

تأثیر منابع مختلف کودی بر شکل‌های شیمیایی و آلی فسفر در یک خاک آهکی تحت کشت گندم

جعفر شهابی فر^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۹)

چکیده

توزیع فراوانی اجزای مختلف فسفر در خاک‌های آهکی به ارزیابی هر چه بهتر وضعیت فسفر خاک کمک می‌کند. کودهای آلی با اضافه نمودن مواد آلی و فسفر سبب افزایش پویایی فسفر خاک می‌گردند. این پژوهش به منظور تأثیر منابع کودی بر شکل‌های شیمیایی فسفر و با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منابع کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل به همراه تیمار شاهد (بدون مصرف کود) در پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار در یک خاک آهکی و در شرایط گلخانه انجام شد. در زمان انتهای رشد فیزیولوژیکی گیاه، ویژگی‌های وزن خشک شاخسار، غلظت فسفر در برگ گندم، شکل‌های آلی و معدنی فسفر خاک اندازه‌گیری شدند. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع کود گوسفندی، بیشترین میزان جذب فسفر توسط شاخسار گیاهی از تیمار سوپر فسفات تریپل حاصل شد. کلیه شکل‌های آلی فسفر به جز فسفر آلی با پایداری بالا با کاربرد تیمارهای کودی افزایش معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به شاهد داشتند. بیشترین سهم نسبی فسفر آلی، مربوط به فسفر آلی با پایداری متوسط و کمترین آن مربوط به فسفر آلی ناپایدار بود. بیشترین سهم نسبی شکل‌های معدنی فسفر مربوط به آپاتیت بود. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منابع کود گوسفندی و سوپر فسفات تریپل، شکل معدنی کلسیم دی فسفات به ترتیب ۴/۲ و ۳/۹ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. شکل آلومینیوم فسفات با اعمال تیمارهای کودی گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل به ترتیب ۳۱/۰، ۴۴/۰ و ۴۶/۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. با استناد به داده‌های پژوهش، با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع کود گوسفندی شکل‌های آلی فسفر و کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپر فسفات تریپل جذب فسفر و شکل‌های معدنی آن در شرایط کشت گندم افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: سوپر فسفات تریپل، فسفر ناپایدار، کلسیم فسفات، کمپوست، کود گوسفندی

شهابی فر ج. ۱۳۹۹. تأثیر منابع مختلف کودی بر شکل‌های شیمیایی و آلی فسفر در یک خاک آهکی تحت کشت گندم. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۱. صفحه: ۹۲-۱۰۷.

۱- مربی پژوهش بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران

پست الکترونیک: shahabifar1@yahoo.com

مقدمه

فسفر به‌عنوان یک عنصر ضروری در تولید محصولات کشاورزی دارای اهمیت است. فسفر در میان عناصر غذایی بعد از نیتروژن مهم‌ترین عامل محدودکننده تولیدات کشاورزی در بیشتر مناطق جهان و ایران است (Salardini, 2008). فسفر به‌عنوان یک عنصر ساختمانی در ساخت اسیدهای نوکلئیک نقش دارد و این اسیدها ناقل اطلاعات ژنتیکی در گیاه می‌باشند. فسفر عمده‌ترین ماده‌ای است که سبب خاصیت اسیدی اسیدنوکلئیک می‌شود. فسفر در انتقال انرژی در گیاه نقش داشته بنابراین در فعالیت متابولیکی گیاه مؤثر بوده و به‌طور غیرمستقیم بر عملکرد محصولات از این طریق تأثیر می‌گذارد. فسفر به‌صورت ترکیبات آلی فیتات در گیاه ذخیره می‌شود و به همراه سایر عناصر در ساختمان دانه گرده شرکت دارد. این عنصر در تشکیل بذر نقشی اساسی داشته و به مقدار زیاد در بذر یافت می‌شود (Gomes *et al.*, 2016).

کمبود فسفر در بسیاری از اراضی دنیا به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای کربنات کلسیم بالایی هستند گزارش شده است (Salardini, 2008). حتی در شرایط فراوانی فسفر در خاک‌های آهکی، مقدار قابل جذب این عنصر در بسیاری از موارد کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد مناسب گیاه است (Malakooti, & Keshavarz, 2005). میزان فسفر قابل جذب خاک با بعضی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مانند کربن آلی و کربنات کلسیم (Jalali & Kolahchi, 2005) همچنین pH، درصد رس و شن (Taghizadeh Asl *et al.*, 2009) در ارتباط است. تعیین شکل‌های فسفر آلی و کمی سازی سهم هریک از این شکل‌ها در تغذیه فسفر گیاه می‌تواند به ارزیابی حاصلخیزی خاک و انتخاب مدیریت مناسب زراعی جهت افزایش قابلیت استفاده فسفر کمک کند. روش‌های جداسازی فسفر آلی و تعیین میزان استفاده بودن آن‌ها برای گیاه بر اساس تفاوت پایداری‌شان در اسید و باز به چهار شکل لبایل، نسبتاً لبایل، نسبتاً غیر لبایل (فسفر آلی موجود در اسید فولویک) و غیر لبایل (فسفر موجود در اسید هومیک) تفکیک می‌شوند (Bowman, & Cole, 1978; Ivanoff *et al.* 1998).

شرر و شارما (Scherer & Sharma, 2002) با مطالعه روند آزادسازی فسفر و تغییر شکل‌های فسفر در خاک‌های

اصلاح‌شده با مواد آلی با کاربرد دو منبع آلی (کمپوست زباله شهری و لجن فاضلاب) در مقایسه با کاربرد کود معدنی فسفوری در طی ۳۸ سال گزارش کردند که میزان فسفر کل در تمام تیمارها که شامل فسفر معدنی عصاره‌گیری شده با سود (NaOH-Pi)، فسفر باقی‌مانده (P Residual)، فسفر معدنی عصاره‌گیری شده با بیکربنات سدیم (NaHCO₃Pi)، فسفر معدنی عصاره-گیری شده با آب مقطر (H₂O-P) و فسفر معدنی عصاره-گیری شده با اسیدکلریدریک (HCL-P) بود، افزایش معنی داری را نشان داد. در زمان شروع این آزمایش، تغییرات شکل‌های فسفر به‌صورت: $H_2O-P > HCL-P > NaOHPi > Residual-P \sim NaHCO_3Pi$ بود که در پایان آزمایش به شکل: $Residual-P \sim H_2O-P > HCL-P > NaOHPi > NaHCO_3Pi > P$ تغییر یافت. این محققان نشان دادند، باوجود افزایش در مقدار فسفر کل در اثر کاربرد مواد آلی، فسفر جذب‌شده توسط گیاه بعد از کاربرد کمپوست و لجن فاضلاب در مقایسه با کاربرد کمپوست زباله شهری کاهش یافت. این پژوهشگران همچنین نشان دادند، با کاربرد مرتب فسفر در خاک، مقادیر زیادی فسفر پایدار و نامحلول (فسفر باقی‌مانده) می‌تواند در خاک تجمع یابد. کمبود فسفر در خاک‌های آهکی به دلیل تثبیت این عنصر در این گونه خاک‌ها، وجود آهک و اسیدیته بالا که قابلیت جذب فسفر برای گیاه را با محدودیت‌های شدیدی روبرو کرده است، جهت تأمین فسفر مورد نیاز گیاه و افزایش ماده آلی در این خاک‌ها از کودهای دامی استفاده شده است (Delgado *et al.*, 2002). پژوهش‌های متعددی نشان داده است که کاربرد کودهای آلی می‌تواند سبب افزایش غلظت فسفر آلی نسبتاً ناپایدار در خاک گردد. ازجمله آن‌ها می‌توان به تأثیر کاربرد کودهای آلی به همراه سنگ فسفات (Singh *et al.*, 2000) و با کاربرد بقایای گیاهی (Reddy *et al.*, 2005) اشاره کرد. تحقیقات سماواتی و حسین پور (Samavati & Hoseinpour, 2011) نشان داد که عملکرد ماده خشک گیاه گندم به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر شکل فسفر آلی با پایداری متوسط (استخراجی به‌وسیله اسیدکلریدریک) و فسفر آلی ناپایدار قرار می‌گیرد، همه شکل‌های آلی فسفر به‌جز فسفر آلی پایدار (استخراجی به وسیله سود) رابطه معنی‌داری با مقدار یا غلظت فسفر در بافت گیاهی

1998). مواد آلی با کلات کردن اکسیدهای آهن و آلومینیوم بر جذب فسفر تأثیر می‌گذارد و تشکیل اکسیدهای آهن و آلومینیوم در حضور اسیدهای آلی خاص متوقف می‌شود (Borggard, et al., 1990).

