

بررسی پویایی فسفر در یک خاک آهکی تیمار شده با سطوح مختلف کود مرعی و کود شیمیایی

مجید حجازی مهریزی^{1*}، مرضیه آیینه حیدری²، فاطمه عباس زاده²

تاریخ دریافت: 92/12/10 تاریخ پذیرش: 94/10/30

- 1- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
 - 2- دانشجوی کارشناسی علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- *مسئول مکاتبات. پست الکترونیکی: mhejazi@uk.ac.ir

چکیده

منابع فسفر در دنیا محدود بوده و به همین دلیل استفاده بهینه از این عنصر یکی از اهداف اصلی کشاورزی پایدار می‌باشد. کودهای آلی به عنوان یک منبع غنی از فسفر می‌توانند پویایی این عنصر در خاک‌های آهکی را تغییر دهند. در این مطالعه فسفر در سطوح 100 و 200 میلی‌گرم از دو منبع کود مرعی و سوپرفسفات تریپل به یک کیلوگرم خاک آهکی اضافه شد. یک تیمار بدون کاربرد کودهای آلی به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. نمونه‌های برای زمان‌های 3، 120، 360، 720، 1080، 1440 و 2160 ساعت انکوباسیون گردید و پس از هر دوره زمانی میزان فسفر آزادشده اندازه‌گیری شد. معادلات مختلف سینتیکی بر داده‌های فسفر آزادشده برازش و شیب معادلات به‌عنوان ضرایب سرعت تغییر شکل فسفر تعیین گردید. در کود مرعی تا زمان 1440 ساعت فسفر آزادشده روند افزایشی و سپس کاهش را داشت. در هر دو سطح کود شیمیایی روند کاهش در فسفر آزادشده مشاهده و بعد از گذشت 2160 ساعت از انکوباسیون به ترتیب 75 و 81 درصد از فسفر افزوده‌شده به خاک، به‌صورت غیرقابل‌دسترس تبدیل شد. بر اساس شیب معادلات برازش داده شده قدرت تبدیل شکل‌های فسفر در خاک تیمار شده با کود مرعی از کود شیمیایی متفاوت بود. به نظر می‌رسد که در این خاک می‌بایستی کاربرد کود شیمیایی فسفوری در سطح کمتر و دفعات بیشتر صورت گیرد. همچنین با توجه به کاهش فسفر آزادشده در تیمار کود مرعی بعد از 1440 ساعت، تأثیر کاربرد همزمان کود شیمیایی و مرعی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک آهکی، فراهمی فسفر، فسفات‌های کلسیم، کشاورزی پایدار، معادلات سینتیکی

An Investigation of Phosphorus Dynamics in a Calcareous Soil Treated with Different Levels of Poultry Manure and Chemical Fertilizer

M Hejazi Mehrizi^{1*}, M Ayeeneheydari, F abbaszadeh

Received: 1 March 2014 Accepted: 20 January 2016

¹-Assist. Prof., Dept. of Soil. Sci., Faculty of Agric., Shahid Bahonar Univ., Kerman, Iran

²-Msc Student, Dept. of Soil. Sci., Faculty of Agric., Shahid Bahonar Univ., Kerman, Iran

* Corresponding Author, Email : mhejazi@uk.ac.ir

Abstract

Phosphorus (P) is a limited resource in the world and thus its efficient use is a main task in sustainable agriculture. Organic amendments as excellent sources of P are capable of changing P dynamics in calcareous soils. In the present study, P was added to a calcareous soil at two rates of 100 and 200 mg P kg⁻¹ soil from two sources of triple super phosphate (CF) and poultry manure (PM), separately. A treatment with no amendment was considered as a control. The samples were incubated for 3, 120, 360, 720, 1080, 1440 and 2160 hrs and P release was determined after each incubation period. Several kinetic equations were fitted to the P release data and their slopes were determined as P transformation rates in the soil. In the soil treated with poultry manure, P release increased up to 1440 hrs and then it showed a decreasing trend to 2160 hrs. The P release in soil treated with chemical P fertilizer followed a decreasing trend as at the end of incubation, 75 and 81% of added P became non-extractable in soil treated with 100 and 200 mg P kg⁻¹ soil, respectively. Based on the P transformation rate indices, transformation power of the soil treated with poultry manure and chemical P fertilizer was different. It seems that in the soil, chemical P fertilizer should be applied in smaller and more frequent applications rather than one application. Since P release has decreased in the PM amended soil, it is also recommended to study the effects of poultry manure and chemical P fertilizer co-application.

