

تأثیر مصرف سوپرفسففات تریپل و کشت گندم بر شکل‌های معدنی فسفر در خاک‌های آهکی دشت قزوین

جعفر شهبابی^۱، ابراهیم پناه‌پور^{۲*}، فرهاد مشیری^۳، علی غلامی^۴، مهرزاد مستشاری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۱۶)

چکیده

آگاهی از شکل‌های معدنی فسفر در خاک از نظر حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه مهم است. این پژوهش به منظور تعیین اشکال معدنی فسفر با مصرف سوپرفسففات تریپل و کشت گندم در شرایط خاک‌های آهکی در دو مرحله انکوباسیون و گلخانه به مرحله اجرا درآمد. آزمایش انکوباسیون روی سه خاک دیزان، قزوین ۱ و قزوین ۲ با مقادیر متفاوت فسفر قابل جذب در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام پذیرفت. در هر خاک ۵۰ میلی گرم فسفر برکیلوگرم خاک از منبع سوپرفسففات تریپل به کار برده شد. در زمان‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ روز، شکل‌های معدنی فسفر خاک شامل: Ca_2P ، Ca_8P ، OP ، FeP و $Ca_{10}P$ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تثبیت شکل‌های فسفر تحت تأثیر نوع خاک مورد مطالعه بود. در خاک دیزان، غلظت Ca_2P به ترتیب ۶۷/۵ و ۷۳/۸ درصد، Ca_8P ۷۴/۵ و ۵۹/۷ درصد، AIP ۳۱/۹ و ۵۰/۳ درصد، FeP ۴۷/۹ و ۶۳/۷ درصد، OP ۵۰/۷ و ۶۰ درصد و $Ca_{10}P$ ۶۲/۸ و ۶۹ درصد بیشتر از خاک‌های قزوین ۱ و قزوین ۲ بود. کاربرد فسفر تأثیر زیادی در افزایش غلظت شکل‌های Ca_2P و Ca_8P در هر سه خاک، و با شدت بیشتر در دیزان داشت. بیشترین غلظت اندازه‌گیری شده شکل‌های Ca_2P ، Ca_8P ، AIP ، FeP و OP در زمان T_{45} و T_{90} حاصل شد. آزمایش گلخانه بر روی سه خاک مذکور و با کاربرد ۵۰ میلی گرم فسفر برکیلوگرم خاک از منبع سوپرفسففات تریپل با کشت گندم در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. غلظت شکل‌های فسفر در شرایط گلخانه در خاک دیزان نسبت به سایر خاک‌ها بالاتر بود. در شرایط انکوباسیون، کاربرد ۵۰ میلی گرم برکیلوگرم فسفر، اشکال فسفر نسبت به شرایط کشت گندم با کاهش ۳۰/۶۳، ۱۲/۱، ۷/۱۷، ۳/۳۳ میلی گرم برکیلوگرم برای Ca_2P ، Ca_8P ، AIP و FeP همراه بود. مقادیر تثبیت Ca_2P با کشت گیاه کاهش محسوسی داشت.

واژه‌های کلیدی: آهک، انکوباسیون، سری خاک، شکل معدنی فسفر، گندم

۱- دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- گروه خاکشناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران (مکاتبه کننده)

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

۴- موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

* پست الکترونیک: e.panahpour@iauhvaz.ac

مقدمه

میانگین ۱۵۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. دامنه تغییرات فسفات‌های کلسیم ۱۸۷۲-۱۰۴ با میانگین ۸۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود که ۷۸/۵ درصد فسفر معدنی و ۵۲/۳ درصد از فسفر کل را تشکیل می‌دهد که شکل غالب فسفر خاک است. دامنه تغییرات فسفات پیوند شده با آهن ۱۸۵ - ۱ با میانگین ۵۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک که ۵/۸ درصد از فسفر معدنی و ۳/۸ درصد از فسفر کل را تشکیل می‌دهد. دامنه تغییرات فسفات پیوند شده با آلومینیوم ۵۲۳ - ۵ با میانگین ۱۲۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک که ۱۲/۵ درصد از فسفر معدنی و ۸/۳ درصد از فسفر کل را تشکیل می‌دهد. فسفر محبوس شده درون اکسیدهای آهن ۳۷۱ - ۰ با میانگین ۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک که ۳/۲ درصد از فسفر معدنی و ۲/۲ درصد از فسفر کل را تشکیل می‌دهد. تجدا و همکاران (Tejada *et al.*, 2006) اعلام کردند که توزیع فسفر در خاک به صورت شکل‌های مختلف ژئوشیمیایی شامل محلول و تبادل‌ی خاک، ترکیبات آلی پیوند یافته با کلسیم و آهن و آلومینیوم صورت می‌گیرد. این اجزاء فسفر به طور قابل ملاحظه‌ای در میزان تحرک، قابلیت دسترسی زیستی و رفتارهای شیمیایی در خاک، تفاوت داشته و تحت شرایط خاص تغییر شکل می‌دهند. این اطلاعات به طور بالقوه برای پیش بینی تغییر شکل فسفر بین شکل‌های شیمیایی در خاک های کشاورزی با ارزش هستند.

سماواتی و حسین‌پور (Samavati & Hosseinpoor, 2009) در بررسی اجزای مختلف فسفر معدنی در برخی از خاک‌های استان همدان، مشخص کردند که فسفات‌های کلسیم که شکل غالب فسفر خاک هستند، ۷۸/۵ درصد فسفر معدنی و ۵۲/۳ درصد از فسفر کل را تشکیل می‌دهند فسفات پیوند شده با آهن ۵/۸ درصد از فسفر معدنی و ۳/۸ درصد از فسفر کل، فسفات پیوند شده با آلومینیوم ۱۲/۵ درصد از فسفر معدنی و ۸/۳ درصد از فسفر کل، فسفر محبوس شده درون اکسیدهای آهن نیز ۳/۲ درصد از فسفر معدنی و ۲/۲ درصد از فسفر کل را تشکیل می‌دهند.

مستشاری (Mostashari, 2009) در بررسی ارزیابی شاخص‌های موثر بر راندمان جذب فسفر از خاک‌های آهکی در الگوهای کاشت، ترتیب فراوانی فسفر را به

تعیین توزیع فراوانی اجزای مختلف فسفر در خاک‌های آهکی، به ارزیابی هر چه بهتر وضعیت فسفر خاک کمک می‌کند. نظر به این که فراهمی فسفر برای گیاه به جایگزینی فسفر قابل دسترس توسط اجزای مختلف فسفر وابسته است، عصاره‌گیری جزء به جزء یک ابزار مناسب در ارزیابی وضعیت فسفر خاک و پتانسیل خاک در فراهمی فسفر برای گیاه می‌باشد. قابلیت جذب فسفر برای گیاهان، به مقدار شکل‌های مختلف فسفر بستگی دارد و تعیین شکل‌های مختلف فسفر، آن دسته از اجزایی را که در آزاد شدن فسفر طی مدت عصاره‌گیری فسفر قابل جذب نقش دارند، مشخص می‌کند. بنابراین مطالعات جداسازی اجزای مختلف فسفر برای به دست آوردن اطلاعاتی درباره پتانسیل فسفر قابل جذب و تحرک فسفر خاک مفید است. علی‌رغم فراوانی فسفر در خاک‌های آهکی، مقدار قابل جذب این عنصر در بسیاری از موارد کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد مناسب گیاه است. شکل عمده فسفر در خاک‌های آهکی فسفات‌های کلسیم (هیدروکسی آپاتیت و فلوئوروآپاتیت) می‌باشد. ملکوتی و کشاورز (Malakooti & Keshavarz, 2005) گزارش کردند که قابلیت جذب فسفر در خاک تحت تأثیر عوامل متعددی بوده که از جمله این عوامل می‌توان به واکنش قلیایی خاک، مقدار زیاد کربنات کلسیم (آهک)، مقدار اندک مواد آلی، وفور کاتیون‌های بازی و اثر متقابل سایر عناصر اشاره کرد.

محمودسلطانی و صمدی (Mahmoudsoltani & Samadi, 2003) در بررسی شکل‌های مختلف فسفر معدنی برخی خاک‌های آهکی استان فارس، گزارش دادند که در خاک‌های مورد مطالعه، فسفر معدنی ۷۳ درصد و فسفر آلی ۲۷ درصد از فسفر کل را شامل می‌شد. میزان فسفر کل در خاک‌های بافت سبک با میانگین ۴۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم کمتر از خاک‌های بافت سنگین با میانگین ۶۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. سماواتی و حسین‌پور (Samavati & Hosseinpoor, 2009) در بررسی اجزای مختلف فسفر معدنی در برخی از خاک‌های استان همدان مشخص کردند که دامنه اجزای مختلف فسفر دارای تغییرات نسبتاً زیادی بود. تغییرات فسفر کل خاک‌ها در دامنه ۲۶۸۶-۹۲۶ با

هارل و وانگ (Harrell & Wang, 2006) در تعدادی از خاک‌های آهکی نشان دادند که فسفات کلسیم و فسفر پیوند شده با آلومینیوم، همبستگی‌های معنی‌داری با شاخص‌های گیاهی داشته، ولی فسفر پیوند شده با آهن هیچگونه همبستگی را نشان نداد. سماواتی و حسین‌پور (Samavati & Hosseinpoor, 2009) در بررسی اجزای مختلف فسفر معدنی و قابلیت فراهمی آن در تعدادی از خاک‌های استان همدان، نشان دادند که شکل‌های کلسیمی فسفات (دی و اکتاکلسیم فسفات) بیشترین تأثیر را بر شاخص‌های گیاهی و جذب فسفر داشتند.

