

تأثیر ترکیبات گوگردی بر توزیع شکل‌های معدنی فسفر در یک خاک آهکی

شهریار پاشاپور^۱، ابراهیم سپهر^{۲*}، ندا مرادی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر ترکیبات گوگردی بر توزیع شکل‌های معدنی فسفر در یک خاک آهکی، آزمایش خوابانیدن به صورت طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار در سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل: شاهد (بدون افزودن ترکیبات گوگردی)، سولفات آلومینیوم $(Al_2(SO_4)_3)$ ، سولفات آهن $(FeSO_4)$ ، باکتری تیوباسیلوس + گوگرد (S+Ti) و اسید سولفوریک (H_2SO_4) در سطح ۲ درصد وزنی بودند. تیمارها به مدت دو هفته در دمای ثابت 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس فسفر قابل استفاده (Olsen-P) و توزیع شکل‌های فسفر به روش عصاره‌گیری دنباله‌ای تعیین گردیدند. کاربرد ترکیبات گوگردی موجب تغییرات معنی‌دار ($p \leq 0.05$) در میزان فسفر قابل استفاده (P-Olsen) و شکل‌های معدنی فسفر $(Ca_2-P, Ca_8-P, Al-P, Fe-P, Ca_{10}-P)$ نسبت به شاهد شدند. فسفر قابل استفاده (P-Olsen) در اصلاح‌کننده‌های اسید سولفوریک، سولفات آلومینیوم و گوگرد + تیوباسیلوس نسبت به شاهد به ترتیب باعث ۲۴۰، ۷۰ و ۵۰ درصد افزایش یافت. همچنین این اصلاح‌کننده‌ها باعث شدند شکل‌های نامحلول فسفر اکتاکلسیم فسفات و آپاتیت بطور معنی‌دار کاهش یافته و به شکل‌های محلول‌تر دی‌کلسیم فسفات و فسفر قابل استفاده تبدیل شوند. اما سولفات آهن منجر به کاهش ۳۰ درصدی فسفر قابل استفاده و افزایش ۴ درصدی آپاتیت نسبت به شاهد شد. نتایج مطالعات همبستگی نشان داد که فسفر قابل استفاده همبستگی معنی‌دار با دی‌کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات، آپاتیت و فسفر باقیمانده داشت. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر ترکیبات گوگردی بر توزیع فسفر در شکل‌های مختلف بود، بنابراین انتظار می‌رود که منابع گوگردی بر قابلیت استفاده و شیمی فسفر تأثیر داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: تیوباسیلوس، شکل‌های معدنی فسفر، فسفر قابل استفاده، گوگرد

۱- پاشاپور ش.، سپهر ا.، مرادی ن. ۱۳۹۹. تأثیر ترکیبات گوگردی بر توزیع شکل‌های معدنی فسفر در یک خاک آهکی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۳. صفحه: ۵۵-۶۷.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، (مکاتبه کننده)

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.

*پست الکترونیک: e.sepchr@umia.ac.ir

مقدمه

فسفر (P) یک عنصر غذایی ضروری گیاه است و نقش کلیدی در رشد و توسعه گیاه دارد (Zhang *et al.*, 2014). فسفر در گیاهان بعد از نیتروژن دومین عنصر غذایی ضروری می باشد که برای فرایندهای بیوشیمیایی مختلف و تکمیل رشد زایشی گیاه مورد نیاز است (Mehra *et al.*, 2015). خاک به طور متوسط حاوی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر کل است که از این مقدار تنها ۱ تا ۲/۵ درصد آن قابل استفاده برای جذب توسط گیاهان می باشد (Chen *et al.*, 2008). فسفر در خاک در هر دو شکل معدنی و آلی وجود دارد. با اینکه فسفر به مقدار قابل توجهی در خاک وجود دارد، ولی از آنجایی که قسمت عمده آن در خاک به واسطه اکسیدهای فلزی و نرخ پایین انتشار آن تثبیت می شود، این عنصر جز عناصر با دسترسی خیلی پایین برای گیاهان محسوب می شود (Mehra *et al.*, 2015).

آگاهی از شکل های شیمیایی فسفر در فهم شیمی فسفر در خاک و درک جنبه هایی حاصل خیزی خاک نقش مؤثرتری دارد و می توان با استفاده از اطلاعات به دست آمده برای افزایش قابلیت جذب فسفر توسط گیاهان روش مدیریتی مناسبی پیشنهاد کرد. بنابراین به دلیل شیمی پیچیده این عنصر غذایی در خاک های آهکی پیوند با Ca^{2+} ، Mg^{2+} و اسیدی در پیوند با Al^{3+} ، Fe^{3+} فراهمی پائینی برای محصولات زراعی و باغی مورد انتظار است (Vance *et al.*, 2003). به طوری که کمتر از ۲۰ درصد کود مصرفی آن جذب گیاه شده و مابقی در خاک انباشته و تثبیت می شود (Grotz & Guerinet, 2002). در خاک های آهکی ایران، علی رغم بالا بودن فسفر کل در خاک به دلیل کاربرد بلند مدت کودهای فسفوره و کارایی پایین آنها، وجود pH بالا، درصد زیاد کربنات کلسیم، کمی مواد آلی و خشکی خاک باعث شده است که مقدار جذب فسفر کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد بهینه اکثر محصولات کشاورزی باشد (Salimpour *et al.*, 2010). خاک هایی که دارای مقادیر رس بیشتری هستند به دلیل سطح ویژه بالاتر نسبت به خاک های با مقادیر رس کمتر، فسفر بیشتری را جذب می کنند. روش متداول برای مقابله با این کمبودها استفاده از کودهای شیمیایی است که علاوه بر بهای زیاد (تابع قیمت جهانی نفت) و بازده پائین، خطر

آلودگی های زیست محیطی را نیز به همراه دارد. زمانی که کود فسفر به خاک افزوده می شود، بخش از آن باعث افزایش فسفر محلول می شود اما بخش قابل توجهی از فسفر افزوده شده رسوب می نماید و با قدرت زیاد در خاک تثبیت می شود که به آسانی با فسفر محلول به تعادل نمی رسد (Al-khateeb *et al.*, 1986). بنابراین اطلاع از وضعیت، شکل های فسفر و تغییرات آن ها در خاک های آهکی اهمیت ویژه ای دارد و جداسازی اجزای مختلف فسفر برای به دست آوردن اطلاعاتی درباره وضعیت فسفر قابل دسترس در خاک مفید است.

