۵۷° ۵۷' E) و عرض جغرافیایی (۳۵° ۴۷' N) جمع آوری شد. پس از انتقال نمونه خاک به آزمایشگاه، در معرض هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۷)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (۳۹)، فسفر محلول در آب و فسفر کل به روش هضم با اسید نیتریک و پرکلریک (۲۶)، کربن آلی به روش والکلی و بلک (۳۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جایگزینی با استات آمونیوم (۷)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH در عصاره ۱:۱ خاک به ترتیب با هدایت سنج الکتریکی و pH متر (۴۴) کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (۳۵)، درصد رطوبت ظرفیت مزرعه با دستگاه صفحات فشاری تعیین شد (جدول ۱). کمپوست قارچ مصرفی تازه از واحد تولید قارچ ملارد تهیه و سپس هوا خشک و جهت یک-

مصرفی محصول جانبی صنعت قارچ است که پس از برداشت تمام محصول قارچ و تغییرات مختلف بر بستر باقی‌مانده (۱۵)، می‌تواند به عنوان یک ماده آلی اصلاح کننده به کار گرفته شود. کمپوست قارچ مصرفی تازه به طور معمول حاوی حدود ۵٪ درصد نیتروژن، ۵٪ درصد فسفر، ۵٪ درصد پتاسیم، ۶-۴ درصد کلسیم و ۱۸ درصد ماده آلی می‌باشد؛ در نتیجه اغلب به عنوان یک کود استفاده می‌شود (۸). اثر بخشی SMC به عنوان یک اصلاح کننده آلی توسط ریباس^۱ و همکاران (۴۳) مثبت ارزیابی شده است. گزارش شده است که مواد آلی کمپوست شده سبب کاهش تثبیت فسفر توسط خاک شده‌اند. به عنوان مثال، بوچانان و گلیسمن^۲ (۶) گزارش دادند که مواد کمپوست شده (کمپوست قارچ مصرفی، مواد بستر، کود اسیبی و بقایای یونجه) تثبیت فسفر در خاک را در مقایسه با کود معدنی کاهش دادند. به طور مشابه، اوگارد^۳ (۳۸) اثر کود گاوی تازه و کمپوست شده را بر حفظ فسفر در خاک مورد مطالعه قرار داد و دریافت که هر دو تثبیت فسفر را در مقایسه با فسفات معدنی کاهش دادند. جیوسکوانی^۴ و همکاران (۱۸) نیز گزارش کردند که افزودن کمپوست زباله شهری (MC^۵) حلالیت فسفر خاک را افزایش داد.

توزیع شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های مختلف بسته به خصوصیات آنها متفاوت است. مقدار نسبی شکل‌های فسفر در هر خاک بسته به میزان هوادیدگی، pH، مقدار ماده آلی و نوع مواد مادری متفاوت است (۳). شکل‌های فسفر در خاک مقدار فسفر قابل جذب برای گیاهان و پتانسیل آزاد شدن این عنصر به محلول خاک و آب‌های سطحی را تعیین می‌کنند. اجزا مختلف فسفر به طور قابل ملاحظه ای از نظر میزان تحرک، قابلیت دسترسی زیستی و رفتارهای شیمیایی در خاک تفاوت داشته و تحت شرایط

- 1- Ribas *et al.*
- 2- Buchanan and Gliessman
- 3- Ogaard
- 4- Giusquiani *et al.*
- 5- Municipal Compost

مورفی و رایلی (۳۳) تعیین گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS، مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در یک سطح احتمال یک درصد انجام گردید و برای رسم نمودارها از برنامه Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. براساس نتایج ارائه شده بافت خاک لومی و مقدار کربن آلی خاک زیر یک درصد بود. همانطور که مشاهده می شود، خاک مورد مطالعه دارای مقادیر قابل توجهی از فسفر کل می باشد؛ ولی به دلیل pH بالا، آهک زیاد و پایین بودن مقدار ماده آلی در این خاک، فسفر قابل جذب آن زیر سطح بحرانی قرار دارد، بنابراین به احتمال زیاد رشد اکثر گیاهان در این خاک با کمبود فسفر مواجه خواهد بود. در جدول ۲ برخی خصوصیات SMC و بیوچار باگاس نیشکر ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می شود این دو ترکیب آلی از نظر ویژگی‌های شیمیایی متفاوت می باشند. SMC دارای pH اسیدی ولی بیوچار دارای pH قلیایی است. در SMC میانگین مقدار فسفر کل، فسفر قابل جذب و فسفر محلول در آب چندین برابر مقادیر آن‌ها در بیوچار می باشد. همچنین SMC دارای شوری زیاد ولی شوری بیوچار تقریباً ناچیز است.

اثر SMC و بیوچار بر فسفر قابل جذب خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان می دهد که اثرات اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل تیمار در زمان بر فسفر قابل جذب معنی دار ($p < 0.01$) بود. مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار در زمان بر فسفر قابل جذب خاک در زمان‌های مختلف با آزمون LSD نشان می دهد (شکل ۱) که تیمار SMC2 در هر سه زمان، نسبت به شاهد و سایر تیمارها افزایش معنی داری در فسفر قابل جذب خاک را نشان داد که در زمان ۶۰ روز بیشترین مقدار فسفر قابل جذب در آن مشاهده شد. این می تواند به فعالیت میکروبی بالاتر خاک بعد از کاربرد کمپوست و به دنبال آن، آزادسازی فسفر در طی تجزیه ماده آلی مرتبط باشد (۲۲). در تحقیق حاضر مشاهده شد که در این تیمار فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در مقایسه با شاهد و همچنین سایر تیمارها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته

نواخت کردن ذرات آسیاب گردید. باگاس نیشکر نیز از شرکت کشت و صنعت نیشکر دعبیل خزایی خوزستان تهیه شد. با توجه به عدم دسترسی به کوره مناسب تولید بیوچار در گروه، برای تولید بیوچار ابتدا مواد اولیه باگاس نیشکر در داخل قوطی‌های فلزی قرار داده شد؛ سپس برای این که اکسیژن موجود در ظرف تا حد امکان حذف شود، یک شمع روشن را روی مواد اولیه درون قوطی قرار دادیم پس از آن، درب ظرف را بسته و برای اطمینان از عدم ورود هوا با گل دور تا دور درب ظرف پوشیده شد، سپس درون کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس برای مدت ۳ ساعت حرارت داده شدند. بعد از آن بیوچار تولید شده از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. pH و قابلیت هدایت الکتریکی SMC و بیوچار در عصاره ۱:۱۰ (۱۰ و ۲۵)، فسفر محلول در آب (۳۲ و ۴۰) و فسفر قابل جذب به روش اولسن (۲۵) و فسفر کل به روش هضم خشک در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد (۹ و ۲۴) (جدول ۲). این پژوهش با ۵ تیمار در ۳ دوره زمانی (۱۴، ۶۰ و ۱۲۰ روز) در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار به انجام رسید. تیمارها شامل بیوچار به مقدار ۱۵ تن در هکتار (B1) و ۳۰ تن در هکتار (B2)، کمپوست قارچ به مقدار ۲۰ تن در هکتار (SMC1) و ۴۰ تن در هکتار (SMC2) و تیمار شاهد (C) بودند. به منظور انجام آزمایش، ۳۰۰ گرم خاک هوا خشک توزین و پس از اعمال تیمارهای مختلف درون گلدان ریخته شد. گلدان‌ها در شرایط دما (۲۹ درجه سلسیوس) و تهویه مناسب در داخل انکوباتور نگهداری شدند. در طول دوره آزمایش رطوبت گلدان‌ها در دامنه ۷۰-۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه به روش وزنی حفظ گردید. در فواصل زمانی، ۱۴، ۶۰ و ۱۲۰ روز از خاک گلدان‌ها نمونه برداری شد (از طریق حذف گلدان‌ها). نمونه‌های خاک هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند، سپس ویژگی‌هایی مانند؛ pH فسفر قابل جذب و فسفر محلول در آب در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد. شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌ها به روش عصاره‌گیری متوالی جیانگ و گو^۱ (۲۳) استخراج شدند (جدول ۳). غلظت فسفر در همه عصاره‌ها به روش رنگ سنجی

