

## اثر ماده آلی بر سینتیک تثبیت فسفر در چند خاک مختلف

مصطفی شیرمردی<sup>۱</sup>، حسن توفیقی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی علوم خاک دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۲۷)

### چکیده

در این بررسی اثر ماده آلی بر سینتیک تثبیت فسفر در چهار خاک مختلف مطالعه شد. برای این کار خاک‌ها با سطوح متفاوت کود دامی تیمار و به مدت دو ماه در اینکوبیتور نگهداری شدند. سپس با  $K_2HPO_4$  به میزان  $45\text{mg P/kg}$  تیمار و در اینکوبیتور در دمای  $25^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس به مدت صد روز نگهداری شدند. در زمان‌های ۰، ۱، ۵، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ روز از خاک‌ها نمونه‌گیری و Olsen-P آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد سرعت اکسایش ماده آلی و میزان فسفر آلی معدنی شده با میزان رس همبستگی منفی معناداری دارند. همچنین، سرعت اکسایش کربن آلی با میزان کود آلی اضافه شده به خاک‌ها افزایش یافت. فسفر موجود در کود دامی نیز نسبت به فسفر معدنی قابلیت استفاده بالاتری داشت. در حضور ماده آلی، سینتیک تثبیت فسفر تحت تأثیر معدنی شدن فسفر آلی قرار می‌گیرد و در هر زمان برآیند اثر چهار فرایند جذب در سطح، رسوب، غیر متحرک شدن، و معدنی شدن فسفر در دوره اینکوبیشن، سطح Olsen-P خاک را تعیین می‌کنند. افزودن ماده آلی به خاک موجب افزایش بازیابی فسفر اضافه شده به خاک شد. این اثر در زمان‌های طولانی‌تر پس از افزودن فسفر آشکارتر بود.

**کلیدواژگان:** تثبیت فسفر، سینتیک، فسفر آلی، کربن آلی، معدنی شدن.

### مقدمه

فسفر، بعد از نیتروژن، مهم‌ترین عنصر غذایی محدودکننده تولید محصول در بسیاری از نقاط جهان است (Holford, 1997). اما رفع کمبود فسفر با کوددهی، به دلیل واکنش‌های پیچیده فسفر با خاک، مستلزم مصرف فسفر به میزان خیلی زیادتر از نیاز گیاه است. بنابراین، همه فسفوری که از طریق کوددهی به خاک اضافه می‌شود برای گیاهان قابل استفاده نیست (Chepkwony *et al.*, 2001). دو سازوکار برای تثبیت فسفات در خاک ارائه شده است؛ یکی، جذب فسفات بر سطوح کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم و دیگری، تشکیل رسوبات فسفات (مانند فسفات‌های کلسیم، آهن، آلومینیوم) (White and Taylor, 1977). عوامل مختلفی نظیر میزان کربن آلی، pH، بافت، درصد کربنات کلسیم، درصد کلسیم و منیزیم تبادل‌ی، و قدرت یونی محلول بر فرایندهای جذب و رسوب فسفات در خاک مؤثرند (Bubba, 2003).

ماده آلی یکی از عوامل مؤثر بر قابلیت استفاده فسفر در خاک است. آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند برهمکنش ماده آلی با خاک به افزایش بازیابی فسفر بومی و همچنین بازده کودهای فسفوری می‌انجامد (Staunton and Leprince, 1996; Delgado *et al.*, 2002). سازوکارهای مختلفی برای این افزایش گزارش شده‌اند. بقایای آلی از طریق رقابت اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم با یون‌های فسفات بر سر مکان‌های جذبی موجب تأخیر در جذب فسفر می‌شوند (Violente and Gianfreda, 1993; Staunton and Leprince, 1996; Delgado *et al.*, 2002). Nagarajah و همکاران (1970) اثر رقابتی آنیون‌های آلی با فسفات را بر جذب در سطوح کائولینایت و گیبسایت بررسی و اعلام کردند سیترات و اکسلات در کاهش جذب فسفر توسط کائولینایت و گیبسایت بسیار مؤثرند. مالونات، تارتارات، و ملات نسبتاً مؤثر بودند و استات، سوکسینات، و لاکتات اثر کمی داشتند. Haynes and Mokolobate (2001) نیز گزارش کردند بر اثر تجزیه ماده آلی باقی‌مانده اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم و اسیدهای هیومیک و فولیک در محلول خاک آزاد می‌شوند که با فسفات برای مکان‌های جذبی رقابت می‌کنند. همچنین

همچنین مانع رسوب اکتا کلسیم فسفات ( Grossl and Inskip, 1989 ) و دای کلسیم فسفات ( Grossl and Inskip, 1991 ) می‌شود.

با توجه به گزارش‌های متفاوت و گاه مغایر، که درباره تأثیر ماده آلی بر قابلیت استفاده فسفر در خاک‌ها وجود دارد، هدف این مطالعه بررسی تأثیر سطوح مختلف ماده آلی بر بازیابی فسفر اضافه‌شده به خاک‌های مختلف در طول زمان است.

## مواد و روش‌ها

### نمونه‌های خاک و مواد شیمیایی

چهار نمونه خاک سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) از مناطق مختلف ایران جمع‌آوری شد. نمونه‌ها، بعد از هواخشک شدن، برای آزمایش‌های اولیه از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. همه مواد شیمیایی استفاده‌شده در این مطالعه از شرکت مرک با خلوص GR بود.

### اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها

درصد رس، سیلت، و شن خاک‌ها با روش هیدرومتر اندازه‌گیری شد (Bouyoucos, 1962). pH و EC عصاره اشباع نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1978). روش والکی و بلک برای اندازه‌گیری مقدار کربن آلی در خاک‌ها استفاده شد (Nelson and Sommers, 1996). کربنات کلسیم معادل بر اساس روش کلسیمتری اندازه‌گیری شد (Nelson, 1982). فسفر آلی کود دامی به روش Cottenie (1980)، کربن آلی کود دامی به روش Nelson and Sommers (1996)، و تنفس میکروبی به روش Isermeyer (1952) اندازه‌گیری شد. فسفر به روش اولسن از خاک‌ها استخراج شد؛ به این صورت که نسبت ۱:۲۰ از خاک به محلول بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار pH=۸/۵ به مدت سی دقیقه تکان داده شد و سپس صاف شد (Olsen and Sommers, 1982). غلظت فسفر در عصاره به روش مولیبدات آمونیوم-آسکوربیک اسید، که Murphy and Riley (1962) آن را ارائه کردند، اندازه‌گیری شد. بازیابی فسفر از طریق رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\text{Recovery (\%)} = \frac{P_{PCITj} - P_{OCITj}}{P_A} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

Olsen-P،  $P_{OCITj}$  اندازه‌گیری‌شده در شاهد (خاک کودنخورده) با درصد کربن آلی  $C_i$  در زمان  $T_j$  و  $P_{PCITj}$  و Olsen-P اندازه‌گیری‌شده در خاک تیمار شده با کود معدنی با درصد کربن آلی  $C_i$  در زمان  $T_j$ ، هر دو، بر حسب میلی‌گرم فسفر

