

توزیع شکل‌های مختلف فسفر در برخی خاک‌های استان آذربایجان شرقی و رابطه آن با برخی ویژگی‌های خاک

نسیم حیدری^۱، عادل ریحانی تبار^{۲*}، نصرت‌اله نجفی^۳، شاهین اوستان^۴

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۲. استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۳. ۴. دانشیاران گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۷/۸)

چکیده

شناخت شکل‌های مختلف فسفر در خاک برای ارزیابی وضعیت فسفر و نیز حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه اطلاعات مفیدی در اختیار می‌گذارد. برای اطلاع از چگونگی توزیع شکل‌های معدنی و آلی فسفر تعیین همبستگی بین این شکل‌ها با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ایجاد معادله‌هایی برای پیش‌بینی شکل‌های فسفر با بهره‌گیری از ویژگی‌های خاک در خاک‌های آهکی استان آذربایجان شرقی بیست نمونه خاک سطحی از مناطق عمده کشاورزی استان انتخاب و فسفر کل و قابل جذب و شکل‌های معدنی و آلی فسفر آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد فسفر کل خاک‌ها بین ۵۳۴ و ۱۰۶۱/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. به‌طور میانگین فسفر معدنی ۷۹ درصد و فسفر آلی ۲۱ درصد از فسفر کل خاک را تشکیل می‌داد. فسفات‌های کلسیم شکل غالب فسفر معدنی بودند. مقدار شکل‌های معدنی فسفر به‌ترتیب آپاتیت (Ca₁₀-P) < اکتاکلسیم فسفات (Ca₈-P) < فسفات آلومینیوم (Al-P) < فسفات آهن (Fe-P) < دی‌کلسیم فسفات (Ca₂-P) بود. مقدار شکل‌های آلی فسفر نیز به‌ترتیب فسفر آلی نسبتاً ناپایدار (MLOP) < فسفر آلی ناپایدار (LOP) < فسفر آلی پایدار (NLOP) بود. کربنات کلسیم معادل خاک با اکتاکلسیم فسفات و فسفات آهن، pH با اکتاکلسیم فسفات و فسفات آهن و فسفر قابل جذب، و درصد کربن آلی با فسفر آلی نسبتاً ناپایدار و پایدار همبستگی‌های معناداری نشان داد. مجموع فسفات‌های کلسیم و فسفر آلی کل رابطه‌ای معنادار با کربن آلی خاک داشت. همچنین همبستگی فسفر معدنی کل و مجموع انواع فسفات‌های کلسیم با کربنات کلسیم معادل معنادار بود. از میان شکل‌های معدنی و آلی فسفر، Ca₂-P بالاترین ضریب همبستگی را با فسفر قابل جذب داشت. بین شکل‌های مختلف فسفر همبستگی‌های معناداری مشاهده شد که احتمالاً بیانگر رابطه‌ای پویا بین آن‌ها در خاک است. تحلیل رگرسیونی چندگانه نشان داد درصد کربنات کلسیم معادل احتمالاً بر توزیع شکل‌های فسفر در خاک‌های بررسی‌شده مؤثر است.

کلیدواژگان: آذربایجان شرقی، خاک‌های آهکی، عصاره‌گیری دنباله‌ای، فسفر.

مقدمه

خاک به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم امکان‌پذیر است. روش‌های مستقیم شامل مطالعه با انواع میکروسکوپ‌های الکترونی و استفاده از پرتو ایکس و روش‌های غیرمستقیم شامل استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی است (Samadi and Gilkes, 1998). آگاهی از شکل‌های شیمیایی فسفر در خاک و درک جنبه‌های حاصلخیزی خاک نقش مؤثری دارد و می‌توان با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده برای افزایش قابلیت جذب فسفر توسط گیاهان روش مدیریتی مناسبی پیشنهاد کرد. با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها، فسفر می‌تواند به‌صورت ترکیبات شیمیایی متنوع، مانند فسفات‌های کلسیم و آهن و آلومینیوم در خاک حضور داشته باشد (Dehghan et al., 2008). (Lindesay et al., 1979) گزارش کردند اندازه‌گیری مستقیم کانی‌های فسفاتی در خاک‌ها مشکل

بسیاری از خاک‌های ایران آهکی است و میزان کربنات کلسیم معادل در این خاک‌ها حتی تا بیش از ۶۵۰ گرم در کیلوگرم خاک نیز گزارش شده است. از طرف دیگر، کودهای فسفوری در سطح وسیعی در این خاک‌ها استفاده می‌شوند که به افزایش فسفر در خاک به‌صورت ترکیبات گوناگون فسفر می‌انجامد (Adhami et al., 2006). مصرف زیاد کودهای فسفر بدون اطلاع از سرنوشت آن‌ها، علاوه بر نتیجه‌بخش نبودن و ضررهای اقتصادی، باعث غنی‌شدن آب‌های سطحی از فسفر و بروز کمبود عناصر غذایی کم‌مصرف، مانند آهن و روی، در گیاهان می‌شود (Tiessen et al., 1984). شناسایی ترکیبات مختلف فسفر در

* نویسنده مسئول: areyhani@tabrizu.ac.ir

مطالعه است و این موضوع با داده‌های عصاره‌گیری متوالی مطابقت داشت (Delgado *et al.*, 2000). Tyler (2002) گزارش داد در خاک‌های شرق سوئد شکل‌های فسفر معدنی پیوندشده با آهن و آلومینیوم و کلسیم رابطه‌ای نزدیک با pH خاک دارند و بین یون‌های ارتوفسفات پیوندشده با آهن و pH رابطه‌ای خطی و منفی وجود دارد. Samadi and Gilkes (1998) روش Jiang and Gu (1989) را برای خاک‌های آهکی ایالت استرالیای غربی به کار بردند و فراوانی شکل‌های فسفر در خاک‌های مذکور را به صورت گزارش کردند:

فسفات آلومینیوم < اکتاکلسیم فسفات < دی‌کلسیم فسفات < آپاتیت < فسفات آهن < فسفر محبوس.