جدول (۱) برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده
Table (1) Some physical and chemical properties of used soil

مقدار (Value)	ویژگی (واحد) (Properties) (unit)	مقدار (Value)	ویژگی (واحد) (Properties) (unit)
0.8	کربن آلی (درصد) (Organic carbon) (%)	0.514	EC (dS m ⁻¹)
7.85	کربنات کلسیم معادل (درصد) (Calcium carbonate equivalent) (%)	7.08	pH
38	شن (درصد) (Sand) (%)	8.13	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم) (Available phosphorus) (mg kg ⁻¹)
35	سیلت (درصد) (Silt) (%)	2.5	فسفر محلول در آب (میلی گرم بر کیلوگرم) (Water Soluble phosphorus) (mg kg ⁻¹)
27	رس (درصد) (Clay) (%)	1010	فسفر کل (میلی گرم بر کیلوگرم) (Total phosphorus) (mg kg ⁻¹)
		21.55	رطوبت ظرفیت مزرعه (درصد) (Field capacity) (%)

جدول (۲) برخی از ویژگی‌های SMC و بیوچار
Table (2) Some properties of SMC and Biochar

مقدار Value		ویژگی (واحد) (Properties) (unit)
بیوچار (Biochar)	SMC	
0.008	12.62	EC (dS m ⁻¹)
8.79	6.66	pH
28.6	83.3	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم) (Available phosphorus) (mg kg ⁻¹)
3.6	21.4	فسفر محلول در آب (میلی گرم بر کیلوگرم) (Water Soluble phosphorus) (mg kg ⁻¹)
667.8	5466	فسفر کل (میلی گرم بر کیلوگرم) (Total phosphorus) (mg kg ⁻¹)

که بعد از ۱۲۰ روز افزایش قابل توجهی در فسفر قابل جذب مشاهده شد (شکل ۱). افزودن مواد کمپوست شده منجر به تحریک باکتری‌های مسئول معدنی کردن فسفر آلی و باکترهای حل کننده فسفر معدنی و افزودن بیوچار سبب تحریک قارچ‌های میکوریزی، که به شدت برای چرخه عناصر غذایی بویژه فسفر مهم هستند، می‌شود (۲۷). علاوه بر افزایش فعالیت بیولوژیکی، مواد آلی و مشتقات آن همچنین می‌توانند با آلومینیم و آهن فعال کمپلکس تشکیل دهند و منجر به کاهش تثبیت فسفر توسط خاک گردند (۲۲). در این

بود (داده‌ها ارائه نشده است). میانگین مقدار فسفر قابل جذب در کمپوست قارچ نسبت به بیوچار بیشتر است (جدول ۲) که می‌تواند با تفاوت معنی‌دار ($p < 0.01$) مشاهده شده بین تیمار SMC1 و SMC2 با B1 و B2 مرتبط باشد. در تحقیقی (۱۳) با کاربرد کمپوست و کود گاوی در دو سال متوالی افزایش معنی‌دار در فسفر قابل جذب گزارش شد.

در مقابل در تیمارهای B1 و B2، اندازه‌گیری مقدار فسفر قابل جذب در زمان‌های ۱۴ و ۶۰ روز بعد از انکوباسیون تفاوت معنی‌داری ($p < 0.01$) در مقایسه با شاهد نشان نداد؛ در حالی

فتحی گردلیدانی و همکاران: تاثیر کمپوست قارچ مصرفی و بیوجار...

محلول در آب معنی دار ($p < 0.01$) است. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار در زمان در شکل ۲ ارائه شده است.

رابطه، جیوسکوانی و همکاران (۱۸) نشان دادند که افزودن کمپوست زباله شهری می تواند آلومینیم و آهن را کمپلکس کند و در نتیجه فراهمی فسفر را افزایش دهد.

اثر SMC و بیوجار بر فسفر محلول در آب خاک
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان می دهد که اثرات اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل تیمار در زمان بر فسفر

جدول (۳) خلاصه عصاره گیری متوالی شکل های معدنی فسفر به روش جیانگ و گو (۲۳)

Table (3) Summary of the sequential extraction of mineral forms of phosphorus by Jiang and Gu (23)

غلظت (Concentration)	عصاره گیر (Extractant)	مدت تکان دادن (Time of shaking) (h)	علامت (Symbol)	شکل معدنی فسفر (Inorganic phosphorus form)
0.25 M	NaHCO ₃ و pH=7.5	1	Ca ₂ -P	دی کلسیم فسفات
0.5 M	NH ₄ AC و pH=4.2	1	Ca ₈ -P	اکتا کلسیم فسفات
0.5 M	NH ₄ F و pH=8.2	1	Al-P	فسفات آلومینیم
0.1-0.1 N	NaOH + Na ₂ CO ₃	2-2	Fe-P	فسفات آهن
0.3-1 M	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O – Na ₂ S ₂ O ₄ – NaHCO ₃	-	OC-P	فسفر محبوس
0.25 M	H ₂ SO ₄	1	Ca ₁₀ -P	آپاتیت