نتایج پژوهش های بسیاری حاکی از آن است که می توان فسفر نامحلول موجود در خاک (رسوب یافته) را با روش هایی به شکل محلول تبدیل کرد (Verma, 1993). از این جنبه با اسیدی کردن خاک و کاهش pH می توان از قدرت تثبیت این خاک ها کاسته و بر حلالیت عناصر غذایی افزود. استفاده از مواد اسیدزا مثل گوگرد یک راهکار موثر در جهت کاهش pH، افزایش فراهمی و پایداری عناصر غذایی در این خاک ها می باشد. به علت سرعت پائین فرآیند اکسیداسیون گوگرد در خاک، تلقیح گوگرد عنصری با تیوباسیلوس از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا با افزایش سرعت اکسیداسیون گوگرد و فراهم شدن شرایط اسیدی حاصل از اسید شدن آن، می توان به حلالیت فسفر موجود در سنگ فسفات، فسفر بومی خاک و در نهایت، افزایش عملکرد گیاه کمک زیادی کرد (Rosa *et al.*, 1989). استفاده از اسیدهای معدنی نیز در خاک های آهکی به دلیل تأثیر آنها در کاهش مقدار pH محلول خاک رایج می باشد (Bertr *et al.*, 2003). کاربرد این اسیدها در کنار سایر کودهای شیمیایی باعث افزایش قابلیت جذب برخی عناصر غذایی شده و در نهایت منجر به افزایش عملکرد می شود. سولفات آهن ($FeSO_4$) بطور گسترده به عنوان عامل اسیدی کننده برای خاک ها و یا محیط های رشد گیاه و همچنین برای افزایش میزان فسفر، آهن و گوگرد قابل دسترس گیاه مورد استفاده قرار می گیرد (Sánchez-Arias *et al.*, 2008). سولفات آهن اضافه شده به خاک منجر به کاهش pH شده و باعث حلالیت ترکیبات و نمک های حاوی کلسیم از جمله سولفات کلسیم می شود و می تواند با کلسیم واکنش داده و مانع کمپلکس فسفر با کلسیم شود. همچنین باعث فراهمی و

مقادیر فسفر قابل استفاده و شکل‌های شیمیایی فسفر در خاک آهکی انجام گردید.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک
نمونه خاک مورد مطالعه از محوطه دانشگاه ارومیه از عمق ۰-۳۰ سانتی متری برداشت شد. نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه هوا خشک شده و از الک ۲ میلی-متری عبور داده شد. سپس برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نظیر بافت به روش هیدرومتری، pH در سوسپانسیون ۱:۵ خاک به آب، کربن آلی به روش والکی و بلک (Walky & Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (Rayment & Higginson, 1992) و فسفر قابل استفاده (Olsen-P) به روش اولسن (Olsen *et al.*, 1954) اندازه گیری شد.

آزمایش خوابانیدن

برای اجرای آزمایش خوابانیدن ابتدا مقدار ۲ درصد وزنی از ترکیبات گوگردی شامل اسید سولفوریک (مقدار اسید مورد نیاز جهت خنثی سازی ۲ درصد وزنی، همراه با آب مقطر جهت رساندن رطوبت خاک به ظرفیت مزرعه‌ای به صورت اسپری به خاک افزوده شد)، گوگرد با تیوباسیلوس، سولفات آلومینیوم و سولفات آهن به خاک اضافه گردید و پس از مخلوط شدن، ۵۰۰ گرم از نمونه‌ها درون ظروف پلی اتیلن ریخته شده و دهانه ظروف بوسیله درپوش پلاستیک بسته شدند تا از تبخیر بیشتر رطوبت از نمونه‌ها در طول خوابانیدن جلوگیری شود. در روی درپوش‌های پلاستیکی، منفذهای ریز یکنواخت جهت تسهیل تبادلات گازی تعبیه شد. پس از تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نمونه‌ها از طریق وزنی با افزودن آب مقطر به صورت اسپری در رطوبت ظرفیت زراعی تنظیم شدند. نمونه‌ها به مدت ۲ هفته در انکوباتور با دمای 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در طول مدت خوابانیدن، درصد رطوبت نمونه ثابت نگه داشته شد. بعد از دو هفته، مقدار ۲۰ گرم از نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌ها برداشته و هوا خشک شدند. فسفر قابل استفاده گیاه (Olsen-P) به روش اولسن (Olsen *et al.*, 1954) و عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر

تشکیل یون‌های Fe^{2+} می‌گردد. از آنجایی که اکثر خاک‌های زراعی ایران آهکی است و مصرف سولفات آهن در این خاک‌ها موجب تثبیت سریع آن و تبدیل آن به فرم‌های غیر قابل جذب می‌گردد، لذا مصرف خاکی آن به‌جز به صورت موضعی توصیه نمی‌گردد (Kuchaki *et al.*, 1997). مطالعات انجام شده بر روی اثر کاربرد مقادیر مختلف گوگرد (۰، ۱۱۲، ۲۲۴، ۴۴۸ کیلوگرم درهکتار) بر توزیع شکل‌های فسفر در شرایط مزرعه‌ای نشان داده که بیشترین مقدار گوگرد کاربرد (۴۴۸ کیلوگرم گوگرد در هکتار) پس از دو ماه موجب کاهش pH خاک (۰/۲ واحد) و افزایش شکل‌های فسفر قابل دسترس (Labile P) و فسفر متصل به آهن و آلومینیوم (Fe-Al-P) نسبت به زمان‌های ۶، ۹ و ۱۲ ماه شد اما به دلیل کم بودن مقدار گوگرد مصرفی، در ابتدای فصل رشد تأثیر معنی‌دار بر شکل‌های کلسیمی فسفر (Ca-P) در مقایسه با زمان‌های دیگر نداشت (Rongzhong *et al.*, 2010). مودیش و همکاران (Modaihs *et al.*, 1989) با بررسی اثر گوگرد بر خصوصیات شیمیایی و قابلیت دسترسی عناصر غذایی در چند خاک آهکی مشاهده نمودند که pH خاک در مقایسه با شاهد به طور معنی‌داری کاهش و مقدار فسفر قابل دسترس افزایش یافت. گارسیا (Garcia, 1991) نشان داد که مصرف گوگرد و تیوباسیلوس با تولید اسید سولفوریک در نتیجه‌ی اکسایش گوگرد، باعث کاهش pH خاک و افزایش قابلیت جذب فسفر و سایر عناصر کم مصرف در خاک‌های آهکی می‌شوند. ملکوتی و همکاران (Malakouti *et al.*, 2005) گزارش کردند مصرف آهن از منبع سولفات آهن در خاک‌های غیر آهکی سبب افزایش عملکرد دانه‌ی آفتابگردان شد.

یکی از مشکلات عمده خاک‌های آهکی پایین بودن کارایی کودهای فسفوری در اثر رسوب سریع آنها است که کاهش pH خاک می‌تواند به حلالیت فسفر کمک کند (Mirzapour *et al.*, 2017). لذا استفاده از مواد اسیدزا (گوگرد و اسیدسولفوریک و غیره) جهت کاهش pH خاک می‌تواند به عنوان یک روش موثر برای افزایش قابلیت استفاده فسفر در خاک‌های آهکی کشور باشد. بنابراین این پژوهش به منظور بررسی تأثیر ترکیبات مختلف گوگردی (اسید سولفوریک، سولفات آهن، سولفات آلومینیوم و گوگرد به همراه تیوباسیلوس) بر

تیوباسیلوس + گوگرد (S+Ti) و اسید سولفوریک (H_2SO_4) در ۳ تکرار اجرا گردید. تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل آزمون نرمال بودن داده‌ها و اشتباه‌ها، تجزیه واریانس و همبستگی بین شکل‌های مختلف فسفر در تیمارهای مورد آزمایش با استفاده از نرم افزارهای MINITAB نسخه ۱۴ و SPSS انجام گرفت و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. ترسیم نمودارها نیز با استفاده از نرم افزار Excel صورت گرفت.