گرچه پژوهش‌های فراوانی در خصوص شکل‌های معدنی فسفر انجام شده است، اما با توجه به اینکه فسفر به شکل‌های مختلفی در خاک وجود دارد (که می‌تواند برحاصلخیزی خاک و فسفر قابل جذب تأثیر داشته باشد) و از طرف دیگر در مورد وضعیت اجزای مختلف فسفر در خاک‌های دشت قزوین اطلاعات چندانی در دست نیست، این مطالعه با هدف تعیین شکل‌های مختلف فسفر در برخی از خاک‌های استان قزوین و چگونگی تأثیر کشت گیاه بر فراوانی این اشکال در شرایط انکوباسیون و گلخانه به مرحله اجرا در آمد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در شرایط انکوباسیون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۷۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه در سه سری خاک دیزان، قزوین ۱ و قزوین ۲ با مقادیر متفاوت فسفر قابل استفاده انجام شد. در هر خاک مقادیر صفر و ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع کود سوپرفسفات تریپل به‌کار برده شد. در زمان‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ روز انکوباسیون، شکل‌های معدنی فسفر خاک اندازه‌گیری گردید. شکل‌های مورد بررسی در این آزمایش شامل Ca_2P (کلسیم دی‌فسفات)، Ca_8P (کلسیم اکتافسفات)، AIP (آلومینیوم فسفات)، OP (فسفر محبوس)، FeP (آهن فسفات) و $Ca_{10}P$ (آپاتیت) بود. در آزمایشات گلخانه، تیمارهای مورد استفاده شامل سه خاک دیزان، قزوین ۱ و قزوین ۲ با مقادیر متفاوت فسفر قابل استفاده با کاربرد صفر و ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع کود سوپرفسفات تریپل و از رقم گندم پیش‌تاز استفاده شد. ابتدا بذور اصلاح و ضدعفونی شده گندم در رطوبت مناسب برای جوانه زنی

صورت آپاتیت < اکتا کلسیم فسفات < فسفات آلومینیوم < فسفات آهن < فسفر محبوس شده < دی کلسیم فسفات گزارش کرد.

مستشاری و همکاران (Mostashari *et al.*, 2008) در آزمایشی تحت عنوان تأثیر تناوب زراعی و نوع خاک بر روی شکل‌های معدنی فسفر در شرایط با و بدون مصرف کود فسفره در کشت ذرت- گندم، نشان دادند که در شرایط بدون مصرف کود فسفره و بدون کشت گیاه، ابتدا کاهش و سپس افزایش فسفر اولسن مشاهده گردید. ولی در شرایط کشت گیاه، ابتدا افزایش و سپس کاهش فسفر اولسن وجود داشت. در شرایط مصرف کود فسفره، با گذشت زمان میزان فسفر اولسن خاک کاهش یافت. به طوری که این کاهش در نتیجه تثبیت فسفر در شرایط مصرف دو مرحله‌ای کود فسفره بیشتر به دست آمد. ضمناً سرعت تثبیت در شرایط کشت گیاه کندتر از شرایط بدون کشت بود.

صمدی و جیلکز (Samadi & Gilkes, 1999) به منظور بررسی شکل‌های فسفر در خاک‌های آهکی و دارای pH بالاتر از ۸ غرب استرالیا، روش جیانگ و گو (Jiang & Gu, 1989) را مورد استفاده قرار داده و دریافتند که فراوانی شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های غیرزراعی که کود دریافت نکرده‌اند، به‌صورت اکتا کلسیم فسفات > آپاتیت دی کلسیم فسفات > فسفات‌های آهن > فسفات‌های محبوس > فسفات‌های آلومینیوم، بود. اما در خاک‌های کود داده شده، این فراوانی به‌صورت فسفات - های محبوس > فسفات‌های آهن > آپاتیت > دی کلسیم فسفات > اکتاکلسیم فسفات > فسفات‌های آلومینیوم، تغییر کرد. لی‌لین‌فین و همکاران (Lilienfein *et al.*, 2000) و سینک و همکاران (Singh *et al.*, 2000) تأثیر معنی‌دار کشت گیاه بر شکل‌های معدنی فسفر را تأیید کرده اند. گو و همکاران (Guo *et al.*, 2000) به این نتیجه رسیدند که فسفر قابل استخراج با سدیم بیکربنات و سدیم هیدروکساید، بر اثر جذب فسفر توسط گیاه به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین در بررسی تغییرات شکل‌های فسفر در خاک‌های تحت کشت گیاه، نشان دادند در خاک‌هایی که مقادیر زیادی کود فسفوری دریافت داشته‌اند، دی و اکتاکلسیم فسفات بیشترین تأثیر را بر شاخص‌های جذب گیاهی داشته و می‌توانند در دراز مدت مورد استفاده قرار گیرند.

تحلیل داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطوح ۱ و ۵ درصد استفاده شد. قبل از اجرای پروژه، اقدام به- نمونه‌برداری خاک گردید که نتایج آن‌ها به شرح جدول ۱ می‌باشد. pH خاک در گل اشباع (توماس، Thomas) ۱۹۹۶، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک به روش آلیسون و مودی (Allison & Moodie, 1965)، کربن آلی به روش سوزاندن والکلی و بلاک (نلسون و سامرز Nelson & Sommer, 1982)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (کائو Kuo, 1996)، فسفر کل به روش هضم با اسیدپرکلریک (کائو Kuo, 1996)، بافت خاک به روش هیدرومتری (بویکوس Bouyoucos, 1962) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم (چپمن Chapman, 1965) تعیین گردید.

قرار داده شدند و پس از رویت جوانه‌ها، به مدت ۷۲ ساعت در داخل یخچال جهت انجام ورنالیزاسیون قرار گرفتند. سپس جوانه‌ها در یک گلدان محتوی ۱/۵ کیلوگرم خاک تیمار شده در عمق سطحی کشت شده و در شرایط گلخانه نگهداری شدند. گلدان‌ها هر روز بر اساس رطوبت وزنی و رسیدن به نقطه ظرفیت زراعی با آب مقطر آبیاری شده و تا زمان پنجه‌زنی کامل به مدت ۶۰ روز تحت مراقبت و تیمار قرار گرفتند. پس از سپری شدن زمان مذکور، اقدام به نمونه‌برداری از خاک گلدان‌های تحت آزمایش در ناحیه توسعه ریشه و تعیین شکل‌های معدنی فسفر خاک گردید. هر دو آزمایش به صورت آزمایشات فاکتوریل، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. برای تجزیه و

جدول ۱ - برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

Table 1. Some physical and chemical characteristics of studied soils

Soil series	CEC	Clay	Silt	Sand	OC	T.N.V	EC	Ptot.	Pava.	pH
	($\text{cm}_c \text{kg}^{-1}$)						(dS m^{-1})			
Dizan	17.30	18	52	30	0.87	28.32	1.22	677	13.2	7.9
Qazvin ₁	16.22	8	32	60	0.58	8.20	0.80	241	4.4	7.5
Qazvin ₂	15.97	8	34	58	0.96	7.40	0.70	330	8.4	7.6

pH: واکنش خاک؛ Pava: فسفر قابل جذب؛ Ptot: فسفر کل؛ EC: هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک؛ N.V: کربنات کلسیم؛ OC: کربن آلی؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی خاک

Pava: Phosphorus available; Ptot: Phosphorus total; EC: Electrical Conductivity of soil saturation extract; T.N.V: Calcium carbonate; OC: Organic Carbon; CEC: Cation Exchangeable Capacity

جدول ۲ - تعیین شکل‌های معدنی فسفر

Table 2. Determination of phosphorus mineral forms

Mineral phosphorus form	Measurement methods
di Calcium phosphate (Ca_2P)	1 hour shaker, pH =7.5, dry soil of the juicer (NaHCO_3 : 0.25 M) 1:50
octa Calcium phosphate (Ca_8P)	1 hour shaker, pH =4.5, dry soil of the juicer (NH_4AC : 0.50 M) 1:50
Aluminum phosphate (AlP)	1 hour shaker, pH =8.2, dry soil of the juicer (NH_4F : 0.50 M) 1:50
Iron phosphate (FeP)	2 hour shaker, dry soil of the juicer (Na_2CO_3 0.10 N & NaOH 0.10 N) 1:50
Phosphorus trapped (OP)	10 minutes shaker, dry soil of the juicer (citrate-bicarbonate-dithionite) 1:45
Apatite (Ca_{10}P)	1 hour shaker, dry soil of the juicer (H_2SO_4 : 0.25 M) 1:50

شکل‌های Ca_2P ، Ca_8P ، OP و Ca_{10}P فسفر معنی‌دار بود. اثر اصلی زمان انکوباسیون و نیز برهمکنش خاک و زمان بر اشکال Ca_2P ، Ca_8P ، AlP، FeP و Ca_{10}P معنی‌دار بود. برهمکنش کود و زمان بر اشکال Ca_2P ، Ca_8P ، FeP و OP معنی‌دار بود و بالاخره برهمکنش خاک، کود و زمان بر اشکال Ca_2P ، Ca_8P و OP معنی‌دار شد.

