نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد نهم، شماره دوم، ۱۳۹۸
۴۵-۶۳
http://ejsms.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejsms.2019.15468.1832

اثر کود شیمیایی فسفر و لجن فاضلاب بر قابلیت استفاده و شکل‌های فسفر و شاخص‌های رشد ذرت در یک خاک آهکی

فاطمه شهبازی[۱]، علیرضا حسین‌پور[۲] و *حمیدرضا متقیان[۳]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد، [۲]استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد، [۳]استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳

چکیده

سابقه و هدف: کمبود فسفر قابل‌استفاده یکی از مشکلات عمده در خاک‌های ایران است. برای افزایش فسفر قابل‌جذب از کودهای شیمیایی استفاده می‌شود؛ در حالی‌که کود فسفر مصرف شده در خاک با گذشت زمان به شکل‌هایی با قابلیت استفاده کم تبدیل می‌شود. برای افزایش کارایی کودهای فسفری می‌توان از مواد آلی استفاده کرد. لجن فاضلاب حاوی مواد آلی و عناصر غذایی زیادی بوده و برای بهبود حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی و ارتقای عملکرد گیاهان به‌کار می‌رود. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر برهمکنش کود شیمیایی فسفر و لجن فاضلاب بر قابلیت استفاده و شکل‌های معدنی فسفر و شاخص‌های رشد ذرت (*Zea Mays* L.) در یک خاک آهکی بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل فسفر (۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر از منبع KH_2PO_4) لجن فاضلاب (۰ و ۱ درصد وزنی/ وزنی) بود. خاک‌های تیمارشده به‌مدت یک ماه در شرایط گلخانه ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه خوابانده شدند. ذرت (رقم سینگل‌کراس ۷۰۴) در گلدان‌های ۳ کیلوگرمی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد کشت شد. پس از دو ماه کشت، بخش هوایی برداشت و شاخص‌های رشد ذرت (غلظت فسفر، وزن ماده خشک و جذب فسفر در گیاه ذرت) تعیین شدند. همچنین، پس از کشت از خاک گلدان‌ها نمونه‌برداری شد و در آن‌ها شکل‌های فسفر (فسفر محلول و تبادلی، فسفر متصل به آهن و آلومینیم، فسفر متصل به کلسیم، فسفر باقی‌مانده و فسفر آلی) و فسفر قابل‌جذب (اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار) اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که برهمکنش کود شیمیایی فسفره و لجن فاضلاب بر فسفر عصاره‌گیری شده با روش اولسن معنی‌دار نبود ($P>0/05$)؛ در حالی‌که بر فسفر عصاره‌گیری شده با کلرید کلسیم معنی‌دار بود ($P<0/05$). نتایج نشان داد که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر، فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن و فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش کلرید کلسیم به‌ترتیب ۲۱/۴ و ۶۰ درصد افزایش یافت، در حالی‌که با کاربرد یک درصد لجن فاضلاب فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم به‌ترتیب ۸۳/۲ و ۲۰۰ درصد افزایش یافت. اثر لجن فاضلاب بر

* مسئول مکاتبه: motaghian.h@yahoo.com

همه شکل‌های فسفر (به‌غیر از فسفر باقی‌مانده) و اثر کود شیمیایی فسفره بر شکل‌های فسفر معنی‌دار (P<۰/۰۱) بود. برهمکنش بین کود شیمیایی فسفره و لجن فاضلاب فقط بر فسفر متصل به کلسیم معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). اثر لجن فاضلاب بر شکل‌های فسفر بیش از اثر کود شیمیایی فسفره و برهمکنش آن‌ها بود. نتایج نشان داد که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود فسفر نسبت تیمار بدون کود فسفر، غلظت فسفر در ذرت و ماده خشک ذرت به‌ترتیب ۸/۲ و ۲۵/۹ درصد افزایش یافت (P<۰/۰۱). با کاربرد لجن فاضلاب غلظت فسفر در ذرت و ماده خشک گیاه به‌ترتیب ٤/۹ و ۱۹٤ درصد نسبت به سطح صفر لجن فاضلاب افزایش یافت. برهمکنش کود شیمیایی فسفره و لجن فاضلاب بر ماده خشک ذرت معنی‌دار (P<۰/۰۵) بود. ماده خشک گیاه در تیمار یک درصد لجن فاضلاب همراه با کود فسفره نسبت به تیمار یک درصد لجن فاضلاب بدون کاربرد کود فسفره ۳۲/۵ درصد و همچنین نسبت به تیمار کود فسفره بدون کاربرد لجن فاضلاب ۱۷۰ درصد افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که اثر کاربرد کود شیمیایی فسفره بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن به کاربرد لجن فاضلاب در خاک بستگی نداشت. فسفر قابل‌استفاده با کاربرد لجن فاضلاب به‌میزان چشم‌گیری نسبت به کود شیمیایی افزایش یافت که می‌تواند به‌دلیل اثرات متفاوت تیمارها بر شکل‌های فسفر خاک باشد. علاوه بر این اثر کود شیمیایی فسفره بر جذب فسفر به کاربرد لجن فاضلاب بستگی داشت.