در رابطه با تأثیر مواد آلی بر شکل‌های شیمیایی فسفر مطالعاتی توسط پژوهشگران انجام شده است، اما تأثیر این مواد بر شکل‌های آلی فسفر کمتر توجه محققان را به خود معطوف داشته است. وجه تمایز این پژوهش کاربرد کودهای شیمیایی و آلی با ترکیبات کاملاً متفاوت در یک خاک آهکی و بررسی این موضوع که تفاوت در شکل‌های آلی و معدنی فسفر خاک در اثر افزودن آن از منابع کودهای آلی یا شیمیایی وجود دارد. گذشته از آن کاربرد کودهای آلی با ماهیت‌های کاملاً متفاوت شامل کود دامی با ترکیبات غذایی بالاتر و کمپوست زباله شهری با ترکیبات عناصر سنگین بالاتر چه میزان سهم در آزادسازی شکل‌های شیمیایی فسفر دارند از جمله اهداف مهم این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و تعیین ویژگی‌های خاک و کودهای آلی مورد استفاده

بر اساس مطالعات هدفمند مکان‌های تحت کشت گندم (Khademi et al., 2010)، از اراضی زراعی دشت قزوین یک نمونه مرکب خاک آهکی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری متشکل از هشت نمونه فرعی تهیه و پس هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل pH خاک (در گل اشباع)، هدایت الکتریکی (در عصاره اشباع خاک) کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک، کربن آلی به روش اکسایش تر - والکلی و بلاک (Walkley & Black, 1934)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Kuo, 1996)، فسفر کل به روش هضم با اسید پرکلریک (Kuo, 1996)، بافت خاک به روش هیدرومتری، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم - استات آمونیوم (Rhoads, 1986) تعیین گردید (جدول ۱).

کودهای آلی مورد استفاده در این پژوهش شامل کود گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل بود. قابلیت هدایت الکتریکی و pH کودهای گوسفندی و

گندم داشت. در بررسی‌های لوپز پینریو و همکاران (Lopez-Pineiro, al., 2001) و سالک و همکاران (Saleque et al., 2004)، غلظت فسفر آلی ناپایدار (استخراجی به وسیله بیکربنات سدیم) با کاربرد کودهای آلی و شیمیایی فسفوری در خاک‌های آهکی افزایش پیدا کرد که دلیل آن وجود شکل فسفر آلی ناپایدار در کودهای آلی بود.

در بررسی‌های یانگ و همکاران (Yang et al., 2006) در خاک‌های شالیزاری استفاده از کودهای آلی سبب افزایش قابل توجه فسفر آلی با پایداری متوسط شد. نتایج ردی و همکاران (Reddy et al., 2005) افزایش فسفر آلی با پایداری متوسط را با کاربرد کود گوسفندی در خاک ورتی‌سول نشان داد. حیدری و همکاران (Heydari et al., 2013) در بررسی روابط شکل‌های فسفر معدنی و آلی با رشد ذرت و جذب فسفر در برخی خاک‌های استان آذربایجان شرقی، مقدار شکل‌های آلی فسفر را به ترتیب فسفر آلی نسبتاً ناپایدار (moderately labile organic phosphorus)، فسفر آلی ناپایدار (labile organic phosphorus) و فسفر آلی پایدار (Non labile organic phosphorus) تعیین کردند.

ماگوئر و همکاران (Maguire et al., 2000) در بررسی شکل‌های معدنی فسفر خاک‌های اصلاح شده توسط کودهای بیولوژیکی، از هشت خاک با تاریخچه‌های مختلف مدیریتی میزان فسفر محلول، فسفر متصل به آلومینیوم، فسفر متصل به آهن، فسفر متصل به کلسیم، فسفر محبوس شده در اکسیدهای آهن و آلومینیوم و فسفر کل را اندازه‌گیری کردند. افزایش کودهای بیولوژیکی سبب افزایش فسفر کل خاک گردید. همچنین فسفر متصل به آهن به دلیل افزایش آهن توسط این کودها به خاک و نیز فسفر متصل به آلومینیوم افزایش نشان داد. پن و سیمس (Penn & Sims, 2002) نیز گزارش دادند که اصلاح‌کننده‌های بیولوژیکی می‌توانند سبب افزایش فسفر خاک و فسفر در رواناب گردند.

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مواد آلی باعث افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی می‌شود. مواد آلی و اسیدهای آلی حاصل از تجزیه آن، سطوح کربنات کلسیم را اشغال کرده و از تشکیل رسوب هیدروکسی آپاتیت جلوگیری می‌کند (Inskip & Silvertooth, 2002).

روی و آهن از مخلوط اسید پرکلریک 70 درصد و اسید نیتریک غلیظ به نسبت ۲:۱ استفاده شد (Clup & Clup, 1978 (جدول ۲).

کمیوست زباله شهری در عصاره ۱:۵ (Nazari *et al.*, 2006) تعیین شد. تعیین ماده آلی به اکسایش تر - والکلی و بلاک (Walkley & Black, 1934) صورت پذیرفت. برای اندازه‌گیری غلظت کل عناصر فسفر، مس،

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil

Depth cm	pH	P _{tot.} mg kg ⁻¹	P _{ava} mg kg ⁻¹	EC dS m ⁻¹	TNV	OC g kg ⁻¹	Sand g kg ⁻¹	Silt g kg ⁻¹	Clay g kg ⁻¹	CEC cmolckg ⁻¹
0-30	7.8	687	10.30	1.32	283	8.7	300	520	180	23.14

P_{ava}= Available phosphorus P_{tot}= Total phosphorus EC=Electrical Conductivity C.C.E. = Calcium Carbonate Equivalent OC=Organic Carbon CEC=Cation Exchange Capacity

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کودهای آلی مورد استفاده در این مطالعه

Table 2. Some physical and chemical characteristics of tested organic fertilizers in this study

Fertilizer	Moisture	Nt	N-NH ₃ %	OC	Kt	Pt	pH 1:5	EC 1:5 dS m ⁻¹
SM	6.3	2.2	0.03	24.0	1.4	0.51	7.70	8.9
MSWC	5.5	2.0	0.01	16.6	3.48	1.1	8.16	10.9

ادامه جدول ۲

Continue table 2

Fertilizer	Pb _t	Cd _t	Mn _t	Zn _t	Cu _t	Fe _t	NO ₃ ⁻ _t
	mg kg ⁻¹						
SM	15.8	0.001	256	66.5	17.3	4520	39
MSWC	372	3.6	591	3305	197	9712	4380

MSWC (Municipal solid waste compost), SM (Sheep manure), N.t (Total nitrogen), OC (Organic carbon), Kt (Total potassium), Pt (Total phosphorus), EC (Electrical conductivity), Pb.tot (Total lead), Cd.t (Total Cadmium), Mnt (Total manganese), Znt (Total zinc), Cut (Total copper), Fet (Total iron), NO₃t (Total nitrate).