Deb and Datta (1967) اعلام کردند آنیون‌های آلی جذب و نگهداری فسفر توسط خاک را در pHهای مختلف کاهش می‌دهند که این کاهش به ماهیت فیزیکوشیمیایی ترکیبات آلی و شرایط واکنش آن‌ها با خاک بستگی دارد. Sibanda and Young (1986) در تحقیقی گزارش کردند ماده آلی به میزان شایان توجه جذب فسفر را بر اکسیدهای آهن و آلومینیوم و به طور کلی خاک کاهش می‌دهد. به‌رغم این نتایج، در برخی موارد بین جذب سطحی فسفر با کربن آلی خاک همبستگی مثبت مشاهده شده است؛ که علت آن را وجود آهن و آلومینیوم جذب‌شده توسط کلوئیدهای آلی (مواد هیومیک) و جذب سطحی فسفر از طریق این یون‌ها دانسته‌اند (Frossard *et al.*, 2000). برهم‌کنش‌هایی بین اکسیدهای آهن و آلومینیوم با مواد آلی مشاهده شده که بر کریستالی شدن این اکسیدها اثر بازدارندگی داشته و در نهایت موجب افزایش جذب فسفر توسط آن‌ها شده است (Huang and Violante, 1986). به‌رغم گزارش‌هایی مبنی بر کاهش و افزایش جذب فسفر در خاک‌ها توسط ماده آلی، Appelt *et al.* (1975) گزارش کردند بعد از افزودن ماده آلی هیچ تغییری در جذب فسفر توسط خاک رخ نداد. Evans (1985) نیز گزارش کرد از هفت ترکیب آلی، که آزمایش شد، فقط اسید فیتیک جذب فسفر را به طور معنادار کاهش داد. Borggaard *et al.* (1990) گزارش کردند حذف ماده آلی اثر مستقیم بر جذب فسفر ندارد. آنان اعلام کردند آنیون‌های آلی با فسفات بر سر مکان‌های جذبی موجود رقابت نمی‌کنند و ماده آلی فقط با تأثیری که بر کریستالی شدن اکسیدهای آهن و آلومینیوم دارد (کاهش کریستالی شدن و افزایش جذب فسفر) بر نگهداری فسفر تأثیرگذار است. اسیدهای آلی همچنین می‌توانند کمپلکس‌های قوی‌تری با  $Fe^{3+}$ ،  $Al^{3+}$  و  $Ca^{2+}$  در مقایسه با فسفر تشکیل دهند و موجب کاهش سرعت رسوب فسفر و تغییر شکل آن شوند (Kang *et al.*, 2008). به‌علاوه، ایجاد پوشش محافظ در سطح ذرات سزکویی اکسید توسط هوموس ظرفیت تثبیت فسفر این ذرات را کاهش می‌دهد. Wandruszka (2006) اعلام کرد اسیدهای آلی با مسدود کردن مکان‌های جذب فسفر و همچنین تشکیل کمپلکس با آهن و آلومینیوم تبادلی در خاک موجب افزایش تحرک فسفر می‌شوند. همچنین، آنان گزارش کردند مواد هیومیک بومی و اضافه‌شده به خاک بازیابی Olsen-P را افزایش می‌دهند و در حضور کاتیون‌های فلزی کمپلکس قوی بین فسفر معدنی و هومات‌ها تشکیل می‌شود. به گزارش Inskip and Silvertooth (1988) حضور اسیدهای فولیک، هیومیک، و تانیک رسوب هیدروکسی آپاتیت را مهار می‌کند. اسیدهای آلی

مقادیر ۷، ۱۴، ۲۱، ۴۰، ۶۰، و ۱۳۰/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، و به خاک شماره ۴ مقادیر ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۹۰/۹، و ۱۳۰/۴۳ گرم کود دامی به کیلوگرم اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت دو ماه در اینکوبیتور قرار داده شدند تا واکنش‌های سریع‌تر کود با خاک انجام گیرد. رطوبت نمونه‌ها در این مدت در ۵۰ درصد SP نگهداری شد. بعد از این مدت، درصد کربن آلی نمونه‌ها تعیین شد. هفت سطح از کربن آلی برای هر یک از خاک‌های مورد نظر انتخاب شد. برای مطالعات سینتیکی، فسفر به صورت  $K_2HPO_4$  در سطح ۴۵ mg P/kg، به نمونه‌ها اضافه شد. نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی در اینکوبیتور در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت صد روز نگهداری و در زمان‌های ۰، ۱، ۵، ۲۰، ۵۰، و ۱۰۰ روز از آن‌ها نمونه‌برداری و غلظت فسفر استخراج شده به روش اولسن در آن‌ها اندازه‌گیری شد. در طول این دوره، رطوبت نمونه‌ها در ۵۰ درصد SP نگهداری شد.

#### تحلیل‌های آماری

همه آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تکرار انجام گرفت و نتایج به صورت میانگین مقادیر به دست آمده از دو تکرار ارائه شد. تجزیه واریانس داده‌های آزمایش به کمک نرم‌افزار SAS 9.2 صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

#### یافته‌ها و بحث

##### ویژگی‌های خاک‌ها

جدول ۱ تعدادی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های استفاده شده را نشان می‌دهد. ویژگی‌های کود دامی استفاده شده در آزمایش ماده آلی در جدول ۲ می‌آید.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک استفاده شده

شماره خاک	منطقه نمونه‌برداری	ویژگی‌های شیمیایی				ویژگی‌های فیزیکی		
		pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	OC (%) <sup>*</sup>	CCE (%) <sup>**</sup>	شن (%)	رس (%)	سیلت (%)
۱	طالقان	۷٫۳۲	۱٫۱۱	۰٫۳۹	۰	۷۲	۹	۱۹
۲	کلاردشت	۷٫۷۴	۱٫۰۷	۰٫۲۴	۰	۷۲	۸	۲۰
۳	خیرودکنار	۸٫۰۳	۰٫۶۵	۰٫۲۷	۰	۶۶	۱۶	۱۸
۴	خیرودکنار	۶٫۹۸	۰٫۲۹	۰٫۴۳	۰	۱۱	۴۶	۴۳

<sup>\*</sup> Organic Carbon <sup>\*\*</sup> Calcium Carbonate Equivalent

##### تغییرات Olsen-P خاک در حضور ماده آلی

در این بررسی ابتدا سطوح مختلف یک کود دامی، که بعضی از ویژگی‌های آن در جدول ۲ آمد، به خاک‌ها اضافه و به مدت دو

در کیلوگرم خاک و  $P_A$  مقدار کود معدنی اضافه شده به خاک (۴۵ mg P/kg) است.

میزان فسفر معدنی شده طی دو ماه با رابطه ۲ محاسبه

شد:

(رابطه ۲)

$$\text{فسفر معدنی شده طی دو ماه} = \left( \left( A \times \frac{B}{100} \right) + C \right) \times \frac{D}{100} \times \frac{100}{B} \times \frac{E}{100} \times 1000 \left( \frac{mg}{kg} \right)$$

A میزان کود دامی اضافه شده به خاک بر حسب گرم بر کیلوگرم، B درصد کربن کود دامی، C میزان کربن بومی خاک بر حسب گرم بر کیلوگرم، D درصد کاهش کربن خاک طی دو ماه، و E درصد فسفر آلی موجود در کود دامی ( $E = 0.14$  -  $0.73$ ) است. این رابطه با فرض اینکه میزان تجزیه ماده آلی بومی خاک‌ها (که عمدتاً به صورت هوموس و درصد آن در خاک‌ها کم است) طی دو ماه اندک و قابل صرف نظر کردن است به دست آمده است.