نتایج و بحث

بخش انکوباسیون

میانگین مربعات شکل‌های فسفر مورد آزمایش در شرایط انکوباسیون (جدول ۳) نشان داد که اثرات اصلی خاک و کود به تنهایی بر کلیه شکل‌های معدنی فسفر در سطح بالایی معنی‌دار بود. برهمکنش خاک و کود بر

جدول ۳- میانگین مربعات اشکال مورد آزمایش در شرایط انکوباسیون

Table 3. Mean Square forms in the conditions of incubation

Source of variation	df	Ca ₂ P	Ca ₈ P	AIP	FeP	OP	Ca ₁₀ P
Replication	2	24.6 [*]	33.8 ^{ns}	0.8 ^{ns}	2.0 [*]	0.001 ^{ns}	14.950 ^{ns}
Soil factor	2	4631.7 ^{**}	44849.9 ^{**}	352.0 ^{**}	405.3 ^{**}	368.8 ^{**}	231579.8 ^{**}
Fertilizer factor	1	10743.6 ^{**}	5577.2 ^{**}	32.5 ^{**}	15.2 ^{**}	39.2 ^{**}	448.4 ^{**}
Soil*Fertilizer	2	3194.0 ^{**}	68.6 ^{**}	5.6 ^{ns}	1.2 ^{ns}	17.3 ^{**}	296.1 ^{**}
Time factor	2	2508.0 ^{**}	1230.2 ^{**}	21.4 ^{**}	2.9 ^{**}	0.76 ^{ns}	294.3 ^{**}
Soil*Time	4	910.7 ^{**}	240.5 ^{**}	13.3 ^{**}	2.5 ^{**}	1.6 ^{ns}	806.6 ^{**}
Fertilizer*Time	2	198.8 ^{**}	1637.8 ^{**}	0.664 ^{ns}	3.5 ^{**}	11.137 ^{**}	87.9 ^{ns}
Soil*Fertilizer*Time	4	973.7 ^{**}	66.6 ^{**}	2.561 ^{ns}	0.6 ^{ns}	3.8 ^{**}	92.2 ^{ns}
Error	34	5.9	27.021	4.186	0.6	0.7	54.725
CV (%)	-	11.69	5.08	16.43	8.26	9.29	4.32

*در سطح ۵ درصد معنی دار، ** در سطح ۱ درصد معنی دار، ns معنی دار نیست.

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

بود. در سری دیزان غلظت اندازه‌گیری شده کلیه اشکال فسفر با کاربرد کود فسفوری نسبت به عدم کاربرد (-P) به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. در حالی‌که مقادیر غلظت در اشکال Ca₈P و Ca₂P در خاک‌های قزوین ۱ و قزوین ۲ با کاربرد فسفر بالاتر بود، اما غلظت FeP و OP فقط در سری قزوین ۱ اختلاف معنی‌داری را در شرایط کاربرد فسفر نشان دادند (جدول ۵).

تأثیر نوع خاک بر تغییرات شکل‌های معدنی فسفر در بین خاک‌های بررسی شده، خاک سری دیزان نسبت به سری‌های قزوین ۱ و قزوین ۲ مقادیر بالاتری از کلیه شکل‌های معدنی فسفر را نشان داد (جدول ۴). با کاربرد ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (+P) کلیه شکل‌های معدنی فسفر در سری خاک دیزان، نسبت به سایر خاک‌ها با کاربرد فسفر به‌طور معنی‌داری بالا بود. این مسئله گویای ظرفیت بالای تثبیت توسط خاک دیزان

جدول ۴- اثر اصلی خاک بر غلظت شکل‌های فسفر (دانکن ۵٪)

Table 4. The main effect of soil on concentration of phosphorus forms (Duncan 5%)

Soil series	Ca ₁₀ P	OP	FeP	AIP	Ca ₈ P	Ca ₂ P
Dizan	310.7 ^a	14.02 ^a	14.31 ^a	17.20 ^a	158.8 ^a	39.21 ^{a**}
Qazvin ₁	115.5 ^b	6.91 ^b	7.46 ^b	11.71 ^b	84.34 ^b	12.76 ^b
Qazvin ₂	96.38 ^c	5.61 ^c	5.20 ^c	8.45 ^c	63.92 ^c	10.26 ^c

* واحد بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم است. ** در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

*Unites per mg kg⁻¹. **In each column, means with dissimilar letters have significant difference

جدول ۵- میانگین مقادیر شکل‌های فسفر ناشی از کاربرد سطوح مختلف فسفر در خاک (دانکن ۵٪)

Table 5. Average amount phosphorus fractions from using of phosphorus levels in soil (Duncan 5%)

Soil series	Ca ₁₀ P	OP	FeP	AIP	Ca ₈ P	Ca ₂ P	Treatment
Dizan	308.80 ^a	16.00 ^a	15.10 ^a	18.47 ^a	171.2 ^a	68.68 ^{a**}	+P
	294.60 ^b	12.03 ^b	13.52 ^b	15.93 ^b	146.4 ^b	9.73 ^d	-P
Qazvin ₁	118.00 ^c	7.26 ^c	7.99 ^c	12.60 ^c	93.11 ^c	19.76 ^b	+P
	112.90 ^c	6.57 ^d	6.92 ^d	10.82 ^c	75.57 ^d	5.76 ^e	-P
Qazvin ₂	95.37 ^d	5.83 ^{de}	5.47 ^e	8.62 ^d	73.24 ^d	16.10 ^c	+P
	97.36 ^d	5.38 ^e	4.93 ^e	8.28 ^d	54.60 ^e	4.41 ^e	-P

* واحد بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم است. ** در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

*Unites per mg kg⁻¹. **In each column, means with dissimilar letters have significant difference

در دوره‌های زمانی انکوباسیون تثبیت شد. غلظت Ca₈P در زمان T₄₅ بالاترین میزان را داشته و نسبت به زمان‌های T₀ و T₉₀ به ترتیب ۱۷/۶۰ و ۱۴/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بالاتر بود. در زمان‌های T₀ و T₉₀ میزان تثبیت AIP مشابه بود، اما نسبت به T₂ این رقم به طور

تغییرات شکل‌های معدنی فسفر در طول انکوباسیون بیشترین میزان تثبیت Ca₂P در زمان T₄₅ مشاهده شد. به گونه‌ای که ترتیب ۳۰/۶۳ و ۱۱/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمارهای T₀ و T₉₀ به بالاتر بود. شکل Ca₈P با روندی مشابه Ca₂P اما با غلظت‌های بالاتر

کمترین میزان تثبیت را نشان داد، به گونه‌ای که این غلظت نسبت به زمان T₀ و T₉₀ به ترتیب ۹/۳۰ و ۸/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمتر بود (جدول ۶).

معنی‌داری کمتر بود. FeP در زمان‌های T₀ و T₉₀ از نظر میزان تثبیت شده مشابه، اما نسبت به T₄₅ کمتر بود. OP در طول دوره انکوباسیون در برابر تثبیت مقاوم بود و تأثیر معنی‌داری را نشان نداد. Ca₁₀P در زمان T₄₅

جدول ۶- میانگین غلظت شکل‌های فسفر در طول دوره انکوباسیون (دانکن ۵٪)*

Table 6. Average concentrations of phosphorus forms during incubation period (Duncan 5%)

Treatment	Ca ₂ P	Ca ₈ P	AIP	FeP	OP	Ca ₁₀ P
T ₀	8.03 c**	96.14 b	11.54 b	9.39 a	8.62 a	175.7 a
T ₄₅	31.37 a	111.70 a	13.66 a	8.59 b	8.98 a	167.0 b
T ₉₀	22.82 b	99.15 b	12.16 b	8.99 ab	8.93 a	170.0 b

* واحدها برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم است. ** در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

*Unites per mg kg⁻¹. ** In each column, means with dissimilar letters have significant difference

با گذشت زمان انکوباسیون، در سری دیزان، مقادیر غلظت‌های اندازه‌گیری شده شکل‌های Ca₂P، Ca₈P، AIP و OP در T₄₅ بیشتر از T₀ و T₉₀ بود. در سری قزوین ۱ غلظت اندازه‌گیری شده Ca₂P در T₄₅ بیشتر از T₀ و T₉₀ بود. غلظت Ca₈P در T₄₅ و T₉₀ یکسان و کمتر از T₀ بود. غلظت Ca₁₀P در T₀ و T₄₅ یکسان و کمتر از T₉₀ بود. با گذشت زمان انکوباسیون شکل‌های معدنی AIP، FeP و OP در برابر تثبیت مقاوم بودند. در سری قزوین ۲ غلظت اندازه‌گیری شده Ca₂P و Ca₈P در T₄₅ بیشتر از T₀ و T₉₀ بود. غلظت Ca₈P در T₄₅ و T₉₀ یکسان و کمتر از T₀ بود. غلظت Ca₁₀P در T₀ و T₄₅ از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت، اما کمتر از T₉₀ بود. با گذشت زمان انکوباسیون شکل‌های معدنی AIP، FeP و OP در برابر تثبیت مقاوم بودند (جدول ۷).