واژه‌های کلیدی: جذب فسفر، جزءبندی، کود آلی

مقدمه

فسفر یازدهمین عنصر فراوان پوسته زمین است که در DNA، RNA، لیپیدها، آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و حامل‌های انرژی نقش دارد (٤٧). فسفر پس از نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی مورد نیاز گیاهان است. اغلب خاک‌های آهکی pH بالا دارند که بسیاری از گیاهان در این خاک‌ها با کمبود فسفر مواجه هستند (۲۵). کمبود فسفر یکی از مشکلات عمده در خاک‌های ایران است (۱۰). علاوه بر این، کارایی کودهای شیمیایی فسفر در خاک‌های آهکی کم است (۲٦)

لجن فاضلاب به‌عنوان محصول تصفیه فاضلاب حاوی مواد آلی و عناصر غذایی زیادی از جمله فسفر بوده و برای بهبود حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی و افزایش عملکرد گیاهان به‌کار می‌رود (۷، ۹، ۱۰، ۱٤، ۲۳، ۳۰ و ۳٤). مصرف لجن فاضلاب به‌دلیل افزایش مواد آلی خاک و تولید اسیدهای آلی هومیک و کربنیک اثر مثبتی در خاک‌های کشاورزی دارد، مواد هومیکی علاوه بر کاهش pH خاک‌های آهکی، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را نیز افزایش می‌دهد (۲۰). فریستاک و سوجا (۲۰۱۵) گزارش کردند که بر اثر استفاده از لجن فاضلاب مقدار فسفر کل و فسفر قابل‌جذب (با روش اولسن) افزایش یافت (۱۰). سعادت و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که افزایش لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار pH خاک و افزایش معنی‌دار ماده آلی خاک و همچنین مقدار فسفر جذب‌شده توسط ذرت نسبت به تیمار شاهد شد (۳۷). نجفی و مردمی (۲۰۱۲) به بررسی اثر منبع و مقدار کود آلی بر ویژگی‌های رشد آفتابگردان پرداختند. نتایج آنان نشان داد که با کاربرد لجن فاضلاب (۱۳ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم) وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی افزایش یافت (۳۰). فتح‌العلومی

و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش عملکرد دانه و برخی شاخص‌های گندم از جمله ماده خشک اندام هوایی می‌گردد (۹). همچنین کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند موجب افزایش شکل‌های فسفر به‌خصوص شکل قابل‌جذب شود (۲۳). حجازی‌مهریزی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که با افزایش مقدار و دفعات کوددهی لجن فاضلاب مقدار دی‌کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات، آپاتیت، فسفات آلومینیم، فسفات آهن و فسفر قابل‌جذب خاک افزایش یافت؛ اما مقدار فسفر محبوس‌شده کاهش یافت. همچنین آثار باقی‌مانده لجن در یک‌بار کوددهی سبب افزایش شکل‌های مختلف فسفر در مقایسه با تیمار شاهد شد. نتایج آنان نشان داد که به‌جز فسفر محبوس‌شده، بین شکل‌های معدنی فسفر و فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن، عملکرد گندم و جذب فسفر همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد لجن فاضلاب در خاک سبب افزایش شکل‌های فسفر معدنی و قابلیت دسترسی آن شد (۱۵). نجفی و توفیقی (۲۰۱٤) گزارش کردند که فسفر قابل‌استفاده (به روش اولسن) در خاک‌های آهکی با اجزاء فسفر (به‌استثنای آپاتیت) همبستگی معنی‌داری داشت و بیش‌ترین همبستگی را با جزء دی‌کلسیم فسفات داشت (۲۸). در برخی مطالعات به اثرات مثبت کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی بر فسفر خاک اشاره شده است (۱٤، ۳۳، ۳٤ و ٤۰). رنجبر و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر کاربرد درازمدت کمپوست زباله شهری و کود شیمیایی بر غلظت عناصر پرمصرف در خاک و برنج پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که کاربرد ۷ ساله کمپوست زباله شهری موجب افزایش معنی‌دار ($P<۰/۰۱$) غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در خاک و دانه برنج در مقایسه با تیمار شاهد شد. کم‌ترین غلظت عناصر پرمصرف در خاک و گیاه برنج مربوط به تیمار شاهد و تیمار کود شیمیایی بود. آنان نتیجه‌گیری کردند که می‌توان از تلفیق کمپوست زباله شهری به همراه کود شیمیایی برای افزایش غلظت برخی عناصر پرمصرف در خاک و برنج استفاده کرد (۳٤). سیدیکو و رابینسون (۲۰۰۳) گزارش کردند که کاهش جذب و انرژی پیوند فسفر در خاک‌های تیمارشده با کود گاوی و پتاسیم دی هیدروژن فسفات بیش‌تر از خاک تیمارشده با بستر و کود مرغی و لجن فاضلاب بود. همچنین تأثیر کود گاوی و پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات بر قابلیت استفاده فسفر بیش‌تر از دیگر منابع فسفر بود (٤۰). حجازی‌مهریزی و همکاران (۲۰۱٦) گزارش کردند که در کود مرغی تا ۱٤٤۰ ساعت فسفر آزادشده روند افزایشی و سپس کاهشی داشت؛ در حالی‌که فسفر آزاد شده در هر مقدار کود شیمیایی، روند کاهشی داشت و بعد از ۲۱٦۰ ساعت از انکوباسیون به‌ترتیب حدود ۸۰ درصد فسفر افزوده شده به خاک، به‌صورت غیرقابل‌دسترس تبدیل شد. آنان با توجه به کاهش فسفر آزادشده در تیمار کود آلی بعد از ۱٤٤۰ ساعت، پیشنهاد کردند که کود شیمیایی و کود آلی به‌صورت هم‌زمان به‌کار برده شوند (۱٤). پو و همکاران (۲۰۱٤) گزارش کردند که ترکیب کود آلی و کود شیمیایی فسفر به‌عنوان یک روش مؤثر در افزایش کربن آلی خاک و درصد فسفر قابل‌جذب است (۳۳).