درصد کاهش کربن خاک طی دو ماه با رابطه ۳ به دست

آمد:

(رابطه ۳)

$$\text{کاهش کربن} (\%) = \frac{\text{کل کربن خاک در ابتدای دو ماه} - \text{کل کربن خاک در ابتدای دو ماه}}{\text{کل کربن خاک در ابتدای دو ماه}} \times 100$$

##### آماده‌سازی خاک‌ها با مقدار کربن آلی مختلف و آزمایش‌های

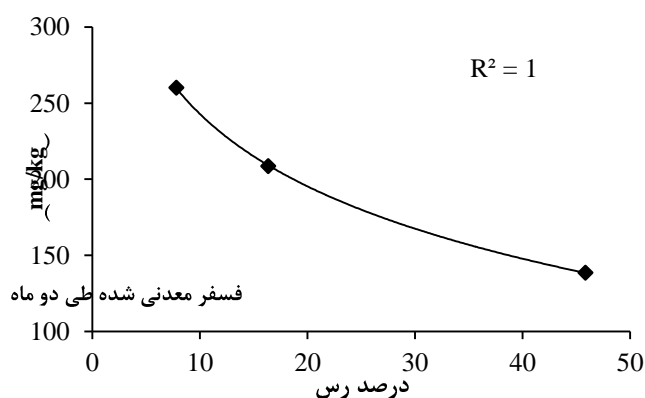
##### سینتیکی

بعد از تهیه چهار خاک با درصد کربن آلی کم (جدول ۱)، مقادیر مختلفی از کود گاوی کاملاً پوسیده به نمونه‌ها اضافه شد. به این ترتیب که به خاک شماره ۱ مقادیر ۷، ۱۴، ۲۱، ۴۲، ۹۰/۹، و ۱۶۶/۷ گرم بر کیلوگرم، به خاک شماره ۲ مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، و ۱۳۰/۴۳ گرم بر کیلوگرم، به خاک شماره ۳

جدول ۲. مشخصات کود دامی استفاده شده در آزمایش ماده آلی

Olsen-P (%)	فسفر کل (%)	کربن آلی (%)	ماده آلی (%)	C/P
۰٫۱۴	۰٫۷۳	۲۸٫۸۸	۵۰٫۶۷	۳۹٫۶

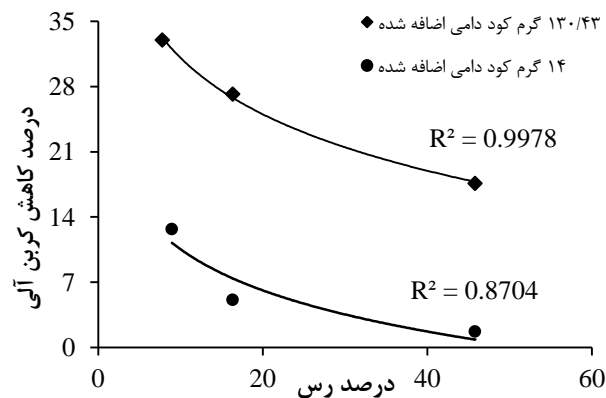
مشخص هر چه میزان مصرف کود آلی افزایش یابد کود با سرعت بیشتری تجزیه می‌شود. زیرا سرعت تجزیه کود به میزان اضافه‌شده به خاک بستگی دارد (Bohn *et al.*, 2001). به عبارت دیگر، در واکنش‌های شیمیایی، از جمله واکنش‌های اکسیدیشن، سرعت واکنش وابسته به غلظت واکنشگرهاست. نسبت C/P در کود دامی برابر ۳۹/۶ و درصد فسفر در آن ۰/۷۳ است. با توجه به اینکه هنگامی که  $C/P < 200$  است یا درصد فسفر در کود بزرگ‌تر از ۰/۳ است، بر اثر افزودن کود به خاک، برآیند دو فرایند معدنی شدن و غیر متحرک شدن معدنی شدن فسفر آلی است (Havlin *et al.*, 1999)، بر اثر تجزیه کود دامی در خاک‌ها فسفر معدنی آزاد می‌شود. جدول ۳ میزان فسفر معدنی آزادشده طی دو ماه را در خاک‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد میزان فسفر معدنی‌شده طی دو ماه با درصد رس همبستگی دارد.



شکل ۲. رابطه میزان فسفر معدنی‌شده و درصد رس طی دو ماه

شکل‌های ۳ و ۴ سینتیک تغییرات Olsen-P خاک را در حضور درصدهای متفاوت کربن آلی با و بدون افزودن فسفر معدنی ( $45 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان Olsen-P در زمان‌های کوتاه همراه با نوسان کاهش می‌یابد و پس از حدود پنجاه روز میزان آن در خاک‌هایی که سطح ماده آلی آن‌ها نسبتاً کم است تقریباً ثابت می‌شود؛ ولی در بعضی خاک‌های با سطح ماده آلی زیاد افزایش می‌یابد. با افزودن ماده آلی به خاک، چهار فرایند جذب در سطح، رسوب، غیر متحرک شدن، و معدنی شدن فسفر به طور همزمان انجام می‌شود. سه فرایند اول موجب کاهش فسفر قابل استفاده (Olsen-P) و فرایند چهارم موجب افزایش آن می‌شود. خالص اثر این چهار فرایند در هر زمان، سطح Olsen-P را در خاک مشخص می‌کند. شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات خالص اثر این چهار فرایند را با زمان نشان می‌دهند.

ماه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در اینکوبیتور در رطوبت ۵۰ درصد SP نگهداری شد. جدول ۳ میزان کود دامی اضافه‌شده به هر خاک را در دو سطح زیاد و کم و درصد کاهش کربن آلی خاک را طی دو ماه در خاک‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت اکسایش کربن آلی در خاک‌های مختلف متفاوت است. شکل ۱ نشان می‌دهد سرعت اکسایش با درصد رس خاک، هنگامی که میزان کود دامی اضافه‌شده زیاد باشد، همبستگی منفی بالایی دارد که به علت اختلال در تهویه خاک با افزایش درصد رس است. اما هنگامی که میزان کود دامی اضافه‌شده کم باشد، همبستگی کاهش می‌یابد که به دلیل نیاز کمتر به اکسیژن است؛ که به هر حال در خاک با درصد رس زیاد نیز ممکن است تا حدی تأمین شود. همچنین، نتایج جدول ۲ گویای آن است که سرعت اکسایش کربن آلی با کاهش میزان کود آلی اضافه‌شده به خاک کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، صرف‌نظر از نوع خاک، در شرایط



شکل ۱. رابطه درصد کاهش کربن آلی خاک و درصد رس طی دو ماه برای دو سطح کود دامی اضافه‌شده

جدول ۳ همچنین میزان کل فسفر آزادشده طی دو ماه و نیز درصد کاهش آن را طی همین مدت نشان می‌دهد. میانگین درصد کاهش فسفر در خاک‌ها در این مدت ۳۴/۴ درصد بود. در حالی که طی همین مدت میانگین درصد کاهش فسفر در صورتی که فسفر به صورت کود معدنی بدون افزودن ماده آلی به این خاک‌ها اضافه شود ۶۷/۵ درصد بود (جدول ۴). این کاهش کمتر (یا بازیابی بیشتر) فسفر در حضور ماده آلی ممکن است ناشی از ممانعت ماده آلی از رسوب یا جذب فسفر باشد (Violente and Gianfreda, 1993; Staunton and Leprince, 1996; Delgado *et al.*, 2002; Kang *et al.*, 2008). همچنین به نظر می‌رسد این اثر به سبب آزاد شدن تدریجی فسفر بر اثر معدنی شدن فسفر آلی باشد. البته این دو اثر جمع‌ناپذیر نیست و موجب می‌شود اثر مشترک این دو سبب شود قابلیت استفاده فسفر کود آلی نسبت به کود معدنی بیشتر باشد.