Samadi and Gilkes (1999) گزارش کردند بین فسفر آلی، فسفات‌های کلسیم، آلومینیوم، و آهن با درصد رس رابطه‌ای معنادار و مثبت وجود دارد. علاوه بر این، فسفات‌های آهن و آلومینیوم با ظرفیت تبادل کاتیونی هم رابطه‌ای مثبت و معنادار دارند. Mahmood-Soltani and Samadi (2003) از استان فارس گزارش کردند برای فسفر آلی و فسفات‌های کلسیم فقط درصد رس و برای فسفات‌های آهن و آلومینیوم درصد رس و کربنات کلسیم معادل وارد مدل رگرسیونی شد. آنان میزان رس را عامل مهم قابلیت جذب فسفر در این خاک‌ها معرفی کردند. Carreira *et al.* (2006) گزارش کردند کربنات‌ها در خاک نقشی مؤثر در رسوب فسفر به صورت فسفات‌های کلسیم دارند و اکسی هیدروکسی‌های آهن نیز مشابه کربنات‌ها نقش تثبیت‌کننده فسفر را دارند. با وجود این، برخی محققان، همانند Dakermanji and Bakhieit-Said (1993)، نبود همبستگی بین فسفر قابل جذب و کربنات کلسیم را گزارش کردند. Shariatmadari *et al.* (2007) گزارش کردند از میان ویژگی‌های خاک‌های آهکی استان اصفهان کربن آلی مؤثرترین عامل بر توزیع شکل‌های فسفر است.

با توجه به مطالب فوق و با توجه به اینکه گزارش چاپ‌شده‌ای از توزیع شکل‌های آلی و معدنی فسفر در خاک‌های استان آذربایجان شرقی وجود ندارد، اهداف پژوهش حاضر عبارت بود از:

الف) تعیین مقدار فسفر کل و شکل‌های مختلف فسفر در برخی خاک‌های استان آذربایجان شرقی؛

ب) تعیین ارتباط شکل‌های مختلف فسفر با فسفر قابل جذب و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه؛

است؛ زیرا مقدار آن‌ها از ۰/۲ تا ۰/۵ درصد با میانگین ۰/۵ درصد تغییر می‌کند و مقدار زیادی از فسفر به شکل آلی و جذب سطحی شده حضور دارد. با روش عصاره‌گیری متوالی هم شناسایی ترکیبات خاص امکان‌پذیر نیست و این مسئله به واکنش‌های جذب سطحی مجدد فسفر هنگام عصاره‌گیری و وجود انواع ترکیبات پیچیده‌ی حاوی فسفر با آهن و آلومینیوم و کلسیم و سایر یون‌های خاک‌ها نسبت داده می‌شود (Delgado *et al.*, 2000). شکل‌های مختلف فسفر خاک برای گیاهان قابلیت جذب متفاوت دارند. نتایج عصاره‌گیری متوالی فسفر می‌تواند برای تعیین نقش نسبی شکل‌های مختلف فسفر در قابلیت جذب آن‌ها از طریق مطالعات آماری به کار رود (Najafi and Towfigi, 2006). از سال ۱۹۵۷، که Chang و Jackson روش عصاره‌گیری متوالی را برای تعیین شکل‌های معدنی فسفر پیشنهاد کردند، از این روش به‌طور گسترده استفاده شده است. البته پس از آنان برخی محققان تغییراتی در روش مذکور ایجاد کردند (Williams *et al.*, 1967; Hedley *et al.*, 1982). ویژگی‌های مهم خاک که بر قابلیت جذب فسفر و فسفر استخراج‌شده به‌وسیله عصاره‌گیرهای شیمیایی تأثیر می‌گذارد عبارت است از کمیت و ماهیت رس‌های خاک، کربنات کلسیم معادل، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و منگنز، ماده آلی و pH (Samadi and Gilkes, 1998). Hanley and Murphy (1970) روش Chang and Jackson (1957) را به کار بردند تا توزیع شکل‌های معدنی فسفر را در ذرات تشکیل‌دهنده برخی خاک‌های ایرلند تعیین کنند. آنان گزارش کردند شکل‌های فسفر در ذرات رس بیشترین و در شن کمترین مقدار را دارد. بیشتر فسفر معدنی پیوسته به ذرات رس و سیلت فسفات آهن و در شن عمدتاً فسفات کلسیم بود. کاهش فسفر قابل استفاده در خاک با افزایش pH را Nwoke and Vanlauwe (2003) گزارش کردند. علت آن افزایش بار منفی و متغیر کلئیدهای خاک معرفی شد که سبب دفع الکترواستاتیک یون‌های ارتوفسفات می‌شود. Mostashari *et al.* (2009) از استان قزوین گزارش کردند میزان فسفر کل از ۷۰۰ تا ۱۰۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک متغیر و ترتیب شکل‌های معدنی فسفر به صورت آپاتیت < اکتاکلسیم فسفات < فسفات آلومینیوم < فسفات آهن < فسفر محبوس < دی‌کلسیم فسفات بود. همچنین آنان گزارش کردند شکل‌های معدنی فسفر شامل فسفر محلول، دی‌کلسیم فسفات، فسفات آهن، و فسفر محبوس با فسفر قابل جذب خاک (به روش اولسن) روابطی معنادار و مثبت نشان دادند.