بنابراین، با توجه به تبدیل فسفر اضافه‌شده به خاک به‌صورت کودهای شیمیایی به شکل‌های غیرقابل‌جذب، کودهای آلی می‌توانند به افزایش قابلیت استفاده فسفر و کارایی کودهای شیمیایی فسفر در خاک منجر شود. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر برهمکنش کود شیمیایی فسفر و لجن فاضلاب بر قابلیت استفاده و جزءبندی فسفر و شاخص‌های رشد گیاه ذرت در یک خاک آهکی بود.

مواد و روش‌ها

نمونه خاکی از لایه سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) خاک‌های آهکی دانشگاه شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری برداشت شد. پس از هوا خشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، ویژگی‌های خاک از جمله بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۱)، pH خاک در سوسپانسیون دو به یک آب به خاک (٤٦)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره دو به یک آب به خاک (۳۵)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون برگشتی (٤٤)، ماده آلی به روش اکسایش تر (۳۱) و گنجایش تبادل کاتیونی با استات سدیم در pH برابر با ۷ (٤٥) اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار فسفر قابل‌جذب با روش اولسن عصاره‌گیری (۳۲) و با روش رنگ‌سنجی (۲۷) تعیین شد.

نمونه لجن فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد تهیه و پس از هوا خشک کردن از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شد. لجن فاضلاب دارای pH برابر با ۷/۳، EC برابر با ۲/٦ دسی‌زیمنس بر متر، کربن آلی و نیتروژن به‌ترتیب ۱۷/۰۲ و ۱/۲٦ درصد و فسفر قابل‌جذب و کل به‌ترتیب ۱۵۱۷ و ۸۲٤۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. تیمارهای مورد استفاده در این آزمایش شامل سطوح ۰ و ۱ درصد (وزنی/ وزنی) لجن فاضلاب و سطوح ۰ و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فسفر از منبع KH_2PO_4 بود. این تیمارها با ۳ کیلوگرم خاک در هر گلدان مخلوط و به‌مدت یک ماه در رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه در شرایط گلخانه خوابانده شدند.

پس از یک ماه خوابانیدن، ٤ عدد بذر ذرت (رقم سینگل‌کراس ۷۰٤) در هر گلدان کاشته و چند روز پس از جوانه‌زنی به تعداد ۳ عدد تنک شدند. مقدار رطوبتی که با رسیدن مقدار آب گلدان‌ها به آن؛ آبیاری انجام شد با در نظر گرفتن ۳۰ درصد تخلیه مجاز (یا نسبت آب سهل‌الوصول) و بر اساس درصد وزنی رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و ظرفیت زراعی تعیین گردید (۸). سپس، از طریق توزین گلدان‌ها (دو روز یکبار) آب مورد نیاز گلدان‌ها افزوده و سعی شد از تغییرات رطوبت در طول دوره رشد جلوگیری شود. دو ماه پس از جوانه‌زدن، گیاهان را از محل طوقه (نزدیک سطح خاک) قطع و پس از شستشو، در آون در دمای ٦۵ سلسیوس به‌مدت ٤۸ ساعت خشک شدند. نمونه‌های گیاهی پس از توزین به‌وسیله آسیاب برقی پودر گردید. به‌منظور تجزیه گیاه پس از خاکسترسازی خشک با اسید کلریدریک عصاره‌گیری (٦) برای تعیین غلظت فسفر عصاره‌ها از روش رنگ‌سنجی (۲۷) استفاده شد. شاخص‌های رشد گیاه شامل غلظت فسفر، ماده خشک اندام هوایی و جذب فسفر (حاصل‌ضرب ماده خشک در غلظت فسفر) تعیین شد.