جدول ۳. درصد کاهش کربن آلی و میزان فسفر معدنی شده و فسفر کل آزاد شده طی دو ماه پس از افزودن کود دامی به خاکها

شماره خاک	کود دامی اضافه شده	کاهش کربن آلی خاک طی دو ماه	Olsen-P در کود دامی	P معدنی شده طی دو ماه	کل P آزاد شده طی دو ماه	Olsen-P خاک بعد از دو ماه	کاهش Olsen-P خاک طی دو ماه
	g / kg soil	(%)		(mg P/kg soil)			(%)
۱	۱۶۶٫۷	۲۳٫۹	۲۴۲٫۹	۲۵۴٫۱	۴۹۷	۳۵۹٫۹	۲۷٫۶
۲	۱۳۰٫۴۳	۳۳	۱۹۰	۲۷۰٫۲	۴۶۰٫۲	۲۶۲٫۷	۴۲٫۹
۳	۱۳۰٫۴۳	۲۷٫۲	۱۹۰	۲۲۴٫۳	۴۱۴٫۳	۲۹۴٫۴	۲۸٫۹
۴	۱۳۰٫۴۳	۱۷٫۶	۱۹۰	۱۵۰٫۹	۳۴۰٫۹	۲۱۱٫۴	۳۸

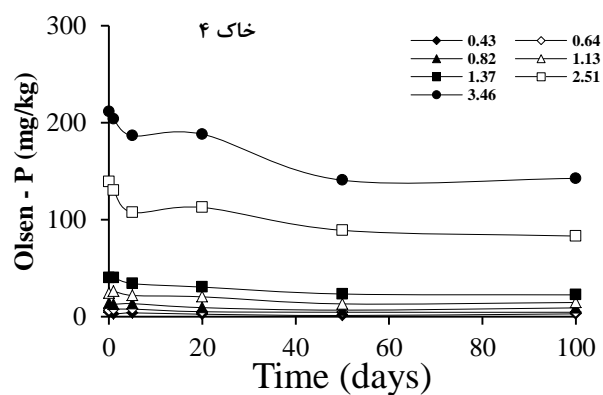
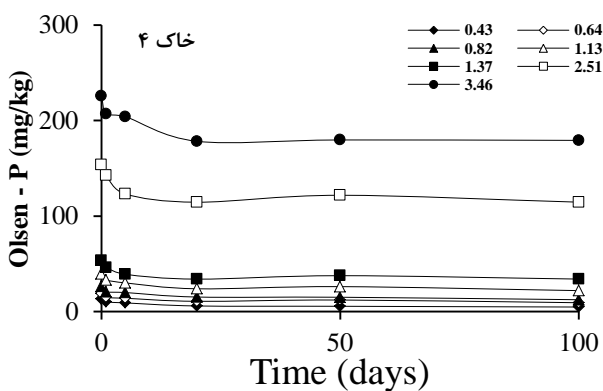
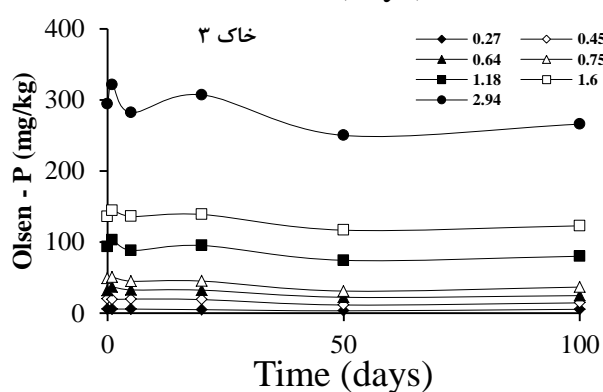
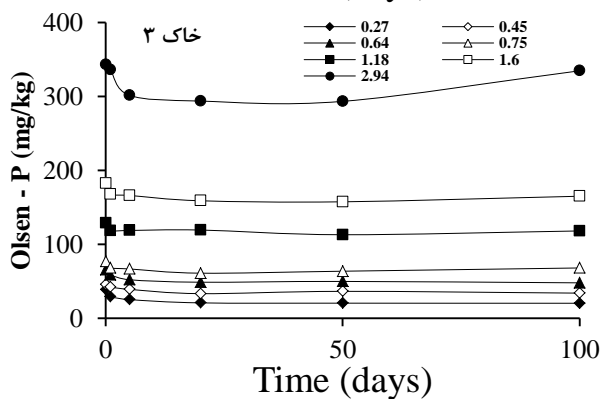
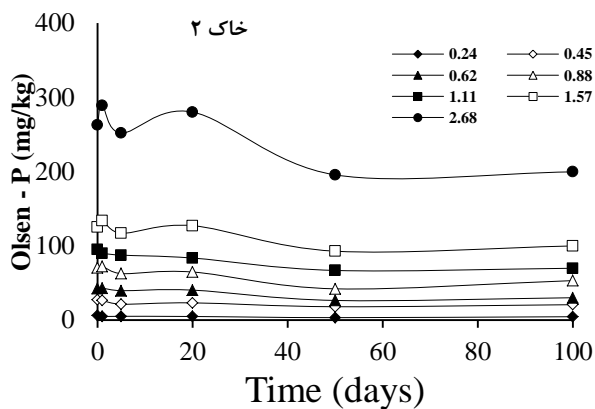
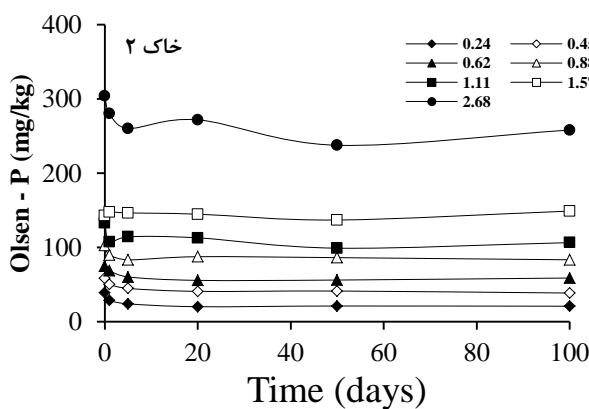
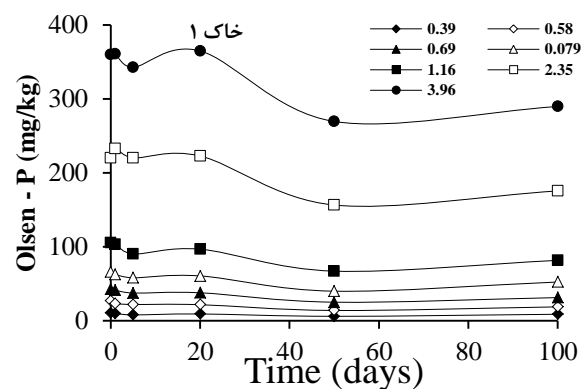
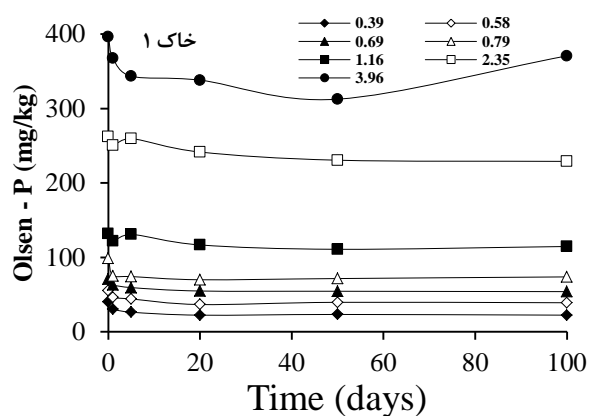
ماده آلی برای خاک ۱ و مقدار ۱۳۰٫۴۳ گرم بر کیلوگرم برای خاک‌های ۲ و ۳ و ۴) ماده آلی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هنگامی که سطح ماده آلی کم یا متوسط باشد روند تغییرات Olsen-P با زمان نسبتاً منظم و مشابه است و منحنی خاکی که کود معدنی دریافت کرده بالاتر از منحنی خاک بدون دریافت کود معدنی است. اما هنگامی که سطح ماده آلی در خاک زیاد است وضعیت کاملاً متفاوت می‌شود و روند تغییرات در دو حالت با یکدیگر مشابه نیست. به نظر می‌رسد هنگامی که درصد ماده آلی خاک کم است میزان معدنی شدن یا غیر متحرک شدن فسفر در خاک کم می‌شود و تغییرات Olsen-P عمدتاً از دو فرایند رسوب و جذب فسفر در سطح متأثر می‌شود. اما هنگامی که درصد ماده آلی در خاک بالاست، اثر دو فرایند معدنی شدن یا غیر متحرک شدن در طول زمان به اندازه‌ای زیاد می‌شود که تغییرات Olsen-P در هر زمان از چهار فرایند یادشده متأثر می‌شود. به علاوه، به نظر می‌رسد در حضور فسفر معدنی فرایند معدنی شدن فسفر متفاوت از عدم حضور آن باشد. این موضوع در درصدهای بالای ماده آلی در خاک بیشتر آشکار می‌شود. وضعیت پیچیده حاصل سبب می‌شود منحنی تغییرات Olsen-P در خاک، هنگامی که به آن کود معدنی اضافه نشده، متفاوت از منحنی تغییرات Olsen-P در این شرایط، یعنی درصد بالای ماده آلی در خاک پس از افزودن کود معدنی، باشد. در شکل‌های ۶ تا ۹ مشاهده می‌شود هنگامی که درصد کربن بالاترین مقدار را دارد، در زمان‌های نسبتاً کم، منحنی تغییرات Olsen-P برای تیمار کودی بالای منحنی تیمار کودی + سطح ثابت فسفر معدنی قرار می‌گیرد؛ که احتمالاً به سبب اثر سطح بالای فسفر معدنی بر خالص فرایند معدنی شدن است. بنابراین، در این شرایط تعیین تغییرات بازیابی فسفر معدنی با زمان در حضور ماده آلی امکان‌پذیر نیست.