تأثیر نوع خاک بر تغییرات شکل‌های معدنی فسفر خاک در طول دوره انکوباسیون

با گذشت زمان انکوباسیون، در سری دیزان مقادیر غلظت‌های اندازه‌گیری شده شکل‌های Ca₂P، Ca₈P، AIP و OP در T₄₅ بیشتر از T₀ و T₉₀ بود. در سری قزوین ۲ غلظت اندازه‌گیری شده Ca₂P در T₄₅ بیشتر از T₀ و T₉₀ بود. Ca₈P در T₄₅ و T₉₀ یکسان و کمتر از T₀ بود. Ca₁₀P در T₀ و T₄₅ یکسان و کمتر از T₉₀ بود. با گذشت زمان انکوباسیون شکل‌های معدنی AIP، FeP و OP در برابر تثبیت مقاوم بودند. در سری قزوین ۲ غلظت اندازه‌گیری شده Ca₂P و Ca₈P در T₄₅ بیشتر از در T₀ و T₉₀ بود. مقادیر غلظت Ca₈P در T₄₅ و T₉₀ یکسان و کمتر از T₀ بود. غلظت Ca₁₀P در T₀ و T₄₅ از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت، اما کمتر از T₉₀ بود. با گذشت زمان انکوباسیون، شکل‌های معدنی AIP، FeP و OP در برابر تثبیت مقاوم بودند (جدول ۷).

جدول ۷- تأثیر نوع خاک بر شکل‌های فسفر در طول دوره انکوباسیون (دانکن ۵٪)*

Table 7. The effect of soil type on phosphorus forms during incubation period (Duncan 5%)

Soil series	Treatment	Ca ₂ P	Ca ₈ P	AIP	FeP	OP	Ca ₁₀ P
Dizan	T ₀	11.28 d**	149.80 b	14.62 b	15.45 a	13.25 b	305.30 b
	T ₄₅	62.78 a	176.10 a	20.13 a	13.25 c	14.70 a	285.50 c
	T ₉₀	43.55 b	105.40 b	16.85 b	14.23 b	14.10 ab	314.20 a
Qazvin ₁	T ₀	7.55 e	79.25 d	11.40 c	7.27 d	7.12 c	118.70 d
	T ₄₅	17.30 c	88.05 c	12.15 c	7.37 d	6.83 c	119.90 d
	T ₉₀	13.42 d	85.72 c	11.58 c	7.73 d	6.78 cd	107.70 e
Qazvin ₂	T ₀	5.27 e	59.42 f	8.62 d	5.45 e	5.48 e	103.00 ef
	T ₄₅	14.02 d	71.03 e	8.70 d	5.15 e	5.42 e	97.98 f
	T ₉₀	11.48 d	1.32 f	8.03 d	5.00 e	5.92 de	88.15 g

* واحدها برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم است. ** در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

*Unites per mg kg⁻¹. ** In each column, means with dissimilar letters have significant difference

تأثیر نوع خاک و کود بر شکل‌های معدنی فسفر در طول دوره انکوباسیون در جدول ۸ آمده است. در سری دیزان با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک،

تأثیر نوع خاک و کود بر تغییرات شکل‌های معدنی فسفر خاک در طول دوره انکوباسیون

نبودند. در این خاک غلظت Ca_8P در شرایط کاربرد فسفر، در زمان T_0 کمترین میزان تثبیت را نشان داد. در حالی که در شرایط عدم مصرف فسفر، در زمان‌های مختلف اختلاف معنی‌داری در میزان غلظت این شکل معدنی فسفر مشاهده نشد. غلظت AIP با و بدون کاربرد فسفر، در همه زمان‌های انکوباسیون در برابر تثبیت مقاوم بود به طوری که افزایش معنی‌داری در این شکل معدنی فسفر مشاهده نشد. شکل معدنی FeP با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در ابتدای دوره زمانی انکوباسیون، از تثبیت کمتری برخوردار بود. به گونه‌ای که در این زمان با کاهش ۰/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، نسبت به T_{45} و ۱/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_{90} همراه بود. در شرایط عدم کاربرد فسفر، کمترین میزان تثبیت در زمان T_{45} دیده شد. غلظت OP با و بدون کاربرد فسفر، در همه زمان‌های انکوباسیون افزایش معنی‌داری را نشان نداد. در حالی که غلظت شکل معدنی $Ca_{10}P$ در شرایط کاربرد فسفر اختلاف آماری را نشان نداد، در شرایط عدم کاربرد فسفر، در پایان دوره انکوباسیون از کمترین غلظت برخوردار بود. در سری قزوین ۲ با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، شکل معدنی Ca_2P افزایش معنی‌داری را در زمان T_{45} نسبت به T_0 و T_{90} نشان داد. این افزایش غلظت ۲۳/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به زمان T_0 و ۹/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_{90} بود. در شرایط عدم مصرف کود فسفوری، مقادیر تثبیت Ca_2P در زمان‌های انکوباسیون معنی‌دار نبودند. در این خاک غلظت Ca_8P در شرایط کاربرد فسفر، در زمان T_0 کمترین میزان تثبیت را نشان داد. در حالی که در شرایط عدم مصرف فسفر، در زمان‌های مختلف اختلاف معنی‌داری در میزان غلظت این شکل معنی فسفر مشاهده نشد. غلظت شکل‌های AIP و FeP با و بدون کاربرد فسفر در همه زمان‌های انکوباسیون در برابر تثبیت مقاوم بود. به طوری که افزایش معنی‌داری در این شکل معدنی فسفر مشاهده نشد. غلظت شکل معدنی $Ca_{10}P$ با کاربرد فسفر در زمان‌های T_{45} و T_{90} از نظر آماری یکسان بود، اما در زمان T_{90} با کاهش معنی‌دار ۱۵/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به ابتدای دوره انکوباسیون همراه بود. در شرایط عدم کاربرد فسفر این شکل معدنی در پایان دوره انکوباسیون کمترین میزان تثبیت را نشان داد.

شکل معدنی Ca_2P افزایش معنی‌داری را در زمان T_{45} نسبت به سایر تیمارها نشان داد. این افزایش غلظت ۲۷/۱۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به زمان T_0 و ۴۲/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_{90} بود. در این خاک در شرایط عدم مصرف کود فسفوری، مقادیر تثبیت Ca_2P به طور معنی‌داری در زمان T_{45} کاهش یافت. در این خاک غلظت Ca_8P با روندی مشابه در شرایط مصرف کود و متفاوت در شرایط شاهد همراه بود. به طوری که با افزایش غلظت ۵۱/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در زمان T_{45} و کاهش ۳۸/۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_{90} داشت. در غلظت Ca_8P در شرایط شاهد، در زمان‌های T_0 و T_{45} تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اما با کاهش ۱۲/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی‌داری نسبت به T_{90} داشت. در زمان T_{45} ، غلظت AIP با افزایش معنی‌دار ۵/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_0 و ۴/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_{90} تفاوت شرایط شاهد، غلظت AIP در زمان‌های T_{45} و T_{90} تفاوت معنی‌داری با T_0 نشان داد و با افزایش ۵/۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_0 همراه بود. در حالی که در شرایط کاربرد فسفر شکل معدنی FeP از نظر آماری در طول دوره زمانی تفاوت معنی‌داری را نشان نداد، در شرایط عدم کاربرد فسفر، در پایان دوره انکوباسیون با کمترین میزان تثبیت همراه بود. با گذشت زمان انکوباسیون غلظت شکل OP با کاربرد فسفر، در زمان‌های T_{45} و T_{90} از نظر آماری یکسان و به ترتیب ۳/۶۳ و ۴/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بیشتر از T_0 بود. غلظت OP در شرایط عدم کاربرد فسفر در زمان‌های T_0 و T_{45} از نظر آماری یکسان و کمتر از T_{90} بود. در شکل $Ca_{10}P$ در زمان‌های T_0 و T_{45} از نظر آماری یکسان و کمتر از T_{90} بود. در شرایط عدم کاربرد فسفر در زمان T_{45} با کاهش ۲۰/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_0 و ۲۷/۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_{90} ، از کمترین میزان تثبیت برخوردار بود. در سری قزوین ۱ با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، شکل معدنی Ca_2P افزایش معنی‌داری را در زمان T_{45} نسبت به T_0 و T_{90} نشان داد. این افزایش غلظت ۲۳/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به زمان T_0 و ۹/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به T_{90} بود. در شرایط عدم مصرف کود فسفوری مقادیر تثبیت Ca_2P در زمان‌های انکوباسیون معنی‌دار

جدول ۸- تاثیر خاک و کود بر شکل‌های فسفر در طول دوره انکوباسیون (دانکن ۵٪)*

Table 8. The effect of soil and fertilizer on phosphorus forms during the incubation period (Duncan 5%)