Keywords: Calcareous soil, Calcium phosphates, Kinetic equations, P availability, Sustainable agriculture

اورتوفسفات (کمتر از 10^{-4.5} مولار) جذب سطحی (تونسی و همکاران 1999) و در غلظت‌های بالاتر رسوب کانی‌های کم‌محلول فسفات کلسیم، بخش عمده-ای از فسفر را به‌صورت غیرقابل‌دسترس برای گیاه تبدیل می‌کند (دلگادو و تورنت 2000). این واکنش‌های شیمیایی فسفر با اجزای مختلف خاک سبب شده که بخش کمی از فسفر موجود در کودهای شیمیایی به‌صورت قابل‌جذب برای گیاه باقی بماند. برای رفع این مشکل استفاده از کودهای آلی نظیر کودهای حیوانی،

مقدمه

فسفر به‌عنوان یکی از عناصر ضروری در تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌رود و کمبود آن در بسیاری از خاک‌های آهکی ایران، که دارای ظرفیت بالای تثبیت فسفر هستند، گزارش شده است (حسین‌پور و بیابانکی 2009). فرآیندهای جذب سطحی و رسوب فسفر توسط کانی‌های کربناته کلسیم به‌عنوان سازوکارهای اصلی کاهش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی شناخته شده‌اند به‌طوری‌که در غلظت‌های کم

مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل مرتبه اول، پارابولیک، تابع نمایی و الوویچ اشاره کرد. در مطالعه انجام‌شده توسط جلالی و همکاران (2010) در تعدادی از خاک‌های آهکی تیمار شده با کود شیمیایی، مدل پارابولیک بهترین برازش را با داده‌های رهاسازی فسفر نشان داد. از طرف دیگر هانسن و استراون (2003) گزارش کردند که مدل الوویچ بهترین مدل برای برازش داده‌های رهاسازی فسفر در خاک آهکی تیمار شده با کود آلی هست. مطالعات نافیلو (2009) نیز نشان داد که مدل‌های الوویچ، تابع نمایی و پارابولیک به‌خوبی داده‌های رهاسازی فسفر را در یک خاک آلفی‌سول توصیف می‌کنند.

کاربرد کودهای آلی به‌عنوان یک روش مرسوم در کشاورزی پایدار و بازچرخ فسفر شناخته شده است. برخلاف کودهای شیمیایی، رهاسازی فسفر از کودهای آلی یک فرایند پیچیده‌ای بوده و از عوامل مختلفی نظیر پایداری مواد آلی، ویژگی‌های خاک و سیستم کشت تأثیر می‌پذیرد. در سال‌های اخیر استفاده از کود مرغی در باغات پسته به‌ویژه در جنوب کشور افزایش چشمگیری داشته است. اطلاعات چندانی در ارتباط با تفاوت اثرات کودهای شیمیایی و مرغی بر سینتیک و نحوه رهاسازی فسفر و درصد بازیابی آن در این اراضی وجود ندارد اگرچه وجود چنین اطلاعاتی از نقطه نظر مدیریت زیست‌محیطی و تغذیه‌ای فسفر بسیار مفید خواهد بود. این مطالعه با هدف بررسی اثر سطوح مختلف کود مرغی و شیمیایی بر سینتیک رهاسازی فسفر و سرعت تغییر شکل آن در یک خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

یک نمونه خاک دارای کمبود فسفر از منطقه ماهان واقع در 10 کیلومتری جنوب‌شرقی شهر کرمان از عمق 0-30 سانتی‌متری جمع‌آوری و بعد از

بقایای گیاهی و لجن فاضلاب جهت بالا بردن فراهمی فسفر و افزایش بازیابی فسفر در خاک‌های آهکی پیشنهاد شده است (ردی و همکاران 2005). در مطالعه‌ای که توسط زلفی باوریانی و نوروزی (1389) انجام شد، کاربرد 15 و 30 تن در هکتار کود حیوانی سبب افزایش بازیابی فسفر در یک خاک آهکی بعد از گذشت 4 سال شد.

کودهای آلی می‌توانند پویایی فسفر در خاک را از طریق بلوکه کردن مکان‌های جذب و رقابت بین اسیدهای آلی با فسفر برای جذب تحت تأثیر قرار داده و جذب فسفر توسط اجزای خاک را کاهش دهد. همچنین اسیدهای آلی شکل و سرعت تبدیل کانی‌های فسفات کلسیم را تغییر داده و از این طریق فراهمی فسفر در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (اویگور و کاراباتاک 2009). آپاتایت پایدارترین شکل فسفات‌های کلسیم در خاک‌های آهکی هست و از رسوب شکل‌های محلول‌تر فسفر نظیر دی‌کلسیم فسفات و اکتاکلسیم فسفات تشکیل می‌شود. اینسکیپ و سیلورتوت (1988) نشان دادند که اسیدهای آلی از طریق تشکیل این کانی‌ها مانع از رسوب کانی هیدروکسی‌آپاتایت در خاک‌های آهکی می‌شود. همچنین در مطالعه‌ای که توسط حجازی و همکاران (1392) در یک خاک آهکی صورت گرفت، کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب طی چند سال سبب افزایش دی‌کلسیم فسفات و اکتاکلسیم فسفات و کاهش آپاتایت شد. نتایج آنان نشان داد که لجن فاضلاب می‌تواند به‌عنوان یک منبع تأمین‌کننده پایدار فسفر در خاک‌های آهکی مورد استفاده قرار گیرد.