شکل ۵ میزان CO<sub>2</sub> متصاعد شده در طول دوره آزمایش را در دو سطح کربن آلی کم و زیاد در خاک شماره ۳ نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد متعاقب دوره شصت‌روزه اولیه اینکوبیشن خاک تجزیه ماده آلی در دوره آزمایش همچنان استمرار می‌یابد. محاسبات نشان می‌دهد طی دوره صدروزه آزمایش، در خاک با سطح ۲٫۹۶ درصد کربن، ۵٫۳ درصد کربن خاک به CO<sub>2</sub> تبدیل می‌شود. با توجه به C/P پایین کود دامی (۳۸٫۹)، بر اثر تجزیه ماده آلی، فسفر آلی کود به فسفر معدنی تبدیل می‌شود. میزان فسفر معدنی شده در این خاک، با سطح ۲٫۹۶ درصد کربن آلی، در حدود ۲۲۰ میلی‌گرم در دوره صدروزه آزمایش است. بدیهی است میزان فسفر معدنی شده با کاهش درصد کربن آلی خاک کاهش می‌یابد. این میزان فسفر آزاد شده بر روند تغییرات Olsen-P با زمان اثر می‌گذارد. بنابراین، افزایش Olsen-P در خاک در زمان‌های اولیه (شکل‌های ۳ و ۴) می‌تواند به سبب معدنی شدن فسفر باشد.

جدول ۴. میانگین بازیابی کود فسفوری معدنی با زمان در خاکها

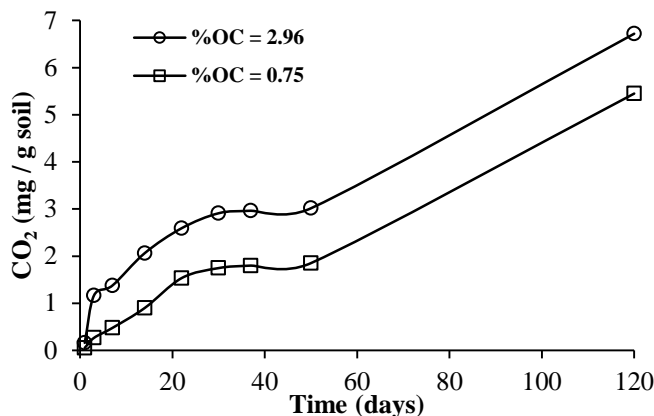
زمان (روز)	بازیابی (درصد)	کاهش بازیابی (درصد)
۰	۱۰۰	۰
۵	۳۵	۶۵
۶۰	۳۲٫۵	۶۷٫۵
۱۰۰	۳۰	۷۰

شکل‌های ۶ تا ۹ تغییرات Olsen-P با زمان را در دو حالت با و بدون افزودن فسفر معدنی و در سه سطح کم (مقدار ۷ گرم بر کیلوگرم ماده آلی برای خاک‌های ۱ و ۲ و ۳ و مقدار ۱۰ گرم بر کیلوگرم برای خاک ۴)، متوسط (مقدار ۴۲ گرم بر کیلوگرم ماده آلی برای خاک‌های ۱ و ۴ و مقدار ۴۰ گرم بر کیلوگرم برای خاک‌های ۲ و ۳)، و زیاد (مقدار ۱۶۶٫۷ گرم بر کیلوگرم

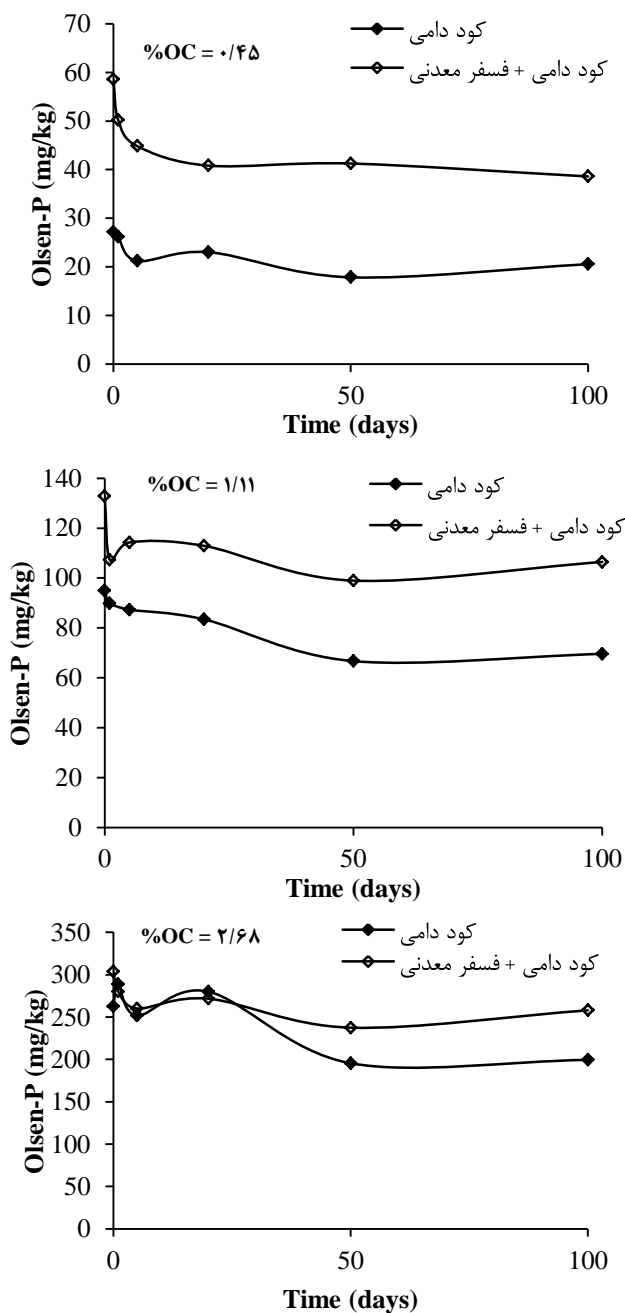


شکل ۴. سینتیک تغییرات Olsen-P خاک در حضور درصدهای متفاوت کربن آلی با افزودن فسفر معدنی