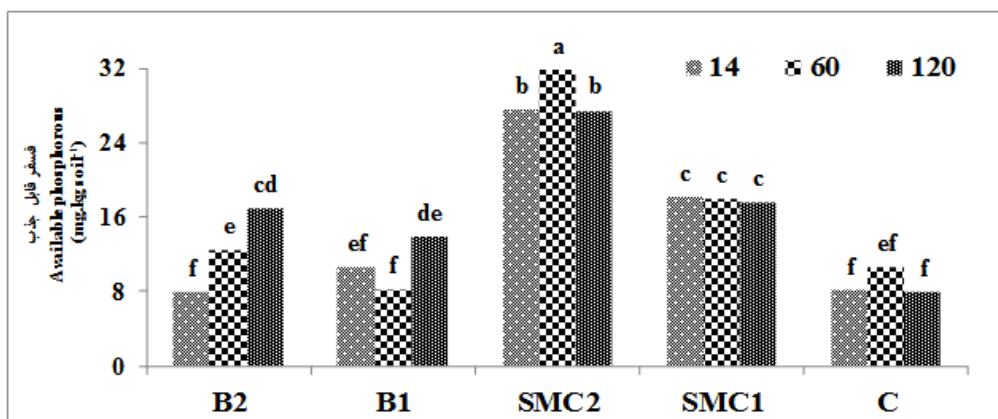
جدول (۴) تجزیه واریانس اثر تیمارها بر فسفر قابل جذب، فسفر محلول در آب و pH در زمان های مختلف

Table (4) Analysis of variance of the effect of treatments on available phosphorus, water soluble phosphorus, and pH at different times

میانگین مربعات (Mean square)			درجه آزادی (df)	منابع تغییرات (S.O.V.)
pH	فسفر محلول در آب (Water soluble phosphorus)	فسفر قابل جذب (available phosphorus)		
0.141 **	0.9599 **	585.3 **	4	تیمار (Treatment)
2.704 **	0.8998 **	20.9 **	2	زمان (Time)
0.037 **	1.2249 **	22 **	8	تیمار در زمان (Treatment× Time)
0.010	0.1019	2.6	30	اشتباه (Residual)
1.36	13.04	10.34	-	ضریب تغییرات (%) (C.V.)

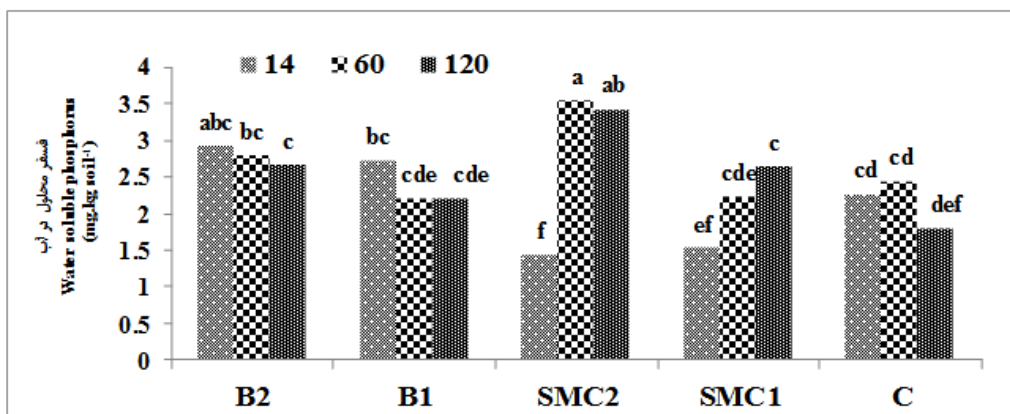
ns و ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** non-significant, significant at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively



شکل (۱) اثر متقابل تیمار در زمان بر فسفر قابل جذب خاک در طول دوره اتکوباسیون. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0.01$) می‌باشد. B1 و B2 (به ترتیب ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوجار)، SMC1 و SMC2 (به ترتیب ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار کمپوست) و C (شاهد).

Figure (1) Interaction between treatment and time on available phosphorus during the incubation period. Similar letter indicate statistically nonsignificant difference ($p < 0.01$). B1 and B2 (15 and 20 tons of biochar per hectare respectively), SMC1 and SMC2 (20 and 40 tons of compost per hectare respectively) and C (control).



شکل (۲) اثر متقابل تیمار در زمان بر فسفر محلول در آب خاک در طول دوره اتکوباسیون. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0.01$) می‌باشد. B1 و B2 (به ترتیب ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوجار)، SMC1 و SMC2 (به ترتیب ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار کمپوست) و C (شاهد).

Figure (2) Interaction effect of treatment and time on water soluble phosphorus of Soil during the incubation period. Similar letter indicate statistically nonsignificant difference ($p < 0.01$). B1 and B2 (15 and 20 tons of biochar per hectare respectively), SMC1 and SMC2 (20 and 40 tons of compost per hectare respectively) and C (control).

افزودن SMC و به دنبال آن تثبیت میکروبی فسفر می‌باشد که با گذشت زمان دوباره آزاد شده و موجب افزایش سطح آن در زمان‌های ۶۰ و ۱۲۰ روز گردید. در این رابطه مکاگین^۱ و همکاران (۳۱) گزارش دادند که چون

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تیمار SMC1 و SMC2 پس از ۱۴ روز آنکوباسیون فسفر محلول در آب در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌داری مشاهده شد ($p < 0.01$)؛ ولی بعد از ۶۰ روز در تیمار SMC2 و پس از ۱۲۰ روز در هر دو تیمار افزایش قابل توجه مشاهده گردید. این امر احتمالاً به سبب افزایش فعالیت میکروبی ناشی از

1- McLaughlin et al.

۱۴ و ۱۲۰ روز بعد از شروع انکوباسیون pH تیمارها در مقایسه با شاهد تفاوت معنی داری نشان نداد؛ در حالی که در ۶۰ روز پس از انکوباسیون تاثیر تیمارها بر pH خاک متفاوت بود، هر دو سطح SMC در مقایسه با شاهد به طور معنی داری pH خاک را کاهش دادند ($p < 0.01$)، که دلیل آن یکی pH اسیدی کمپوست قارچ مورد استفاده و دیگری احتمالاً تحریک فعالیت میکروارگانیسمها و به دنبال آن افزایش تولید CO₂ و کاهش pH می باشد. در مقابل B1 بعد از ۶۰ روز انکوباسیون سبب افزایش pH خاک شد ($p < 0.01$). در تایید این نتیجه بانیک و دی^۳ (۴) گزارش کردند که کمپوست حاصل از ضایعات بستر قارچ باعث افزایش اسیدیته خاکهای آهکی شده است؛ از سوی دیگر، بسیاری از محققان نیز با کاربرد بیوجار در خاک افزایش در pH خاک را گزارش کردند (۴۱). افزایش قابل توجه در pH بعد از کاربرد بیوجار ممکن است به معدنی شدن کربن و تولید آنیون OH⁻ از طریق تبادل لیگاندی و تولید میزان زیادی کاتیونهای بازی همانند کلسیم و منیزیم مرتبط باشد (۲۲).