پس از کشت نمونه خاکی از گلدان‌ها برداشته شد و فسفر قابل‌جذب به روش‌های اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و همچنین شکل‌های فسفر به روش تغییریافته هدلی (۱۳ و ۱۷) (جدول ۱) تعیین گردید. فسفر عصاره‌ها به روش رنگ‌سنجی (۲۷) اندازه‌گیری شد. فسفر آلی نیز به روش سوزاندن کو (۲۱) و فسفر کل نیز به روش سامرز و تلسون (٤۱) عصاره‌گیری شدند و غلظت فسفر با استفاده از روش رنگ‌سنجی (۲۷) تعیین گردید.

همه تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار Statistica انجام شد. مقایسه میانگین‌های‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. همچنین همبستگی بین فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر نیز تعیین شد.

جدول ۱- تعیین شکل‌های معدنی فسفر با روش تغییریافته هدلی (۱۳ و ۱۷).

Table 1. Determination of inorganic P fractions by modified Hedley method (13 and 17).

شکل Fraction	عصاره‌گیر Extractant	زمان time
فسفر محلول و تبادلی soluble and exchangeable P	۲۰ میلی‌لیتر محلول پتاسیم کلرید ۲ مولار 20 ml of 2M KCl	۲ ساعت تکان دادن Shake for 2 h
فسفر متصل به آهن و آلومینیم Fe - Al bound P	۲۰ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۰/۱ مولار 20 ml of 0.1M NaOH	۱۷ ساعت با ۱۶۰ دور در دقیقه تکان دادن Shaking of 160 r min^{-1} for 17 h
فسفر متصل به کلسیم Ca bound P	۲۰ میلی‌لیتر محلول اسید کلریدریک ۰/۵ مولار 20 ml of 0.5 M HCl	۲۴ ساعت با ۱۶۰ دور در دقیقه تکان دادن Shaking of 160 r min^{-1} for 24 h
فسفر باقی‌مانده residual P	از کسر مجموع اشکال فسفر از فسفر کل Total P – sum of fractions	-

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انتخاب‌شده در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به توزیع اندازه ذرات، خاک دارای بافت لوم‌رسی بود. خاک مورد مطالعه دارای pH قلیایی (pH=۸/۰) و غیرشور بود. گنجایش تبادل کاتیونی آن ۱۵/۸ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم، مقدار کربن آلی و کربنات کلسیم معادل به‌ترتیب ۰/۴۵ و ۳۴ درصد بود. فسفر قابل‌استفاده (به روش اولسن) و فسفر کل خاک به‌ترتیب ۲۰ و ۳۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

اثر کود فسفر و لجن فاضلاب بر فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر: نتایج تجزیه واریانس اثر کود شیمیایی فسفره، لجن فاضلاب و برهمکنش آن‌ها بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و همچنین بر شکل‌های فسفر در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که اثر لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار معنی‌دار بود ($P<0/01$). اما برهمکنش اثر لجن فاضلاب و کود شیمیایی فسفره فقط بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار معنی‌دار بود ($P<0/05$). معنی‌دار بودن برهمکنش اثر لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار نشان می‌دهد که تغییرات فسفر قابل‌جذب بر اثر کود شیمیایی به مقدار لجن فاضلاب اضافه شده بستگی داشت. بر اساس نتایج جدول ۳، اثر لجن فاضلاب بر همه شکل‌های فسفر به‌غیر از فسفر باقی‌مانده و اثر کود شیمیایی بر همه شکل‌های فسفر معنی‌دار ($P<0/01$) بود. برهمکنش بین کود شیمیایی و لجن فاضلاب فقط بر فسفر متصل به کلسیم معنی‌دار ($P<0/05$) بود.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورد مطالعه.

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

مقدار value	ویژگی property	مقدار value	ویژگی Property
11.2	C/N	8.0	pH (1:2)
360	پتاسیم قابل‌استفاده available K (mg kg^{-1})	0.18	EC (1:2) (dS/m)
20	فسفر قابل‌استفاده available P (mg kg^{-1})	15.8	CEC (cmolc kg^{-1})
329	فسفر کل total P (mg kg^{-1})	40	شن Sand%
0.37	روی قابل استفاده available Zn (mg kg^{-1})	28	سیلت Silt%
0.27	مس قابل استفاده Available Cu (mg kg^{-1})	32	رس Clay%
3.2	آهن قابل استفاده Available Fe (mg kg^{-1})	34	CCE%
360	پتاسیم قابل‌استفاده available K (mg kg^{-1})	0.45	کربن آلی OC%
11.2	C/N	0.04	N%

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر کود شیمیایی فسفر، لجن فاضلاب و اثر متقابل آن‌ها بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و شکل‌های فسفر در خاک‌های مورد مطالعه.

Table 3. Results of analysis of variance of the effect of P fertilizer, sewage sludge and their interaction on P extracted by Olsen (P-Olsen) and $CaCl_2$ 0.01 M (P-$CaCl_2$) and P-fractions in the studied soils.