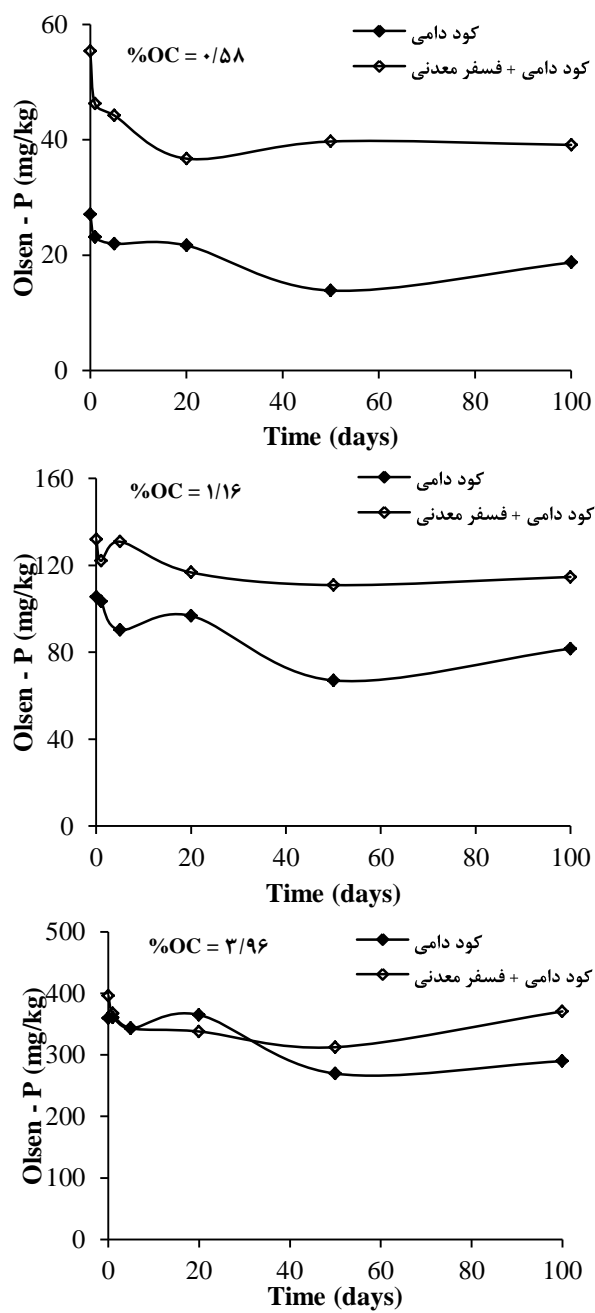
شکل ۳. سینتیک تغییرات Olsen-P خاک در حضور درصدهای متفاوت کربن آلی بدون افزودن فسفر معدنی



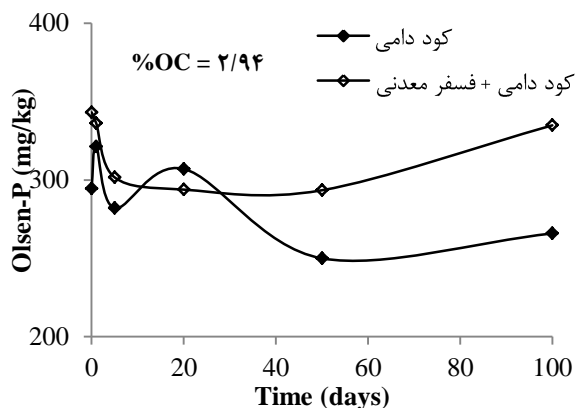
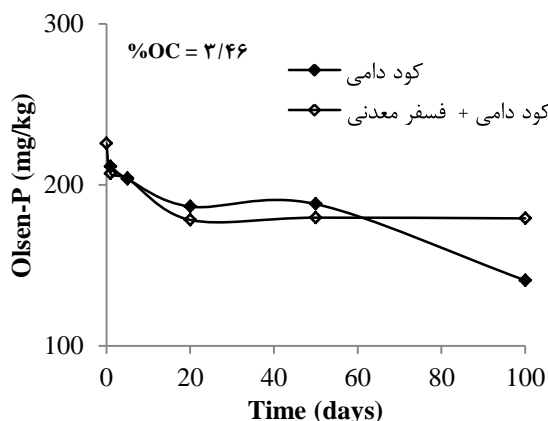
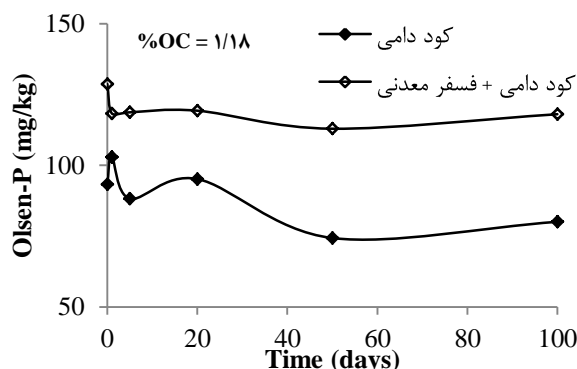
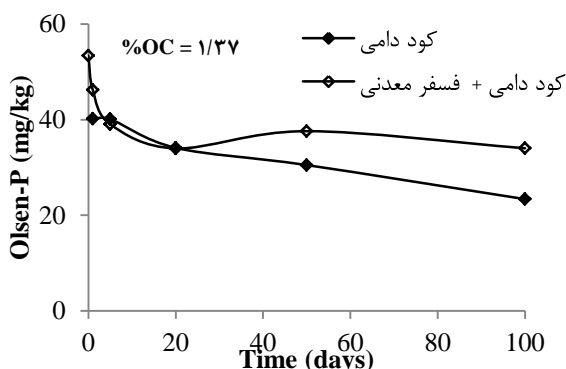
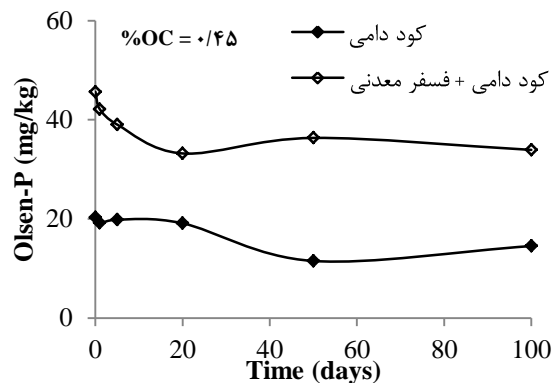
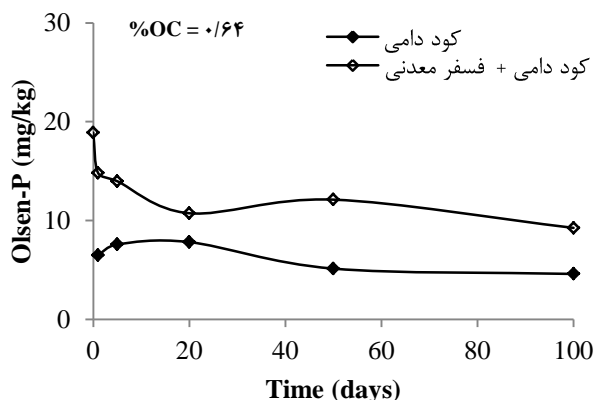
شکل ۵. تغییرات میزان CO<sub>2</sub> تولیدی با زمان در دو سطح کربن آلی (OC) در خاک شماره ۳



شکل ۷. سینتیک تغییرات Olsen-P با زمان در دو حالت با و بدون افزودن فسفر معدنی و در سه سطح کم و متوسط و زیاد ماده آلی خاک در خاک شماره ۳



شکل ۶. سینتیک تغییرات Olsen-P با زمان در دو حالت با و بدون افزودن فسفر معدنی و در سه سطح کم و متوسط و زیاد ماده آلی در خاک شماره ۱