رطوبت ظرفیت مزرعه انجام و به مدت ۹۰ روز در شرایط گلخانه نگهداری شدند. در طی دوره رشد در گلخانه با توجه به آزمون خاک و لزوم مصرف کودهای شیمیایی موردنیاز در صورت کمبود، به میزان ۲ گرم کود اوره برای هر گلدان محاسبه و در دو قسط در زمان‌های ۱۵ و ۶۰ روز پس از استقرار در گلخانه با آب آبیاری گلدان‌ها مخلوط و در اختیار کلیه تیمارها قرار گرفت. در پایان دوره رشد، بخش شاخساره گندم از محل طوقه در نزدیک سطح خاک قطع و پس از شستشو با آب مقطر، جهت تعیین وزن خشک در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. نمونه‌ها پس از پودر شدن توسط آسیاب با استفاده از کوره الکتریکی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد و اسیدکلریدریک، به مدت ۶ ساعت هضم و غلظت فسفر موجود در عصاره به روش رنگ سنجی وانادات مولیبدات (Murphy & Riley, 1962) تعیین شد. میزان جذب فسفر توسط شاخسار گندم از

کشت گلخانه‌ای

به‌منظور تعیین شکل‌های آلی و معدنی فسفر در خاک تیمار شده با کودهای گوسفندی، کمیوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل و ارتباط آن‌ها با جذب فسفر توسط گندم، مطالعه در گلخانه کنترل شده از لحاظ دمایی با میانگین درجه حرارت روز و شب به ترتیب ۲۵ و ۱۸ درجه سلسیوس و با شرایط نور طبیعی انجام شد. ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منابع کودهای گوسفندی، (۱۰/۹۸ گرم کود گوسفندی) کمیوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل با ۳ کیلوگرم از خاک مخلوط و در داخل گلدان‌های پلاستیکی قرار گرفت. تیمار شاهد که در آن از کودهای موردبررسی استفاده نشده بود، در نظر گرفته شد. در هر گلدان ۶ عدد بذر گندم رقم پیش‌تاز که قبلاً مرحله ورنالیزاسیون را در دمای ۳ درجه سانتی‌گراد در داخل یخچال گذرانده بودند، کشت و پس از اطمینان از سبز شدن به ۳ عدد کاهش یافت. آبیاری گلدان‌ها به روش وزنی در ۷۰ درصد

به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه با دستگاه سانتریفیوژ شده و از کاغذ صافی عبور داده شدند. در این حالت مجدداً عصاره به دو قسمت تقسیم شد. غلظت فسفر در یک بخش جدا شده به طور مستقیم اندازه‌گیری شد. این فسفر نشان‌دهنده فسفر معدنی نسبتاً ناپایدار بود. قسمت دوم عصاره به وسیله پرسولفات پتاسیم ($K_2S_2O_8$) هضم سپس غلظت فسفر در این عصاره تعیین شد. این غلظت نشان‌دهنده فسفر نسبتاً ناپایدار کل بود. بخشی از فسفر آلی نسبتاً ناپایدار از تفاضل دو مقدار فوق به دست آمد.

در مرحله دوم نمونه عصاره‌گیری شده توسط اسیدسولفوریک (مرحله اول) با اتانول شستشو داده شد. سپس به مدت ۵ دقیقه بر روی شیکر دورانی مخلوط و مانند مرحله قبل ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. ۵۰ میلی‌لیتر سود ۰/۵ نرمال افزوده و به مدت ۶ ساعت شیکر و سپس سانتریفیوژ شد. محلول صاف رویی شامل بخشی از فسفر آلی با پایداری متوسط و فسفر آلی پایدار بود. برای این که بتوان این اجزا را جدا کرد، عصاره به دو قسمت تقسیم شد. غلظت فسفر به طور مستقیم در یک قسمت عصاره تعیین شد که نشان‌دهنده بخش دوم فسفر آلی با پایداری متوسط بود. بخش دیگر عصاره مانند مرحله قبل توسط پرسولفات پتاسیم هضم و غلظت فسفر تعیین شد. از تفاضل غلظت فسفر در عصاره هضم شده و مقدار فسفر آلی با پایداری متوسط، غلظت فسفر پایدار تعیین شد. در نهایت مقدار کل فسفر آلی با پایداری متوسط از حاصل جمع دو فسفر آلی با پایداری متوسط در دو مرحله قبلی به دست آمد (Bowman & Cole, 1978).

اندازه‌گیری شکل‌های معدنی فسفر خاک

برای جداسازی شکل‌های معدنی فسفر از روش جیانگ و گو (Jiang & Gu, 1989) استفاده شد. در این روش شکل‌های مختلف معدنی فسفر شامل دی کلسیم فسفات، اکتا کلسیم فسفات، فسفات‌های آهن و آلومینیوم، فسفر محبوس شده و آپاتیت بر اساس حلالیتشان در محلول‌های مختلف به شرح جدول ۳ تعیین شدند.

حاصل‌ضرب عملکرد وزن خشک در غلظت فسفر شاخصار محاسبه گردید.

اندازه‌گیری فسفر آلی

فسفر ناپایدار با $NaHCO_3$ ۰/۵ مولار در $pH=8/5$ عصاره‌گیری می‌شود. فسفر عصاره‌گیری شده با این عصاره گیر به عنوان فسفر آلی ناپایدار شناخته شده است. فسفر آلی با پایداری متوسط (Moderately labile pool) به وسیله اسیدکلریدریک یک مولار به دنبال سود (NaOH) ۰/۵ مولار عصاره‌گیری می‌شود. عصاره NaOH به وسیله اسیدکلریدریک غلیظ اسیدی می‌شود تا جدایی شکل‌های پایدار (اسید هیومیک) از اشکال پایداری متوسط (اسید فولویک) به وجود آید. سرانجام اشکال با مقاومت بالا و پایدار، به وسیله خاکسترگیری بقایا از عصاره NaOH در ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت به دنبال انحلال در اسید سولفوریک یک مولار انجام می‌شود. در هر صورت مقادیر غلظت‌های فسفر در عصاره به وسیله رنگ سنجی با روش فسفو مولیبدات (Murphy & Riley, 1962) تعیین می‌گردد.

برای تعیین فسفر آلی ناپایدار در خاک به روش اولسن عصاره‌گیری شد. عصاره به دو قسمت تقسیم شد. در یک قسمت از عصاره غلظت فسفر به روش مورفی و رایلی (Murphy & Riley, 1962) تعیین شد که نشان‌دهنده فسفر معدنی ناپایدار بود (Bowman, 1978 & Cole). در بخش دیگر عصاره فسفر آلی محلول به فسفر معدنی با استفاده از پرسولفات پتاسیم ($K_2S_2O_8$) هضم شد. روش کار بدین ترتیب بود که ۵ میلی‌لیتر از عصاره تهیه‌شده به داخل بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتر ریخته و ۰/۵ گرم پرسولفات پتاسیم و ۳ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک ۲/۵ مولار به آن افزوده به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بر روی یک صفحه داغ عملیات هضم انجام شد. در این عصاره غلظت فسفر تعیین‌شده نشان‌دهنده فسفر ناپایدار کل بود. از اختلاف این فسفر و فسفر معدنی ناپایدار، فسفر آلی ناپایدار تعیین شد (Bowman & Cole, 1978).

فسفر آلی با پایداری متوسط در دو مرحله عصاره‌گیری شد. در مرحله اول یک گرم از نمونه خاک توزین و به ظرف پلی‌اتیلنی ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل شد، سپس ۵۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک یک مولار اضافه و به مدت ۳ ساعت توسط شیکر دورانی تکان داده شد. کلیه نمونه‌ها

جدول ۳- تعیین شکل های معدنی فسفر

Table 3. Determination of phosphorus mineral forms

Mineral phosphorus form	Measurement methods
Di calcium phosphate (Ca ₂ P)	1 hour shake, pH =7.5, dry soil Extraction with NaHCO ₃ : 0.25 M (1:50)
Octa Calcium phosphate (Ca ₈ P)	1 hour shake, pH =4.5, dry soil Extraction with NH ₄ AC: 0.50 M (1:50)
Aluminum phosphate (AlP)	1 hour shake, pH =8.2, dry soil Extraction with NH ₄ F: 0.50 M (1:50)
Iron phosphate (FeP)	2 hours shake, dry soil Extraction with Na ₂ CO ₃ 0.10 N and NaOH 0.10 N (1:50)
Occluded phosphate (OP)	10 minutes shake, dry soil Extraction with citrate-bicarbonate-dithionite (1:45)
Apatite (Ca ₁₀ P)	1 hour shake, dry soil Extraction with H ₂ SO ₄ : 0.25 M (1:50)

میانگین مربعات صفات مورد آزمایش در جدول ۴ آمده است. همان‌طور که نتایج جدول نشان می‌دهد، تأثیر فاکتور کود بر صفات وزن خشک ($P < 0.05$)، میزان جذب فسفر توسط گیاه ($P < 0.01$)، فسفر آلی ناپایدار (LOP)، فسفر آلی با پایداری متوسط (MLOP) ($P < 0.01$)، فسفر آلی مقاوم متوسط (MROP) ($P < 0.01$) و فسفر آلی مقاوم بالا (HROP) ($P < 0.05$) معنی‌دار شد.