برای مطالعه پویایی فسفر بین فاز محلول و جامد خاک می‌توان از آزمایش‌ها سینتیکی و تفکیک شکل‌های معدنی فسفر بهره گرفت. آزمایش‌ها سینتیکی با هدف مطالعه ماهیت، ظرفیت و سرعت جذب و رهاسازی فسفر توسط اجزای خاک طراحی شده‌اند (نافیلو 2009). مدل‌های مختلفی برای توصیف داده‌های رهاسازی فسفر در خاک ارائه شده است که از

درصد بازیابی فسفر

برای محاسبه درصد بازیابی فسفر ابتدا مقدار فسفر آزاد شده در زمان‌های تعیین شده طبق رابطه زیر تصحیح (جلالی و رنجبر 2010) و سپس به کمک آن درصد بازیابی فسفر اندازه‌گیری شد.

$$\% \text{ efficiency} = P \text{ corrected} / P \text{ added}$$

$$P \text{ corrected} = P \text{ amended} - P \text{ control}$$

که در این فرمول‌ها:

efficiency %: درصد بازیابی

P corrected: فسفر تصحیح شده

P amended: فسفر آزاد شده در تیمار

P control: فسفر آزاد شده در شاهد

P added: فسفر افزوده شده به خاک (برای سطح اول

کود مرغی و شیمیایی 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای

سطح دوم آن‌ها 200 میلی‌گرم بر کیلوگرم) هست.

جدول 1- معادلات مورد استفاده جهت برازش داده‌های

رها سازی فسفر در تیمارها.

معادله	شکل خطی معادله	ضرایب
مرتبه اول	$\ln q_t = \ln q_0 - k_1 t$	k_1 : ثابت سرعت مرتبه اول (h^{-1})
پخشیدگی پارابولیک	$q_t = q_0 + k_p t^{0.5}$	k_p : ثابت سرعت پخشیدگی [[$mg P kg^{-1}$] $^{-0.5}$]
تابع نمایی	$\ln q = \ln a + b \ln t$	a : ثابت سرعت واجذب اولیه فسفر ($mg P kg^{-1} h^{-1}$) b : ثابت سرعت واجذب فسفر [[$mg P kg^{-1}$] $^{-1}$]
الوویچ	$q = \alpha + \beta \ln t$	α : ثابت سرعت واجذب اولیه فسفر ($mg P kg^{-1} h^{-1}$) β : ثابت سرعت واجذب فسفر [[$mg P kg^{-1}$] $^{-1}$]

q_0 و q_t به ترتیب مقدار فسفر آزاد شده در زمان صفر و در

زمان t بر حسب ($mg P kg^{-1}$) هست

هوا خشک شدن جهت اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های خاک از الک دو میلیمتری عبور داده شد. قابلیت هدایت الکتریکی، pH و مجموع کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع تعیین شد (روول 1994). کربن آلی به روش اکسایش تر (والکلی و بلاک 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون با سود (لوپرت و سوارز 1996) و فسفر قابل دسترس بر اساس روش اولسن و سامرز (1982) استخراج و میزان فسفر موجود در عصاره به روش رنگ‌سنجی مورفی و رایلی (1962) اندازه‌گیری شد. توزیع اندازه ذرات نیز از طریق پیپت انجام و بافت خاک تعیین گردید (جی و بادر 1986).

سینتیک رها سازی فسفر از خاک

یک کیلوگرم از نمونه خاک هوا خشک به گلدان‌های پلاستیکی منتقل و دو سطح از کود شیمیایی فسفوری (از منبع سوپرفسفات تریپل) و دو سطح از کود مرغی (pH: 5/7، کربن آلی: 35 درصد، C/N: 11/66 و فسفر: 0/54 درصد) به گونه‌ای اضافه شد تا مقدار 100 و 200 میلی‌گرم فسفر خالص در هر کیلوگرم خاک خشک فراهم شود. یک تیمار بدون کاربرد کود نیز به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. گلدان‌ها در سه تکرار برای مدت زمان 3، 120، 360، 720، 1080، 1440 و 2160 ساعت در دمای 25°C و در رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. در زمان‌های مشخص شده نمونه‌های فرعی از گلدان‌ها برداشت و میزان فسفر آزاد شده در خاک به روش اولسن و سامرز (1982) اندازه‌گیری شد. سپس مدل‌های مختلف سینتیک بر داده‌های به دست آمده برازش داده شد (جدول 2) و برای تعیین توانایی مدل‌ها در برازش داده‌ها و تعیین بهترین مدل برازش، ضریب تبیین و خطای استاندارد محاسبه گردید. جهت بررسی اختلاف سرعت رها سازی فسفر در تیمارها ضرایب سرعت رها سازی از معادلات الوویچ (α ، β)، پارابولیک (k_p) و تابع نمایی (a, b) استخراج گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول 2 ارائه شده است. خاک مورد نظر دارای بافت سبک، آهکی و میزان ماده آلی پایین هست

که از ویژگی‌های معمول خاک‌های مناطق خشک و نیمه-خشک هست. همچنین میزان فسفر قابل جذب خاک 8/2 میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده کمبود فسفر در خاک مورد استفاده هست.

جدول 2- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه خاک.