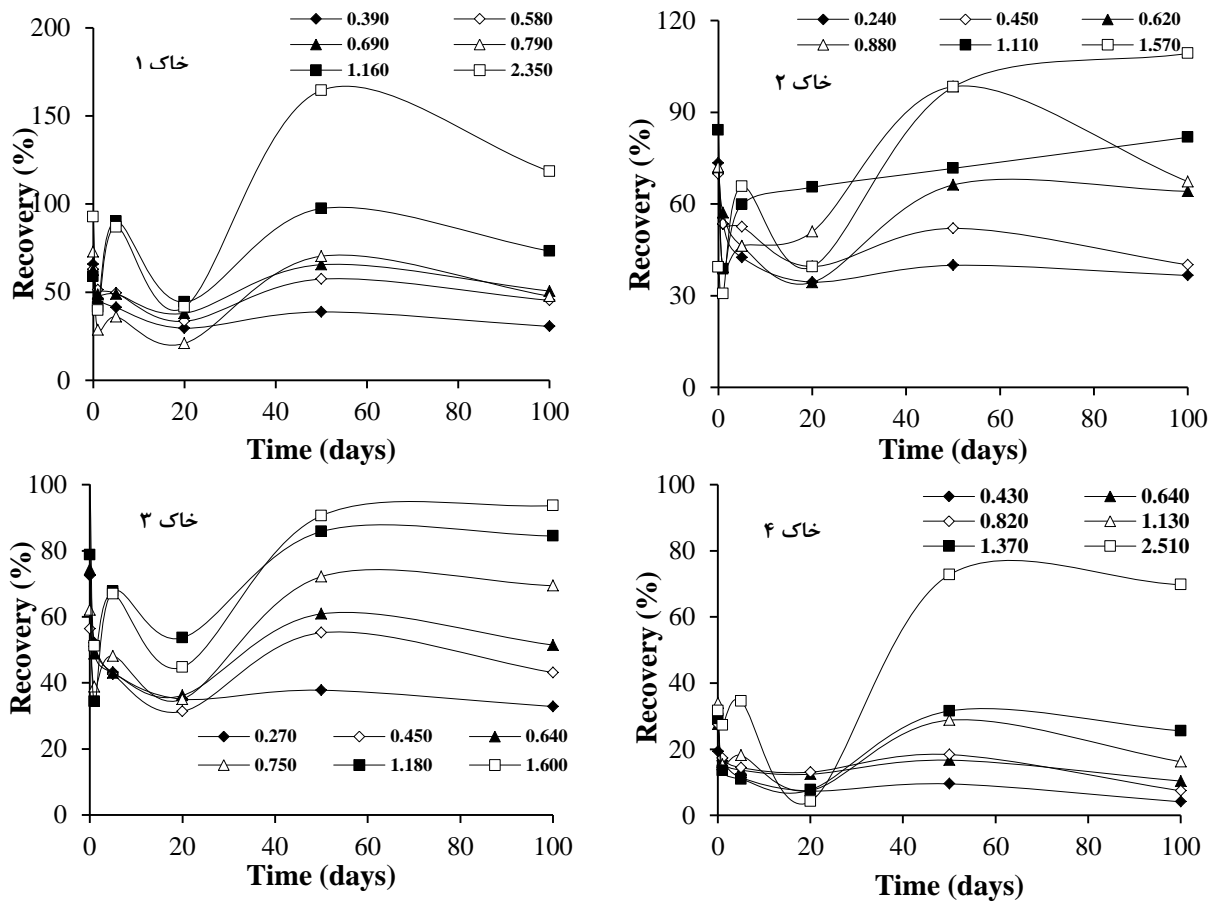
شکل ۹. سینتیک تغییرات Olsen-P با زمان در دو حالت با و بدون افزودن فسفر معدنی و در سه سطح کم و متوسط و زیاد ماده آلی در خاک شماره ۴

شکل ۸. سینتیک تغییرات Olsen-P با زمان در دو حالت با و بدون افزودن فسفر معدنی و در سه سطح کم و متوسط و زیاد ماده آلی در خاک شماره ۳

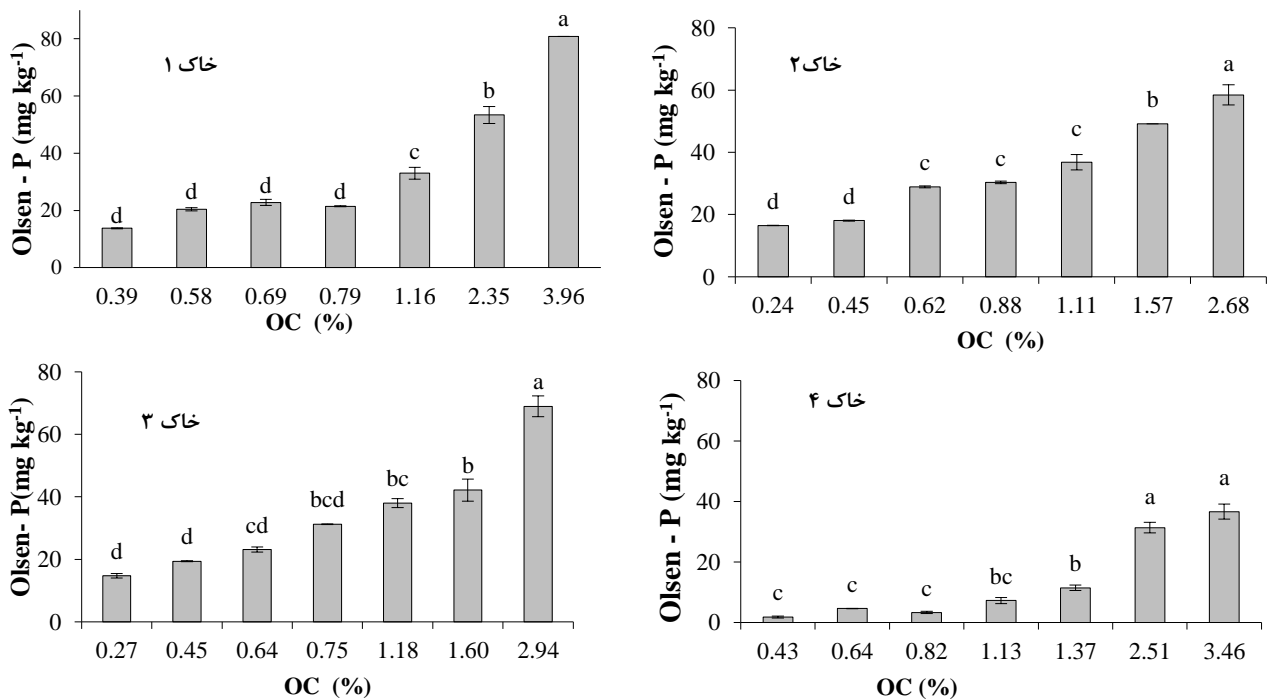
مصرف کود معدنی فسفر همراه کود آلی می‌تواند، اگر نه در کوتاه‌مدت، در درازمدت موجب جلوگیری از تثبیت کود و افزایش راندمان مصرف آن شود. همچنین، در خاک‌های با درصد ماده آلی بالاتر بازیابی کود فسفر مصرفی بیشتر است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد در سطوح پایین ماده آلی تفاوت بازیابی معنادار نیست و سطحی از کربن آلی، که از آن سطح به بعد تفاوت‌ها معنادار می‌شود، در خاک‌های مختلف با هم تفاوت دارد. این سطح برای خاک‌های شماره ۱ تا ۴ به ترتیب ۱/۱۶، ۰/۶۲، ۱/۱۸، و ۱/۳۷ است. احتمالاً این سطح با توانایی خاک در تثبیت فسفر ارتباط دارد. زیرا برای خاک شماره ۴، که بالاترین توانایی تثبیت فسفر را دارد، این سطح بالاترین درصد را دارد.