با استفاده از داده‌های طیف 31P-NMR گزارش شده هیدروکسی آپاتیت شکل غالب فسفر در خاک‌های آهکی مورد

عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر

برای تعیین شکل‌های معدنی فسفر ۰/۵ گرم خاک الک‌شده از هر نمونه خاک در لوله‌های سانتریفوژ ۵۰ میلی‌متری در دو تکرار مطابق جدول ۲ استفاده شد. برای تعیین شکل‌های آلی فسفر ۰/۵ گرم از نمونه خاک عبور یافته از الک ۰/۵ میلی‌متری در لوله‌های سانتریفوژ ۵۰ میلی‌لیتری در دو تکرار ریخته شد. برای اندازه‌گیری فسفر آلی در هر مرحله عصاره‌گیری ابتدا مقدار فسفر کل از طریق هضم با پرسولفات پتاسیم ($K_2S_2O_8$) تعیین و سپس از تفاضل فسفر کل با فسفر معدنی اندازه‌گیری شده با عصاره‌گیرها مقدار فسفر آلی آن تعیین شد (Zhang and Kovar, 2000) (جدول ۳). در همه مراحل عصاره‌گیری متوالی فسفر معدنی و آلی نمونه‌ای به‌مثابه شاهد (بدون خاک) در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری غلظت فسفر در عصاره‌ها به روش رنگ‌سنجی مولیبدات آبی (Murphy and Riley, 1962) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام گرفت. روش‌های آماری، شامل محاسبه ضرایب همبستگی خطی و رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام^۱، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، برای تفسیر نتایج به‌کار رفت.

ج) به‌دست‌آوردن معادله‌هایی برای پیش‌بینی شکل‌های مختلف فسفر با بهره‌گیری از ویژگی‌های خاک.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در این پژوهش بیست نمونه مرکب خاک سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) از نقاط مختلف استان آذربایجان شرقی، که از نظر ویژگی‌های خاکی دامنه نسبتاً وسیعی داشتند، انتخاب و پس از هواخشک‌کردن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت خاک به روش هیدرومتر چهار زمانه (Gee and Bauder, 2002)، pH عصاره ۱:۲ آب به خاک (Thomas, 1996)، کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌کردن با اسید (Allison and Moodie, 1965)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen et al, 1954) اندازه‌گیری شد. همچنین فسفر کل به روش هضم با اسید سولفوریک نرمال (Walker and Adams, 1958) جهت مقایسه با فسفر کل حاصل از عصاره‌گیری دنباله‌ای اندازه گرفته شد (جدول ۱).

جدول ۱. توصیف آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه‌شده

فسفر کل	فسفر آلی	Olsen-P	Ph	CCE	کربن آلی	رس	
mg kg ⁻¹		درصد					
۵۳۴/۱	۹۴/۳۶	۳/۱۷	۷/۳	۷	۰/۱	۱۲/۵	حداقل
۱۰۶۱/۴	۲۴۳/۰۴	۶۹/۰۴	۸/۳	۳۵	۱/۶	۵۷/۲	حداکثر
۷۷۱/۳۴	۱۶۲/۰۱	۱۳/۰۳	۷/۵	۲۱/۵	۰/۹	۳۲	میانگین
۱۳۲/۶۶	۴۳/۱۱	۱۸/۱۸	۰/۱۸	۹/۷	۰/۴	۱۲/۴	انحراف معیار
۱۷/۱۹	۲۶/۶	۱۳۹/۵	۲/۴	۴۵/۱	۴۴/۴	۳۸/۷۵	ضریب تغییرات

جدول ۲. خلاصه عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر به روش (Jiang and Gu, 1989)

شکل معدنی فسفر	علامت	مدت تکان دادن (ساعت)	عصاره‌گیر	غلظت عصاره‌گیر (M)
دی‌کلسیم فسفات	Ca ₂ -P	۱	۷/۵ pH= و NaHCO ₃	۰/۲۵
اکتاکلسیم فسفات	Ca ₈ -P	۱	۴/۲ pH= و NH ₄ AC	۰/۵
فسفات آلومینیوم	Al-P	۱	۸/۲ pH= و NH ₄ F	۰/۵
فسفات آهن	Fe-P	۲-۲	- Na ₂ CO ₃ NaOH	۰/۱-۰/۱
فسفر محبوس	OC-P	۱۶	Na ₃ Cit-Na ₂ S ₂ O ₄ - NaHCO ₃	۰/۳-۱-۰/۵
آپاتیت	Ca ₁₀ -P	۱	H ₂ SO ₄	۰/۲۵

جدول ۳. خلاصه عصاره‌گیری متوالی شکل‌های آلی فسفر به روش (Zhang and Kovar, 2000)