بافت خاک	رس	سیلت	شن	pH	EC	Ca+Mg	کربنات کلسیم معادل	OC	فسفر قابل جذب
-	%	%	-	dS m ⁻¹	me L ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	-
شن لومی	13/1	28/6	58/3	7/7	1/7	11/1	24/3	0/7	8/2

آزادسازی فسفر

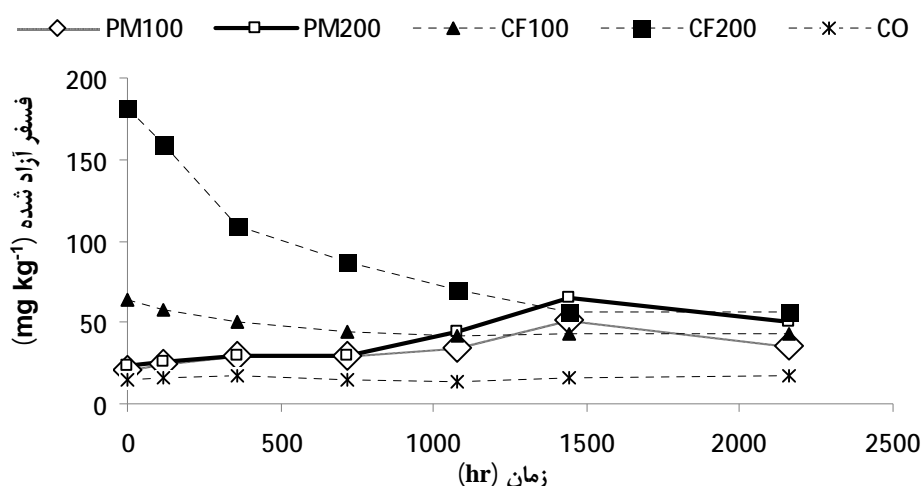
نتایج نشان داد که تأثیر تیمارهای کودی و زمان و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان آزادسازی فسفر معنی‌دار بوده است. به‌طورکلی در هر دو سطح کود شیمیایی میزان فسفر آزادشده بیشتری نسبت به تیمار کود مرغی اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار فسفر آزادشده در تیمار شاهد مشاهده گردید. نحوه آزاد شدن فسفر در تیمارهای آلی با گذشت زمان متفاوت از تیمارهای شیمیایی بود به‌طوری‌که در هر دو سطح کود مرغی با گذشت زمان مقدار فسفر آزادشده افزایش یافت و در زمان 1440 ساعت بعد از انکوباسیون به بیشترین مقدار رسید (شکل 1). دلیل این افزایش را می‌توان ناشی از تجزیه میکروبی و معدنی شدن فسفر در طول دوره انکوباسیون ذکر کرد که با نتایج دیل و همکاران (2009) همخوانی دارد. شروع روند کاهش بعد از زمان 1440 ساعت در هر دو سطح کود مرغی را می‌توان ناشی از کاهش ماده آلی خاک و افزایش جذب سطحی و رسوب فسفر در خاک دانست. در طی فرآیند جذب، فسفر محلول از طریق واکنش با ترکیبات معدنی خاک به شکل‌های پایدارتر تبدیل‌شده و قابلیت جذب فسفر کاهش می‌یابد (طهماسبی و حسین‌پور 1386). به نظر

می‌رسد که کود مرغی قادر به کاهش جذب سطحی و تثبیت فسفر تا زمان 1440 ساعت بوده و بعدازاین زمان به دلیل تجزیه و کاهش ماده آلی خاک جذب سطحی فسفر افزایش‌یافته است. در مطالعه باگیه و همکاران (2004) نیز افزودن بقایای گیاهی به خاک تا هفته‌های پنجم و ششم سبب افزایش و بعدازاین زمان‌ها سبب کاهش فسفر قابل‌استخراج گردید. در زمان‌های اولیه تفاوت بین دو سطح کود مرغی بسیار ناچیز بود و با گذشت زمان به‌طور جزئی میزان فسفر آزادشده بیشتری در سطح دوم کود مرغی نسبت به سطح اول اندازه‌گیری شد.

در هر دو سطح کود شیمیایی بیشترین مقدار فسفر آزادشده در زمان اول انکوباسیون (3 ساعت بعد از شروع انکوباسیون) به‌میزان 63/3 میلی‌گرم برای سطح اول و 181/2 میلی‌گرم بر کیلوگرم برای سطح دوم کود شیمیایی اندازه‌گیری شد. با گذشت زمان روند کاهش در فسفر آزادشده مشاهده گردید و بعد از 1080 ساعت در سطح اول و 1440 ساعت در سطح دوم کود شیمیایی یک روند تقریباً ثابت در کاهش فسفر آزادشده مشاهده گردید. مطالعه جلالی و رنجبر (2010) در تعدادی از خاک‌های آهکی استان همدان

آزادشده در خاک باشد (دلگادو و تورنت 2000). نتایج آگنبن و تیسن (1995) نیز نشان داد که جذب فسفر در ابتدا سریع بوده و سپس کاهش و بعد از 50 روز جذب فسفر به حالت پایداری رسید. در تیمار کود شیمیایی بخش عمده‌ای از فسفر به‌کاررفته در مدت‌زمان کوتاهی به‌صورت تثبیت‌شده در آمد و بنابراین به نظر می‌رسد که کود شیمیایی فسفوری می‌بایستی در مقدار کمتر و با دفعات بیشتر به‌جای مصرف یک‌باره در خاک به‌کار گرفته شود.