شامل دی‌کلسیم فسفات (Ca_2-P)، اکتا کلسیم فسفات (Ca_8-P)، فسفات آلومینیوم ($Al-P$)، فسفات آهن ($Fe-P$) و آپاتیت ($Ca_{10}-P$) به روش جیانگ و گو (Jiang & Gu, 1989) انجام گردید (جدول ۱). فسفر باقیمانده ($Residual-P$) نیز توسط هضم با HNO_3-HClO_4 (۱:۶) تعیین شد. سپس فسفر در عصاره‌های خاک بدست آمده به روش اسپکتروفتومتری تعیین گردید. آزمایش به صورت طرح پایه کاملاً تصادفی با ۵ تیمار شامل: شاهد (بدون افزودن ترکیبات گوگردی)، سولفات آلومینیوم ($Al_2(SO_4)_3$)، سولفات آهن ($FeSO_4$)، باکتری

جدول ۱- خلاصه عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر به روش جیانگ و گو (Jiang & Gu, 1989)

Table 1. Summary of sequential extraction of inorganic phosphorus forms by Jiang & Gu method (1989)

Inorganic phosphorus forms	Shaking time (h)	Extractant	Extractant concentration (M)
Ca_2-P	1	PH = 7.5 و $NaHCO_3$	0.25
Ca_8-P	1	PH = 4.2 و NH_4AC	0.5
$Al-P$	1	PH = 8.2 و NH_4F	0.5
$Fe-P$	2+2	Na_2CO_3 و $NaOH$	0.1-0.1
$Ca_{10}-P$	1	H_2SO_4	0.25

(جدول ۳) که اثر تیمارها بر فسفر قابل استفاده، شکل‌های فسفر معدنی و فسفر باقیمانده در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود.

نتایج و بحث

خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی، آهکی، pH بالا و دارای مقدار فسفر قابل استفاده کم بود (جدول ۲). همچنین تجزیه واریانس داده‌های آزمایش نشان داد

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 2. Some physical and chemical properties of the studied soil

Soil texture	Clay	Silt	Sand	CCE	OC	Available phosphorous ($mg\ kg^{-1}$)	pH
Clay Loam	35.2	33.9	30.9	16	1.14	9.81	8.09

CCE: $CaCO_3$ equivalent, OC: Organic Carbon.

CCE: $CaCO_3$ equivalent, OC: Organic Carbon.

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر تیمارها بر فسفر قابل استفاده و شکل‌های مختلف فسفر در خاک

Table 3. Variance analysis (mean squares) of the treatments effects on available-P and various phosphorus forms in soil

Source of Variation	Df	Mean Square						
		Olsen-P	Ca_2-P	Ca_8-P	$Al-P$	$Fe-P$	$Ca_{10}-P$	Residual-P
Treatments	4	338 ***	347***	246***	13.71 ***	246***	1049***	1211***
Error	10	0.65	0.65	2.11	0.12	3.16	8.79	22.82
CV(%)		4.81	2.95	0.97	0.64	3.45	0.57	3.35

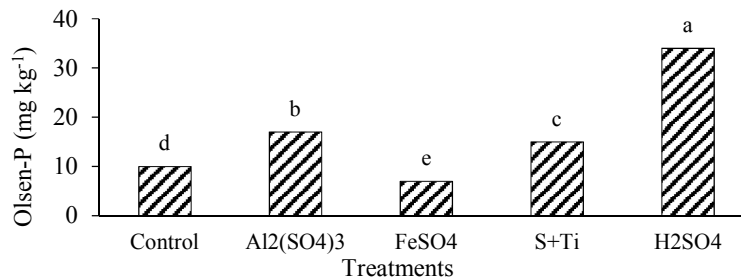
***، معنی‌دار در سطح ۰/۱

***: significant at $P < 0.001$.

گاریسیا (Garcia, 1991) نیز کاهش pH خاک و افزایش قابلیت جذب فسفر و سایر عناصر ریزمغزی در خاک‌های آهکی در نتیجه مصرف گوگرد و تیوباسیلوس را گزارش کرد. سلیم‌پور و همکاران (Salimpour et al., 2010) ضمن تاکید به نقش مؤثر باکتری تیوباسیلوس در افزایش جذب فسفر و عملکرد کلزا در خاک‌های آهکی، نشان دادند که مصرف گوگرد یک روش مؤثر و ارزان برای رفع کلروز، افزایش جذب عناصر غذایی و در نتیجه افزایش عملکرد در خاک‌های آهکی است. رایان و استرولن (Ryan & Stroehlein, 1979) در مطالعه گلخانه‌ای نیز به این نتیجه رسیدند که تزریق اسید سولفوریک به خاک آهکی منجر به افزایش فسفر محلول خاک و همچنین رشد گیاه گوجه‌فرنگی می‌شود. آنها طی تحقیق دیگری در سال 1979 دریافتند که استفاده از اسید سولفوریک باعث افزایش جذب فسفر از ۰/۵ به ۷/۴ میلی‌گرم در هر بوته گوجه‌فرنگی می‌شود. پرات (Pratt, 1961) نشان داد که اسیدی کردن خاک‌های آهکی، میزان فسفر محلول و همچنین رشد گیاه را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد که مصرف سولفات آهن باعث کاهش ۳۰ درصدی فسفر قابل استفاده در خاک مورد مطالعه شد که به دلیل تشکیل رسوب فسفات آهن در نتیجه ترکیب Fe با PO_4 خاک و توزیع فسفر به فاز نامحلول است. این نتایج با نتایج سایر محققین در ارتباط بود (Zhang et al., 2004). داهیا و سینگ (Dahiya & Singh, 1976) دریافتند که افزایش سطح آهن باعث کاهش غلظت فسفر در گیاه نخود شده و این امر احتمالاً به دلیل تشکیل فسفات آهن یا فسفات هیدروکسید آهن بوده است.

تأثیر ترکیبات گوگردی بر فسفر قابل استفاده (Olsen-P) روش اولسن یا بی‌کربنات سدیم توسط اولسن و همکاران (Olsen et al., 1954) برای پیش بینی پاسخ گیاه به کاربرد کود فسفر در خاک‌های آهکی گسترش یافته است که به منظور ارزیابی فسفر قابل استفاده در خاک‌های آهکی استفاده می‌شود. مقایسه میانگین اثر تیمارها بر مقدار فسفر قابل استفاده نشان داد که همه ترکیبات گوگرد جز سولفات آهن سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استفاده نسبت به تیمار شاهد شدند اما سولفات آهن سبب کاهش معنی‌دار فسفر قابل استفاده نسبت به شاهد شد (شکل ۱). بیشترین و کمترین مقدار فسفر قابل استفاده به ترتیب در تیمار اسید سولفوریک (۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سولفات آهن (۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود که در مقایسه با شاهد ۲۴۰ درصد افزایش و ۳۰ درصد کاهش داشتند. همچنین تیمارهای گوگرد+ تیوباسیلوس (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سولفات آلومینیوم (۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نیز مقدار فسفر قابل استفاده را نسبت به شاهد به ترتیب ۵۰ و ۷۰ درصد افزایش دادند.