Soil series	Fertilizer treatment	Time treatment	Ca ₂ P	Ca ₈ P	AIP	FeP	OP	Ca ₁₀ P
Dizan	+P	T ₀	11.23 ^{fr*}	149.90 ^c	16.37 ^{bc}	15.50 ^a	13.40 ^b	305.40 ^b
	+P	T ₄₅	118.5 ^a	201.20 ^a	21.60 ^a	14.30 ^a	17.03 ^a	295.30 ^b
	+P	T ₉₀	76.33 ^b	162.40 ^b	17.43 ^b	15.50 ^a	17.57 ^a	325.60 ^a
	-P	T ₀	11.33 ^f	149.70 ^c	12.87 ^{cd}	15.40 ^a	13.10 ^b	305.10 ^b
	-P	T ₄₅	7.10 ^g	151.00 ^c	18.67 ^{ab}	12.20 ^b	12.37 ^b	275.80 ^c
	-P	T ₉₀	10.77 ^f	138.40 ^d	16.27 ^{bc}	12.97 ^b	10.63 ^c	302.90 ^b
Qazvin ₁	+P	T ₀	7.57 ^{fg}	79.33 ^g	11.43 ^{de}	7.27 ^{de}	7.13 ^d	121.40 ^d
	+P	T ₄₅	30.60 ^c	101.90 ^e	13.47 ^{cd}	8.10 ^{cd}	7.10 ^d	120.30 ^d
	+P	T ₉₀	21.10 ^{de}	98.10 ^e	12.90 ^{cd}	8.60 ^c	7.50 ^d	112.40 ^{def}
	-P	T ₀	7.53 ^{fg}	79.17 ^g	11.37 ^{de}	7.27 ^{de}	7.10 ^d	116.10 ^{de}
	-P	T ₄₅	4.00 ^g	74.20 ^g	10.83 ^{de}	6.63 ^{fg}	6.57 ^{de}	119.60 ^d
	-P	T ₉₀	5.73 ^g	73.33 ^g	10.27 ^{de}	6.87 ^{def}	6.03 ^{de}	103.00 ^{fg}
Qazvin ₂	+P	T ₀	5.27 ^g	59.27 ^h	8.60 ^e	5.47 ^{hi}	5.47 ^e	103.30 ^{fg}
	+P	T ₄₅	24.47 ^d	88.93 ^f	8.83 ^e	5.87 ^{fgh}	5.47 ^e	94.63 ^{gh}
	+P	T ₉₀	18.57 ^e	71.53 ^g	8.43 ^e	5.07 ^{hi}	6.57 ^{de}	88.13 ^h
	-P	T ₀	5.27 ^g	59.57 ^h	8.63 ^e	5.43 ^{hi}	5.50 ^e	102.70 ^{fg}
	-P	T ₄₅	3.57 ^g	53.13 ^h	8.57 ^e	4.43 ⁱ	5.37 ^e	101.30 ^{fg}
	-P	T ₉₀	4.40 ^g	51.10 ^h	7.63 ^e	4.93 ^{hi}	5.27 ^e	88.17 ^h

+P = با فسفر -P بدون فسفر * واحدها برحسب میلی گرم بر کیلوگرم. ** در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی دار هستند.

*Unites per mg kg⁻¹. * In each column, means with dissimilar letters have significant difference

جمله ترکیبات اولیه است که در خاک تشکیل می‌گردد، فراهمی آن به دلیل تثبیت کمتر در خاک برای استفاده گیاه اهمیت زیادی دارد. این شکل معدنی فسفر ناپایدار بوده و به اشکال دیگر کلسیمی تبدیل می‌گردد (Foth & Ellis, 1997). فراوانی غلظت Ca₈P نسبت به Ca₂P و نیز اشکال آهن و آلومینیوم در هر سه خاک بالاتر بود. غلظت این شکل معدنی فسفر در خاک سری دیزان بیشتر شد (جدول ۸). Ca₈P که پس از گذشت حدود ۲ الی ۳ ماه از Ca₂P به وجود می‌آید، یکی از فراوان‌ترین شکل‌های معدنی فسفات در خاک‌های آهکی است. دهقان و همکاران (Dehghan *et al.*, 2008) در بررسی شکل‌های فسفر خاک در چهار ردیف ارضی در مناطق اصفهان و شهر کرد، بیش از نیمی از فسفر معدنی را به شکل فسفات‌های کلسیم گزارش کردند که نشان دهنده نقش مهم کلسیم و آهک در این خاک‌ها می‌باشد. ادهمی و همکاران (Adhami *et al.*, 2008) کلسیم اکتا فسفات را بخش عمده فسفات‌های کلسیمی در تعدادی از خاک‌های آهکی ایران اعلام کردند. از میزان تثبیت شکل معدنی AIP در سری خاک دیزان با کاربرد فسفر در زمان T₉₀ کاسته شد. در حالی که در شرایط بدون

خاک سری دیزان نسبت به قزوین ۱ و قزوین ۲ مقادیر بالاتری از میزان تثبیت کلیه شکل‌های معدنی فسفر را نشان داد (جدول ۴). یکی از دلایل این موضوع می‌تواند وجود آهک و ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر این سری خاک نسبت به دیگر خاک‌ها باشد. البته مقدار فسفر کل در این خاک نیز بالاتر بود. در سری قزوین ۱ شکل‌های معدنی Ca₂P، Ca₈P، FeP و OP و در سری قزوین ۲ شکل‌های معدنی Ca₂P، Ca₈P و OP در شرایط کاربرد فسفر نسبت به شاهد معنی دار شدند. در حالی که شکل‌های AIP و Ca₁₀P در سری قزوین ۱ و FeP، AIP و Ca₁₀P در سری قزوین ۲ حتی با کاربرد فسفر نسبت به شرایط شاهد تفاوت معنی‌داری نشان ندادند (جدول ۵). این نکته مبین این بود که با کاربرد فسفر از میزان تثبیت این شکل‌های معدنی در چنین خاک‌هایی جلوگیری به عمل آمده است. فراوانی غلظت Ca₂P که نسبت به سایر اشکال معدنی کلسیم‌دار فسفر در هر دو خاک مورد مطالعه کمتر از اشکال دیگر فسفر بود، در سری دیزان از تثبیت بالاتری برخوردار بود. دلیل این موضوع وجود آهک و pH بالاتر نسبت به دیگر خاک‌ها بود (جدول ۸). نظر به این که شکل معدنی Ca₂P که از

غلظت تحت تأثیر فسفر مصرفی قرار نگرفت. اما در شرایط شاهد (بدون فسفر) در انتهای دوره زمانی از تثبیت کمتری برخوردار شد. در خاک قزوین ۲ روند کاهش غلظت این شکل معدنی فسفر با گذشت زمان انکوباسیون با کاربرد فسفر مشاهده شد و در انتهای دوره زمانی به کمترین میزان خود رسید. این وضعیت برای شرایط عدم کاربرد فسفر نیز صادق بود (جدول ۸). این شکل معدنی فسفر مقادیر غلظت بالاتری را از کلیه شکل‌های دیگر در هر سه نوع خاک مورد بررسی نشان داد. این شرایط هم با کاربرد فسفر و هم بدون کاربرد آن دیده شد. آپاتیت که از تبدیل کلسیم اکتا فسفات در خاک تشکیل می‌گردد، یکی از فراوان‌ترین اشکال معدنی فسفات‌های کلسیم بوده و شکل نهایی فسفر در مقادیر تثبیت بالا می‌باشد. بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نشان دهنده صحت این موضوع می‌باشد. فوٹ و الیس (Foth & Ellis, 1997) بخش اعظم فسفر در خاک‌های آهکی را از نوع شکل معدنی آپاتیت دانستند. فراوانی این شکل معدنی نسبت به سایر اشکال توسط مستشاری و همکاران (Mostashari *et al.*, 2009) گزارش گردید. سینک و همکاران (Singh *et al.*, 2000) در تغییر شکل‌های معدنی فسفر به شکل قابل جذب نیز مشخص نمودند که مصرف کود فسفوری سبب تثبیت فسفر به شکل آپاتیت می‌گردد.

بخش گلخانه

تجزیه واریانس

میانگین مربعات اشکال فسفر مورد آزمایش در شرایط گلخانه در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر اصلی خاک بر کلیه شکل‌های معدنی فسفر در سطح بالایی معنی‌دار بود. همچنین اثر اصلی فاکتور کود به جز $Ca_{10}P$ بر سایر شکل‌های فسفر، معنی‌دار بود. برهمکنش خاک و کود بر اشکال $Ca_{10}P$ ، AIP ، Ca_2P ، OP و FeP معنی‌دار بود. آزمون میانگین مربعات فسفر در گیاه و خاک مورد آزمایش (جدول ۱۰) نشان داد که فاکتور خاک بر غلظت فسفر پس از برداشت گیاه در خاک در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. فاکتور کود بر وزن تر، غلظت فسفر پس از برداشت، فسفر کل و فسفر جذب شده توسط گیاه در سطوح یک و ۵ درصد معنی‌دار شد.