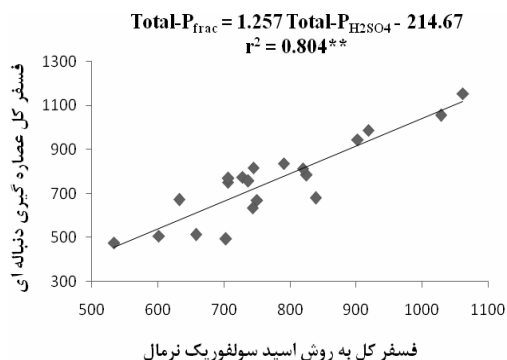
شکل آلی فسفر	علامت	مدت تکان دادن (ساعت)	عصاره‌گیر	غلظت عصاره‌گیر (M)
ناپایدار	LOP	۱۶	۸/۵ pH= و NaHCO ₃	۰/۵
نسبتاً ناپایدار	MLOP	۳-۳	NaOH -HCl	۱-۱
پایدار	NLOP	۲۴	H ₂ SO ₄	۱

یافته‌ها و بحث

Shariatmadari *et al* (2007) نیز نتیجه‌ای مشابه با نتایج تحقیق حاضر گزارش کرده‌اند.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه‌شده خاک‌های مطالعه‌شده هفت کلاس بافتی مختلف از لوم شنی تا رسی داشتند و از نظر ویژگی‌های مختلف از تنوع خوبی برخوردار بودند.

فسفر کل، فسفر معدنی، و فسفر آلی: دامنه تغییرات فسفر کل از ۵۳۴ تا ۱۰۶۱/۴ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک با میانگین ۷۷۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که از این مقدار ۷۹ درصد آن به شکل فسفر معدنی و ۲۱ درصد به شکل فسفر آلی بود. فسفر کل اندازه‌گیری شده با مقدار فسفر کل حاصل از مجموع شکل‌های آلی و معدنی فسفر در عصاره‌گیری متوالی دارای همبستگی قوی بود (شکل ۱ و جدول ۵).



شکل ۱. رابطه فسفر کل اندازه‌گیری شده به روش عصاره‌گیری دنباله‌ای و اسید سولفوریک نرمال (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)

جدول ۴. توصیف آماری توزیع مقادیر شکل‌های معدنی و آلی فسفر در خاک‌های مطالعه‌شده (mg kg^{-1})

آلی	فسفر	شکل‌های	معدنی			شکل‌های		
			NLOP	MLOP	LOP	Ca ₁₀ -P	Fe-P	Al-P
۲۰/۱	۵۲/۴	۲۹/۱	۳۶/۸	۵/۸	۲۲/۷	۲۷/۳	۵/۱	حداقل
۱۲۸/۹	۱۱۳/۲	۸۵/۴	۵۳۷/۵	۶۹/۳	۱۴۵/۸	۵۸۲/۶	۸۲	حداکثر
۵۳/۲	۶۴/۷	۵۲/۲	۲۴۴/۹	۲۴/۵	۶۱/۰	۲۳۴/۱	۱۶/۵	میانگین
۳۶	۱۴/۸	۱۳/۱	۱۵۲/۳	۲۰	۳۲/۶	۱۵۴/۸	۱۷/۸	انحراف معیار

Ca₂-P: دی‌کلسیم فسفات، Ca₈-P: اکتاکلسیم فسفات، Al-P: فسفات‌های آلومینیوم، Fe-P: فسفات‌های آهن، Ca₁₀-P: آپاتیت و LOP, MLOP, NLOP به ترتیب فسفر آلی ناپایدار، فسفر آلی نسبتاً ناپایدار، و فسفر آلی پایدار

جدول ۵. ضرایب همبستگی ساده بین شکل‌های معدنی و آلی فسفر

۶	۵	۴	۳	۲	۱
					۱
					۰/۹۴۸**
				۱	۰/۲۵۱ ^{ns}
			۱	۰/۰۶۷ ^{ns}	۰/۸۹۸**
		۱	۰/۰۳۹ ^{ns}	۰/۹۱۴**	۰/۸۳۷**
	۱	۰/۹۷۲**	۰/۰۱۸ ^{ns}	۰/۹۲۳**	۰/۰۴۴ ^{ns}
۱	۰/۳۴۸ ^{ns}	۰/۱۳۴ ^{ns}	۰/۸۷۵**	۰/۲۴۱ ^{ns}	

ns و * و ** به ترتیب غیر معنادار و معنادار در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

شکل‌های معدنی و آلی فسفر

آپاتیت < اکتاکلسیم فسفات < فسفات آلومینیوم < فسفات آهن < دی‌کلسیم فسفات. در مجموع ۸۵/۲ درصد کل فسفر معدنی فسفات‌های کلسیم و ۱۴/۸ درصد کل فسفر معدنی فسفات‌های آهن و آلومینیوم بود. Adhami *et al.* (2006) نیز نتیجه‌ای مشابه درباره فراوانی نسبی شکل‌های مختلف فسفر معدنی در خاک‌های بررسی‌شده استان فارس گزارش کردند. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج Samadi and Gilkes

مقدار و توزیع شکل‌های معدنی و آلی فسفر در جدول ۴ آورده شده است. دی‌کلسیم فسفات ۲/۸ درصد، اکتاکلسیم فسفات ۴۰/۳ درصد، فسفات‌های آلومینیوم ۴/۲ درصد، فسفات‌های آهن ۱۰/۵ درصد، و آپاتیت ۴۲/۱ درصد فسفر معدنی را تشکیل دادند. فسفر محبوس در خاک‌های مطالعه‌شده ناچیز بود و از آن صرف‌نظر شد. به‌طور میانگین ترتیب مقادیر مختلف فسفر معدنی در خاک‌های مطالعه‌شده به‌صورت زیر بود:

pH را می توان به این صورت توضیح داد که با توجه به دیگرام حل پذیری کانی های فسفر در خاک در pH های بعد از ۷٫۵ فسفات های کلسیم به ویژه اکتاکلسیم فسفات ها حل و ناپایدار می شوند (Havlin et al., 2004).