افزایش مقدار فسفر قابل استفاده در ترکیبات گوگرد می‌تواند به دلیل کاهش pH در اثر استفاده از اسید سولفوریک و یا در نتیجه اکسیداسیون گوگرد توسط باکتری تیوباسیلوس و جایگزینی آنیون سولفات تیمارهای مذکور با PO_4 متصل به Al، Fe و Ca باشد که منجر به حل‌الیت فسفر تثبیت شده می‌شود (Besharati & Saleh Rastin, 1999). بشارتی و صالح راستین (Besharati & Saleh Rastin, 1999) در یک آزمایش گلدانی بر روی ذرت نشان داد تیوباسیلوس، گوگرد و گوگرد+تیوباسیلوس به ترتیب مقدار فسفر قابل استفاده را ۱۰، ۹۰ و ۲۵۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند.



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر نوع تیمار بر فسفر قابل استفاده خاک

Figure 1. Mean comparison of the effect of treatment type on available-P soil

میانگین‌ها دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند. Means followed by the same superscript letters are not significant different according to the Duncan's -test at $p < 0.05$

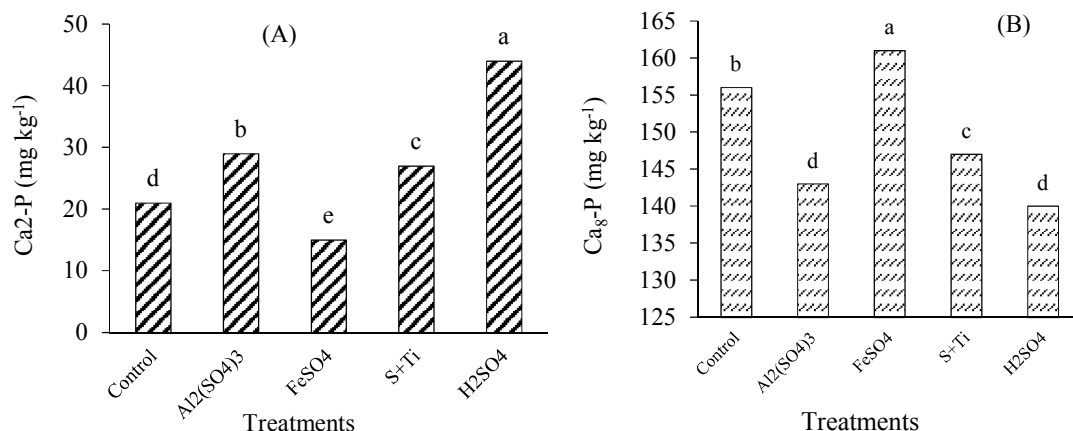
سدیم) روند تغییرات دی کلسیم فسفات تقریباً مشابه فسفر قابل استفاده بود. این امر با نتایج عبدالهی (Abdullahi, 2010) که بین دی کلسیم فسفات با فسفر قابل استفاده همبستگی بسیار معنی داری مشاهده کردند مطابقت دارد.

اکتا کلسیم فسفات در خاک مورد مطالعه این پژوهش بعد از آپاتیت بیشترین مقدار را در بین شکل های معدنی فسفر به خود اختصاص داده است و هم اینکه این شکل معدنی فسفر بعد از دی کلسیم فسفات مستعدترین شکل معدنی فسفر جهت تبدیل به شکل های محلول و در نتیجه قابل جذب برای گیاه می باشد. نتایج نشان داد در اثر کاربرد تیمارهای سولفات آلومینیوم، گوگرد+ تیوباسیلوس و اسیدسولفوریک میزان اکتاکلسیم فسفات (Ca_8-P) نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی داری نشان داد اما تیمار سولفات آهن در مقایسه با شاهد افزایش معنی داری داشت (شکل ۲ ب). یونسی و همکاران (Younessi *et al.*, 2017) در تحقیقی بر روی تأثیر باکتری های تیوباسیلوس، گوگرد و کودآلی بر میزان جذب فسفر نشان داد که تیمار گوگرد + کود آلی بیشترین تأثیر را در تجزیه شکل اکتا کلسیم فسفات به شکل های کم محلول و محلول فسفر داشته است و بعد از این تیمار تیمارهای تیوباسیلوس+ گوگرد و تیوباسیلوس + گوگرد + کود آلی بیشترین تأثیر در انحلال اکتا کلسیم فسفر داشت.

تأثیر ترکیبات گوگردی بر شکل های معدنی فسفر

فسفات های کلسیم

مقایسه میانگین داده ها نشان داد کاربرد تیمارهای سولفات آلومینیوم، گوگرد+ تیوباسیلوس و اسیدسولفوریک به ترتیب سبب افزایش معنی دار میزان دی کلسیم فسفات خاک (Ca_2-P) به مقدار ۳۸، ۲۹ و ۱۰۹ درصد شد (شکل ۲ الف). بیشترین مقدار دی کلسیم فسفات در تیمار اسید سولفوریک با ۱۰۹ درصد افزایش و کمترین مقدار آن در تیمار سولفات آهن با ۲۸/۵۷ درصد کاهش نسبت به شاهد بود. کمترین بخش فسفر معدنی در بین سایر اشکال شیمیایی مربوط به دی کلسیم فسفات بود علت این امر آن است که دی کلسیم فسفات شکل ناپایدار فسفر است و توانایی تبدیل به شکل های دیگر را دارد (Lindsay, 1982). در این ارتباط ادومی و همکاران (Adhami *et al.*, 2005) در مطالعات خود روی تعدادی از خاک های آهکی ایران نشان دادند که دی کلسیم فسفات کمترین بخش فسفات های کلسیمی این خاک ها را تشکیل می دهد. افزایش Ca_2-P پس از اعمال تیمارها را می توان به حل شدن $CaCO_3$ بر اثر کاهش (Najafi & Towfighi, 2008) pH نسبت داد. کاهش Ca_2-P در برخی خاک ها پس از اعمال تیمارها را می توان به ناپایداری این شکل فسفر و تبدیل آن به شکل های اکتا و آپاتیت مربوط دانست (Najafi & Tofigi, 2011). به دلیل استفاده از عصاره گیاه های تقریباً یکسان (بی کربنات



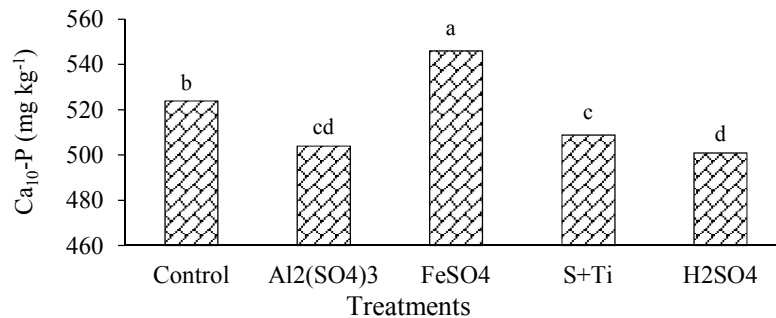
شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر نوع تیمار بر مقدار دی کلسیم فسفات (A) و اکتا کلسیم فسفات (B)

Figure 2. Mean comparison of the effect of treatment type on the amount Ca₂-P (A) and Ca₈-P (B)

میانگین ها دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون چند دامنه ای دانکن اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند. Means followed by the same superscript letters are not significant different according to the Duncan's -test at $p < 0.05$

مقدار آپاتیت نسبت به تیمار شاهد شدند به جز تیمار سولفات آهن که نسبت به تیمار شاهد افزایش ۴ درصدی داشت (شکل ۳). افزایش غلظت آپاتیت در سولفات آهن را می‌توان به رسوب یون‌های آهن و فسفات باهم نسبت داد که سبب افزایش این شکل از فسفات کلسیم می‌شود. میکروارگانیسم‌های خاک دارای پتانسیل معدنی کردن فسفر آلی و انحلال فسفر معدنی یا غیرآلی (ثبیت شده در خاک‌های اسیدی و قلیایی) بوده و از این طریق فسفر در دسترس گیاهان را افزایش می‌دهند (Chen *et al.*, 2006) بنابراین اسید سولفوریک، سولفات آلومینیوم و گوگرد + تیوباسیلوس با تولید اسید قادر به افزایش انحلال فسفر تثبیت شده در خاک هستند.