کاربرد فسفر در T_0 این کاهش دیده شد. با گذشت زمان در این شرایط به میزان تثبیت اضافه شد. در سری قزوین ۱ و قزوین ۲ این شکل معدنی فسفر با و بدون کاربرد کود فسفوری تحت تأثیر تثبیت قرار نگرفت (جدول ۸). شکل معدنی FeP در شرایط کاربرد فسفر در سری خاک دیزان از نظر آماری تغییر غلظتی نشان نداد که حاکی از عدم تأثیر کود فسفوری بر غلظت این شکل معدنی در طول دوره انکوباسیون بود. در شرایط بدون کاربرد فسفر با گذشت زمان انکوباسیون در زمان‌های T_{45} و T_{90} نسبت به آغاز انکوباسیون کاهش معنی‌دار تثبیت را نشان داد. در سری قزوین ۱ در شرایط با و بدون کاربرد فسفر تنها در انتهای دوره زمانی انکوباسیون کمترین میزان تثبیت را نشان داد که بیانگر تأثیر زمان بر چگونگی معدنی شدن فسفر بود. در سری قزوین ۲ در شرایط با و بدون کاربرد فسفر تنها در انتهای دوره زمانی انکوباسیون، این شکل معدنی فسفر تحت تأثیر تغییرات معنی‌دار غلظت قرار نگرفت (جدول ۸). شکل‌های معدنی آهن و آلومینیوم فسفات در خاک‌های مورد مطالعه با غلظت‌های کمتری از اشکال معدنی کلسیم فسفات همراه بود که نشان‌دهنده فراوانی کمتر آنها بود. بدیهی است در شرایط خاک‌های آهکی به دلیل غالبیت یون کلسیم به واسطه وجود آهک، اشکال معدنی کلسیم فسفات نسبت به سایر اشکال دیگر غلبه پیدا می‌کند. همان‌طوری که در شرایط خاک‌های اسیدی با pH پایین شکل‌های معدنی آهن و آلومینیوم فسفات ممکن است بیشتر باشد (Abolfazli *et al.*, 2012). فراوانی کمتر شکل‌های آهن و آلومینیوم فسفات در خاک‌های آهکی توسط سماواتی و حسین‌پور (Samavati & Hosseinpoor, 2009) گزارش شده است. میزان تثبیت شکل معدنی OP در سری خاک دیزان با کاربرد فسفر در زمان T_0 و در شرایط بدون کاربرد فسفر در T_{90} کاهش یافت. در سری‌های قزوین ۱ و قزوین ۲، این شکل معدنی فسفر با و بدون کاربرد کود فسفوری تحت تأثیر تثبیت قرار نگرفت (جدول ۸). با گذشت زمان انکوباسیون، در سری خاک دیزان، شکل معدنی $Ca_{10}P$ در شرایط کاربرد فسفر از تثبیت بیشتری برخوردار شد. در شرایط بدون کاربرد فسفر در زمان T_{45} از کمترین میزان تثبیت برخوردار بود. در سری قزوین ۱، مقادیر

جدول ۹- میانگین مربعات شکل‌های فسفر مورد آزمایش در شرایط گلخانه (دانکن ۵٪)

Table 9. Mean Square phosphorus forms in greenhouse conditions (Duncan 5%)

Source of variation	df	Ca ₂ P	Ca ₈ P	AIP	FeP	OP	Ca ₁₀ P
Replication	2	4.3 ^{ns}	70.8 ^{ns}	3.0 ^{**}	0.5 [*]	0.8 ^{**}	91.6 ^{ns}
Soil factor	2	641.8 ^{**}	13568.9 ^{**}	51.5 ^{**}	116.6 ^{**}	152.6 ^{**}	82273.6 ^{**}
Fertilizer factor	1	409.2 ^{**}	435.1 [*]	38.7 ^{**}	6.6 ^{**}	9.4 ^{**}	13333.9 ^{ns}
Soil*Fertilizer	2	337.9 ^{**}	18.2 ^{ns}	3.0 ^{**}	7.6 ^{**}	6.7 ^{**}	201.4 [*]
Error	10	1.20	49.9	0.46	0.10	0.30	34.50
CV (%)	-	8.52	7.00	6.36	4.06	5.52	3.40

*در سطح ۵ درصد معنی دار، ** در سطح ۱ درصد معنی دار، ns معنی دار نیست.

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

جدول ۱۰- میانگین مربعات فسفر در گیاه و خاک در شرایط گلخانه (دانکن ۵٪)

Table 9. Mean Squares of phosphorus in plant and soil in greenhouse conditions (Duncan 5%)

Source of variation	P uptake by plant (g pot ⁻¹)	Plant Total P (%)	Soil after P concentration harvest (mg kg ⁻¹)	Fresh weight (g)	df
Replication	0.346 ^{ns}	0.000 ^{ns}	2.934 ^{ns}	2.722 ^{ns}	2
Soil factor	1.015 ^{ns}	0.007 ^{ns}	18.288 [*]	4.740 ^{ns}	2
Fertilizer factor	11.513 [*]	0.091 ^{**}	1398.582 ^{**}	36.69 ^{**}	1
Soil*Fertilizer	0.762 ^{ns}	0.008 ^{ns}	2.504 ^{ns}	0.429 ^{ns}	2
Error	0.45	0.006	4.45	1.27	10
CV (%)	39.43	33.66	14.14	18.71	-

*در سطح ۵ درصد معنی دار، ** در سطح ۱ درصد معنی دار، ns معنی دار نیست.

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

جذب فسفر توسط گیاه معنی دار نشد، اما بیشترین غلظت جذب فسفر در خاک قزوین ۲ بود. بررسی نتایج نشان داد که از میان شاخص‌های بررسی شده، فقط غلظت فسفر باقی‌مانده پس از برداشت در خاک به طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع خاک بود. تفاوت معنی‌داری با قزوین ۱ نشان دادند. به طوری که مقادیر وزن تر گیاه در سری‌های قزوین ۲ و دیزان به ترتیب: ۱/۷ و ۱/۳ گرم بیشتر از سری قزوین ۱ بود. گرچه تأثیر خاک بر میزان جذب فسفر توسط گیاه معنی دار نشد، اما بیشترین غلظت جذب فسفر در خاک قزوین ۲ بود. بررسی نتایج نشان داد که از میان شاخص‌های بررسی شده، فقط غلظت فسفر باقی‌مانده پس از برداشت در خاک به طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع خاک بود.

اثر اصلی خاک بر غلظت شکل‌های فسفر معدنی در بررسی و تعیین شکل‌های معدنی فسفر در شرایط گلخانه و پس از برداشت ۶۰ روزه گندم در خاک‌های تحت کشت، مقادیر متفاوتی از غلظت شکل‌های معدنی فسفر بر اساس رفتار خاک‌ها مشاهده شد. در سری دیزان مقادیر شکل‌های معدنی فسفر، نسبت به سری قزوین ۱ و قزوین ۲ بیشتر بود (جدول ۱۱). در شرایط کشت گندم مقادیر غلظت شکل‌های Ca₈P، Ca₂P، AIP و FeP نسبت به شرایط انکوباسیون (جدول ۴) افزایش نشان داد. تأثیر خاک سری قزوین ۱ بر غلظت فسفر پس از برداشت گیاه در خاک تفاوت معنی‌داری با سری‌های قزوین ۲ و دیزان داشت. در بررسی وزن تر گیاه، سری‌های قزوین ۲ و دیزان تفاوت معنی‌داری با قزوین ۱ نشان دادند. به طوری که مقادیر وزن تر گیاه در سری‌های قزوین ۲ و دیزان به ترتیب: ۱/۷ و ۱/۳ گرم بیشتر از سری قزوین ۱ بود. گرچه تأثیر خاک بر میزان

جدول ۱۱- اثر اصلی خاک بر غلظت شکل‌های فسفر و جذب آن در گیاه در شرایط گلخانه (دانکن ۵٪) *

Table 11. The main effect of soil on the concentration of phosphorus forms and uptake under greenhouse conditions (Duncan 5%)

Soil series	P uptake by plant	Plant Total P	P conc. in soil after harvest	Fresh weight	Ca ₁₀ P	OP	FeP	AIP	Ca ₈ P	Ca ₂ P
	(g pot ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(g)	(mg kg ⁻¹)					
Dizan	1.891 ^a	0.23 ^a	16.51 ^a	7.32 ^a	307.20 ^a	15.07 ^a	13.58 ^a	13.70 ^a	154.20 ^a	24.73 ^{a*}
Qazvin ₁	1.235 ^a	0.19 ^a	13.05 ^b	6.02 ^b	116.20 ^b	7.03 ^b	7.17 ^b	11.27 ^b	86.10 ^b	7.82 ^b
Qazvin ₂	1.994 ^a	0.26 ^a	15.19 ^{ab}	7.72 ^a	94.30 ^c	5.77 ^c	4.95 ^c	7.81 ^c	61.65 ^c	5.97 ^c

* در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی دار هستند.

* In each column, means with dissimilar letters have significant difference

میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه بود. کاربرد کود در شرایط کشت گیاه نسبت به انکوباسیون فقط غلظت AIP را در هر سه خاک به‌طور معنی‌داری کاهش داد. غلظت FeP تنها در خاک دیزان و Ca₁₀P در خاک قزوین ۲ کاهش یافت. این شرایط کاملاً متفاوت با شرایط انکوباسیون (جدول ۵) بود. این امر می‌تواند ناشی از کشت گیاه باشد. افزایش غلظت شکل‌های معدنی فسفر (HCl-P > NaOH-P > Resin-P > bic-P > Water-P, with NaOH-P and HCl-P) به خاک در طول کشت گندم توسط یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2002) گزارش شد. بلیک و همکاران (Blake *et al.*, 2003) نشان دادند که کشت گیاه بدون مصرف کود فسفری سبب کاهش فسفر به شکل کلسیم دی‌فسفات می‌گردد که نشان دهنده قابلیت جذب این شکل از فسفر توسط گیاه می‌باشد. دی‌کلسیم فسفات‌های موجود در خاک‌های آهکی یکی از منابع فسفر قابل جذب برای گیاه گندم می‌باشند. مقادیر قابل ملاحظه‌ای فسفر از شکل دی‌کلسیم فسفات آزاد و توسط برنج توسط نجفی و توفیقی (Najafi & Towfighi, 2012) و گیاهان علفی توسط ما و همکاران (Ma *et al.*, 2009) گزارش شده است.