اثر SMC و بیوجار بر دی کلسیم فسفات (Ca₂-P)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) نشان می دهد که اثرات اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل تیمار در زمان بر شکل Ca₂-P معنی دار ($p < 0.01$) است. مقایسه میانگینها در زمانهای مختلف (شکل ۴) نشان می دهد تیمار SMC1 و SMC2 پس از ۱۴ روز انکوباسیون به ترتیب سبب افزایش معنی دار شکل Ca₂-P از ۵/۷۹ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۰/۷۷ و ۱۴/۸۴ میلی گرم بر کیلوگرم شده اند. مقادیر Ca₂-P اندازه گیری شده در تیمارهای SMC پس از ۱۲۰ روز به طور قابل ملاحظه ای نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. در خاکهای آهکی شکل Ca₂-P در بین شکل های فسفر بعد از منوکلسیم فسفات، دارای بیشترین حلالیت می باشد

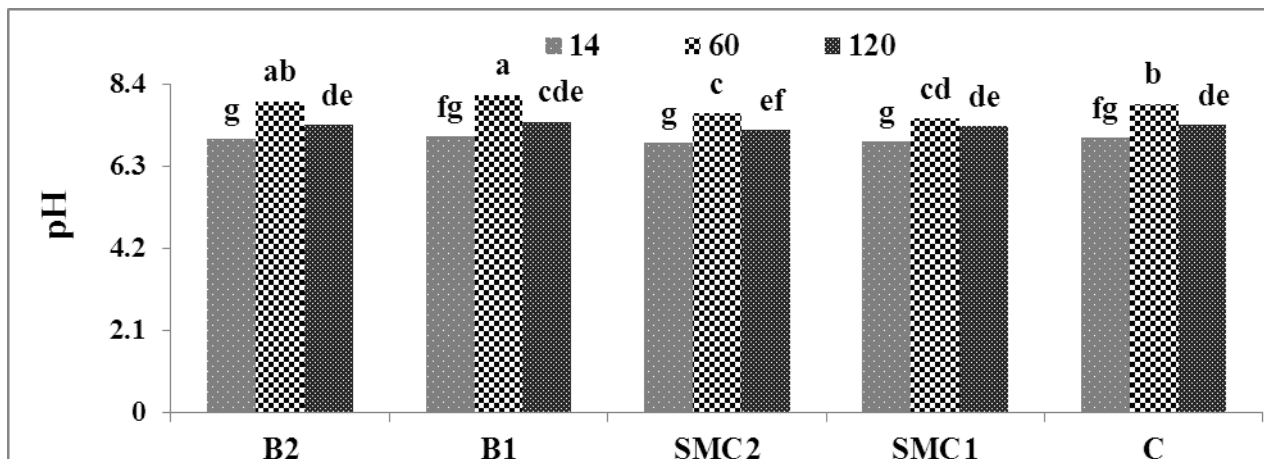
مواد آلی سبب افزایش فعالیت میکروبی می شوند، لذا این احتمال وجود دارد که فسفر آزاد شده به صورت بیولوژیکی تثبیت گردد. در تیمار B2، ۱۲۰ روز بعد از انکوباسیون، فسفر محلول افزایش معنی داری در مقایسه با شاهد نشان داد. در طی فرایند تولید بیوجار بخشی از زیست توده تبدیل به خاکستر می شود که حاوی نمک های محلول از جمله نمک های فسفر می باشد که اضافه شدن آنها همراه بیوجار به خاک احتمالاً سبب افزایش فسفر محلول در آب می گردد. اریش^۱ و همکاران (۱۲) با کاربرد کمپوست و کود گاوی در دو سال متوالی با اندازه گیری فسفر محلول در آب برای فواصل زمانی مختلف مشاهده کردند که در بعضی از زمانها تفاوت تیمارها در مقایسه با شاهد معنی دار و در بعضی زمانها غیر معنی دار بود.

اثر SMC و بیوجار بر pH خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان می دهد که اثرات اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل تیمار در زمان بر pH خاک در طول دوره انکوباسیون معنی دار است ($p < 0.01$). اثر متقابل تیمار در زمان بر pH خاک در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که pH همه تیمارها در زمان اول (۱۴ روز بعد از اعمال تیمارها) کمترین مقدار بود، و بعد از ۲ ماه انکوباسیون به بالاترین مقدار افزایش یافت و در نهایت بعد از ۴ ماه روند کاهشی نشان داد. این تغییرات ممکن است به علت تغییر در فعالیت میکروارگانیسمهای خاک اتفاق افتاده باشد. به طور مشابه یو^۲ و همکاران (۵۲) با کاربرد کمپوست کود مرغی و کود آلی تجاری در سه خاک با مواد مادری مختلف و اندازه گیری pH خاک در فواصل زمانی ۳۰ و ۶۰ روز پس از انکوباسیون مشاهده کردند که pH همه تیمارها در هر سه خاک در ۶۰ روز نسبت به زمان ۳۰ روز به طور معنی داری افزایش یافته بود و این افزایش برای خاکهای با pH بالاتر، شدیدتر بود. در

1- Erich *et al.*

2- Yu *et al.*



شکل (۳) اثر متقابل تیمار در زمان بر pH خاک در طول دوره انکوباسیون. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری ($p < 0.01$) می باشد. B1 و B2 (به ترتیب ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوجار)، SMC1 و SMC2 (به ترتیب ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار کمپوست) و C (شاهد).

Figure (3) Interaction effect of treatment and time on soil pH during the incubation period. Similar letter indicate statistically nonsignificant difference ($p < 0.01$). B1 and B2 (15 and 20 tons of biochar per hectare respectively), SMC1 and SMC2 (20 and 40 tons of compost per hectare respectively) and C (control).

شکل های معدنی فسفر در چند خاک آهکی بیان داشتند که با افزایش کاربرد کمپوست زباله شهری مقدار فسفات کلسیم افزایش معنی داری نشان داد.

اثر SMC و بیوجار بر اکتا کلسیم فسفات (Ca₈-P)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) گویای آن است که اثرات اصلی تیمار و زمان بر شکل Ca₈-P معنی دار است ($p < 0.01$). مقایسه میانگین های اثر اصلی تیمارها نشان می دهد (شکل ۵) که در بین تیمارها، تنها SMC2 در طول ۱۲۰ روز انکوباسیون خاک شکل Ca₈-P را از ۱۵۸/۴ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۸۶/۲ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش داده است ($p < 0.01$). کمپوست قارچ مصرفی حاوی بیش از ۰/۵ درصد فسفر می باشد که با اضافه شدن به خاک سبب افزایش فسفر محلول و به دنبال آن افزایش در شکل های نامحلول

و پس از اضافه شدن فسفر به خاک بخشی از آن در ابتدا به شکل Ca₂-P رسوب می کند. در SMC مقدار میانگین فسفر کل و فسفر قابل جذب در مقایسه با بیوجار به طور قابل ملاحظه ای بالاتر می باشد (جدول ۲) که در طول دوره انکوباسیون از طریق تجزیه شیمیایی و میکروبی به شکل محلول آزاد و بعد از آن بواسطه تعادلی که بین فاز محلول و شکل های نامحلول فسفر برقرار است، به Ca₂-P تبدیل شده است. در حضور ماده آلی بیشتر در خاک، تبدیل فسفر قابل استفاده به ترکیبات با حلالیت و قابلیت استفاده کمتر، به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. کول^۱ (۱۱) گزارش کرد که حضور ماده آلی فعالیت دی کلسیم فسفات که اولین و سریع ترین محصول تشکیل شده در خاک های آهکی می باشد را افزایش می دهد؛ به طور مشابه حسین پور^۲ و همکاران (۱۹) با بررسی اثر کمپوست زباله شهری بر فراهمی و