نشان داد که با گذشت زمان مقدار فسفر آزادشده به‌سرعت کاهش یافت و کمترین تغییرات در فسفر آزادشده در فاصله زمانی 720 تا 2160 ساعت بعد از انکوباسیون مشاهده شد. شکست در منحنی‌های مربوط به سطح اول و دوم کود شیمیایی (به‌خصوص در سطح دوم) نشان می‌دهد که جذب فسفر توسط اجزای خاک توسط دو مکانیسم متفاوت رخ می‌دهد. به‌نظر می‌رسد در زمان‌های اولیه کاهش سریع فسفر آزادشده ناشی از جذب سطحی بوده و بعدازآن پخش فسفر به داخل منافذ که با سرعت کمتری انجام می‌شود دلیل کاهش فسفر



شکل 1- ارتباط بین فسفر آزادشده و زمان در طول دوره انکوباسیون در تیمارهای کود مرگی (PM) و شیمیایی (CF) در دو سطح 100 و 200 میلی-گرم فسفر در مقایسه با تیمار شاهد (CO).

شیمیایی نتایج متفاوتی را به همراه داشت. در تیمار شاهد هیچ تفاوت معنی‌داری از لحاظ توصیف داده‌های آزادسازی فسفر بین توابع مشاهده نشد. در تیمار کود شیمیایی تمام معادلات به‌خوبی قادر به توصیف داده‌های فسفر آزادشده بودند که بر اساس ضریب تبیین و خطای استاندارد، معادله پخشیدگی پارابولیک به‌عنوان بهترین معادله در توصیف ارتباط بین زمان و فسفر آزادشده شناخته شد (جدول 3). این نتایج نشان می‌دهد که در هر دو سطح کود شیمیایی فرایند پخشیدگی و

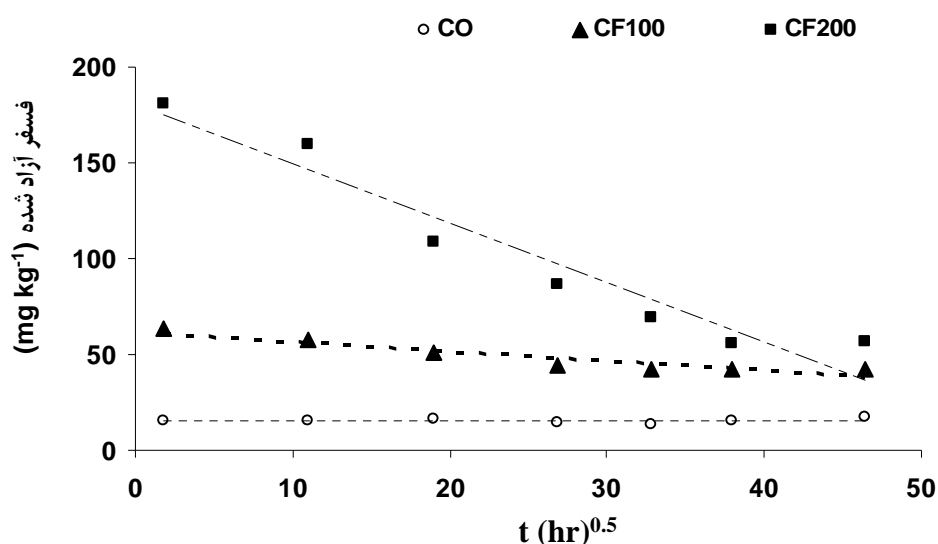
سینتیک آزادسازی فسفر

برای توصیف داده‌های فسفر آزادشده با زمان و تعیین ضرایب سرعت آزادسازی فسفر در تیمارها از معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و الویچ استفاده شد. این معادلات به‌طور گسترده‌ای برای مطالعات جذب و رهاسازی فسفر در خاک مورد استفاده قرار گرفته است (طهماسبی و حسین‌پور 1386، شریعتمداری و همکاران 2006، نافیلو 2009). برآزش داده‌های فسفر آزادشده در تیمار کود مرگی و

نفوذ فسفر به داخل منافذ کانی‌ها نقش اساسی در کاهش فسفر آزاد شده ایفا کرده است. برآزش داده‌های پخشیدگی پارابولیک در دو سطح کود شیمیایی توسط معادله

جدول 3- ضرایب تبیین و خطای استاندارد معادلات پارابولیک، نمایی، الویج و مرتبه اول در برآزش داده‌های فسفر آزاد شده در تیمارهای کود مرغی (PM) و شیمیایی (CF) در دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم بر کیلوگرم و شاهد (CO).