نقی‌زاده و دردی‌پور (Naghizadeh & Dordipoor, 2013) در بررسی اثر کشت گندم بر شکل‌های فسفر معدنی، به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های لسی استان گلستان، کشت گندم به‌طور عمده شکل‌های دی-کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات و آلومینیوم‌فسفات را کاهش داد. این سه شکل را می‌توان به عنوان منبع عمده فسفر قابل جذب گندم در نظر گرفت. هدلی و همکاران (Hedly *et al.*, 1982) در آزمایشی اعلام کردند

برهمکنش تأثیر خاک و کود بر شکل‌های معدنی فسفر خاک در دوره رشد گندم

میانگین داده‌های تأثیر خاک و کود بر شکل‌های معدنی فسفر خاک پس از برداشت گندم، در جدول ۱۲ نشان داده شده است. در سری خاک دیزان، با کاربرد کود فسفری، میزان تثبیت شکل‌های معدنی Ca₂P، AIP، FeP و OP اختلاف معنی‌داری را نشان دادند. به‌طوری‌که در مورد Ca₂P و OP در شرایط کاربرد کود فسفری میزان تثبیت بیشتر از شاهد (بدون کود فسفری) بود، اما در مورد AIP و FeP تثبیت در شرایط شاهد بیشتر بود. یعنی زمانی‌که گیاه کشت شود، کاربرد کود فسفری موجب تثبیت شکل‌های اخیر فسفر می‌گردد. مقایسه غلظت شکل‌های معدنی فسفر در شرایط انکوباسیون و کاربرد فسفر (جدول ۵) با شرایط کاشت گیاه (جدول ۱۲) با کاهش غلظت Ca₂P از ۶۸/۶۸ به ۳۸/۱۷، Ca₈P از ۱۷۱/۲ به ۱۵۹/۱، AIP از ۱۸/۴۷ به ۱۱/۳۰، FeP از ۱۵/۱۰ به ۱۱/۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه بود. اما در خصوص شکل‌های معدنی OP و Ca₁₀P، با افزایش غلظت از ۱۶ به ۱۷ و ۳۰۸ به ۳۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط کاربرد فسفر همراه بود. در سری خاک قزوین ۱ در شرایط کاربرد فسفر و انکوباسیون، نسبت به شرایط کشت گیاه غلظت Ca₂P ۷۳/۱۱، Ca₈P ۰/۳۴،

AIP ۲/۴۳، OP ۰/۲۶ و Ca₁₀P ۶/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت. شکل معدنی FeP در این شرایط با افزایش ۰/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه بود. در خاک قزوین ۲ در شرایط کاربرد فسفر و انکوباسیون، نسبت به شرایط کشت گیاه غلظت Ca₂P ۹/۴۷، Ca₈P ۷/۴۱، AIP ۱/۶۵، FeP ۰/۹۴ و Ca₁₀P ۸/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت. شکل معدنی OP در این شرایط با افزایش ۰/۲۰

آمد. ولی میزان FeP در خاک‌های کشت شده بیشتر از کشت نشده بود و اثر کود فسفوری و کشت گیاه ذرت تأثیر معنی‌داری بر روی Ca₁₀P نداشت.

که میزان Ca₂P، Ca₈P و AIP تحت تأثیر کشت ذرت بود. به طوری که در شرایط بدون کشت، خاکی که میزان فسفر بیشتری دریافت کرده است، اشکال معدنی فسفر در حالت‌های فوق بیشتر از خاک کشت شده به دست

جدول ۱۲- برهمکنش تأثیر خاک و کود بر شکل‌های فسفر در دوره رشد گندم (دانکن ۵٪) *

Table 12. The interaction of soil and Fertilizer on phosphorus forms in wheat growing period (Duncan 5%)

Soil series	mg kg ⁻¹						Treatment
	Ca ₁₀ P	OP	FeP	AIP	Ca ₈ P	Ca ₂ P	
Dizan	311.00 ^a	17.00 ^a	11.77 ^b	11.30 ^{bc}	159.10 ^a	38.17 ^{a*}	+P
	303.40 ^a	13.13 ^b	15.40 ^a	16.10 ^a	149.30 ^a	11.30 ^b	-P
Qazvin ₁	111.40 ^{bc}	7.00 ^c	8.13 ^c	10.17 ^c	92.77 ^b	8.03 ^c	+P
	121.00 ^b	7.07 ^c	7.30 ^d	12.37 ^b	79.43 ^c	7.60 ^c	-P
Qazvin ₂	87.100 ^d	6.03 ^d	4.53 ^f	6.97 ^e	65.83 ^d	6.63 ^{cd}	+P
	101.50 ^c	5.50 ^d	5.37 ^e	8.77 ^d	59.47 ^d	5.30 ^d	-P

+P = با فسفر -P = بدون فسفر * در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

* In each column, means with dissimilar letters have significant difference

گیاه در تیمارهای کود داده شده نسبت به شاهد بالاتر از قزوین ۱ بود. سری‌های دیزان و قزوین ۲ که از فسفر قابل جذب بالاتری برخوردار بودند، فسفر باقی‌مانده در خاک بیشتری را هم نشان دادند. فسفر کل گیاه در خاک دیزان در شرایط تیمار کودی بیشتر از شاهد شد. در سایر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. زاهدی فر و همکاران (Zahedifar *et al.*, 2009) وزن ماده خشک بخش هوایی ذرت را با مصرف فسفر افزایش دادند. غلظت جذب فسفر با کاربرد این عنصر افزایش یافت. پتی‌پاس (Pettipas, 2004)، اسکودرا و اسکودرا (Skudra & Skudra, 2004) همبستگی معنی‌داری بین غلظت فسفر در برگ‌های گندم گزارش کردند. کوزمینا (Kuzmina, 1997) بین غلظت فسفر در گیاه و غلظت فسفر قابل استفاده خاک در مراحل مختلف رشد رابطه مشخصی را مشاهده نکرد.

در بررسی تأثیر خاک و کود بر عملکرد و میزان جذب فسفر در طول دوره رشد گندم در شرایط گلخانه (جدول ۱۳) داده‌ها نشان داد در تمامی خاک‌ها عملکرد تر اندام هوایی در تیمار کود داده شده نسبت به شاهد (کود داده نشده) بیشتر بود. تأثیر کاربرد فسفر بر عملکرد به عواملی نظیر مقدار فسفر قابل استفاده برای گیاه بستگی دارد. در خاک دیزان میزان فسفر قابل استفاده در خاک بیشتر از خاک قزوین ۱ بود. در خاک قزوین ۲ میزان فسفر قابل استفاده در خاک بیشتر از قزوین ۱ بود. به همین دلیل وزن تر بیشتری را هم نشان داد (جدول ۱ و ۱۱). میزان فسفر باقی‌مانده در خاک در تیمارهای کود داده شده نسبت به شاهد بالاتر بود. سری‌های دیزان و قزوین ۲ که از فسفر قابل جذب بالاتری برخوردار بودند، فسفر باقی‌مانده در خاک بیشتری را هم نشان دادند. در سری‌های دیزان و قزوین ۲، غلظت جذب فسفر توسط

جدول ۱۳- برهمکنش تأثیر خاک و کود بر میزان جذب فسفر در دوره رشد گندم (دانکن ۵٪) *

Table 13. The interaction of soil and Fertilizer on phosphorus uptake in the wheat period growing (Duncan 5%)

Soil series	P uptake by plant (g pot ⁻¹)	Plant Total P (%)	P concentration in soil after harvest (mg kg ⁻¹)	Fresh weight (g)	Treatment
Qazvin ₁	0.68 ^c	0.12 ^b	7.12 ^c	5.63 ^{cd}	-P
	1.88 ^{abc}	0.25 ^{ab}	21.17 ^b	7.47 ^b	+P
Qazvin ₂	0.60 ^c	0.13 ^b	4.93 ^c	4.57 ^d	-P
	2.46 ^{ab}	0.30 ^a	24.12 ^{ab}	8.87 ^a	+P
	1.44 ^c	0.21 ^{ab}	6.26 ^c	6.57 ^{bc}	-P

+p = با فسفر -P = بدون فسفر * در هر ستون میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

* In each column, means with dissimilar letters have significant difference

نتیجه‌گیری کلی

مقادیر تثبیت فسفر در خاک دیزان از خاک‌های قزوین ۱ و قزوین ۲ بیشتر بود. در این بررسی مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده $Ca_{10}P$ (آپاتیت) بیش از سایر اشکال معدنی بود. کاربرد کود به میزان ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر از منبع کودی سوپرفسفات تریپل، تأثیر زیادی در افزایش غلظت اندازه‌گیری در شکل‌های کلسیم دی‌فسفات و کلسیم اکتافسفات در هر سه خاک و با شدت بیشتر در سری دیزان داشت. در این خاک با کاربرد فسفر از منبع کود سوپرفسفات تریپل، بیشترین غلظت اندازه‌گیری شده شکل‌های Ca_2P .