طرح آماری

مدل آماری به‌کارگیری شده در این پژوهش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تیمار کودی (گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل) و شاهد (بدون مصرف کود) در سه تکرار انجام شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین به کمک آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس

جدول ۴- میانگین مربعات شکل‌های فسفر در شرایط گلخانه (دانکن ۵ درصد)

Table 4. Mean Square phosphorus forms in greenhouse conditions (Duncan 5%)

Source of variation	Degree of freedom	Dry weight (g)	P- uptake by plant	LOP	MLOP	MROP	HROP
Replication	2	0.243*	2.403*	0.641**	26.241**	351.100**	8.295**
Fertilizer factor	3	0.261*	24.543**	40.779**	51.668**	187.450**	3.200*
Error	6	0.032	0.169	0.005	0.234	423.358	0.48
CV (%)	-	7.59	7.28	1.92	2.09	3.36	4.70

Continue table 4

Ca ₁₀ P	OP	FeP	AlP	Ca ₈ P	Ca ₂ P
1552.611 ^{ns}	1.560 ^{ns}	2.292**	0.277 ^{ns}	37.066 ^{ns}	0.811 ^{ns}
477.233 ^{ns}	26.600**	1.309*	13.516**	303.936**	733.582**
763.887 ^{ns}	0.620	0.197	1.246	22.821	3.814
9.41	5.83	4.00	8.57	3.33	6.67

*significant at the 5% level, ** significant at 1%, ns: no significant

شاهد افزایش پیدا کرد. این افزایش عملکرد نسبت به کاربرد کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل به ترتیب ۲۷/۹ و ۲۱/۲ درصد بود (شکل ۱.a). در کلیه تیمارهای کودی کاربرد فسفر باعث افزایش معنی‌دار میزان جذب فسفر توسط گیاه نسبت به شاهد شد که بیشترین آن با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع کود سوپر فسفات تریپل به دست

عملکرد شاخسار گندم و جذب فسفر

کاربرد کود دامی تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک شاخسار گیاهی نسبت به شاهد داشت. همچنین به‌طور معنی‌داری بیشتر از کاربرد کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل بود. نتایج نشان داد که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع کود گوسفندی میزان وزن خشک شاخسار گیاهی ۲۹/۰ درصد نسبت به

مورد نیاز گیاه و همچنین بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک سبب بهبود رشد ذرت گردد. معینی و همکاران (Moeini *et al.*, 2016) با کاربرد کود مرغی و لجن فاضلاب میزان جذب فسفر توسط شاخسار گندم را به ترتیب تا ۵ و ۹ برابر نسبت به شاهد افزایش دادند.

شکل‌های فسفر آلی

تاثیر کودهای آلی و شیمیایی بر شکل‌های آلی فسفر در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل مقادیر شکل فسفر در هر ستون به طور جداگانه تجزیه شده است.

فسفر آلی ناپایدار = LOP (Labile Organic Phosphorus) این بخش از فسفر که توسط کانی‌ها و یا ماده آلی جذب سطحی شده می‌تواند به راحتی طی فرآیند معدنی شدن، قابلیت جذب توسط گیاه را پیدا کند. این بخش از فسفر که توسط کانی‌ها و یا ماده آلی جذب سطحی شده می‌تواند به راحتی طی فرآیند معدنی شدن، قابلیت جذب توسط گیاه را پیدا کند (Vu *et al.*, 2008).

فسفر آلی ناپایدار که مقدار آن در تیمارهای به کاررفته از ۲/۵ تا ۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود، کمترین سهم نسبی را در میان شکل‌های آلی فسفر داشت (شکل ۲). میزان کم فسفر آلی ناپایدار دلیل بر کم‌اهمیت بودن این شکل آلی فسفر نبوده، بلکه افزایش حتی مقادیر کم این بخش از فسفر آلی می‌تواند در میزان جذب فسفر توسط گیاه اهمیت زیادی داشته باشد. این مهم به دلیل پویایی این شکل آلی فسفر است. کاربرد کود گوسفندی توانست به طور معنی‌داری مقدار فسفر آلی ناپایدار را نسبت به سایر تیمارهای کودی و شاهد افزایش دهد. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، از منبع کود گوسفندی مقدار فسفر آلی ناپایدار ۱/۲ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. این مقدار افزایش با کاربرد کودهای کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۳۲ درصد نسبت به شاهد بود (شکل ۲). افزایش مقدار LOP با کاربرد بقایای گیاهی و در نتیجه آن ترشحات ریزوسفری توسط سالک و همکاران (Saleque *et al.*, 2004) و با کاربرد کودهای گوسفندی و کمپوست زباله شهری توسط ورما و همکاران (Verma *et al.*, 2005) گزارش شده است. معینی و همکاران (Moeini *et al.*, 2016) در تعیین شکل‌های آلی فسفر در یک خاک آهکی متأثر از کشت گندم و کاربرد کودهای

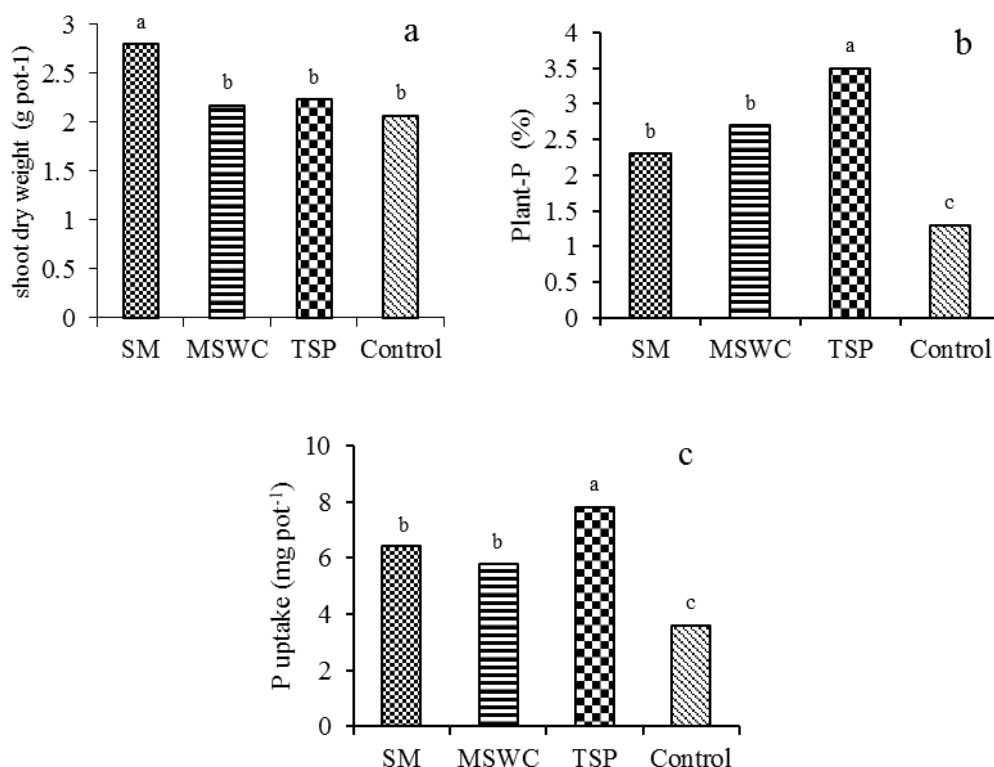
آمد. پس‌از آن تیمارهای کود گوسفندی و کمپوست زباله شهری قرار گرفتند. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منابع سوپر فسفات تریپل، کود گوسفندی و کمپوست زباله شهری میزان جذب فسفر توسط شاخسار گیاهی به ترتیب ۱/۵، ۱/۲ و ۲/۰ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. با عرضه فسفر از منابع کودهای شیمیایی و آلی به دلیل جذب این عنصر توسط گیاه میزان بیوماس افزایش می‌یابد. افزایش میزان جذب فسفر با کاربرد سوپرفسفات تریپل نسبت به کود گوسفندی و کمپوست زباله شهری به ترتیب ۲۱/۶ و ۳۴/۷ درصد بود (شکل ۱.۰c).

مقادیر درصد فسفر در گیاه در شکل ۱.۰b نشان داده شده است. بیشترین غلظت فسفر در گیاه با کاربرد تیمار سوپرفسفات تریپل، سپس با کاربرد کودهای آلی به دست آمد. در کلیه تیمارها میزان فسفر در گیاه نسبت به شاهد بالاتر بود. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل به میزان ۲/۲ درصد فسفر موجود در گیاه نسبت به شاهد افزایش یافت این مقادیر برای کود گوسفندی و کمپوست زباله شهری به ترتیب ۲ و ۱/۴ درصد بود.