تیمار	پخشیدگی پارابولیک		تابع نمایی		الویج		مرتبه اول	
	r ²	S.E	r ²	S.E	r ²	S.E	r ²	SE
PM100	0/60	11/97	0/62	0/31	0/48	12/40	0/60	0/32
PM200	0/65	15/76	0/59	0/43	0/48	19/30	0/76	0/33
CF100	0/96	2/97	0/86	0/14	0/89	5/00	0/69	0/48
CF200	0/98	7/92	0/80	0/27	0/86	22/82	0/85	0/66
CO	0/11	1/36	0/10	0/09	0/10	0/005	0/10	0/09



شکل 2- برآزش معادله پخشیدگی پارابولیک به فسفر آزاد شده در تیمارهای کود شیمیایی (CF) در دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر در مقایسه با تیمار شاهد (CO).

نتایج به دست آمده مکانیسم دخیل در آزادسازی فسفر از خاک تیمار شده با کود مرغی متفاوت از کود شیمیایی است. به نظر می‌رسد که در تیمار کود مرغی آزاد شدن فسفر قابل دسترس از مکان‌های جذب سطحی اصلی‌ترین مکانیسم آزادسازی فسفر از خاک باشد.

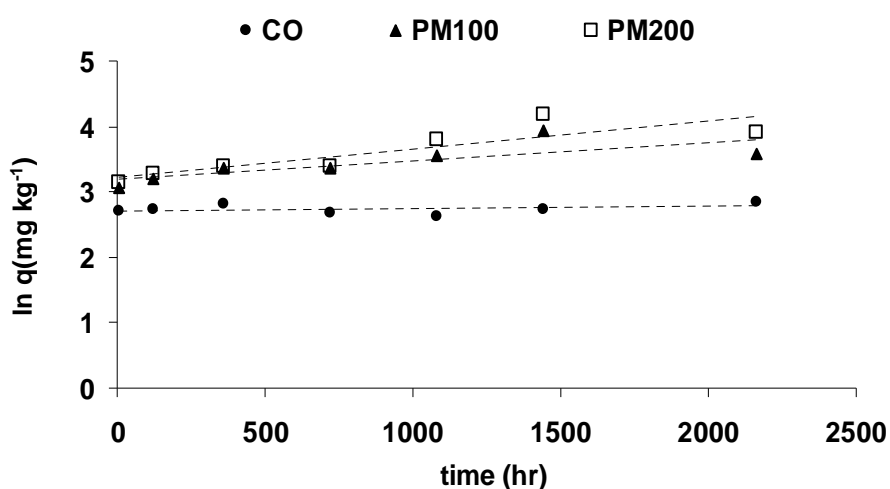
سرعت تغییر شکل فسفر

جهت تعیین سرعت تغییر شکل فسفر در خاک و مقایسه آن در تیمارها، ضرایب سرعت از معادلات

در تیمار کود مرغی به غیر از معادله الویج، سایر معادلات توصیف نسبتاً خوبی از داده‌های فسفر آزاد شده در دو سطح کود مرغی داشتند که بر اساس نتایج، معادله مرتبه اول به دلیل ضریب تبیین بالاتر می‌تواند در این تیمارها جهت توصیف سرعت رهاسازی فسفر مورد استفاده قرار گیرد. شکل 3 برآزش داده‌های فسفر آزاد شده در تیمار کود مرغی را در مقایسه با شاهد توسط معادله مرتبه اول نشان می‌دهد. با توجه

شیمیایی نشان می‌دهد که در طول دوره انکوباسیون فسفر محلول به شکل‌های پایدارتر در خاک تبدیل شده است. در تیمار کود مرغی ارزش مثبت ثابت‌های سرعت را می‌توان ناشی از افزوده شدن فسفر محلول به خاک از طریق کود مرغی و همچنین تبدیل شکل‌های پایدار فسفر موجود در خاک به شکل‌های با قابلیت دسترسی بیشتر دانست.

مورد استفاده استخراج گردید (جدول 4). شیب این معادلات می‌تواند به‌عنوان سرعت تغییر شکل فسفر در خاک مورد استفاده قرار گیرد (جلالی و رنجبر 2010). نتایج نشان داد که ثابت سرعت معادلات در دو تیمار کود مرغی و کود شیمیایی کاملاً متفاوت است به‌طوری‌که در تیمار کود مرغی ثابت‌های سرعت دارای ارزش مثبت و در تیمار کود شیمیایی دارای ارزش منفی است. ارزش منفی ثابت‌های سرعت در تیمار کود



شکل 3- برآزش معادله مرتبه اول به فسفر آزادشده در تیمارهای کود مرغی (PM) در دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر در مقایسه با تیمار شاهد (CO).

جدول 4- ثابت معادلات سینتیکی مورد استفاده در توصیف فسفر آزادشده در تیمارهای کود مرغی (PM) و شیمیایی (CF) در دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم بر کیلوگرم و شاهد (CO).