1- Cole

2- Hosseinpur *et al.*

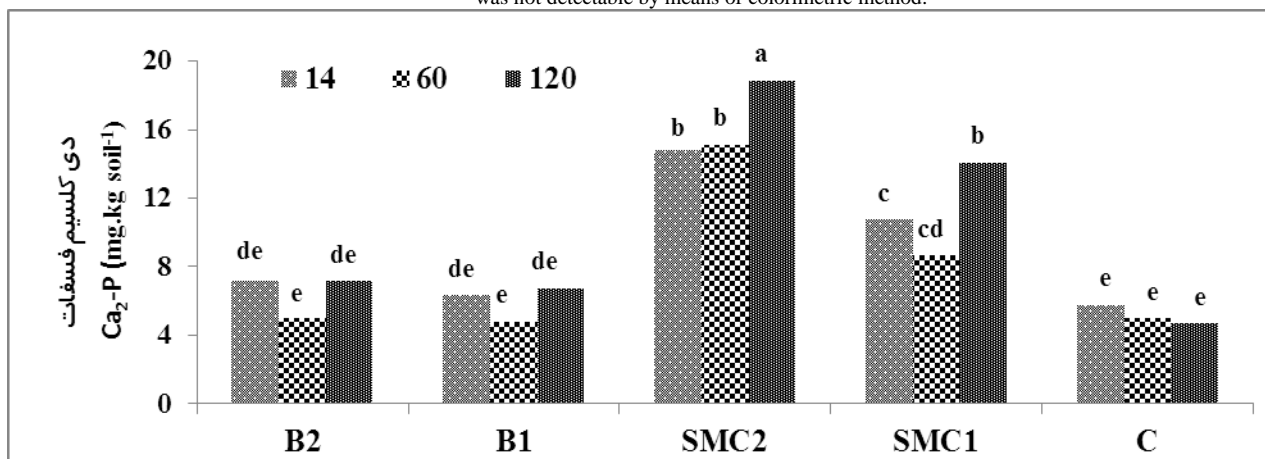
جدول (۵) تجزیه واریانس اثر تیمارها بر شکل‌های فسفر معدنی در زمان‌های مختلف

Table (5) Analysis of variance of the effect of treatments on inorganic phosphorus forms at different times

میانگین مربعات ^Δ (Mean square)					درجه آزادی (df.)	منابع تغییرات (S.O.V.)
آپاتیت (Ca ₁₀ -P)	فسفات آهن (Fe-P)	فسفات آلومینیم (Al-P)	اکتا کلسیم فسفات (Ca ₈ -P)	دی کلسیم فسفات (Ca ₂ -P)		
524.8 ns	1.079 ns	85.93 **	1827.2 **	197.8 **	4	تیمار (Treatment)
602.1 ns	1.504 ns	47.3 ns	4122.1 **	18.7 **	2	زمان (Time)
262.2 ns	0.485 ns	26 ns	234.1 ns	3.9 **	8	تیمار در زمان (Treatment× Time)
234.9	0.540	16.4	334.5	1.3	30	اشتباه (Residual)
2.77	9.73	12.38	11.25	12.84	-	ضریب تغییرات (%) (C.V.)

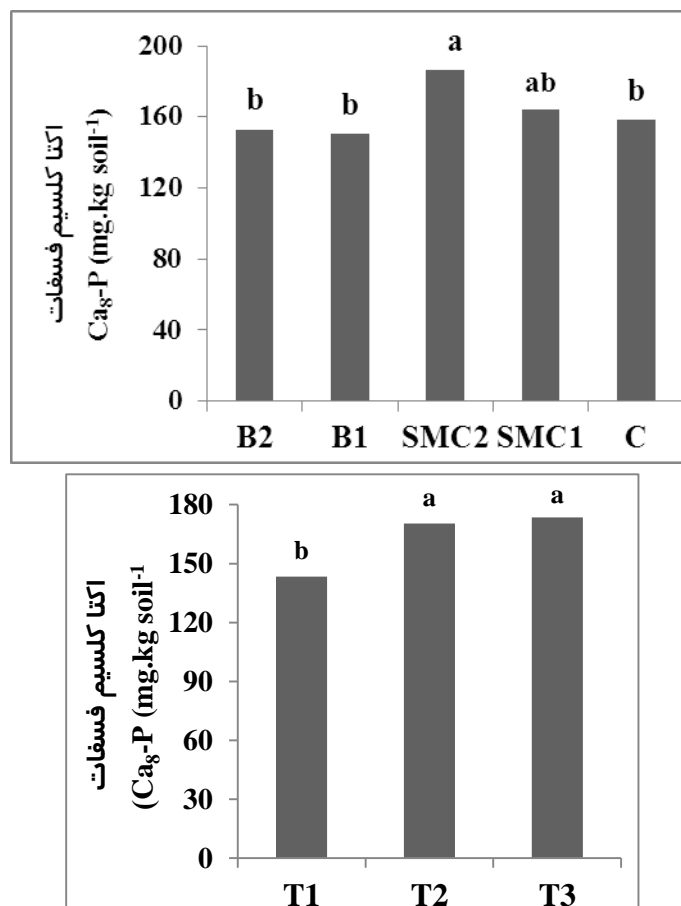
ns, * and ** non-significant, significant at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. Δ : occluded phosphorus in iron and aluminum oxides در خاک ناچیز و به روش رنگ سنجی قابل اندازه گیری نبود.

ns, * and ** non-significant, significant at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. Δ : occluded phosphorus in iron and aluminum oxides was not detectable by means of colorimetric method.



شکل (۴) اثر متقابل تیمار در زمان بر شکل Ca₂-P در طول دوره انکوباسیون. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری ($p < 0.01$) می باشد. B1 و B2 (به ترتیب ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوجار)، SMC1 و SMC2 (به ترتیب ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار کمپوست) و C (شاهد).

Figure (4) Interaction effect of treatment and time on Ca₂-P fraction during the incubation period. Similar letter indicate statistically nonsignificant difference ($p < 0.01$). B1 and B2 (15 and 20 tons of biochar per hectare respectively), SMC1 and SMC2 (20 and 40 tons of compost per hectare respectively) and C (control).



شکل (۵) اثر اصلی تیمار و زمان بر شکل Ca_8-P در طول دوره انکوباسیون. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری می باشد. $p < 0.01$) B2 و B1 (به ترتیب ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوجار)، SMC2 و SMC1 (به ترتیب ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار کمپوست) و C (شاهد).

Figure (5) Main effect of treatment and time on Ca_8-P fraction during the incubation period. Similar letter indicate statistically nonsignificant difference ($p < 0.01$). B1 and B2 (15 and 20 tons of biochar per hectare respectively), SMC1 and SMC2 (20 and 40 tons of compost per hectare respectively) and C (control).