میزان آپاتیت موجود در تیمارها در محدوده‌ی ۵۰۱ تا ۵۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار داشت که اصلی‌ترین شکل شیمیایی فسفر در خاک‌های آهکی است (Adhami *et al.*, 2005). در همه تیمارها بخش آپاتیت بیشتر از بخش‌های دیگر فسفر معدنی بود که بیانگر آن است که اجزای معدنی فسفر می‌توانند به شکل پایدار آپاتیت رسوب کنند به عبارتی تثبیت فسفر اتفاق می‌افتد؛ در فرایند تثبیت در خاک‌های آهکی، یون کلسیم در واکنش با فسفر منوکلسیم فسفات تولید می‌کند و سپس به دی‌کلسیم فسفات و اکتا کلسیم فسفات تبدیل می‌شود و در نهایت به شکل رسوب آپاتیت درمی‌آید. بیشترین مقدار آپاتیت اندازه‌گیری شده در تیمار سولفات آهن و کمترین مقدار آن در تیمار اسید سولفوریک مشاهده شد. تیمارها باعث کاهش معنی‌دار



شکل ۳- مقایسه میانگین تاثیر نوع تیمار بر مقدار آپاتیت

Figure 3. Mean comparison of the effect of treatment type on the amount Ca₈-P

میانگین‌ها دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند. Means followed by the same superscript letters are not significant different according to the Duncan's *s*-test at $p < 0.05$

(Halford & Mattingly, 1976). پویا بودن محیط خاک باعث تغییر شکل‌های فسفر در خاک می‌شود. برای مثال زانگ و همکاران (Zhang, 2004) گزارش کردند که کود فسفر افزوده شده به خاک به شکل فسفات‌های آهن و آلومینیوم تبدیل می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که در خاک‌های آهکی نسبت به خاک‌های اسیدی مقدار بیشتری از کود فسفر به شکل Al-P تبدیل می‌گردد این در حالیست که در خاک‌های اسیدی بیشتر فسفر محلول خاک به شکل Fe-P تبدیل می‌شود (Najafi & Tofigi, 2011).

فسفر باقیمانده (Residual-P)

میزان فسفر باقیمانده در تیمارهای مورد مطالعه در محدوده‌ی ۱۰۸ تا ۱۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارد.

فسفات آلومینیوم (Al-P) و فسفات آهن (Fe-P)

بیشترین مقدار فسفات آلومینیوم در تیمار سولفات آلومینیوم بدست آمد که به‌طور معنی‌دار نسبت به تیمار شاهد ۹ درصد افزایش نشان داد. اما تیمارهای دیگر از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۴). همچنین مقایسه میانگین اثر تیمارها نشان داد که بین تیمارها از نظر میزان فسفات آهن اختلاف معنی‌دار وجود نداشت به جزء تیمار سولفات آهن که بیشترین مقدار (۶۷/۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را به خودش اختصاص داده بود به‌طوری که نسبت به تیمار شاهد افزایش ۴۵ درصدی داشت. آهن موجود در تیمار سولفات آهن با فسفر خاک پیوند تشکیل می‌دهد و سبب افزایش فسفات آهن در خاک می‌شود

پنج درصد معنی‌دار بود. از طرف دیگر میزان فسفر باقیمانده بین تیمارهای سولفات آلومینیم، گوگرد+ تیوباسیلوس و شاهد از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۳).

بیشترین و کمترین مقادیر فسفر باقیمانده به ترتیب به تیمارهای اسید سولفوریک و سولفات آهن تعلق داشت به‌طوری‌که به ترتیب باعث افزایش ۹ و کاهش ۲۵ درصدی نسبت به شاهد شدند که این اختلاف در سطح

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر مقدار فسفات آلومینوم، فسفات آهن و فسفر باقیمانده

Table 4. Mean comparison of the effect of treatment type on the amount Al-P, Fe-P and Res-P.

Phosphorous forms	Treatments				
	Control	Al ₂ (SO ₄) ₃	FeSO ₄	S+Ti	H ₂ SO ₄
Al-P	54.88 b	59.64 a	54.88 b	54.63 b	55.13 b
Fe-P	48.61 b	48.11 b	67.66 a	49.11 b	48.61 b
Residual-P	146 b	151 b	108 c	145 b	162 a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند.

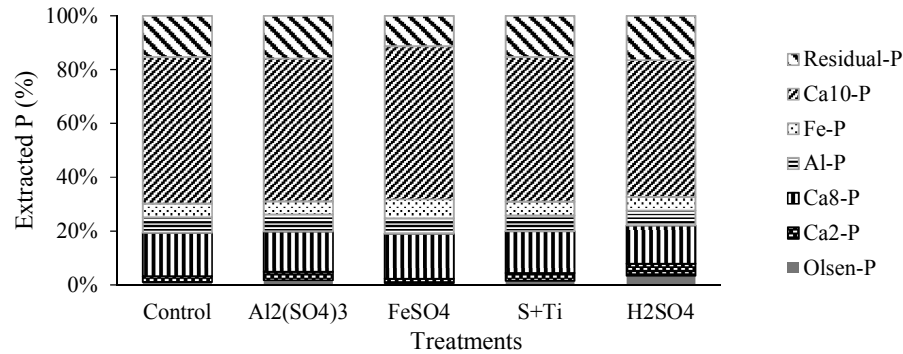
Means similar letter(s) are not significantly different in each row according to the Duncan's *t*-test ($p < 0.05$)

اکتاکلسیم فسفات را می‌توان ناشی از ماهیت آهنی خاک مورد مطالعه و بالا بودن مقدار کلسیم دانست. سامریت و همکاران (Samrit *et al.*, 2002) نیز نتایج مشابهی به دست آوردند با این تفاوت که آنان شکل‌های آپاتیت، دی‌کلسیم فسفات و اکتاکلسیم فسفات را در یک گروه کلی فسفات‌های کلسیم گزارش کرده و مجموعاً اندازه‌گیری کرده بودند.