		میانگین مربعات (Mean square)						
منابع تغییر S. O. V	درجه آزادی df	P-Olsen	P-$CaCl_2$	محلول و تبادلی Soluble and exchangeable P	متصل به آهن و آلومینیم Fe - Al bound P	متصل به کلسیم Ca bound P	باقی‌مانده Residual P	آلی Organic P
کود شیمیایی فسفره P Fertilizer	1	211.8**	0.16**	58.8**	46.3**	564**	2338**	2212**
لجن فاضلاب sewage sludge	1	1954**	0.79**	307.8**	1331**	1664**	338.5^{ns}	249**
کود شیمیایی فسفره × لجن فاضلاب P Fertilizer × sewage sludge	1	0.75^{ns}	0.05*	2.3^{ns}	3.55^{ns}	510.9*	527^{ns}	4.17^{ns}
خطا error	8	15.73	0.005	0.46	1.3	85.5	101	30.29
ضریب تغییرات CV (%)		9.1	13.4	4.9	2.8	5.4	6.6	7.3

*، ** و ^{ns} به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌دار.

^{ns}, * and ** non-significant, significant at P<0.05 and P<0.01, respectively.

میانگین فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم در جدول ٤ آورده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که کاربرد کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار فسفر قابل‌جذب شد. در بررسی اثرات اصلی، کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر نسبت به سطح صفر کود فسفر، فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن ۲۱/٤ درصد و با کاربرد یک درصد لجن فاضلاب نسبت به به سطح صفر لجن فاضلاب فسفر عصاره‌گیری‌شده با این روش ۸۳/۲ درصد افزایش یافت. همچنین نتایج جدول ٤ نشان می‌دهد که اثر توأم کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری ($P<۰/۰۵$) فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار را افزایش داد.

کاربرد یک درصد لجن فاضلاب در تیمار بدون کاربرد کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات فسفر باعث افزایش فسفر عصاره‌گیری‌شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار (۱٦۸ درصد) شد. در حالی‌که اضافه کردن یک درصد لجن فاضلاب در تیمار دارای ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر، فسفر عصاره‌گیری‌شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار را ۲۰۹ درصد افزایش داد. همچنین با اضافه کردن ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود فسفر در تیمار یک درصد لجن فاضلاب، فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار ٦۲/۷ درصد افزایش نشان داد. افزایش فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن پس از کشت ذرت در خاک شاهد نسبت به قبل از کشت (جدول‌های ۲ و ٤) می‌تواند به‌دلیل اثرات ناشی از کشت ذرت و رشد گیاه بر خاک مانند آزاد کردن آمینواسیدها و اسیدهای آلی (ایجاد کمپلکس با کاتیون پیونددهنده با فسفر) در خاک و اثر آن‌ها بر جذب و آزادسازی عناصر درون خاک، تغییر pH و افزایش فعالیت فسفاتاز و مایکوریزا باشد که توانستند با تغییر فسفر غیرقابل استفاده (یا کم‌تر قابل استفاده) به فسفر قابل‌استفاده (هنسینگر؛ ۲۰۰۱) موجب افزایش فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن شوند. علاوه بر این اثرات دوره یک‌ماهه انکوباسیون را نیز می‌توان در نظر گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب و کود شیمیایی منجر به افزایش فسفر قابل‌جذب می‌شود، اما درصد افزایش فسفر قابل‌جذب با تیمار لجن فاضلاب نسبت به کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات به‌صورت چشم‌گیری بیش‌تر بود. تأثیر مثبت کودهای آلی بر فراهمی فسفر به‌وسیله سایر پژوهشگران (۳، ۲۲ و ۳٦) نیز گزارش شده است. نتایج پژوهش لاتار و همکاران (۲۰۱٤) نشان داد که کاربرد ٤۰ تن در هکتار لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار فسفر قابل‌استفاده خاک‌های زیر کشت گندم شد (۲۲).

جدول ٤- مقایسه میانگین‌های فسفر عصاره‌گیری با روش‌های اولسن (فسفر- اولسن) و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار (فسفر- کلرید کلسیم) در خاک‌های مورد مطالعه.

Table 4. Mean comparison of P extracted by Olsen (P-Olsen) and 0.01 M $CaCl_2$ (P-$CaCl_2$) in the studied soils.

فسفر P (mg kg^{-1})	فسفر- اولسن P-Olsen (mg kg^{-1})			فسفر- کلرید کلسیم P-$CaCl_2$ (mg kg^{-1})		
	لجن فاضلاب (٪) Sewage sludge		میانگین Average	لجن فاضلاب (٪) Sewage sludge		میانگین Average
	0	1		0	1	
0	26.74	51.77	39.25B	0.22^{c}	0.59^{b}	0.40B
50	34.65	60.67	47.66A	0.31^{c}	0.96^{a}	0.64A
میانگین average	30.69B	56.22A		0.26B	0.78A	

میانگین‌های با حروف مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

The means with the same letter are not significantly difference based on the Duncan's Multiple Range test at 5% level of significance.