روز در تیمار SMC2 افزایش قابل توجهی مشاهده گردید. در تیمار B1 و B2 با توجه این که شکل Ca_2-P در طول انکوباسیون تفاوت معنی دار با شاهد نداشت (شکل ۴)، بنابراین انتظار می رفت که شکل Ca_8-P نیز تغییر قابل توجهی نداشته باشد. در برخی مطالعات (۱۹) با کاربرد کمپوست در خاک های آهکی افزایش در فسفات های کلسیم گزارش شد و در مقابل در بعضی دیگر (۱) با کاربرد مواد آلی تغییری در فسفات های کلسیم مشاهده نشد. فارل^۲ و همکاران (۱۴) نیز با بررسی

موجود در خاک می شود. اکتا کلسیم فسفات بعد از آپاتیت فراوان ترین شکل فسفر در اکثر خاک های آهکی می باشد. تالیبودین^۱ و همکاران (۴۹) روند واکنش های تبدیل مونوکلسیم فسفات را در خاک های آهکی طی زمان به ترتیب از مونوکلسیم فسفات به دی کلسیم فسفات و به اکتاکلسیم فسفات و در نهایت هیدروکسی آپاتیت ذکر کرده اند. در این مطالعه تا ۶۰ روز پس از شروع انکوباسیون شکل Ca_8-P تغییر معنی داری در هیچ یک از تیمارها نشان نداد؛ ولی با گذشت زمان و پس از ۱۲۰

2- Farrell *et al.*

1- Talibudeen *et al.*

کردند، در مقابل ابوالفضلی و همکاران (۱) با کاربرد کمپوست زباله شهری و کود حیوانی تفاوت معنی داری در فسفات آلومینیم مشاهده نکردند.

اثر SMC و بیوچار بر فسفات آهن (Fe-P)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) اثر اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل تیمار در زمان بر شکل Fe-P غیر معنی دار است. نتایج این مطالعه و گزارش‌های موجود (۳۴) حاکی از آن است که مقدار فسفات آهن در خاک‌های آهکی بسیار کم می‌باشد. از طرفی حلالیت آن از فسفات آلومینیم کمتر است؛ بنابراین یکی از دلایل معنی دار نشدن این شکل احتمالاً ناکافی بودن زمان برای تبدیل اشکال با حلالیت بالاتر مانند فسفات آلومینیم به شکل Fe-P می‌باشد. نجفی و توفیقی (۳۴) نیز در بررسی اثر ریزوسفر برنج بر شکل‌های فسفر معدنی گزارش کردند که در خاک‌های آهکی اثر ریزوسفر بر فسفات آهن معنی دار نبوده است و معنی دار نشدن را با مقدار بسیار کم این شکل و عدم دقت کافی در اندازه‌گیری آن مرتبط دانستند. از طرف دیگر مواد آلی با کلات کردن اکسیدهای آهن بر جذب فسفر تاثیر می‌گذارند و تشکیل اکسیدهای آهن در حضور اسیدهای آلی خاص متوقف می‌شود (۵).

اثر SMC و بیوچار بر آپاتیت (Ca₁₀-P)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) اثر اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل تیمار در زمان بر شکل Ca₁₀-P غیر معنی دار است. مقدار میانگین آپاتیت اندازه‌گیری شده در سه زمان در خاک مورد مطالعه برای تیمارهای مختلف بیوچار و کمپوست قارچ تغییراتی داشت؛ ولی بین آن‌ها با شاهد تفاوت معنی داری وجود نداشت.

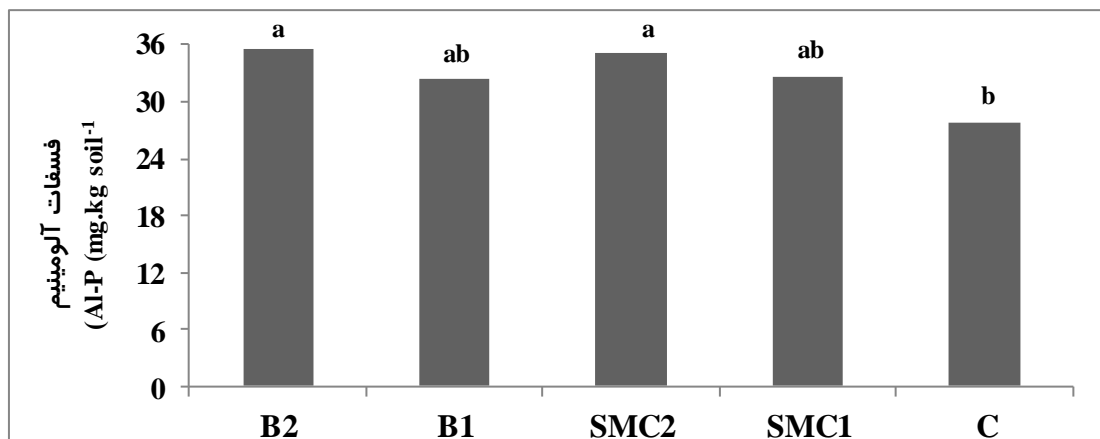
هیدروکسی آپاتیت پایدارترین فاز رسوب یافته در خاک‌های آهکی می‌باشد. تبدیل فسفات افزوده شده به شکل‌های مقاوم مثل آپاتیت فرآیند کندی است و انتظار نمی‌رود که در زمان‌های کوتاه، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته باشد (۴۷). حالت تعادل نسبت به اکتاکلسیم فسفات بین ۴۲ تا ۱۰۵ روز حاصل می‌شود (۴۲) ولی برای

اثر کاربرد سطوح مختلف بیوچار بر جزءبندی فسفر و عملکرد گندم در یک خاک آهکی طی دو سال متوالی مشاهده کردند که در سال اول بالاترین سطح کاربرد بیوچار (۵ تن در هکتار) سبب افزایش معنی‌دار در فسفات‌های کلسیم شد؛ ولی در سال دوم آزمایش فسفات‌های کلسیم در مقایسه با شاهد به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرد.

زمان شکل Ca₈-P را تحت تاثیر قرار داد (شکل ۵). شکل اکتاکلسیم فسفات بین ۴۲ تا ۱۰۵ روز به حالت تعادل می‌رسد (۴۳). با گذشت زمان شکل‌های با حلالیت بیشتر از جمله Ca₂-P به شکل نامحلول Ca₈-P تبدیل شده است، به طوری که در T1 مقدار میانگین شکل Ca₈-P برابر ۱۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در T2 و T3 به ترتیب به ۱۷۴ و ۱۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش معنی دار نشان داد ($p < 0.01$) (شکل ۵).