Shariatmadari et al. (2007) نیز عدم همبستگی بین رس و فسفر قابل جذب را گزارش کردند؛ در حالی که Samadi and Gilkes (1998) و Mostashari et al. (2009) بین فسفر قابل جذب و درصد رس خاک همبستگی منفی مشاهده کردند. کربن آلی خاک ها نیز همبستگی های معنادار مثبتی با شکل های آلی نسبتاً ناپایدار و پایدار داشت. تحلیل رگرسیونی به روش گام به گام نشان داد هنگامی که رس، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل، و pH به مثابه متغیرهای مستقل استفاده شدند، برای فسفات های کلسیم و فسفر معدنی کل به عنوان متغیر وابسته فقط درصد کربنات کلسیم معادل و برای فسفر آلی کل درصد کربن آلی و کربنات کلسیم معادل در مدل باقی ماندند (جدول ۸). این نتایج گویای آن است که احتمالاً عامل کنترل کننده جذب و قابلیت استفاده فسفر در خاک های بررسی شده میزان کربنات کلسیم معادل خاک هاست. پژوهندگان بسیاری تأثیر ویژگی های خاک، مانند کربن آلی و کربنات کلسیم معادل، را بر شکل های فسفر گزارش کرده اند (Samadi and Gilkes, 1998 & 1999).

(1998)، به غیر از میزان آپاتیت، مطابقت داشت. این محققان گزارش کردند که مقدار آپاتیت و دی کلسیم فسفات تقریباً برابرند. Najafi and Towfigi (2006) گزارش کردند در خاک های شالیزاری شمال ایران آپاتیت با میانگین ۵۶۱٫۸ میلی گرم بر کیلوگرم خاک فراوان ترین و فسفر محلول در احیا کننده کم ترین شکل فسفر بودند. در تحقیق جاری فسفر آلی ناپایدار و نسبتاً ناپایدار و پایدار به ترتیب ۳۲٫۱ و ۳۸٫۸ و ۲۹ درصد فسفر آلی را به خود اختصاص دادند و مقادیر آن ها به ترتیب فسفر آلی نسبتاً ناپایدار < فسفر آلی ناپایدار < فسفر آلی پایدار بود. این نتیجه با گزارش Shariatmadari et al. (2007) از اصفهان مطابقت داشت.

رابطه فسفر قابل جذب و شکل های مختلف فسفر با ویژگی های خاک

برای تعیین رابطه شکل های فسفر و ویژگی های اندازه گیری شده خاک از مطالعات همبستگی استفاده شد (جدول ۶). pH و درصد کربن آلی و کربنات کلسیم معادل رابطه ای معنادار با برخی شکل های فسفر داشتند؛ در حالی که میزان رس رابطه ای با هیچ یک از شکل های فسفر نداشت. رابطه کربنات کلسیم معادل و pH با شکل های اکتاکلسیم فسفات (شکل ۳) و فسفات آهن و همچنین pH با فسفر قابل جذب (Olsen-P) معنادار و منفی بود (شکل ۴). دلیل رابطه منفی میان اکتاکلسیم فسفات

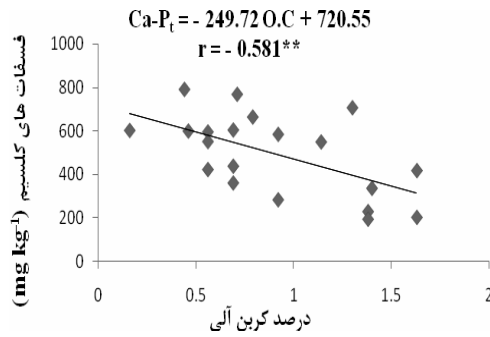
جدول ۶. رابطه فسفر قابل جذب و شکل های فسفر با ویژگی های خاک

آلی			معدنی						
NLOP	MLOP	LOP	Ca ₁₀ -P	Fe-P	Al-P	Ca ₈ -P	Ca ₂ -P	Olsen-P	
۰٫۴۸*	-۰٫۲۰	-۰٫۰۳	۰٫۰۱	-۰٫۴۶*	-۰٫۳۲	-۰٫۶۶**	-۰٫۴۴	-۰٫۴۷*	CaCO ₃
۰٫۰۹	-۰٫۰۹	-۰٫۰۱	۰٫۱۸	-۰٫۵۲*	-۰٫۲۳	-۰٫۴۸*	-۰٫۲۸	-۰٫۴۹*	pH _{1:2}
۰٫۷۸**	۰٫۵۲*	۰٫۳۹	-۰٫۴۰	۰٫۴۲	۰٫۰۹	-۰٫۳۱	۰٫۱۹	۰٫۱۰	OC
۰٫۲۹	-۰٫۲۵	-۰٫۲۳	-۰٫۰۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱	-۰٫۱۰	-۰٫۳۹	-۰٫۳۴	Clay

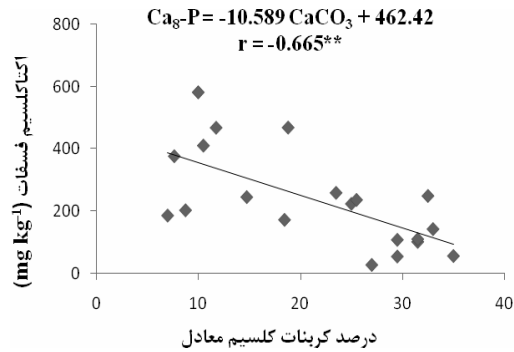
ns و * و ** به ترتیب غیر معنادار و معنادار در سطح ۰٫۰۵ و ۰٫۰۱