همبستگی شکل‌های فسفر تحت اثر تیمارها

وجود همبستگی‌های معنی‌دار بین شکل‌های مختلف فسفر گویای این مطلب است که احتمالاً بین این شکل‌ها در خاک‌های مورد مطالعه یک رابطه پویا و دینامیک برقرار می‌باشد (Tiessen *et al.*, 1984). همبستگی ساده فسفر قابل جذب با دی‌کلسیم فسفات ($p < 0.01$) ($0/98$) و فسفر باقیمانده ($p < 0.01$) ($0/61$) مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۵) که رابطه بین این شکل‌ها و فسفر قابل جذب احتمالاً بیانگر تبدیل این اشکال به فسفر قابل جذب می‌باشد. بیشترین ضریب همبستگی مربوط به P-Olsen و شکل دی‌کلسیم فسفات بود که احتمالاً دلیل این امر حلالیت بالای دی‌کلسیم فسفات در مقایسه با دیگر شکل‌ها بوده است. در بین اجزای معدنی شکل Ca₂-P بیشترین اثر را بر مقدار فسفر قابل جذب در خاک‌های آهنی مورد مطالعه دارد، به طوری که ۹۴ درصد تغییرات P-Olsen توسط Ca₂-P توجیه می‌شود.

توزیع شکل‌های فسفر تحت اثر تیمارهای مورد مطالعه توزیع شکل‌های فسفر و فسفر قابل استفاده برای تیمار-های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. توزیع شکل‌های فسفر در تیمار شاهد به‌صورت آپاتیت (۵۵٪) < اکتاکلسیم فسفات (۱۶٪) < باقیمانده (۱۵٪) < فسفات آلومینوم (۶٪) < فسفات آهن (۵٪) < دی-کلسیم فسفات (۲٪) < فسفر قابل استفاده (۱٪) بود که در تیمار اسید سولفوریک به‌صورت آپاتیت (۵۱٪) < باقیمانده (۱۶٪) < اکتاکلسیم فسفات (۱۴٪) < فسفات آلومینوم (۶٪) < فسفات آهن (۵٪) < دی‌کلسیم فسفات (۴/۵٪) < فسفر قابل استفاده (۳/۵٪) تغییر یافت. بطوریکه در تیمار اسید سولفوریک بخش آپاتیت و اکتاکلسیم فسفر به دی‌کلسیم فسفات تبدیل شدند و مقدار فسفر قابل استفاده نیز افزایش یافت. اما در تیمار سولفات آهن توزیع فسفر به‌صورت آپاتیت (۵۷٪) < باقیمانده (۱۷٪) < اکتاکلسیم فسفات (۱۱٪) < فسفات آهن (۷٪) < فسفات آلومینوم (۶٪) < دی‌کلسیم فسفات (۱/۲۷٪) < فسفر قابل استفاده (۰/۷۳٪) تغییر یافت که نشان دهنده تبدیل دی‌کلسیم فسفات و اکتاکلسیم فسفات به صورت آپاتیت بود. به‌طور کلی با توجه به شکل ۴ در همه تیمارها شکل آپاتیت بیشترین سهم نسبی فسفر را دارا بود که در تیمارهای شاهد، سولفات آلومینوم، سولفات آهن، گوگرد+ تیوباسیلوس و اسیدسولفوریک به ترتیب ۵۵، ۳، ۵۷، ۵۴ و ۵۱ درصد از فسفر را داشتند. بالا بودن شکل‌های شیمیایی آپاتیت و



شکل ۴- توزیع نسبی شکل‌های فسفر حاصل از عصاره‌گیری متوالی در تیمارهای مختلف

Figure 4. Relative distribution of phosphorus forms from continuous extraction in different treatments.

همبستگی معنی‌داری دارد و این همبستگی در خاک‌هایی که در آنها فسفات‌های کلسیم غالب است بیشتر می‌باشد. همبستگی فسفر قابل استفاده با اکتاکلسیم‌فسفات ($P < 0.01$) (-0.83) و آپاتیت ($P < 0.01$) (-0.739) منفی و معنی‌دار بود؛ بیانگر آن است که فسفر عصاره‌گیری شده به روش اولسن احتمالاً از این اجزاء آزاد می‌شود. زانگ و همکارانش (Zhang *et al.*, 2004) گزارش دادند که تبدیل آپاتیت به شکل قابل جذب گیاه طی یک پروسه کند صورت می‌گیرد. صمدی (Samadi, 2003) نیز همبستگی معنی‌داری بین فسفر اولسن و شکل‌های Ca_2-P ، $Al-P$ و $Ca_{10}-P$ را در خاک‌های غرب استرالیا گزارش کرد. کاهش میزان آپاتیت پس از اعمال تیمارها و وجود همبستگی منفی بین آپاتیت و فسفر قابل استفاده نشان دهنده تبدیل این جزء به فسفر قابل استفاده است که می‌تواند کمبود فسفر محلول را جبران کند (Abdollahi, 2010).

صمدی (Samadi, 2003) نیز با انجام رگرسیون گام به گام در خاک‌های آهکی استرالیا گزارش داد که ۹۰ درصد تغییرات P -Olsen به وسیله دی‌کلسیم فسفات توضیح داده می‌شود. نجفی و توفیقی (Najafi & Towfigi, 2006) نیز گزارش کرد در خاک‌های آهکی ۸۳ درصد تغییرات فسفر قابل جذب توسط Ca_2-P توجیه می‌گردد. بین فسفر قابل استفاده و فسفات‌آلومینیم و هم‌چنین فسفات آهن همبستگی معنی‌دار وجود نداشت در حالی که سوسکی و همکاران (Suski *et al.*, 1963) گزارش دادند که فسفر قابل استخراج با عصاره‌گیر اولسن با فسفات آلومینیوم همبستگی معنی‌دار دارد. نتایج سماواتی و حسین‌پور (Samvati & Hosseinpour, 2011) در تعدادی از خاک‌های استان همدان نیز نشان داد که فسفر عصاره‌گیری شده به روش اولسن همبستگی معنی‌داری با فسفات‌های کلسیم و آلومینیوم دارد. چانگ و جوی (Chang & Juo, 1963) گزارش کردند که فسفر قابل جذب گیاه با فسفات‌آلومینیوم

جدول ۵- ضریب همبستگی بین شکل‌های مختلف فسفر در تیمارهای مورد استفاده

Table 5- Correlation coefficients (R) between different P-fractionations of treatments used

	P-Olsen	Ca_2-P	Ca_8-P	Al-P	Fe-P	$Ca_{10}-P$	Residual-P
P-Olsen	-						
Ca_2-P	0.977**	-					
Ca_8-P	-0.83**	-0.894**	-				
Al-P	0.04 ^{ns}	0.098 ^{ns}	-0.386 ^{ns}	-			
Fe-p	-0.34 ^{ns}	-0.491*	0.654**	-0.651*	-		
$Ca_{10}-P$	-0.739**	-0.822**	0.948**	-0.403 ^{ns}	0.8**	-	
Residual-P	0.61**	0.714**	-0.757**	0.376 ^{ns}	-0.893**	-0.865**	-

^{ns}، ** و *؛ به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد،

ns, * and **: not significant, significant at $p < 0.05$, and significant at $p < 0.01$, respectively.