اثر SMC و بیوچار بر فسفات آلومینیم (Al-P)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) نشان می‌دهد که اثر اصلی تیمار بر شکل Al-P معنی دار است ($p < 0.01$). مقایسه میانگین‌های اثر اصلی تیمارها نشان می‌دهد (شکل ۶) که تیمار SMC2 و B2 در طول ۱۲۰ روز انکوباسیون خاک شکل Al-P را به طور معنی‌داری از ۲۷/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ترتیب به ۳۵/۲ و ۳۵/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش داده‌اند ($p < 0.01$). فسفات آلومینیم بعد از آپاتیت و اکتاکلسیم فسفات در اکثر خاک‌های آهکی فراوان‌ترین شکل فسفر و مقدار آن نیز عمدتاً چندین برابر فسفات آهن می‌باشد. با اضافه شدن فسفر به خاک به واسطه تعادلی که بین این اشکال معدنی فسفر و فاز محلول وجود دارد، بخشی از فسفر به شکل فسفات آلومینیم تبدیل می‌شود. فارل و همکاران (۱۴) نیز با کاربرد بیوچار در خاک آهکی مشاهده کردند که مجموع فسفات آلومینیم و آهن افزایش پیدا کرده است. همچنین، حسین‌پور و همکاران (۱۹) با کاربرد کمپوست زباله شهری در چند خاک آهکی افزایش در فسفات آلومینیم را گزارش



شکل (۶) اثر اصلی تیمارها بر شکل Al-P در طول دوره انکوباسیون. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری ($p < 0.01$) می باشد. B1 و B2 (به ترتیب ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوجار)، SMC1 و SMC2 (به ترتیب ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار کمپوست) و C (شاهد).

Figure (6) Main effect of treatments on Al-P fraction during the incubation period. Similar letter indicate statistically nonsignificant difference ($p < 0.01$). B1 and B2 (15 and 20 tons of biochar per hectare respectively), SMC1 and SMC2 (20 and 40 tons of compost per hectare respectively) and C (control).

انکوباسیون مشاهده گردید؛ ولی در تیمار SMC1 بیشترین مقدار فسفر محلول در آب پس از ۱۲۰ روز مشاهده شد و فسفر قابل جذب با گذشت زمان تفاوت معنی داری نشان نداد. SMC به طور قابل توجهی طی ۱۲۰ روز انکوباسیون خاک شکل های Ca_2-P ، Ca_8-P و Al-P را افزایش داد؛ ولی هیچ یک از سطوح SMC و بیوجار تغییری در مقادیر اندازه گیری شده شکل $Ca_{10}-P$ و Fe-P ایجاد نکرد، که به احتمال زیاد با کند بودن فرآیند تشکیل این دو شکل مرتبط است. نتایج اندازه گیری در زمان های مختلف نیز نشان داد، تیمارهایی که هر دو سطح SMC در آنها اعمال شده بود با گذشت زمان مقدار شکل Ca_2-P در آنها افزایش پیدا کرد. همچنین در تیمار SMC2 با گذشت زمان مقدار شکل Ca_8-P روند افزایشی نشان داد. توزیع شکل های فسفر معدنی در تیمار شاهد به صورت $Al-P < Ca_8-P < Ca_{10}-P$ و در نتیجه اعمال تیمارها برای بیوجار به صورت $Fe-P < Al-P < Ca_8-P < Ca_{10}-P < OC-P$ و برای کمپوست قارچ به صورت $Ca_2-P < OC-P < Fe-P < Al-P < Ca_8-P < Ca_{10}-P$ در پایان دوره انکوباسیون بود که در مورد کمپوست قارچ با توزیع

آپاتیت که حلالیت بسیار کمتری دارد، به زمان بیشتری نیاز است. علاوه بر این مواد آلی و اسیدهای حاصل از تجزیه آن، سطوح کربنات کلسیم را اشغال کرده و از تشکیل رسوب هیدروکسی آپاتیت جلوگیری می کند (۲۱).

نتیجه گیری

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد کمپوست قارچ مصرفی و بیوجار در خاک آهکی مورد استفاده در این آزمایش سبب افزایش قابل توجه در فسفر قابل جذب و فسفر محلول در آب گردید. مکانیسم این اثرات در SMC احتمالاً به علت افزایش فعالیت میکروبی، اضافه شدن فسفر معدنی و آلی همراه آن به خاک و بهبود شرایط فیزیکی در خاک می باشد. بیوجار نیز به احتمال زیاد به واسطه داشتن سطوح باردار از یک طرف با یون های فسفات رقابت می کند و سبب کاهش جذب آنها در خاک می شود و از طرف دیگر با اکسیدهای آهن و آلومینیم تشکیل کمپلکس می دهد و از رسوب فسفر محلول همراه با این اکسیدهای فلزی جلوگیری می کند. در تیمار SMC2 بیشترین مقدار فسفر قابل جذب و فسفر محلول در آب پس از ۶۰ روز

اولیه تا حدود زیادی متفاوت بود. با توجه به اثرات مثبت آزمایش پیشنهاد می‌شود که کاربرد آن مورد توجه SMC در بهبود فراهمی فسفر در خاک آهکی مورد بیشتری قرار گیرد.

منابع

1. Abolfazli, F., Forghani, A., and Norouzi, M. 2012. Effects of phosphorus and organic fertilizers on phosphorus fractions in submerged soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2): 349-362.
2. Adhami, A., and Maftoon, M. 1384. The effect of organic matter on availability and mineral forms of phosphorus at field capacity and flooding conditions. 9th Congress of Soil Science of Iran. 516-517. (In Persian)
3. Al-Abbas, A.H., and Barber, S.A. 1964. A soil test for phosphorus based upon fractionation of soil phosphorus: 1. Correlation of soil phosphorus fractions with plant-available phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 28(2): 218-221.
4. Banik, S., and Dey, B.K. 1982. Available phosphate content of an alluvial soil as influenced by inoculation of some isolated phosphate-solubilizing micro-organisms. *Plant and Soil*, 69(3): 353-364.
5. Borggaard, O.K., Jdrngensen, S.S., Moberg, J.P., and Raben-Lange, B. 1990. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. *Journal of Soil Science*, 41(3): 443-449.
6. Buchanan, M.A., and Gliessman, S.R. 1990. The influence of conventional and compost fertilization on phosphorus use efficiency by broccoli in a phosphorus deficient soil. *American Journal of Alternative Agriculture*, 5(01): 38-46.
7. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. In Black, C.A., Evans, D.D., White, L.J., Ensminger, L.E., and Clark, F.E. (eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp: 891-901.
8. Cebula, J., Pelczar, J., Loska, K., and Widziewicz, K. 2013. The effect of Spent Mushroom Substrate field storage conditions on its leachate composition. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 16(1): 93-102.
9. Ch'ng, H.Y., Ahmed, O.H., and Majid, N.M.A. 2014. Improving phosphorus availability in an acid soil using organic amendments produced from agroindustrial wastes. *The Scientific World Journal*, 2014.
10. Chen, X., Chen, G., Chen, L., Chen, Y., Lehmann, J., McBride, M.B., and Hay, A.G. 2011. Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. *Bioresource Technology*, 102 (19): 8877-8884.