افزایش عملکرد ماده خشک گیاهی و غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه، توسط محققان گزارش شده است (Shahbazi, & Davoodi, 2012). سوئی و همکاران (Sui *et al.*, 2000) افزایش میزان جذب فسفر توسط گندم با کاربرد کودهای آلی را به دلیل کاهش تشکیل کانی‌های پایدار فسفر که تحرک فسفر را در خاک افزایش داده و از این طریق به رشد گیاه کمک می‌کند بیان نمودند. کودهای آلی از طریق آزادسازی اسیدهای آلی سبب کاهش pH و افزایش حلالیت فسفات‌های کلسیم در خاک‌های آهکی شده و از این طریق منجر به افزایش جذب فسفر توسط گیاهان می‌شوند. همچنین کودهای آلی حاوی شکل‌های مختلفی از فسفر آلی بوده که در طول دوره رشد تحت فرآیند معدنی شدن به شکل قابل جذب برای گیاه تبدیل می‌شوند (Reddy *et al.*, 2005). دلیل جذب بیشتر فسفر توسط شاخسار گندم با کاربرد کود سوپر فسفات تریپل سهولت آزادسازی این فسفر از این منبع شیمیایی بود. نتایج نووکه و همکاران (Nwoke *et al.*, 2004) نشان دادند که کاربرد کودهای آلی می‌تواند از طریق افزودن عناصر غذایی

فسفر آلی خاک را در مقایسه با سایر شکل‌های آلی داشت.

آلی نشان دادند که فسفر آلی ناپایدار (LOP) کمترین و فسفر آلی نسبتاً ناپایدار (MLOP) بیشترین سهم از کل



شکل ۱- تأثیر کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل بر وزن خشک اندام هوایی (a)، درصد فسفر گیاه (b) و فسفر جذب شده (c) توسط گندم در مقایسه با شاهد

Figure 1. Influence of sheep manure (SM), municipal solid waste compost (MSWC) and triple superphosphate (TSP) on shoot dry weight (a), phosphorus plant percentage (b) and phosphorus uptake (c) by wheat in comparison to control

کودهای آلی به همراه سنگ فسفات سبب شد تا ۷۰ درصد از فسفر حل شده به فسفر آلی نسبتاً لبایل تبدیل شود. این بخش از فسفر نسبت به فسفر آلی ناپایدار از سهم نسبی بالاتری برخوردار بود (شکل ۲).

فسفر آلی نسبتاً مقاوم (Moderately Resistant Organic Phosphorus) MROP کاربرد کودهای گوسفندی و کمپوست زباله شهری تأثیر معنی‌داری در افزایش این شکل آلی فسفر نسبت به شاهد داشت. به طوری که با افزایش به ترتیب ۲۹/۴ و ۱۸/۰ درصد همراه بود (شکل ۲).

فسفر آلی مقاوم متوسط بخش قابل توجهی از فسفر آلی را به خود اختصاص داده است که می‌تواند از طریق بقایای گیاهی به خاک افزوده شود. در این مطالعه نیز رشد بیش‌تر گندم در تیمارهای با کاربرد کودهای آلی و بازگشت بقایای ریشه به خاک می‌تواند بخشی از افزایش

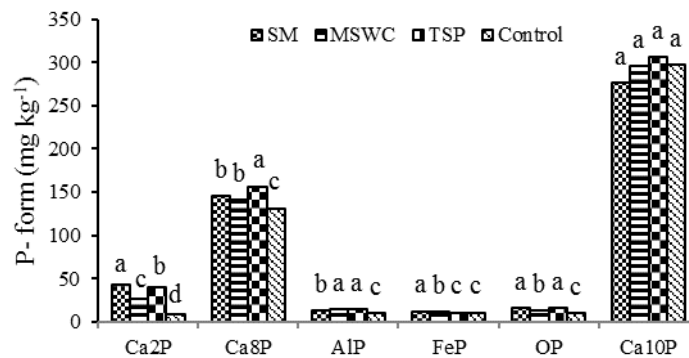
فسفر آلی با پایداری متوسط (Moderately Labile = Organic Phosphorus) MLOP این بخش از فسفر آلی خاک می‌تواند تا حد زیادی تحت تأثیر فرآیند معدنی شدن قرار گرفته و به همین دلیل از نظر تغذیه فسفوری گیاه اهمیت زیادی دارد (Zhang *et al.*, 1994). نتایج داده‌های این پژوهش نشان داد که با کاربرد کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل مقدار فسفر آلی با پایداری متوسط را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت. این افزایش به ترتیب معادل ۵۱/۹، ۳۱/۵ و ۲۲/۴ درصد بود. افزایش فسفر آلی با پایداری متوسط با کاربرد کودهای گوسفندی و کمپوست زباله شهری به دلیل افزایش رشد گندم و تولید و ترشحات محیط ریشه می‌باشد (شکل ۲). چنانچه سالک و همکاران (Saleque *et al.*, 2004) به چنین نتایجی دسترسی پیدا کردند. سینگ و امبرگر (Singh & Amberger, 2001) گزارش کردند که کاربرد

را با شاهد نشان ندادند. تنها با کاربرد کود گوسفندی ۵۴/۶ درصد میزان HROP نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۲). ین و لیانگ (Yin, & Liang, 2013) در شرایط انکوباسیون با کاربرد کود آلی توانستند مقدار فسفر آلی غیرلبایل (پایدار) را در خاک افزایش دهند. آن‌ها دلیل این امر را تجزیه مواد آلی در طول دوره انکوباسیون و سنتز مواد هومیکی بیان داشتند. ین و لیانگ (Yin & Liang, 2013) در شرایط انکوباسیون با کاربرد کود آلی توانستند مقدار فسفر آلی غیرلبایل (پایدار) را در خاک افزایش دهند. آن‌ها دلیل این امر را تجزیه مواد آلی در طول دوره انکوباسیون و سنتز مواد هومیکی بیان داشتند. از نظر مقدار سهم نسبی شکل های آلی فسفر، فسفر آلی مقاوم بالا پس از فسفر آلی ناپایدار قرار گرفت (شکل ۳).

فسفر آلی نسبتاً غیرلبایل را توجیه نماید. افزایش فسفر آلی غیر لبایل در مطالعات یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2006) و ردی و همکاران (Reddy *et al.*, 2005) گزارش شده است. فسفر آلی مقاوم بیشترین سهم در بین شکل‌های آلی فسفر را به خود اختصاص داد (شکل ۳).

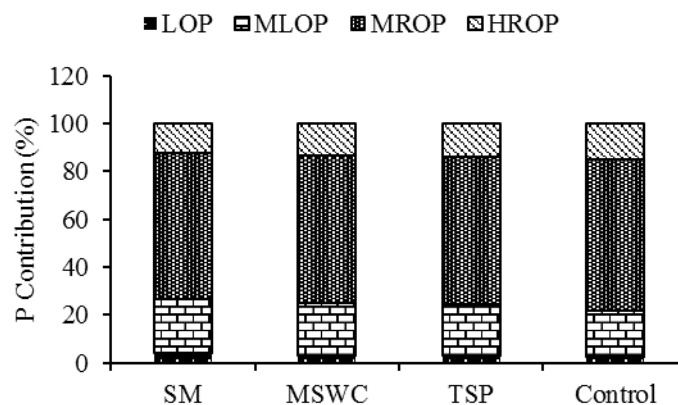
فسفر آلی مقاوم بالا = Highly Resistant Organic (Phosphorus) HROP

این شکل آلی فسفر به دلیل ساختار لیگنینی و سایر مواد آلی مقاوم به تجزیه میکروبی کمتر تحت فرآیند معدنی شدن قرار می‌گیرد. پس همانند فسفر آلی مقاوم متوسط به دلیل شرکت نکردن در فعل‌وانفعالات شیمیایی چندان از نظر تغذیه فسفری گیاه حائز اهمیت نیست (Sharpley, 1985). نتایج داده‌ها نشان داد که کاربرد کودهای آلی و شیمیایی تأثیر معنی‌داری بر این شکل آلی فسفر نداشته و از این نظر اختلاف معنی‌داری



شکل ۲- تاثیر کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل بر غلظت شکل‌های فسفر آلی در مقایسه با شاهد

Figure 2. Influence of sheep manure (SM), municipal solid waste compost (MSWC) and triple superphosphate (TSP) on Organic-P forms concentration in comparison to control.