مرتبه اول	الوویچ		تابع نمایی		پخشیدگی پارابولیک		تیمار	
	k_1	β	α	b	a	q_0		K_p
	0/003	3/046	14/658	0/100	17/44	19/982	0/486	PM100
	0/0004	4/708	11/2	0/129	17/10	17/558	0/929	PM200
	-0/0002	-3/549	69/508	-0/068	71/78	63/033	-0/625	CF100
	-0/0006	-20/556	220/89	-0/187	272/22	185/49	-3/716	CF200
	0/00003	0/074	15/011	0/004	15/04	15/026	0/016	CO

پایدارتر به فسفر قابل‌دسترس تبدیل شده است. با افزایش سطح کود شیمیایی ثابت سرعت معادلات (با ارزش منفی) افزایش یافت که بیانگر افزایش سرعت

با افزایش سطح کود مرغی ثابت سرعت معادلات افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که در سطح بالاتر کود مرغی فسفر با سرعت بیشتری از شکل‌های

شیمیایی به شکل غیرقابل دسترس برای گیاه تبدیل شده است. دلیل کاهش درصد بازیابی در خاک را می‌توان ناشی از فرایند جذب سطحی و رسوب کانی‌های پایدار فسفات کلسیم دانست (ایچرلوبرمن 2007). نتایج به دست آمده با نتایج سایر محققین همخوانی دارد (جلالی و رنجبر 2010، ردی و همکاران 2005).

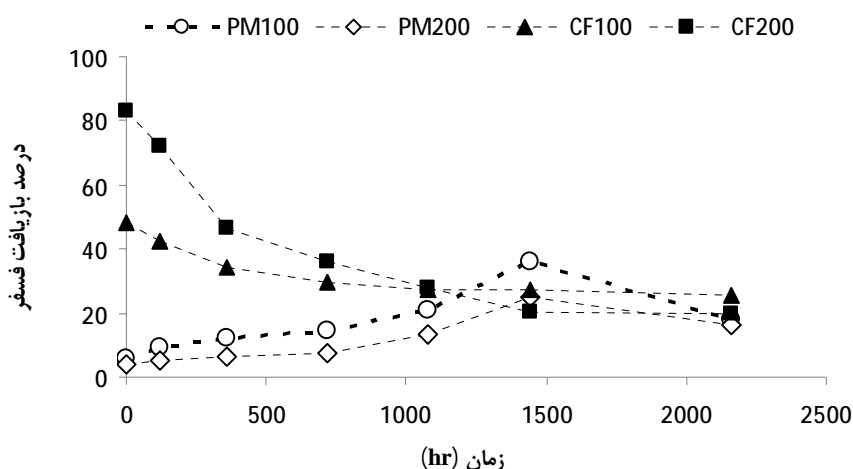
نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که دینامیک فسفر در تیمار کود شیمیایی متفاوت از کود مرغی است. کاهش در فسفر آزاد شده در کود شیمیایی بلافاصله بعد از شروع دوره آزمایش و برای تیمار کود مرغی بعد از گذشت 1440 ساعت از شروع دوره مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که در تیمار کود شیمیایی به دلیل ظرفیت بالای خاک در تثبیت فسفر، بخش عمده‌ای از فسفر محلول در مدت زمان کوتاهی به شکل‌های پایدارتر تبدیل شده است. در زمان‌های ابتدایی میزان فسفر آزاد شده از کود مرغی در مقایسه با کود شیمیایی به مراتب کمتر بود اما در زمان‌های پایانی آزمایش مقدار فسفر آزاد شده در کود مرغی در مقایسه با تیمار کود شیمیایی بیشتر بود که نشان از نقش مؤثرتر این کودها در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه دارد. مقایسه ضرایب سرعت تغییر شکل فسفر در دو تیمار نیز نشان داد که با گذشت زمان در تیمار کود مرغی فسفر از شکل‌های پایدارتر به فسفر محلول تبدیل شده است در حالی که در تیمار کود شیمیایی گذشت زمان سبب شد تا فسفر از شکل محلول به شکل پایدارتر تبدیل شود و افزایش سطح کود مصرفی سرعت تغییر شکل را افزایش داد. با توجه به نتایج کاربرد کود شیمیایی در این خاک‌ها می‌بایستی که در مقادیر کمتر و با دفعات بیشتر انجام شود. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، بررسی کاربرد تلفیقی کود شیمیایی فسفر به همراه کود مرغی در تأمین پایدار فسفر قابل دسترس گیاه پیشنهاد می‌شود.

تغییر شکل فسفر به شکل‌های پایدارتر هست. این نتایج نشان می‌دهد که در سطوح بالاتر کود شیمیایی کاهش فراهمی فسفر با گذشت زمان با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. شیمیایی نتایج حسین‌پور و بیابانکی (2009) نیز نشان داد که کاربرد کود شیمیایی سبب افزایش ثابت سرعت معادلات سینتیکی در خاک‌های آهکی می‌شود.