سورمی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که بر اثر استفاده از کود مرغی میزان فسفر قابل‌جذب افزایش یافت. آنان بیان کردند که آزادسازی فسفر از کود آلی به‌دلیل فعالیت میکروبی و آنزیم‌های موجود در کود باعث آزادشدن فسفر غیرقابل‌جذب می‌شود و این امر موجب افزایش فسفر قابل‌جذب خاک شد (٤٣). فسفر قابل‌جذب در خاک به ظرفیت جذب فسفر بسیار وابسته است و توسط عوامل دیگری مانند مقدار بی‌کربنات، pH، ماده آلی، رس و اکسیدهای آهن و آلومینیم در خاک کنترل می‌شود (۱۲). کاربرد طولانی‌مدت مواد آلی باعث می‌شود که فسفر در مکان‌های با پیوندهای کم‌انرژی‌تر نگهداری شده و قابلیت استفاده آن افزایش یابد (۹). جذب آنیون‌های آلی باعث ایجاد بار منفی در سطح خاک می‌شود و در نتیجه موجب کاهش جذب فسفر یا افزایش فسفر قابل‌جذب می‌شود (۱). بنابراین کود آلی علاوه بر دارا بودن فسفر و آزادشدن آن در طول تجزیه، به‌صورت غیرمستقیم با تأثیر بر جذب فسفر به شکل غیرقابل جذب، بر فسفر قابل‌جذب خاک مؤثر است (۱۲). دلیل افزایش فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن پس از کشت ذرت می‌تواند اثرات ناشی از کشت گیاه و رشد ریشه مانند آزادکردن آمینواسیدها و اسیدهای آلی (ایجاد کمپلکس با کاتیون پیونددهنده با فسفر) در خاک و اثر آن‌ها بر جذب و آزادسازی عناصر درون خاک، تغییر pH و افزایش فعالیت فسفاتاز و مایکوریزا می‌توانند بر تغییر فسفر معدنی از فسفر غیرقابل‌استفاده (یا کم‌تر قابل‌استفاده) به فسفر قابل‌استفاده باشد (١٦). علاوه بر این شرایط یک ماه انکوباسیون و را نیز می‌توان در نظر گرفت.

میانگین شکل‌های فسفر در تیمارهای مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. فسفر محلول مهم‌ترین تأمین‌کننده فسفر گیاه است. نتایج نشان داد که کاربرد کود شیمیایی و لجن فاضلاب باعث افزایش فسفر عصاره‌گیری‌شده با پتاسیم کلرید (محلول و قابل‌تبادل) شد. در بررسی اثرات اصلی کودهای به‌کار برده شده، فسفر محلول و تبادلی بر اثر کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود فسفر نسبت به سطح صفر کود فسفر، ۳۸/۵ درصد و با کاربرد یک درصد لجن فاضلاب نسبت به تیمارهای سطح صفر لجن فاضلاب ۱۱۷ درصد افزایش ($P<۰/۰۵$) یافت که می‌تواند به‌دلیل وجود فسفر محلول در کود لجن فاضلاب و آزادشدن فسفر آن و تبدیل فسفر کود شیمیایی به شکل‌های دیگر در دوره کشت ذرت باشد.

با توجه به نتایج جدول ۵ کاربرد کود شیمیایی و لجن فاضلاب باعث افزایش فسفر متصل به آهن و آلومینیم (فسفر عصاره‌گیری‌شده با NaOH) شد. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود شیمیایی فسفر، فسفر متصل به آهن و آلومینیم ۱۰/۰۹ درصد و با کاربرد لجن فاضلاب ٦۰/٤۰ درصد افزایش یافت.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های شکل‌های فسفر در خاک‌های مورد مطالعه.

Table 5. Mean comparison of P fractions in the studied soils.

فسفر P ($mg\ kg^{-1}$)	فسفر محلول و تبادلی Soluble and exchangeable P ($mg\ kg^{-1}$)			فسفر متصل به آهن و آلومینیم Fe - Al bound P ($mg\ kg^{-1}$)			فسفر متصل به کلسیم Ca bound P ($mg\ kg^{-1}$)			فسفر باقی‌مانده Residual-P ($mg\ kg^{-1}$)			فسفر آلی Organic P ($mg\ kg^{-1}$)		
	میانگین Average	لجن فاضلاب Sewage sludg (%)		میانگین Average	لجن فاضلاب Sewage sludg (%)		میانگین Average	لجن فاضلاب Sewage sludg (%)		میانگین Average	لجن فاضلاب Sewage sludg (%)		میانگین Average	لجن فاضلاب Sewage sludg (%)	
		1	0		1	0		1	0		1	0		1	0
0	11.4B	17.0	5.9	38.9B	48.9	28.9	161B	166^{b}	156^{b}	137B	138	137	60.9B	74.8	47.1
50	15.9A	20.5	11.3	42.8A	53.9	31.7	175A	193^{a}	157^{b}	165A	152	178	88.1A	103	73.1
میانگین average		18.7A	8.6B		51.4A	30.3B		180A	156B		145A	157B		88.9A	60.1B

میانگین‌های با حروف مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

The means with the same letter are not significantly difference based on the Duncan's Multiple Range test at 5% level of significance.

برهمکنش بین کود شیمیایی فسفر و لجن فاضلاب بر این شکل فسفر معنی‌دار نبود (P>۰/۰۵). فسفر محلول و فسفر متصل به آهن و آلومینیم به‌عنوان شکل‌های قابل‌جذب فسفر گزارش شده‌اند (۱۸).