مقادیر تثبیت فسفر در خاک دیزان از خاک‌های قزوین ۱ و قزوین ۲ بیشتر بود. در این بررسی مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده $Ca_{10}P$ (آپاتیت) بیش از سایر اشکال معدنی بود. کاربرد کود به میزان ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر از منبع کودی سوپرفسفات تریپل، تأثیر زیادی در افزایش غلظت اندازه‌گیری در شکل‌های کلسیم دی‌فسفات و کلسیم اکتافسفات در هر سه خاک و با شدت بیشتر در سری دیزان داشت. در این خاک با کاربرد فسفر از منبع کود سوپرفسفات تریپل، بیشترین غلظت اندازه‌گیری شده شکل‌های Ca_2P .

References

- Abolfazli F., Forghani A. and Norozi M. 2012. Effect of phosphorous and organic fertilizers fractions in submerged soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12 (2): 349-362.
- Adhami E., Maftoon M., Rounaghi A., Karimian N., Yasrebi J. and Assad M.T. 2006. Inorganic phosphorus fractionation of highly calcareous soils of Iran. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 37: 1877-1888.
- Allison L.E. and Moodie C.D. 1965. Carbonate. In: "Methods of Soil Analysis". Black C.A., Evans D.D., White L.J., Ensminger L.E. and Clark F.E. (Ed.) American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1379-1396.
- Blake L., Johnston A.E., Poulton P.R. and Goulding K.W.T. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil*, 254: 245-261.
- Bouyoucos C.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal*, 45: 464-465.
- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: C.A. Black (Ed.) Methods of Soil Analysis- Chemical and Microbiological Properties. *Agronomy*, 9: 891-901.
- Dehgan R., Shariatmadari H. and Khademi H. 2008. Soil phosphorus forms in four toposequence of Isfahan and Shahrekord regions. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 11(42): 463-472. (In Persian)
- Foth H.D. and Ellis B.G. 1997. Soil Fertility .2nd Edition, CRC. Press. Boca, Raton, Florida 290p.
- Guo F., Yost R.S., Hue N., Evensen C.I. and Silva J. A. 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Science Society of America*, 64: 1681-1689.
- Harrell D.L. and Wang J.J. 2006. Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils. *Soil Science*, 171: 39-51.
- Hedly M.J., Stewart W.B. and Chauhan, B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America*, 46: 970-976.
- Jiang B. and Gu Y. 1989. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer Research*, 20: 159-165.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. In: Sparks D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods No. 5. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp. 869-919.
- Kuzmina N.A. 1997. Nitrogen, phosphorus and potassium concentrations and their balance in durum wheat plants during different growth stages. In: *Proceedings of the 13th International Plant Nutrition Colloquium on plant nutrition for sustainable food production and environment* (ed. T. Ando et al.), 13-19 Sept. 1997, Tokyo, Japan, pp. 97-98.

- Lilienfein J., Wilcke W., Ayarza M.A., Vilela L., Lima S.U.C. and Zech W. 2000. Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah oxisols under different land use. *Geoderma*, 96: 31-46.
- Ma B., Zhou Z.Y., Zhang C.P., Zhang G. and Hu Y.J. 2009. Inorganic phosphorus fractions in the rhizosphere of xerophytic shrubs in the Alxa Desert. *Journal of Arid Environments*, 73, 55-61.
- Mahmoudsoltani Sh. and Samadi A. 2003. Phosphorus fractionation of some calcareous soils in Fars province and their relationships with some soil properties. *Journal of Water and Soil Science*, 3(7): 119-128. (In Persian)
- Malakooti M.J. and Keshavarz P. 2005. A Glance on the Fertility Status of Iranian Soils (Evaluation and Utilization). Ministry of Jihad-e Agriculture, 514p. (In Persian)
- Mostashari M., Muazardalan M., Karimian N., Hosseini H. and Rezai H. 2008. Phosphorus fractions of selected calcareous soils of Qazvin province and their relationships with soil characteristics. *American-Eurasian Journal Agriculture & Environment Science*, 3(4): 547-553.
- Mostashari M. 2009. Evaluation of the efficiency of phosphorus uptake of calcareous soil in the planting process. Ph.D Thesis, Department of Soil Science, Agricultural Faculty. University of Tehran. 83p. (In Persian)
- Naghizadeh-Asl Z. and Dordipoor E. 2013. The effect of wheat planting on forms of mineral phosphorus in loess soil of Golestan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, (4): 330-313. (In Persian)
- Najafi N. and Towfighi H. 2012. Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorus fractions in the paddy soils (in North Iran) following P fertilizer application. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43 (3): 231-242. (In Persian)
- Nelson D.W. and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Sparks D.L (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. SSSA Book Series No. 5. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison. pp. 961-1010.
- Pettipas F.C. 2004. Soil and plant nutrient relationships in processing carrots. MSc. Thesis, Nova Scotia Agricultural College, Truro, Nova Scotia.
- Samadi A. and Gilkes R.J. 1999. Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of southern Western Australia. *Soil Science Society of America*, 63: 809-815.
- Samavati M. and Hosseinpour A.R. 2009. Phosphorus fractions in some soils of Hamadan Province and their relation to available phosphorus soil. *Journal of Water and Soil Science*, 20 (2): 234-248. (In Persian)
- 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 of America*, 64: 1413-1420.
- Skudra I. and Skudra A. 2004. Phosphorus concentration in soil and in winter wheat plants. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress. Brisbane, Australia. Available at <http://www.cropsociety.org.au>.
- Tejada M., Hernandez M.T. and Garcia C. 2006. Application of two organic amendments on soil restoration: Effects on the soil biological properties. *Journal of Environmental Quality*, 35: 1010-1017.
- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, pp. 1123-1184.
- Yang J.E., Gones C.A., Kim H.J. and Jacobsen J.S. 2002. Soil inorganic phosphorus fraction and Olsen-P in phosphorus responsive calcareous soils: Effects of fertilizer amount and incubation time. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 35:855-871.
- Zahedifar M., Karimian N., Ronaghi A.M., Yasrebi J. and Emam Y. 2011. Phosphorus and zinc distribution in different parts and various growth stages of wheat under field conditions. *Journal of Water and Soil Science*, 25 (3): 436-445. (In Persian)

Effect of Triple Superphosphate and Wheat Cultivation on Mineral Phosphorus Forms in Calcareous Soils of Qazvin Plain

Jafar Shahabifar¹, Ebrahim Panahpour^{2*}, Farhad Moshiri³, Ali Gholami⁴, Mehrzad Mostashari³

(Received: May 2016 Accepted: April 2017)

Abstract

Knowledge of soil phosphorus (P) mineral forms is important in soil fertility and plant nutrition. This study was conducted to evaluate of mineral P fractions with addition of triple superphosphate fertilizer and wheat cultivation in incubation and greenhouse conditions. Incubation test was performed in three soil types: Dizan, Qaznin₁ and Qaznin₂ with various amounts of available P which in each soil 50 mg kg⁻¹ P used from triple super phosphate. Soil's P fractions including: Ca₂P, Ca₈P, AIP, FeP, OP and Ca₁₀P were measured at 0, 45 and 90 days of incubation based on a complete randomized block design with three replications. Results showed that soil type effect on fixation of mineral P under incubation conditions and Dizan soil ranked in the first place. In this soil, Ca₂P: 67.5 and 73.8%, Ca₈P: 74.5 and 59.7%, AIP: 31.9 and 50.3 %, FeP: 47.9 and 63.7%, OP: 50.7 and 60% and Ca₁₀P: 62.8 and 69% were more than Qaznin₁ and Qaznin₂, respectively. By addition of 50 mg kg⁻¹ P from TSP, concentrations of Ca₂P and Ca₈P increased in all soils and more in Dizan. The highest concentrations of Ca₂P, Ca₈P, AIP, FeP and OP achieved by T₄₅ and Ca₁₀P by T₉₀ times. Greenhouse trial was conducted on three soils mentioned with 50 mg kg⁻¹ P used from triple super phosphate and cultivated with wheat based on a complete randomized block design with three replications. The concentration of mineral P was higher than other soils under wheat cultivation in Dizan. Comparison of mineral P fractions under incubation and greenhouse conditions proved a reduction in P concentrations for Ca₂P: 30.63, Ca₈P: 12.1, AIP: 7.17 and FeP: 3.33 mg kg⁻¹. The amount of P fixation forms (Ca₂P) had an obvious decrease in association with wheat planting in the greenhouse.

Keywords: Calcareous, Incubation, Mineral phosphorus fractions, Soil series, Wheat

1-PhD student of Soil Science, Khuzestan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Khuzestan, Iran.

2- Department of Soil Science, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

3-Soil and Water Research Section, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural and Natural Resources Research Center, (AREEO), Qazvin, Iran.

4- Soil and Water Research Institute (AREEO), Karaj, Iran.

* Corresponding Author Email: e.panahpour@iauahvaz.ac.ir