شکل ۳- سهم نسبی شکل‌های آلی فسفر در تیمارهای کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل در مقایسه با شاهد

Figure 3. The relative of Organic-P forms in sheep manure (SM), municipal solid waste compost (MSWC) and triple superphosphate (TSP) treatments in comparison to control.

شکل‌های فسفر معدنی

شکل‌های کلسیمی فسفر (Ca₁₀P و Ca₈P, Ca₂P)

در فرآیند تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی یون کلسیم در واکنش با فسفر ابتدا کلسیم منو فسفات تولید می‌کند. سپس با کلسیم دی فسفات و اکتا کلسیم فسفات تبدیل و سرانجام در خاک به شکل رسوب آپاتیت درمی‌آید (Foth & Ellis, 1997).

شکل‌های کلسیمی فسفر شامل کلسیم دی فسفات (Ca₂P)، کلسیم اکتا فسفات (Ca₈P) و آپاتیت (Ca₁₀P) در تیمار با ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل در شکل ۴ نشان داده شده است.

بیشترین غلظت کلسیم دی فسفات با کاربرد کود گوسفندی و پس از آن با کاربرد سوپر فسفات تریپل حاصل شد. به‌گونه‌ای که با کاربرد این تیمارهای کودی غلظت کلسیم دی فسفات به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت. این میزان افزایش برای تیمار گوسفندی ۴/۲ برابر، تیمار کمپوست زباله شهری ۲/۳ برابر و برای سوپر فسفات تریپل ۳/۹ برابر نسبت به شاهد بود با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع کودی گوسفندی، غلظت کلسیم دی فسفات نسبت به کاربرد همین مقدار فسفر از منابع کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل به ترتیب ۵۸/۸ و ۶/۵ درصد افزایش نشان داد (شکل ۴).

غلظت کلسیم اکتا فسفات (Ca₈P) متأثر از کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از کود سوپر فسفات تریپل بود و نسبت به سایر تیمارهای کودی و شاهد از اختلاف معنی‌داری برخوردار بود. این در حالی بود که کاربرد فسفر از منابع کودهای آلی (گوسفندی و کمپوست زباله شهری) مقدار این شکل معدنی را تحت تأثیر قرار نداده و با یکدیگر تفاوتی را نشان ندادند. مقدار افزایش غلظت کلسیم اکتا فسفات برای تیمارهای سوپر فسفات تریپل، گوسفندی و کمپوست زباله شهری به ترتیب معادل ۱۸/۵ درصد، ۱۰/۹ درصد و ۷/۷ درصد نسبت به شاهد بود. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از کود سوپر فسفات تریپل غلظت Ca₈P نسبت به کاربرد کود گوسفندی و کمپوست زباله شهری به ترتیب ۶/۹ و ۱۰/۰ درصد افزایش یافت (شکل ۴).

غلظت آپاتیت (Ca₁₀P) با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل اختلاف معنی‌داری نسبت به شاهد نشان نداد. عملیات کود دهی قابلیت استفاده از شکل‌های فسفر را تغییر داده و باعث تأثیر بر میزان انواع شکل‌های فسفر می‌گردد. لیانگ (Liang, 2013) نشان داد که در خاک بدون کاربرد کود گوسفندی در مقایسه با خاک با کاربرد کود گوسفندی بیشترین میزان شکل معدنی فسفر از آن فسفات کلسیم بود. چنگ و همکاران (Cheng *et al.*, 2009) نشان دادند که با کاربرد کود گوسفندی آزادسازی فسفر بیشتری از خاک حاصل شد. ایشان همچنین گزارش کردند که کاربرد کودهای شیمیایی باعث افزایش غلظت FeP, AIP, Ca₈P, Ca₂P می‌شود.

شکل‌های آلومینیوم و آهن فسفر

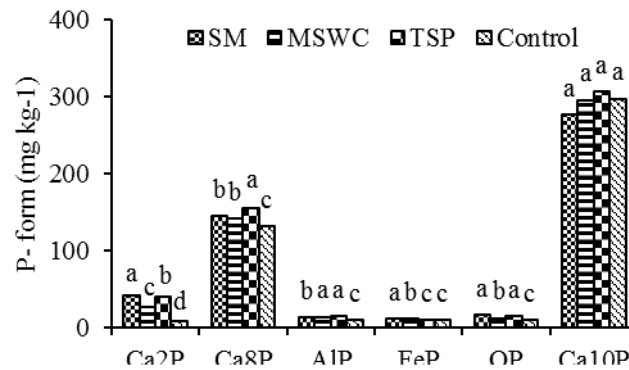
از کانی‌های مهم فسفری همراه با آلومینیوم، واریسایت (Al PO₄ . 2H₂O) می‌باشد. این نوع فسفات غیر محلول بوده و اندازه آن در حدود رس و سیلت می‌باشد (Salardini, 2008). استرینگیات (Fe PO₄.2H₂O) در اکثر خاک‌های اسیدی به همراه واریسایت وجود دارد (Larsen, 1976). این کانی به‌صورت لایه نازکی روی ذرات هیدروکسید آهن و آلومینیوم و یا با اتصال به این فلزات که در سطح رس قرار گرفته‌اند رسوب می‌نمایند (Salardini, 2008). شکل آلومینیومی فسفر (AIP) تحت تأثیر کاربرد فسفر از منابع کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل نسبت به شاهد بود. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منابع کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل مقدار AIP نسبت به شاهد به ترتیب ۳۱، ۴۴ و ۴۶ درصد افزایش یافت که برای تیمارهای کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل بیشتر از کود گوسفندی بود (شکل ۴). شکل آهن فسفر (FeP) در همه تیمارهای کودی اختلاف معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان داد. میزان افزایش غلظت شکل FeP در تیمارهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل نسبت به شاهد به ترتیب ۱۳/۳، ۸/۷ و ۱/۰ درصد بود که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منابع کودهای گوسفندی و کمپوست زباله شهری بیش از سوپرفسفات تریپل بود (شکل ۴).

با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپر فسفات تریپل شکل معدنی فسفر محبوس شده (OP) به ترتیب ۶۵/۳، ۲۶/۵ و ۵۹/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت که با کاربرد تیمارهای گوسفندی و سوپر فسفات تریپل بیشتر از کاربرد تیمار کمپوست زباله شهری بود (شکل ۴). لیانگ (Liang, 2013) گزارش کرد که در خاک تیمار شده با کود گوسفندی، شکل OP بیشترین غلظت را داشت. به دلیل پایداری بالای شکل معدنی آپاتیت (Ca₁₀P) غلظت این فرم فسفر تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی با کودهای آلی و معدنی قرار نگرفت بنابراین از نظر غلظت این شکل معدنی فسفر اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۴).

شاید دلیل افزایش غلظت AIP با کاربرد کودهای کمپوست و گوسفندی افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی خاک و ایجاد شرایط موقت بی‌هوازی باشد که منجر به افزایش غلظت این شکل معدنی فسفر شده است (Akhtar *et al.*, 2002).

فسفر محبوس شده

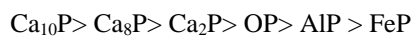
بخشی از فسفر که معمولاً جزء فسفر غیرفعال خاک بوده و تحت عنوان فسفات‌های محبوس شده نام‌برده می‌شود به چهار صورت فسفات آلومینیوم محبوس شده، فسفات آهن محبوس شده، فسفات‌های آهن و آلومینیوم محبوس شده و فسفات‌های محلول در احیاء کننده‌ها می‌باشد (Sample *et al.*, 1980).



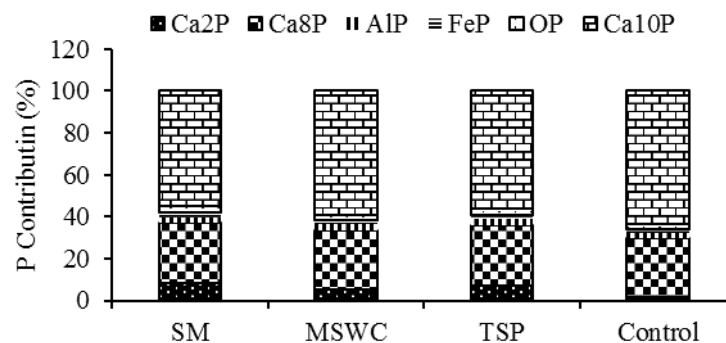
شکل ۴- تأثیر کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل بر غلظت شکل‌های فسفر معدنی در مقایسه با شاهد

Figure 4. The effects of sheep manure (SM), municipal solid waste compost (MSWC) and triple super phosphate (TSP) on inorganic phosphorus forms in comparison to control.