با توجه به نتایج، کاربرد کود شیمیایی و لجن فاضلاب باعث افزایش فسفر متصل به کلسیم شده است. برهمکنش بین کود شیمیایی و لجن فاضلاب بر فسفر متصل به کلسیم معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). این می‌تواند ناشی از ماهیت آهکی خاک مورد مطالعه و بالا بودن مقدار کلسیم خاک و فسفر موجود در لجن فاضلاب باشد. با کاربرد یک درصد لجن فاضلاب در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود فسفر، فسفر متصل به کلسیم ۲۳/۵ درصد افزایش یافت. فسفر متصل به کلسیم با اضافه کردن ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در تیمار یک درصد لجن فاضلاب ۱۶/۲ درصد افزایش نشان داد؛ که دلیل آن را می‌توان احتمالاً ناشی از کلسیم موجود در کود آلی بیان کرد که سبب تشکیل فسفات‌های کلسیم در خاک می‌شود.

کاربرد کود شیمیایی فسفر باعث افزایش فسفر باقی‌مانده شد (جدول ۵). با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود شیمیایی فسفر، فسفر باقی‌مانده ۲۰/۲٤ درصد افزایش یافت. افزایش فسفر باقی‌مانده در خاک باعث کاهش فسفر قابل‌دسترس گیاهان می‌شود. معمولاً کود فسفر در زمان کوتاهی محلول است و سپس تثبیت شده و این امر باعث کاهش فسفر قابل‌دسترس و افزایش فسفر باقی‌مانده می‌شود (۱). به‌طور متوسط ٤۲ درصد فسفر باقی‌مانده؛ فسفر آلی است که فسفومنواسترها به‌صورت اینوزیتول هگزافسفات هستند (۵ و ٤۸). همان‌گونه که بیان شد در این پژوهش به‌جای اندازه‌گیری فسفر باقی‌مانده؛ از تفاوت مقدار فسفر کل و شکل‌های دیگر (معدنی‌ها) تعیین شد (جدول ۱). در اصل فسفر باقی‌مانده دربرگیرنده فسفر آلی هم هست و در این مطالعه تفاوت بین فسفر کل و اجزا معدنی را فسفر باقی‌مانده که بخش زیادی از آن آلی هم هست در نظر گرفته شد.

کاربرد کود شیمیایی فسفره و لجن فاضلاب باعث افزایش فسفر آلی شد (جدول ۵). با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود شیمیایی فسفر آلی ٤٤/۵٤ درصد و با کاربرد ۱ درصد لجن فاضلاب ٤۷/۹٦ درصد افزایش یافت. برهمکنش بین کود شیمیایی و لجن فاضلاب معنی‌دار نبود، این بدان معنی است که کاربرد لجن فاضلاب نقش مؤثری در افزایش و کاهش اثر کود شیمیایی فسفر بر این شکل نداشته است. افزایش فسفر آلی در تیمارهای کود شیمیایی احتمالاً به‌دلیل افزایش زیست‌توده ریزجانداران بوده و در تیمارهای لجن فاضلاب علاوه بر افزایش زیست‌توده ریزجانداران به‌دلیل افزایش مستقیم فسفر آلی خاک نیز می‌باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب باعث افزایش شکل‌های فسفر در خاک شد. افزایش شکل‌های فسفر بر اثر لجن فاضلاب نسبت به کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات بیش‌تر بود. توزیع نسبی شکل‌های فسفر در خاک به‌ترتیب فسفر متصل به کلسیم ≤ فسفر باقی‌مانده > فسفر متصل به آهن و آلومینیم > فسفر محلول و تبادلی بود. بیش‌تر بودن فسفر متصل به کلسیم در خاک‌ها را می‌توان ناشی از ماهیت آهکی خاک مورد مطالعه و بالا بودن مقدار کلسیم آن دانست (۱۲، ۱۵، ۳۸ و ٤۲). سفیدگر

شاهکلایی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب موجب افزایش معنی‌دار همه شکل‌های فسفر شد (۳۹). سونگ و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که مقدار زیادی از اکتا و دی‌کلسیم فسفات و فسفر متصل به آلومینیم به‌صورت قابل‌جذب برای گیاهان آزاد شد. همچنین آنان گزارش کردند که استفاده بیش از حد ازکودها به‌ویژه کود آلی باعث تجمع شکل‌های اکتا و دی‌کلسیم فسفات و فسفر متصل به آلومینیم در خاک شده و باعث مشکلات زیست‌محیطی می‌شود (٤٢). ماو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که فسفر باقی‌مانده غالباً شکل غیرقابل جذب فسفر می‌باشد و صرف‌نظر از این‌که چه نوع کودی استفاده شده ظاهراً کاربرد کودهای آلی مانع از تغییر شکل کود شیمیایی به شکل غیرقابل‌جذب و حتی منجر به تبدیل بخش زیاد فسفر به شکل قابل‌جذب می‌شود (٢٤). لیو و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که با اضافه کردن کود دامی فسفر آلی قابل‌جذب و فسفر آلی نسبتاً قابل‌جذب را به‌طور معنی‌دار افزایش و فسفر پیوندشده با آهن را کاهش داد. کود آلی می‌تواند فعالیت آنزیم فیتاز خاک و زیست‌توده میکروبی را افزایش دهد. همچنین آنان افزودند که ترکیب کودهای آلی و معدنی باعث افزایش فسفر محلول می‌شود و می‌توانند فسفر قابل‌استفاده را افزایش می‌دهد (۲۳). هر چند در مطالعه حاضر برهمکنش کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن معنی‌دار نبود؛ اما مقدار فسفر عصاره‌گیری‌شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار تحت‌تأثیر برهمکنش کودشیمیایی و لجن فاضلاب قرار داشت.