درصد بازیابی فسفر

با گذشت زمان درصد بازیابی فسفر در سطح اول و دوم کود مرغی افزایش یافت و در زمان 1440 ساعت بعد از انکوباسیون به بیشترین مقدار خود رسید (شکل 4). افزایش درصد بازیابی فسفر در اثر استفاده از کودهای سبز در خاک توسط باگیه و همکاران (2004) نیز گزارش شده است. آن‌ها دلیل افزایش درصد بازیابی فسفر با زمان را به فعالیت میکروبی و معدنی شدن فسفر آلی نسبت دادند. همچنین تولید محصولات حاصل از تجزیه میکروبی در طول دوره انکوباسیون و کاهش جذب سطحی فسفر را دلیل دیگری برای افزایش درصد بازیابی فسفر در خاک دانست. در تمامی بازه‌های زمانی درصد بازیابی فسفر در سطح اول کود مرغی بیشتر از سطح دوم بود و اختلاف بین دو سطح در زمان‌های پایانی بیشتر از زمان‌های ابتدایی انکوباسیون بود. دلیل احتمالی این رخداد را شاید بتوان به بیشتر بودن فعالیت میکروبی در سطح دوم کود مرغی و ایموبیلیزاسیون فسفر نسبت داد (ردی و همکاران 2005). بر اساس نتایج به دست آمده کاربرد کود مرغی در سطح اول نقش مؤثرتری در افزایش فراهمی فسفر در مقایسه با سطح دوم کود مرغی دارد. درصد بازیابی فسفر در سطح اول و دوم کود شیمیایی از یک روند کاهشی تبعیت کرد به طوری که در پایان دوره انکوباسیون (2160 ساعت) درصد بازیابی به 25 درصد در سطح اول و 19 درصد در سطح دوم کود شیمیایی رسید. بر این اساس در پایان دوره انکوباسیون به ترتیب 75 و 81 درصد از فسفر قابل دسترس خاک در سطح اول و دوم تیمار کود



شکل 4- تغییرات زمانی درصد بازیافت فسفر در تیمارهای کود مرعی (PM) و شیمیایی (CF) در دو سطح 100 و 200 میلی- گرم فسفر.

منابع مورد استفاده

- حجازی مهریزی م و شریعتمداری ح و افیونی م، 1392. اثرات تجمع و باقی مانده لجن فاضلاب بر شکل‌های معدنی فسفر و ارتباط آن‌ها با قابلیت دسترسی فسفر در خاک آهکی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره 64، صفحه‌های 33 تا 42.
- زلفی باوریانی م و نوروزی م، 1389. تأثیر ماده آلی بر بازیابی فسفر باقی مانده در یک خاک آهکی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره 52، صفحه‌های 87 تا 97.
- طهماسبی پور ف و حسین پور ع، 1386. سینتیک تغییرات فسفر قابل استخراج در تعدادی از خاک‌های استان همدان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره 42، صفحه‌های 475 تا 488.
- Agbenin JO, Tiessen H. 1995. Phosphorus forms in particle-size fractions of a toposequence from Northeast Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1687-1693
- Baggie I, Rowell DL, Robinson JS and Warren GP, 2004. Decomposition and phosphorus release from organic residues as affected by residue quality and added inorganic phosphorus. *Agroforest. Syst.* 63: 125-131.
- Dail HW, He Z Erich SM and Honeycutt WC, 2009. Soil phosphorus dynamics in response to poultry manure amendments. *Soil Sci.* 174: 195-201.
- Delgado A and Torrent J, 2000. Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2031-2037.
- Eicher-Loberman B, Kohne S and Koppen D, 2007. Effect of organic, inorganic, and combined organic and inorganic P fertilization on plant P uptake and soil P pools. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170: 623-628.
- Gee GW and Bauder JW, 1986. Particle size analysis. Pp. 308-409. In: A. Klute (ed) *Methods of Soil Analysis*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Hanssen JC and Strawn, DG, 2003. Kinetics of phosphate release from manure-amended alkaline soil. *Soil Sci.* 168:869-879.
- Hosseinpour AR and Biabanaki FS, 2009. Impact of fertilizer phosphorus application on phosphorus release kinetics in some calcareous soils. *Environ. Geol.* 56: 1065-1069.
- Inskeep WP and Silvertooth JC, 1988. Inhibition of hydroxyapatite precipitation in the presence of fulvic, humic and tannic acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 941-946.
- Jalali M and Ranjbar F, 2010. Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma* 155: 101-106.
- Loppert RH and Suarez DL, 1996. Carbonates and gypsum. Pp. 437-474. In: DL Sparks (ed). *Methods of Soil Analysis*. ASA and SSSA, Madison, WI.

- Murphy J and Riley JP, 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27:31-36.
- Nafilu A, 2009. Effects of soil properties on the kinetics of desorption of phosphate from Alfisol by anion-exchange resins. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172: 101-107.
- Olsen SL and Sommers LE, 1982. Phosphorus. Pp.403-427. In A.L. Page et al. (ed.), *Methods of Soil Analysis*, part 2. 2nd ed..Agron. Monogr. No. 9, ASA and SSSA, Madison WI.
- Reddy DD, Rao SA and Singh M, 2005. Changes in P fractions and sorption in an alfisol following crop residues application. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168: 241-247.
- Rowell DL, 1994. *Soil Science: Methods and Applications*. Longman Group, Harlow. p. 345.
- Shariatmadari H, Shirvani M and Jafari A, 2006. Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid toposequences. *Geoderma* 132: 261-272.
- Tunesi S, Poggi V and Gessa C, 1999. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: the role of calcium ions in solution and carbonate minerals. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 53: 219-227.
- Walkley A and Black IA, 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Uygun V and Karabatak I, 2009. The effect of organic amendments on mineral phosphate fractions in calcareous soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172: 336-345.