رابطه شکل های معدنی و آلی فسفر با یکدیگر وجود همبستگی های معنادار بین شکل های مختلف فسفر گویای این مطلب است که احتمالاً بین این شکل ها در خاک های مطالعه شده رابطه ای پویا و دینامیک برقرار است (Tiessen et al., 1984). وجود این رابطه دینامیک اهمیت زیادی در فرایندهای واکنش های کود فسفر و جذب فسفر به وسیله گیاه دارد. Najafi and Towfighi (2009) گزارش کردند، در خاک های آهکی، دی کلسیم فسفات با همه شکل های فسفر معدنی غیر از آپاتیت

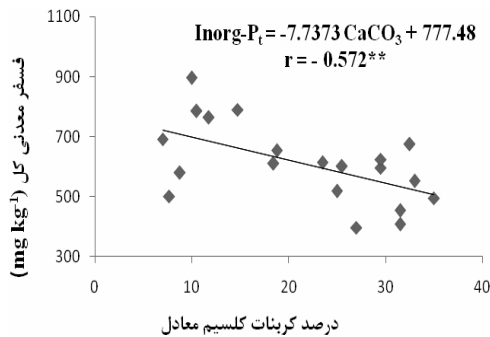
شکل ۲ نشان می دهد در خاک های مطالعه شده با افزایش درصد کربنات کلسیم معادل خاک میزان اکتاکلسیم فسفات کاهش می یابد. از آنجا که با افزایش درصد کربنات کلسیم معادل در خاک های مطالعه شده pH خاک ها افزایش یافت (شکل ۷) و با توجه به حل شدن کانی های فسفات بعد از pH ۷٫۸ می توان کاهش اکتاکلسیم فسفات را ناشی از افزایش pH توسط کربنات کلسیم معادل دانست. همین توجیه درباره شکل ۵ و کاهش فسفر معدنی کل با افزایش کربنات کلسیم معادل نیز قابل ارائه است.



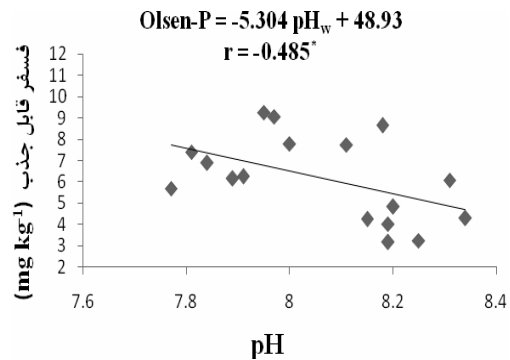
شکل ۳. رابطه فسفات‌های کلسیم با کربن آلی



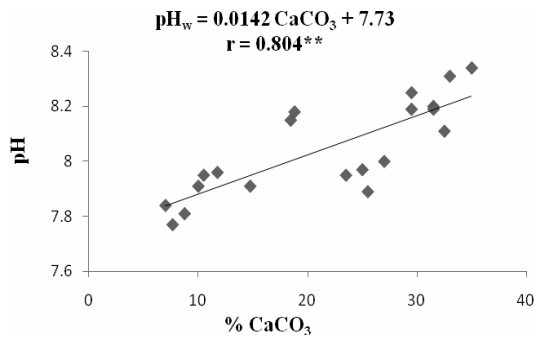
شکل ۲. رابطه اکتاکلسیم فسفات با کربنات کلسیم



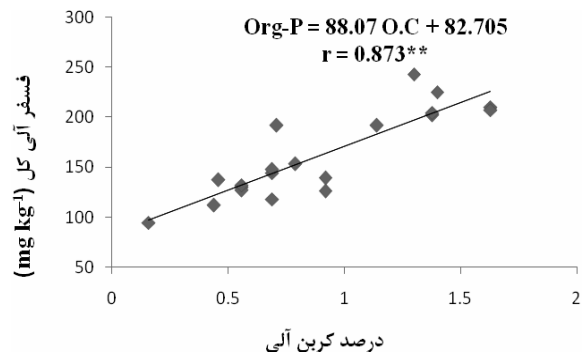
شکل ۵. رابطه فسفر معدنی کل با کربنات کلسیم معادل



شکل ۴. رابطه فسفر قابل جذب با pH



شکل ۷. رابطه کربنات کلسیم معادل با pH



شکل ۶. رابطه فسفر آلی کل و کربن آلی

P به وسیله دی کلسیم فسفات توضیح داده می‌شود. Najafi and Towfighi (2009) گزارش کردند در خاک‌های شالیزاری شمال ایران ۸۳ درصد تغییرات فسفر قابل جذب توسط Ca_2-P توجیه می‌شود. رگرسیون چندمتغیره به روش گام‌به‌گام نشان داد فقط شکل‌های دی کلسیم فسفات و فسفات آلومینیوم وارد مدل شدند. معادله ۱ خط رگرسیون را نشان می‌دهد:

معادله ۱

$$\text{Olsen-P} = 0.896 \text{ Ca}_2\text{-P} + 0.095 \text{ Al-P} - 7.589$$

$$R = 0.955^{**}$$

رابطه‌ای معنادار دارد و اکتاکلسیم فسفات رابطه معناداری با هیچ‌یک از شکل‌ها نشان نداد.