شکل های مختلف فسفر همبستگی های معنی داری مشاهده کردند. نجفی و توفیقی (Najafi & Towfigi, 2006) گزارش کرد در خاک های آهکی دی کلسیم فسفات با همه ی شکل های فسفر معدنی غیر از آپاتیت رابطه معنی داری دارد و اکتاکلسیم فسفات رابطه معنی داری با هیچ یک از شکل ها ندارد. مستشاری و همکاران (Mostashari et al., 2009) نیز نتایج مشابهی گزارش کرده اند در حالی که صمدی و گیلک (Samadi & Gilkes, 1999) گزارش کردند که رابطه معنی داری میان دی کلسیم فسفات با اکتاکلسیم فسفات وجود دارد.

نتیجه گیری کلی

مصرف منابع مختلف گوگرد سبب افزایش معنی دار قابلیت استفاده و حلالیت فسفر در خاک آهکی شد که این امر بدلیل کاهش pH خاک در نتیجه کاربرد اسیدسولفوریک و نیز اکسایش گوگرد+ تیوباسیلوس و تولید اسیدسولفوریک می باشد. اما سولفات آهن بدلیل تثبیت سریع آن و تبدیل به فرم های غیر قابل جذب منجر به کاهش فسفر قابل استفاده شد. در بین تیمارهای مطالعه شده بیشترین اثر مثبت مربوط به تیمار اسید سولفوریک بود به طوری که سبب افزایش ۲۴۰ درصدی فسفر قابل استفاده (P-Olsen) نسبت به شاهد شد. هم چنین نتایج مطالعات همبستگی نشان داد که فسفر قابل استفاده همبستگی معنی داری با دی کلسیم فسفات، فسفر باقیمانده (همبستگی مثبت) اکتاکلسیم فسفات، آپاتیت (همبستگی منفی) دارد. به طور کلی با توجه به این که بخش بیشتری از خاک های ایران دارای pH بالا و آهکی بوده و بدلیل ارزان قیمت بودن گوگرد، می توان از این ترکیبات در جهت کاهش موضعی pH خاک و افزایش قابلیت استفاده فسفر استفاده کرد.

نتایج نشان داد که دی کلسیم فسفات با فسفر باقیمانده همبستگی مثبت ($p < 0.01$) (0.714) و با اکتاکلسیم فسفات ($p < 0.01$) (0.89 -)، آپاتیت ($p < 0.01$) (0.82 -) و با فسفات آهن ($p < 0.05$) (0.49 -) همبستگی منفی داشت. همچنین بین شکل اکتاکلسیم فسفات با شکل فسفات آهن ($P < 0.01$) (0.65) هم چنین با آپاتیت ($P < 0.01$) (0.95) همبستگی مثبت ولی با فسفر باقیمانده همبستگی منفی و معنی داری به دست آمد ($p < 0.01$) (0.76 -). از بین شکل های فسفر، فسفات آهن همبستگی مثبت و معنی داری با آپاتیت دارد ($P < 0.01$) (0.8) ولی همبستگی منفی و معنی دار با فسفر باقیمانده داشت ($p < 0.01$) (0.89 -). با توجه به نتایج به دست آمده، بین فسفر باقیمانده و آپاتیت همبستگی منفی و معنی دار بدست آمد ($p < 0.01$) (0.86 -)، هم چنین فسفات آلومینیم با فسفات آهن همبستگی منفی و معنی دار داشت ($p < 0.05$) (0.56 -).

وجود همبستگی های مختلف و معنی دار بین اجزای فسفر بیانگر وجود رابطه تعادلی بین این شکل ها با یکدیگر است. وجود این رابطه دینامیکی اهمیت زیادی در فرآیندهای مربوط به واکنش های کود فسفوری و جذب فسفر به وسیله گیاه دارد. با استفاده از این روابط شاید بتوان توضیح داد که چرا با گذشت زمان پس از افزودن کود فسفر به خاک، مقدار شکل های محلول تر فسفر در خاک کاهش می یابد و به شکل های با حلالیت کمتر تبدیل می شود، همچنین بین شکل های فسفر یک رابطه دینامیکی وجود دارد که باعث می گردد فسفر به شکل های کم محلول آزاد شود و به این ترتیب غلظت فسفر محلول خاک مجدداً افزایش می یابد. به عبارت دیگر غلظت فسفر محلول خاک به وسیله شکل های با حلالیت کمتر بافر می شود، چنانچه این پدیده نبود میزان فسفر موجود در محلول خاک به هیچ وجه نیاز گیاه را تأمین نمی کرد (Najafi & Towfigi, 2006). صمدی و گیلک (Samadi & Gilkes, 1999) بین

References

- Abdullahi M. 2010. Distribution of phosphorus minerals in calcareous soils under sugar beet cultivation and neighboring non-agricultural land in West Azarbaijan province. Master thesis. Urmia University. (In Persian)
- Adhami A., Chafteh M., Ronaghi A., and Karimian N. 2005. Investigating different forms of phosphorus in several selected lime soils of the province. Proceedings of the 9th Iranian Soil Science Congress. (In Persian)

- Al-Khateeb I.K., Raihan M. J., and Asker S.R. 1986. Phase equilibria and kinetics of orthophosphate in some Iraqi soils. *Soil science*, 141(1): 31-37.
- Bertr I., Holloway R.E., Armstrong R.D., and McLaughlin M.J. 2003. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. *Soil Research*, 41 (1): 61-76.
- Besharati H., and Saleh Rastin N. 1999. Investigation of the effect of inoculation of *Thiobacillus* with sodium on increasing P absorption capacity. *Journal of Soil and Water Science*, 13: 23-29.
- Chang S.C., and Juo S.R. 1963. Available phosphorus in relation to forms of dissection of root formation in maize (*Zea mays* L.) reveals root-type specific developmental programs. *Annals of Botany*, 93: 359-368.
- Chen Y., Rekha P., Arun A., Shen F., Lai W.A., and Young C. 2006. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34: 33-41.
- Chen Z., Ma S., and Liu L.L. 2008. Studies on phosphorus solubilizing activity of a strain of phosphobacteria isolated from chestnut type soil in China. *Bioresource Technology*, 99: 6702-6707.
- Dahiya, S.S., and M. Singh. 1976. Effect of salinity, alkalinity and iron application on the availability of iron, manganese, phosphorus and sodium in pea (*Pisum sativum* L.) crop. *Plant and Soil*, 44: 697-702.
- Garcia J.R.O. 1991. Isolation and characterization of acidithiobacillus thiooxidans and acidithiobacillus ferrooxidans from mineral mines. *Revista demicrobiologia*, 20: 1-6.
- Grotz N., and Guerinot, M.L. 2002. Limiting nutrients: an old problem with new solutions? Current opinion in plant biology, 5(2): 158-163.
- Jiang B., and Gu Y. 1989. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer Research*, 20(3): 159-165.
- Kuchaki A., Soltani A., and Azizi M. 1997. Plant Ecophysiology. Mashhad University Press, 278p.
- Lindsay W. L. 1982. Chemical Equilibria in Soils. John Wiley and Sons. Inc., New York.
- Malakouti M. J., Moshiri, F., and Ghaibi, M. N. 2005. Optimum Levels of Nutrients in Soil and Some Agronomic and Horticultural Crops. Soil and Water Research Institute. Technical Bulletin, No.405. (In Persian)
- Mehra P., Pandey B.K., and Giri J. 2015. Genome-wide DNA polymorphisms in low phosphate tolerant and sensitive rice genotypes. *Scientific Reports*, 5: 1-14.
- Mirzapour M.H., Khavazi K., and Naeini M.R. 2017. Effect of Sulfur, *Thiobacillus* and Phosphorous application on Canola Yield and Some Soil Chemical Characteristics. *Journal of Soil Biology*, 5(2): 109- 122. (In Persian)
- Modaihsh A.S., Al-Mustafa W.A., and Metwally A.I. 1989. Effect of elemental sulphur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. *Plant and soil*, 116(1): 95-101.
- Mostashari M., and Ardalane M.M. 2009. Distribution of phosphorus mineral formations and its relationship with soil properties in some soils of Kerman province. *Journal of Soil Science, Soil and Water Sciences*, 23: 22 – 11. (In Persian)
- Najafi N., and Towfighi H. 2008. Changes in pH, EC and concentration of phosphorus in soil solution during submergence and rice growth period in some paddy soils of north of Iran. International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology. Turkey, pp. 555-567.
- Najafi N., and Towfigi H. 2011. The effect of moisture regime and phosphorus fertilizer on absorbable phosphorus and mineral phosphorus forms in some soils in the north of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research (Iranian Agricultural Sciences)*, 42 (2): 257-269. (In Persian)
- 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 Persian)
- 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. Circ. 939. U.S. Gov. Print office, Washington, DC.
- Pratt P.F. 1961. Phosphorus and Aluminum Interactions in the Acidification of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 25(6): 467-469.