شکل ۱۰ تغییرات بازیابی فسفر معدنی اضافه‌شده به خاک با زمان را در حضور سطوح متفاوت ماده آلی نشان می‌دهد. هر منحنی حاصل تفاضل دو منحنی شاهد (خاک + کود آلی) و تیمار شده (خاک + کود آلی + کود معدنی) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آن‌ها زمان‌های کم به علت فعال بودن چهار فرایند یادشده منحنی‌ها از ترتیب مشخصی پیروی نمی‌کنند؛ ولی در زمان‌های زیاد و به‌خصوص در صد روز میزان بازیابی فسفر معدنی با درصد ماده آلی تقریباً به طور منظم افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج Delgado و همکاران (2002) و Staunton and Leprince (1996) مطابقت داشت. ولی با نتایج Frossard و همکاران (2000) و Borggaard و همکاران (1990) مطابقت نداشت. این نتیجه نشان می‌دهد





شکل ۱۰. تغییرات بازیابی فسفر معدنی در سطوح مختلف کربن آلی در خاک‌های مختلف



شکل ۱۱. مقایسه میانگین Olsen-P خاک در سطوح مختلف کربن آلی (OC) در خاتمه دوره صدمروزه (میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک اختلاف معناداری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند).

## نتیجه‌گیری

تفاوت معناداری در میزان فسفر استخراج‌شده به روش اولسن در پایان دورهٔ صدروزه مشاهده نشد و سطحی از کربن آلی، که از آن سطح به بعد افزایش معنادار در فسفر استخراج‌شده مشاهده شد، در خاک‌های مختلف با هم تفاوت داشت. احتمالاً این سطح با توانایی خاک در تثبیت فسفر ارتباط دارد. زیرا برای خاکی که بالاترین توانایی تثبیت فسفر را داشت این سطح بالاترین درصد را دارا بود. نتایج نشان داد سرعت اکسایش کربن آلی در خاک‌های مختلف متفاوت است و با درصد رس همبستگی منفی بالایی دارد. همچنین، سرعت اکسایش کربن آلی با کاهش مصرف کود آلی کاهش یافت.

نتایج این مطالعه نشان داد در همهٔ خاک‌ها بازیابی فسفر با زمان ابتدا به سرعت کاهش می‌یابد و سپس سرعت کاهش بازیابی به تدریج کم می‌شود. افزودن مادهٔ آلی در درازمدت به افزایش معنادار بازیابی فسفر در خاک‌ها منجر شد. این وضعیت ممکن است به دلیل ممانعت مادهٔ آلی از رسوب یا جذب فسفر در خاک باشد. در حضور مادهٔ آلی، سینتیک تثبیت فسفر از معدنی شدن فسفر آلی متأثر شد. به نظر می‌رسد در هر زمان خالص اثر چهار فرایند جذب در سطح، رسوب، غیر متحرک شدن، و معدنی شدن فسفر در دورهٔ اینکوبیشن سطح Olsen-P خاک را تعیین می‌کند. در چهار خاک مطالعه‌شده در سطوح کم مادهٔ آلی

## REFERENCES

- Appelt, H., Coleman, N. T., and Pratt, P. F. (1975). Interactions between organic compounds, minerals, and ions in volcanic-ash-derived soils. II. Effects of organic compounds on the adsorption of phosphate. *Soil Science Society of America Proceedings*, 39, 628-630.
- Bohn, H. L., Mc Neal, B. L., and O Connor, G. A. (2001). *Soil Chemistry*. Third edition. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Borggaard, O. K., Jdrngensen, S. S., Moberg J. P., and Raben-Lange, B. (1990). Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. *Journal of Soil Science*, 41, 443-449.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465.
- Bubba, M. O., Arias, C. A., and Porix, H. (2003). Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow cultivated reed beds as measured by the Langmuir adsorption isotherms. *Water Research*, 37, 3390-3400.
- Chepkwony, C. K., Haynes, R. J., Swift, R. S., and Harrison, R. (2001). Mineralization of soil organic P induced by drying and rewetting as a source of plant-available P in limed and unlimed samples of an acid soil. *Plant Soil*, 234, 83-90.
- Cottenie, A. (1980). Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations. Part 2. (1st ed.). *Analytical Methods: Methods of Plant Analysis*. P. 94. FAO Soils Bulletin 38/1. Soil and Plant Testing and Analysis. 250 p.
- Deb, D. L. and Datta, N. P. (1967). Effect of associating anions on phosphorus retention in soil. *Plant and soil*, 26, 432-444.
- Delgado, A., Madrid, A., Kassem, S., Andreu, L., and del Campillo, M. D. C. (2002). Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids. *Plant Soil*, 245, 277-286.
- Evans, J. R. (1985). The adsorption of inorganic phosphate by a sandy soil as influenced by dissolved organic compounds. *Journal of Soil Science*, 140, 251-255.
- Frossard, E., Brossard, M., Hedley, M. J., and Metherell, A. (2000). Reaction controlling the cycling of P in soils. Scientific Committee on problems of the Environment, Paris, France.
- Grossl, P. R. and Inskeep W. P. (1989). Crystal growth of octacalcium phosphate in the presence of organic acids. P.200 In *Agronomy Abstracts*. ASA, Madison, WI.
- Grossl, P. R. and Inskeep, W. P. (1991). Precipitation of Dicalcium Phosphate Dihydrate in the Presence of Organic Acids. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 670-675.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., and Nelson, W. L. (1999). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 6<sup>th</sup> edition. Prentice Hall, Inc. Saddle River, New Jersey.
- Haynes, R. J. and Mokolobate, M.S. (2001). Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59, 47-63.
- Holford, I. C. R. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, 35, 227-240.
- Huang, P. M. and Violante, A. (1986). Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminium. In *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (eds P.M Huang & M. Schnitzer), pp. 159-221. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, WI.
- Inskeep W. P. and Silvertooth J. C. (1988). Inhibition of Hydroxyapatite Precipitation in the Presence of Fulvic, Humic, and Tannic Acids. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 941-946.
- Isermeyer, H. (1952). Estimation of Soil Respiration in Closed jars. P.215-217. In Alef, K. and Nannipieri, P. (eds.). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. ACADEMIC press INC. San Diego. USA.

- Kang, J., Hesterberg, D., and Osmond, D. L. (2008). Soil organic matter effects on phosphorus sorption: A path analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 360-366.
- Murphy, J. and Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
- Nagarajah, S., Posner, A. M., and Quirk, J. P. (1970). Competitive adsorption of phosphate with polygalacturonic and other organic anions on kaolinite and oxide surfaces. *Nature*, 228, 83-85.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1996). Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter: Loss-on Ignition Method. P. 1004. In Sparks, D. L. *et al.* (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. 3rd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Nelson, R. E. (1982). Carbonate and Gypsum. P. 181-197. In Page, A. L. (ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. (2nd ed.). Agron. Mongor. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Olsen, S. L. and Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. P. 403-427. In: Page, A. L. (ed.). *Methods of soil analysis*, 2nd ed. ASA, Madison, Wisconsin, USA.
- Rhoades, J. D. (1978). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. P. 417-435. In Sparks, D. L. *et al.* (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. (3rd ed.). *American Society of Agronomy*, Madison, WI.
- Sibanda, H. M. and Young, S. D. (1986). Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *Journal of Soil Science*, 37, 197-204.
- Staunton, S. and Leprince, F. (1996). Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: implications for P bioavailability. *European Journal of Soil Science*, 47, 231-239.
- Violante, A. and Gianfreda, L. (1993). Competition in adsorption between phosphate and oxalate on an aluminum hydroxide montmorillonite complex. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1235-1241.
- Wandruszka, R. (2006). Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical Transactions*, 7: 1-8.
- White, R. E. and Taylor A. W. (1977). Effect of pH on phosphate adsorption and isotopic exchange in acid soils at low and high additions of soluble phosphate. *Journal of Soil Science*, 28, 48-61.