فسفر محبوس شده، آلومینیوم فسفات و آهن فسفات قرار گرفتند:



در شکل ۵ سهم نسبی هر یک از شکل‌های معدنی فسفر نشان داده شده است. بیشترین سهم معدنی فسفر از آن آپاتیت، بعد از آن فسفات اکتا کلسیم، فسفات دی کلسیم،



شکل ۵- سهم نسبی شکل‌های معدنی فسفر در تیمارهای کودهای گوسفندی، کمپوست زباله شهری و سوپرفسفات تریپل در مقایسه با شاهد

Figure 5. Contribution of inorganic P fractions in sheep manure (SM), municipal solid waste compost (MSWC) and triple super phosphate (TSP) treatments in comparison to control.

همچنین فسفر آلی با پایداری متوسط (MLOP) و فسفر آلی نسبتاً مقاوم (MROP) همبستگی معنی‌داری با فسفر آلی مقاوم بالا (HROP) به ترتیب در سطوح ۱ و ۵ درصد داشتند (جدول ۵).

در این مطالعه به دلیل اضافه شدن کودهای آلی تازه به خاک، شکل‌های قابل‌دسترس‌تر فسفر آلی در خاک افزایش و به همین دلیل سهم آن‌ها در افزایش فسفر قابل‌جذب گیاه و جذب فسفر توسط گندم افزایش یافته است.

بررسی ارتباط بین شکل‌های فسفر آلی و میزان جذب فسفر توسط گندم

به‌منظور تعیین سهم هر یک از شکل‌های فسفر آلی در افزایش فسفر قابل‌جذب گیاه، آزمون همبستگی ساده پیرسون مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۵). نتایج نشان داد که تمامی شکل‌های فسفر آلی با جذب‌شده توسط گندم همبستگی معنی‌داری ندارند. از بین شکل‌های فسفر آلی، فسفر آلی لبایل (LOP)، فسفر آلی با پایداری متوسط (MLOP) همبستگی معنی‌داری با فسفر آلی نسبتاً مقاوم (MROP) در سطح ۱ درصد داشتند.

جدول ۵- روابط همبستگی شکل‌های فسفر آلی با فسفر جذب شده

Table 5. Correlation coefficient of organic P fractions with P uptake.

	P uptake	LOP	MLOP	MROP	HROP
P uptake	1				
LOP	0.940*	1			
MLOP	0.933*	0.959*	1		
MROP	0.964*	0.970*	0.979*	1	
HROP	0.696 ns	0.863 ns	0.991**	0.955*	1

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

به منظور بررسی ارتباط بین شکل‌های فسفر معدنی و میزان جذب فسفر توسط گندم آزمون همبستگی ساده پیرسون مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۶). بین فسفر جذب شده و شکل‌های کلسیم دی فسفات (Ca_2P) کلسیم اکتا فسفات (Ca_8P) همبستگی در سطح یک درصد دیده شد. نتایج ورما و همکاران (Verma *et al.*, 2005) نشان داد که در خاک تیمار شده با کودهای آلی، تمام شکل‌های آلی و معدنی فسفر با فسفر قابل‌جذب گیاه و جذب فسفر توسط ذرت همبستگی نسبتاً خوبی دارند

مطالعه حیدری و همکاران (Heydari *et al.*, 2013) در تعدادی از خاک‌های آذربایجان شرقی نشان داد که تنها فسفر آلی غیرلبایل همبستگی معنی‌داری با فسفر قابل‌جذب، وزن خشک و مقدار جذب فسفر توسط ذرت داشت. شریعتمداری و همکاران (Shariatmadari *et al.*, 2007) با تفکیک شکل‌های فسفر آلی در تعدادی از خاک‌های آهکی نشان دادند که عملکرد ماده خشک گندم و جذب فسفر تحت تأثیر فسفر آلی ناپایدار و پایداری متوسط قرار می‌گیرد.

بررسی ارتباط بین شکل‌های فسفر معدنی و میزان جذب فسفر توسط گندم

جدول ۶- روابط همبستگی شکل‌های فسفر معدنی با فسفر جذب شده

Table 6. Correlation coefficient of inorganic P fractions with P uptake

	P uptake	Ca_2P	Ca_8P	AIP	FeP	OP	$Ca_{10}P$
P uptake	1						
Ca_2P	0.955*	1					
Ca_8P	0.971*	0.883	1				
AIP	-0.790	-0.676	-0.913	1			
FeP	-0.124	0.232	-0.157	0.183	1		
OP	0.904	0.991**	0.875	-0.711	0.310	1	
$Ca_{10}P$.6950	.8200	.7630	-0.781	0.462	0.889	1

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

نتیجه‌گیری کلی

شکل‌های کلسیمی فسفر با کاربرد کودهای آلی بیشتر بود و این موضوع اهمیت کاربرد این کودها را در حاصلخیزی خاک و تأمین فسفر موردنیاز را برای گندم نشان می‌دهد. بیشترین درصد سهم معدنی فسفر از آن آپاتیت بود. بعداز آن فسفات اکتا کلسیم، فسفات دی کلسیم، فسفر محبوس شده، آلومینیوم فسفات و آهن فسفات قرار گرفتند. بین شکل‌های کلسیمی فسفر (کلسیم دی فسفات و کلسیم اکتا فسفات) و فسفر جذب‌شده توسط گندم همبستگی معنی‌داری مشاهده شد. بین شکل‌های فسفر آلی ناپایدار، فسفر آلی با پایداری متوسط و فسفر آلی نسبتاً مقاوم و فسفر جذب‌شده توسط گندم همبستگی معنی‌داری مشاهده شد.

فسفر آلی به‌عنوان یک منبع تأمین‌کننده نیاز فسفر گیاه موردتوجه قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که کودهای آلی به‌طور قابل‌توجهی شکل‌های فسفر را تحت تأثیر قرار دادند به‌طوری‌که فسفر آلی نسبتاً مقاوم (Moderately Labile Organic Phosphorus) و فسفر آلی با پایداری متوسط (Moderately Labile Organic Phosphorus) با کاربرد کود گوسفندی بیشترین افزایش را نشان داد که اهمیت کاربرد کودهای آلی را در قابلیت جذب فسفر می‌رساند. تأثیر کودهای آلی بر شکل‌های مختلف فسفر آلی به‌صورت: سوپر فسفات تریپل >کمپوست زباله شهری > کود گوسفندی بود. در بین شکل‌های آلی فسفر، فسفر آلی نسبتاً مقاوم بیشترین سهم نسبی را به خود اختصاص داد. فراوانی

Reference

- Akhtar M., McCallister D.L., and Eskridge K.M. 2002. Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge amended soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33: 2057-2068.
- Borggard O.K., Jorgensen S.S., Meberg J. P., and Raben Lang B. 1990. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminum and iron oxides in sandy soils. *Journal of Soil Science*, 41: 443-449.
- Bowman R.A., and Cole C.V. 1978. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. *Journal of Soil Science*, 125: 95-101.
- Cheng YL, Cheng XL, Zou DY. 2009. Long-term Located Fertilizer Experiments after 15-years in Brown Soil Forms and Availability of Phosphate Nutrient. *Chinese Journal of Soil Science*, 40 (6): 1362-1366.
- Clup P.L., and Clup G.L. 1978. Advance Wastewater Treatment. 2nd ed., Van – Nostr and Rienhold Pub., New York.
- Delgado A., Madrid A., Kassem S., Andreu L., and Campillo M. C. 2002. Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fluvic acids. *Plant and Soil*, 245: 277-286.
- Foth H.D., and Ellis B.G. 1997. Soil Fertility. (2nd Ed.). CRC P Press LLC, Boca Raton, 290 p.
- Gomes-Costa M., Gama-Rodrigues A., Moraes J., Gama –Rodrigues E., and da-silva Aleixo M.S. 2016. Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under eucalyptus plantations, Brazil. *Forests*, 6: 1-15.
- Heydari N., Reyhanitabar A., Najafi N., and Ostan Sh. 2013. Relationships between inorganic and organic phosphorus fractions with corn growth and phosphorus uptake in some soils of East Azerbaijan Province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 3: 2. 237-250. (In Persian)
- Inskeep W.P., and Silvertooth J.C. 1998. Inhibition of hydroxy apatite precipitation in the presence of fulvic, humic, and tannic acids. *Soil Science Society America Journal*, 52: 941-946.
- Ivanoff D.B., Reddy K.R., and Robinson S. 1998. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. *Soil Science*, 163: 36-45.
- Jalali M., and Kolahchi Z. 2005. Availability of soil phosphorus resulting from different amounts of phosphorus fertilizer in soils of Hamedan province. *Soil and Water Science*, 19(1): 53-60. (In Persian)
- Jiang B., and Gu Y. 1989. A suggested fractionation scheme for inorganic phosphorus in calcareous soil. *Fertilizer Research*, 20: 150-165.