رابطه شکل‌های معدنی و آلی فسفر با فسفر قابل جذب

بین اجزای معدنی و آلی فسفر شکل Ca_2-P بیشترین همبستگی را با مقدار فسفر قابل جذب (Olsen-P) در خاک‌های آهکی مطالعه شده داشت (جدول ۹)؛ طوری که ۸۸ درصد تغییرات Olsen-P توسط Ca_2-P توجیه شد.

Samadi (2003) نیز با انجام دادن رگرسیون گام‌به‌گام در

خاک‌های آهکی استرالیا گزارش کرد ۹۰ درصد تغییرات Olsen-

جدول ۷. رابطه شکل‌های معدنی و آلی فسفر با یکدیگر

فسفر آلی			فسفر معدنی					
NLOP	MLOP	LOP	Ca ₁₀ -P	Fe-P	Al-P	Ca ₈ -P	Ca ₂ -P	
۰٫۶۵**	۰٫۳۳	۰٫۳۲	-۰٫۵۹*	۰٫۷۱**	۰٫۳۶	۰٫۴۴	۱	Ca ₂ -P
-۰٫۲۲	-۰٫۱۹	-۰٫۱۲	-۰٫۲۷	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۱		Ca ₈ -P
۰٫۱۵	۰٫۰۷	۰٫۱۵	-۰٫۵۲*	۰٫۴۸*	۱			Al-P
۰٫۴۶	۰٫۰۹	-۰٫۰۰۳	-۰٫۵۱*	۱				Fe-P
-۰٫۴۹*	-۰٫۴۶	-۰٫۵۴*	۱					Ca ₁₀ -P
۰٫۳۷	۰٫۴۹*	۱						LOP
۰٫۴۷	۱							MLOP
۱								NLOP

* و ** به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ۸. معادلات رگرسیونی خطی ساده و چندمتغیره بین فسفر قابل جذب و شکل‌های معدنی و آلی با برخی ویژگی‌های خاک

معادله خط	ضریب همبستگی
Ca-P = - ۱۱٫۲۱ CaCO ₃ + ۷۳۷٫۴۲	r = ۰٫۵۹**
Inorg-P = -۷٫۷۳ CaCO ₃ + ۷۷۷٫۴۷	r = ۰٫۵۷**
Org-P = ۱٫۱۸ ۱۰۳ O.C - ۱٫۳۶ CaCO ₃ + ۹۸٫۴۸	R = ۰٫۹۱**
Ca ₈ -P = -۱۰٫۵۸ CaCO ₃ + ۴۶۲٫۴۱	r = ۰٫۶۶**
Fe-P = -۷۵٫۵۰ pH + ۲۰٫۶۸ O.C + ۶۱۳٫۳۳	R = ۰٫۶۷**
MLOP = ۲۷٫۸۷ O.C - ۰٫۸۷ CaCO ₃ + ۶۱٫۰۹	R = ۰٫۷۲**
NLOP = ۶۵٫۷۴ O.C - ۸٫۷۷	r = ۰٫۷۸**
Olsen-P = ۰٫۸۹ - CaCO ₃ + ۳۲٫۲۳	r = ۰٫۴۷*
Total-P = -۶٫۷۲ CaCO ₃ + ۹۱۶٫۲۱	r = ۰٫۴۹*
Total-P = ۵٫۶۷ Olsen-P + ۶۹۷٫۴۳	r = ۰٫۷۷**

Ca-P: مجموع فسفات‌های کلسیم، Inorg-P: کل فسفر معدنی، Org-P: کل فسفر آلی، CaCO₃ درصد کربنات کلسیم معادل، O.C درصد کربن آلیCa₂-P: دی کلسیم فسفات، Ca₈-P: اکتاکلسیم فسفات، Al-P: فسفات‌های آلومینیوم، Fe-P: فسفات‌های آهن، Ca₁₀-P: آپاتایت

LOP، MLOP، NLOP به ترتیب: فسفر آلی ناپایدار، فسفر آلی نسبتاً ناپایدار، فسفر آلی پایدار.

جدول ۹. ضرایب همبستگی شکل‌های معدنی و آلی فسفر با فسفر قابل جذب

فسفر آلی			فسفر معدنی					
NLOP	MLOP	LOP	Ca ₁₀ -P	Fe-P	Al-P	Ca ₈ -P	Ca ₂ -P	
-۰٫۱۳	**۰٫۵۹	**۰٫۶۸	-۰٫۲۰	**۰٫۷۱	*۰٫۴۸	**۰٫۶۸	**۰٫۹۴	Olsen-P

نتیجه‌گیری
 نتایج این تحقیق نشان داد مجموع فسفات‌های کلسیم و فسفر آلی کل رابطه‌ای معنادار با کربن آلی خاک دارند. همبستگی فسفر معدنی کل و مجموع فسفات‌های کلسیم با کربنات کلسیم معادل معنادار بود. از میان شکل‌های معدنی و آلی فسفر شکل‌های Ca₂-P، Ca₈-P، Fe-P، Al-P، LOP و MLOP رابطه‌ای مثبت و معنادار با فسفر قابل جذب داشتند. Ca₂-P بیشترین ضریب همبستگی را داشت. از بین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده رابطه معنادار pH با فسفر قابل جذب به روش اولسن نیز مشاهده شد. با افزایش کربنات کلسیم معادل

سپاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است. بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز قدردانی می‌شود.