- Rayment G.E., and Higginson F.R. 1992. Oxalat – extractable Fe and Al. In “Australian Laboratory Hand book of soil and water chemical methods”. *In kata press*, 22: 137-151.
- Rongzhong Y., Wright A.L., McCray J.M., Reddy K.R., and Young L. 2010. Sulfur-induced changes in phosphorus distribution in Everglades Agricultural Area soils. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 87(1):127-135.
- Rosa M.C., Muchovej J.J., and Alvarez J.V.H. 1989. Temporal relations of phosphorus fractions in an oxisol amended with rock phosphate and *Thiobacillus thiooxidans*. *Soil Science Society of America Journal*, 53:1096-1100.
- Ryan J., and Stroehlein J.L. 1979. Sulfuric Acid treatment of calcareous soils: effects on phosphorus solubility, inorganic phosphorus forms and plant growth. *Soil Science Society of America Journal*, 43(4): 731-735.
- Salimpour S., Khavazi K., Nadian H.E., and Besharati H. 2010. Effect of rock phosphate along with sulfur and microorganisms on yield chemical composition of canola. *Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil and Water Science)*, 24: 9-19. (In Persian)
- 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 Journal*, 63(4): 809-815.
- Samadi A. 2003. A study on distribution of forms of phosphorus in calcareous soils of Western Australia. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5: 39-49.
- Samavati M., and Hosseinpur A. 2011. Phosphorus fractions and availability in some calcareous soils in Hamedan province. *Journal of Water and Soil Science*, 15: 55. 127-138. (In Persian)
- Samrit P., Insitute R., Mai C., Chanchareonsook J., Suwannarat C., and Tungkananuruk N. 2002. Changes of some chemical properties, inorganic phosphate fractions and available P in some paddy soils in Thail. In: 17 World congress of soil science, Bangkok (Thail), pp. 14-21.
- Sánchez-Arias V., Fernández F.J., Villaseñor J., and Rodríguez L. 2008. Enhancing the co-composting of olive mill wastes and sewage sludge by the addition of an industrial waste. *Bioresource Technology*, 99(14): 6346-6353.
- Susuki A., Lawton K., and Doll E.C. 1963. Phosphorus uptake and soil tests as related to forms of phosphorus in some michigan soils. *Soil Science Society of America Journal*, 27(4): 401-403.
- Tiessen H., Stewart J.W.B., and Cole C.V. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4): 853-858.
- Vance C.P., Uhde-Stone C., and Allan D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securig a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157:423-447.
- Verma L.N. 1993. Biofertiliser in agriculture. In: Thampan P.K. (Ed.), *Organics in soil health and crop production*. Peekay Tree Crops Development Foundation, Cochin, India, pp. 152-183.
- Walky A., and Black I.A. 1934. An examination of degtgareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. Experimental. *Soil Science Society American Journal*, 79: 459-465.
- Younessi-Hamzekhanlu M., Pashaei M., Khanmirzaei A., Shakourifar F., Esmaeilpour M., and Sabzi Nojedeh M. 2017. Thiobacillus, sulfur, and organic fertilizer effects on phosphorus absorption by *Zea mays*. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 1(2): 249-263.
- Zhang D., Song H., Cheng H., Hao D., Wang H., Kan G., Jin H., and Yu D. 2014. The acid phosphatase-encoding gene GmACP1 contributes to soybean tolerance to low-phosphorus stress. *PLOS Genetics*, 10(1): e1004061. doi: 10.1371/journal.pgen.1004061.
- Zhang T.Q., MacKenzie A.F., Liang B.C., and Drury C.F. 2004. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2): 519-528.

Effect of Different Sources of Sulfur on Distribution of Inorganic Phosphorus forms in A Calcareous Soil

Shahriar Pashapour¹, Ebrahim Sepehr^{2*}, Neda Moradi³

(Received: August 2019 Accepted: April 2020)

Abstract

In order to study the effect of different sources of sulfur on inorganic phosphorus fractions in a calcareous soil, an incubation experiment was conducted in a completely randomized design with five treatments in three replications. Treatments were including: control (without sulfur compounds), Al₂(SO₄)₃, FeSO₄, S + Ti (sulfur + thiobacillus) and H₂SO₄ at 2% (w/w). Amendments were incubated at 25±1 °C for a period of 12 days. Then, available-P (Olsen-P) and different forms of inorganic phosphorus were determined by sequential extraction method. The application of sulfur compounds caused significant changes ($p \leq 0.05$) in the amount of P-Olsen and inorganic forms of phosphorus (Ca₂-P, Ca₈-P, Al-P, Fe-P, Ca₁₀-P) compared to control. The amount of available phosphorus in H₂SO₄, Al₂(SO₄)₃ and S + Ti compared to control increased 240, 70 and 50%, respectively. Also, these amendments caused to insoluble forms of phosphorus, Ca₈-P and Ca₁₀-P, significantly reduced and in more soluble forms of Ca₂-P and available-P could be used. In the amendments, FeSO₄ caused 30% decrease in available-P and 4% increase in apatite compared to control. The results of correlation studies showed that available phosphorus (Olsen extracted phosphorus) had a significant correlation with Ca₂-P, Ca₈-P, Ca₁₀-P and residual-P; the results of this study showed the effect of sulfur compounds on the distribution of phosphorus in different forms, so it is expected that Sulfur sources affect the usability and phosphorus chemistry.

Keywords: Available-P., Calcareous Soils, Inorganic phosphorus fractions, Sulfur, *Thiobacillus*

Pashapour Sh., Sepehr E. and Moradi N. 2020. Effect of different sources of sulfur on distribution of inorganic phosphorus forms in a calcareous soil. *Applied Soil Research*. 8(3): 55-67.

1. MSc Student, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia, Iran

2. Associate Prof, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia, Iran

3. Assistant Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* Corresponding Author, Email: e.sepehr@urmia.ac.ir