11. Cole, C., and Olsen, S.R. 1959. Phosphorus solubility in calcareous soils: 1. Dicalcium phosphate activities in equilibrium solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 23(2): 116-118.
12. Erich, M.S., Fitzgerald, C.B., and Porter, G.A. 2002. The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88(1): 79-88.
13. Farrell, M., Macdonald, L.M., Butler, G., Chirino-Valle, I., and Condon, L.M. 2014. Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield. *Biology and fertility of soils*, 50(1): 169-178.
14. Farrell, M., Rangott, G., and Krull, E. 2013. Difficulties in using soil-based methods to assess plant availability of potentially toxic elements in biochars and their feedstocks. *Journal of Hazardous Materials*, 250: 29-36.
15. Fasidi, I.O. 1996. Studies on *Volvariella esculenta* (Mass) Singer: cultivation on agricultural wastes and proximate composition of stored mushrooms. *Food Chemistry*, 55(2), 161-163.
16. Gaskin J.W., Speir R.A., Harris K., Das K.C., Lee R.D., Morris L.A., Fisher D.S. 2010. Effect of Peanut Hull and Pine Chip Biochar on Soil Nutrients, Corn Nutrient Status, and Yield. *Agronomy Journal*, 102:623-633. DOI: 10.2134/agronj2009.0083.
17. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle- size analysis. In Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 383-411.
18. Giusquiani, P.L., Marucchini, C., and Businelli, M. 1988. Chemical properties of soils amended with compost of urban waste. *Plant and Soil*, 109(1): 73-78.
19. Hosseinpour, A.R., Kiani, S., and Halvaei, M. 2012. Impact of municipal compost on soil phosphorus availability and mineral phosphorus fractions in some calcareous soils. *Environmental Earth Sciences*, 67(1): 91-96.
20. Hunt, J.F., Ohno, T., He, Z., Honeycutt, C.W., and Dail, D.B. 2007. Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite, and kaolin by fresh and decomposed organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 44(2): 277-288.
21. Inskeep, W.P., and Silvertooth, J.C. 1988. Inhibition of hydroxyapatite precipitation in the presence of fulvic, humic, and tannic acids. *Soil Science Society of America Journal*, 52(4), 941-946.
22. Iyamuremye, F., and Dick, R.P. 1996. Organic amendments and phosphorus sorption. *Advances in Agronomy*, 56: 139-185.
23. Jiang, B.F., and Gu, Y.C. 1989. A suggested fractionation scheme for inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer Research*, 20: 159-165.

24. Jordan, S.N., Mullen, G.J., and Murphy, M.C. 2008. Composition variability of spent mushroom compost in Ireland. *Bioresource Technology*, 99(2): 411-418.
25. Jones, B.E., Haynes, R.J., and Phillips, I.R. 2010. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. *Journal of Environmental Management*, 91(11): 2281-2288.
26. Kuo, S. 1996. Phosphorus. In D. L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. Pp: 869-919.
27. Lambers, H., Raven, J.A., Shaver, G.R., and Smith, S.E. 2008. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology and Evolution*, 23: 95–103.
28. Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., and Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3): 436-442.
29. Lehmann J., Czimnik C., Laird B., and Sohi, S. 2009. *Biochar for environmental management: science and technology*. London: Earthscan, pp: 183-264.
30. Lentz, R.D., and Ippolito, J.A. 2012. Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 1033-1043.
31. McLaughlin, M.J., Alston, A.M., and Martin, J.K. 1988. Phosphorus cycling in wheat pasture rotations. I. The source of phosphorus taken up by wheat. *Soil Research*, 26(2), 323-331.
32. Medina, E., Paredes, C., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., and Moral, R. 2009. Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresource Technology*, 100(18): 4227-4232.
33. Murphy, J., and Riley, H.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36.
34. Najafi, N., and Towfigi, H. 2006. Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorous fractions in the paddy soils of north of Iran: Native soil phosphorus fractions. *Iran Journal of Agricultural Sciences*, 38(1): 919-935. (In Persian)
35. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: Page A.L., Miller R.H., Keeney D.R. (eds), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison. pp. 181–197.
36. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd Edition Agronomy. Monographs. 9*. ASA, Madison, WI. pp: 539-579.

37. Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W., and Niandou, M.A.S. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 174: 105–112.
38. Ogaard, A.F. 1996. Effect of fresh and composted cattle manure on phosphate retention in soil. *Acta Agriculturae Scandinavica B-Plant Soil Sciences*, 46(2), 98-105.
39. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus. In Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and microbiological Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 403-430.
40. Parvage, M.M., Ulén, B., Eriksson, J., Strock, J., and Kirchmann, H. 2013. Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char. *Biology and Fertility of Soils*, 49(2): 245-250.
41. Peng, X., Ye, L.L., Wang, C.H., Zhou, H., and Sun, B. 2011. Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research*, 112(2): 159-166.
42. Pierzynski, G.M., Logan, T.J., and Traina, S.J. 1990. Phosphorus chemistry and mineralogy in excessively fertilized soils: Solubility equilibria. *Soil Science Society of America Journal*, 54(6): 1589-1595.
43. Ribas, L.C.C., Mendonça, M.M., Camelini, C.M., and Soares, C.H.L. 2009. Use of spent mushroom substrates from *Agaricus Subrufescens* (syn. *A. Blazei*, *A. brasiliensis*) and *Lentinula edodes* productions in the enrichment of a soil-based potting media for lettuce (*Lactuca sativa*) cultivation: growth promotion and soil bioremediation. *Bioresource Technology*, 100: 4750–4757.
44. Rhoades, J.D. 1982. Soluble salts. In: Page AL, Miller RH, KeeneyDR (eds) *Methods of soil analysis. part 2, 2nd edn. Chemical and microbiological methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 167–179.
45. Sanyal, S.K., and De Datta, S.K. 1991. Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Advances in Soil Science*, 16: 1–120.
46. Sharpley, A., Foy, B., and Withers, P. 2000. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: an overview. *Journal of Environmental Quality*, 29(1), 1-9.
47. Shelton, J.E., and Coleman, N.T. 1968. Inorganic phosphorus fraction and their relationships to residual value of large application of phosphorus on high phosphorus fixing soil. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 32: 91 -94.
48. Sujana, I.P., Lanya, I., Subadiyasa, I.N.N., and Suarna, I.W. 2014. The effect of dose biochar and organic matters on soil characteristic and corn plants growth on the land degraded by garment liquid waste. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 4(5): 77-88.

49. Talibudeen, O. 1958. Isotopically exchangeable phosphorus in soils. *Journal of Soil Science*, 9(1): 120-129.
50. 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*, 26 (2): 123-144. (In Persian).
51. Tryon, E.H. 1948. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. *Ecological Monographs*, 18(1): 83-113.
52. Yu, W., Ding, X., Xue, S., Li, S., Liao, X., and Wang, R. 2013. Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, (AHEAD). pp: 23-31.
53. Zhai, L., Cai, Z., Liu, J., Wang, H., Ren, T., Gai, X., and Liu, H. 2015. Short-term effects of maize residue biochar on phosphorus availability in two soils with different phosphorus sorption capacities. *Biology and Fertility of Soils*, 51(1): 113-122.