REFERENCES

- Adhami, E., Maftoun, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J., and Asad, M.T. (2006). Inorganic phosphorus fractionation of highly calcareous soil of Iran, *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 1877-1888.
- Allison, L. E. and Moodie C. D. (1965). *Carbonates*. In: Black C A (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 3. Chemical Methods, 1379-1396. ASA: Madison, WI.
- Bakhieit-Said, M. and Dakermanji, H. (1993). Phosphate adsorption and desorption by calcareous soils of Syria, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24, 197-210.
- Carreira, J. A., Vinegla, B., and Lajtha, K. (2006). Secondary CaCO₃ and precipitation of P-Ca compounds control the retention of soil P in arid ecosystems, *Arid Environments*, 64, 460-473.
- Chang, S. C. and Jackson, M. L. (1957). Fractionation of soil phosphorus, *Soil Science*, 84, 133-144.
- Dehghan, R., Shariatmadari, H., and Khademi, H. (2008). Soil phosphorus forms in four toposequence of Isfhan and Shahrekord regions, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 11 (42), 463-472.
- Delgado, A., Ruiz J. R., Campillo, M. C., Kassem, S., and Andereu, L. (2000). Calcium and iron related phosphorus in calcareous and calcareous marsh soils: Sequential chemical fractionation and 31P nuclear magnetic resonance study, *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 31, 2483-2499.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (2002). *Particle size analysis*, In: Jacob, H. D., and Clarke, G (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 4, 201-214 Physical Methods, SSSA. Madison, WI.
- Hanley, P. K. and Murphy, M. D. (1970). Phosphorus forms in particle size separate of Irish soils in relation to drainage and parent materials, *Soil Science Society of American Proceeding*, 34, 587-590.
- Hedley, M. J., Stewart, J. 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 American Journal*, 46: 970-976.
- Jiang, B. and Gu, Y. (1989). A suggested fractionation scheme for inorganic phosphorus in calcareous soil, *Fertilizer Research*, 20, 150-165.
- Lindsay, W. L., Velke, P. G., and Chien, S. H. (1979). *Phosphate minerals*, In: J B Dixeon and S B Weed (Ed.) *Minrals in Soil Environments*, 1089-1130, 2th Edition. SSSA Book Series No. 1, Madison, WI. USA.
- Mahmood-soltani, S. H. and Samadi, A. (2003). Determination of phosphorus fractions in some calcareous soils in Fars province and their relationships with soil physic-chemical properties, *Isfahan University of Technology Journal*, 7 (3), 119-128.
- Mostashari, M., Muazardalan, N., Karimian, H., Rezai and Hosseni, H.M. (2009). Phosphorus fractions of selected calcareous soils of Qazvin province and their relationships with soil characteristics, *Iranian Journal of Soil Research*, 23, 11-23.
- Murphy, J. and Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, *Analytical Chemistry Acta journal*, 27, 31-36.
- Najafi, N. and Towfighi, H. (2009). Determination of inorganic phosphorus fractions and their relations with each other and available phosphorus in paddy soils of north of Iran, In: *Proceedings of the 11th Iranian Soil Science Congress, 12-15 Jun*, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, (In Farsi).
- Najafi, N., and Towfigi, H. (2006). Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorous fractions in the paddy soils of north of Iran: 1-Native soil phosphorus fractions, *Iranian Journal of Agricultural Science*, 5 (5), 919-935, (In Farsi).
- 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*, 961-1010, Chemical Methods, SSSA. Madison, WI.
- Nwoke, O. C. and Vanlauwe, B. (2003). Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil properties of West Africa savanna soils, *Agriculture Ecosystem Environment*, 100, 285-294.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., and Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Cire.939. *U.S.Gov. Print office, Washington, DC*.
- Samadi, A. (2003). A study on distribution forms of phosphorus in calcareous soils of western Australia, *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5, 39-49.
- Samadi, A. and Gilkes, R. J. (1999). Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of South Western Australia, *Soil Science Society American Journal*, 69, 809-815.
- Samadi, A. and Gilkes, R. J. (1998). Forms of phosphorus in virgin and fertilized calcareous soils of Western Australia, *Australian Journal of Soil Research*, 36, 585-601.
- Shariatmadari, H., Shirvani, M., and Dehghan, R. A. (2007). Availability of organic and inorganic phosphorus fractions to wheat in four toposequences of calcareous soils, *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 38, 2601-2617.
- Thomas, G. W. (1996). *Soil pH and soil acidity*, In: Sparks D L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*, Part 3, 475-49, Chemical Methods, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Tiessen, H., Stewart, J. W. B., and Cole, C. V. (1984). Transformation of phosphates varying in citrate

- and water solubility in a calcareous soil after incubation with cattle dung, *Journal of Indian Society of Soil Science*, 32, 421-426.
- Walker, T. W. and Adams, A. F. R. (1958). Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent material on accumulation of carbon, nitrogen, sulfur and organic phosphorus in grassland soils, *Soil Science*, 85, 307-318.
- Williams, J. D. H., Syers, J. K., and walker, T. W. (1967). Fractionation of soil inorganic phosphate by modification of Chang and Jacksons procedure, *Soil Science Society American Journal*, 31, 736-739.
- Zhang, H. and Kovar, J. L. (2000). *Phosphorus fractionation*, In: Pierzynski, G. E (Ed). *Methods of Phosphorus Analysis for Soil, Sediments, Residues and Waters*; Southern Cooperative Series Bulletin, 50-59, No. 369, NCSU: Raleigh, NC.