- Khademi Z., Balali M.R., Asadi F., Shahbazi K., Rezaei H., Feizolahzadeh M., Bazargan K., and Tehrani M.M. 2010. Improvement of macronutrient fertilizer use efficiencies and S and Mg role in increasing the yield and quality of wheat. Final report. Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO). Soil and Water Institute. Tehran Iran.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. In: Sparks D.L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods, pp. 551-574. *Soil Science Society of America*, Madison, WI.
- Larsen S. 1976. Soil phosphorus. *Advances in Agronomy*, 19:151-210.
- Liang L.Z., Zhao X.Q., Yi X.Y., Chen Z.C., Dong X.Y., Chen R.F., and Shen R.F. 2013. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China. *Soil Use and Management*, 29: 161- 168.
- Lopez-Pineiro A., Cabrera D., and Pena D. 2009. Phosphorus adsorption and fractionation in a two-phase olive mill waste amended soil. *Soil Science Society of America*, 73: 1539-1544.
- Maguire R.O., Sims J.T., and Coale F.J. 2000. Phosphorus fractionation in biosolids-amended soils: Relationship to soluble and desorb able phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 2018-2024.
- Malakooti M.J. and Keshavarz P. 2005. Look at the Fertility Status of Iranian Soils (Evaluation and Utilization). Ministry of Jihade- Agriculture, 514p. (In Persian)
- Moeini M., Hejazi Mehrizi M., and Jafari A. 2016. Determination of organic P fractions in a calcareous soil as affected by wheat cultivation and organic amendments. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(4): 79-95. (In Persian)
- Murphy J., and Riley J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-143.
- Nazari M.A., Shariatmadari H., Afyuni M., Mobli M., and Rahili, Sh. 2006. Effect of industrial sewage-sludge and effluents application on concentration of some elements and dry matter yield of wheat, barley and corn. *Journal of Water and Soil*, 10: 3. 97-111. (In Persian)
- Nwoke O.C., Vanlauwe B., Diels J., Sanginga N., and Osonubi O. 2004. Impact of residue characteristics on phosphorus availability in West African savanna soils. *Biology and Fertility of Soil*, 39: 422-428.
- Penn C, J., and Sims J.T. 2002. Phosphorus forms in biosolids – amended soils and losses in runoff, Effects of wastewater treatment process. *Journal of Environmental Quality*, 31: 1349-1362.
- Reddy D.D., Rao A.S., and Rupa T.R. 2005. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol. *Bioresource Technology*, 75: 113-118.
- Rhoads J.W. 1986. Cation exchange capacity, P 149-158. In: C.A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. ASA: Madison, WI.
- Salardini A.K. 2008. *Soil Fertility*. (8nd Ed.). Tehran University, 434p.
- Saleque M.A., Naher U.A., Islam A., Pathan A.B.M.B.U., Hossain, A.T.M.S., and Meisner, C.A. 2004. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soil. *Soil Science Society of America*, 68: 1635-1644.
- Samavati M. and Hosseinpoor A.R. 2009. Phosphorus fractions in some soils of Hamadan province and their relation to available phosphorus soil. *Soil and Water Science*, 20 (2), 234 - 248. (In Persian)
- Sample E.C., Soper R.J., and Racz G.J. 1980. Reactions of phosphate fertilizer in soils. pp. 263-310. In: Khasawneh F.E. et al. (Ed.) *the Role of phosphorus in Agriculture*. *American Society of Agronomy*, Madison, WI.
- Scherer H., and Sharma S. 2002. Phosphorus fractions and phosphorus delivery potential of a luvisol derived from loess amended with organic materials. *Biology and Fertility of Soils*, 53: 414-419.
- Shahbazi K., and Davoodi M.H. 2013. Evaluation of wheat phosphorous necessity with phosphorous absorption isotherm in calcareous soils. *Journal of Soil and Water Science*, 26: 1-17.
- Shariatmadari H., Shirvani M., Dehghan, R. 2007. Availability of organic and inorganic phosphorus fractions to wheat in toposequence of calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38: 2601-2617.

- Sharpley A.N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 905-911.
- Singh C.P., and Amberger A. 2001. Solubilization and availability of phosphorus during decomposition of rock phosphate enriched straw and urine. *Biological Agriculture and Horticulture*, 7: 261-269.
- Singh Y., Dobermann A., Singh B., Bronson K.F., Bronson C.S., and Khind C.S. 2000. Optimal phosphorus management. Strategies for wheat-rice cropping on loamy sand. *Soil Science Society America Journal*, 64: 1413-1420.
- Sui Y.B., and Thompson M.L. 2000. Phosphorus sorption/desorption and buffering capacity in a biosolids amended Mollisol. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 164-169.
- Taghizadeh Asl Z., Dordsipour E., Gholizadeh A.L., and Kiani F. 2009. Investigating the relation between plant available phosphorus and some of soil properties in soils of south of Gorgan roud. *Proceedings of the 11th Iranian Soil Science Congress*, Gorgan, Iran. (In Persian)
- Verma S., Subehia S.K., and Sharma S.P. 2005. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, 41: 295-300.
- Vu D.T., Tang C., and Armstrong R.D. 2008. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate. *Plant and Soil*, 304: 21-33.
- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Science*, 37: 29-38.
- Yang C., Yang L., and Jianhua L. 2006. Organic phosphorus fractions in organically amended soils in continuously and intermittently flooded conditions. *Journal of Environmental Quality*, 35: 1142-1150.
- Yin Y., and Liang C.H. 2013. Transformation of phosphorus fractions in paddy soil amended with pig manure. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13: 809-818.
- Zhang Y.S., Werner W., Scherer H.W., and Sun X. 1994. Effect of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils. *Biology and Fertility of Soils*, 26: 64-68.

Effect of Fertilizer Sources on Chemical and Organic Forms of Phosphorus under Wheat Cultivation in a Calcareous Soil

Jafar Shahabifar¹

(Received: September 2018 Accepted: April 2019)

Abstract

The distribution of phosphorus (P) forms is very important to evaluate the soil P in calcareous soils. Organic fertilizers increase the soil P dynamics by adding organic matter. This experiment was conducted by using 50 mg P kg⁻¹ soil from sheep manure (SM), municipal solid waste compost (MSWC) and triple superphosphate (TSP) treatments with control (without fertilizer) in a calcareous soil in greenhouse conditions. At the end of the plant's physiological growth, dry weight of shoots, phosphorus concentrations of wheat, organic and inorganic forms of soil P were measured. The results showed that by using of 50 mg P kg⁻¹ soil from SM, the highest P uptake by wheat was obtained from TSP treatment. All organic P forms significantly increased ($P < 0.05$) in comparison with the control, but Highly Resistant Organic Phosphorus (HROP) showed invers trend. Moderately Resistant Organic Phosphorus (MROP) had the highest of organic P fraction and the Labile Organic Phosphorus (LOP) was the least. The highest fraction of mineral phosphorus was the apatite form. By applying of 50 mg P kg⁻¹ soil from SM and TSP, Ca₂P form increased by 4.2 and 3.9 times compared to control respectively. The AIP form increased by applying SM. MSWC and TSP treatments at 31.0, 44.0 and 46% compared to control, respectively. According to the research data, with the application of 50 mg P kg⁻¹ soil from the source SM, increased organic phosphorus forms and by 50 mg P kg⁻¹ soil from the source TSP, increased phosphorus absorption and its mineral forms in wheat cultivation.

Keywords: Calcium phosphate, Compost, Labile phosphorus, Sheep manure, Triple super phosphate

Shahabifar J. 2020. Effect of fertilizer sources on chemical and organic forms of phosphorus under wheat cultivation in a calcareous soil. *Applied Soil Research*. 8(1): 92-107.

1. Research coach of Soil and Water Research Section, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Qazvin, Iran.

* Corresponding Author Email: shahabifar1@yahoo.com