برهمکنش اثر کود شیمیایی و لجن فاضلاب بر شاخص‌های ذرت: نتایج تجزیه واریانس اثر کود فسفر، لجن فاضلاب و برهمکنش آن‌ها بر شاخص‌های ذرت در جدول ٦ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که اثر لجن فاضلاب و کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات بر غلظت فسفر گیاه، ماده خشک ذرت و جذب فسفر معنی‌دار ($P<۰/۰۱$) بود. همچنین برهمکنش لجن فاضلاب و کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات بر جذب فسفر معنی‌دار بود ($P<۰/۰۵$). معنی‌دارشدن برهمکنش نشان می‌دهد که اثر لجن فاضلاب بر جذب فسفر در ذرت به سطح کود شیمیایی به‌کار برده شده وابسته بود. کاظم علیلو و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که برهمکنش لجن فاضلاب (۰ تا ٦۰ تن در هکتار) و سوپرفسفات تریپل (۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) بر وزن هزاردانه، تعداد دانه در بوته، درصد پوکی، قطر طبق و عملکرد دانه آفتابگردان معنی‌دار بود (۲۰).

جدول ٦- نتایج تجزیه واریانس اثر کود شیمیایی، لجن فاضلاب و برهمکنش آن‌ها بر شاخص‌های ذرت.

Table 6. Results of analysis of variance of the effect of P fertilizer, sewage sludge and their interaction on maize indices.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square		
		غلظت فسفر P Concentration ($mg\ kg^{-1}$)	وزن خشک Dry matter ($g\ pot^{-1}$)	جذب uptake ($mg\ pot^{-1}$)
کود شیمیایی فسفره P Fertilizer	1	53879**	25.65**	130.69**
لجن فاضلاب sewage sludge	1	20304*	402.66**	1283**
کود شیمیایی فسفره × لجن فاضلاب P Fertilizer × sewage sludge	1	670^{ns}	3.081^{ns}	17.62*
خطا Error	8	2419	0.625	2.99
ضریب تغییرات CV%		2.9	6.2	7.9

*، ** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌دار.

ns, * and ** non-significant, significant at P<0.05 and P<0.01, respectively.

نتایج مقایسه میانگین‌های غلظت فسفر، ماده خشک و جذب فسفر در گیاه در جدول ۷ آورده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فسفر، غلظت فسفر در ذرت و ماده خشک ذرت به‌ترتیب ۸/۲ و ۲۵/۹ درصد افزایش یافت (P<۰/۰۱)، همچنین با کاربرد ۱ درصد لجن فاضلاب غلظت فسفر در ذرت و ماده خشک ذرت به‌ترتیب ٤/۹ و ۱۹٤ درصد افزایش یافت. برهمکنش کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب بر جذب فسفر معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). جذب فسفر نسبت به تیمار شاهد بر اثر کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر به‌صورت کود شیمیایی، ٤٤/۳ درصد افزایش یافت. افزودن یک درصد لجن فاضلاب به تیمار شاهد باعث افزایش به ۱۹٤ درصدی جذب فسفر شد؛ در حالی‌که کاربرد یک درصد لجن فاضلاب در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر، جذب فسفر را ۳۲/٦ درصد افزایش داد. اضافه کردن ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در تیمار یک درصد لجن فاضلاب باعث افزایش ۱۷۰ درصد جذب فسفر در ذرت شد.

نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب بیش‌تر از کود شیمیایی باعث افزایش ماده خشک ذرت و بنابراین جذب فسفر در آن شد. لجن فاضلاب به‌دلیل افزایش ماده آلی، بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و همچنین افزایش فسفر قابل‌دسترس در خاک می‌تواند مفید باشد (۲). در پژوهش‌های متعددی به افزایش ماده خشک گیاه و جذب فسفر اشاره شده است (٤، ۱۹، ۲۰، ۲۳، ۲۹، ۳۰ و ۳۹). سفیدگر شاهکلایی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که با کاربرد لجن فاضلاب، غلظت فسفر در اندام هوایی گندم و ماده خشک اندام هوایی به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت (۳۹).

بوستانی و رونقی (۲۰۱۱) گزارش کردند که با کاربرد لجن فاضلاب، غلظت فسفر اسفناج به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد بیش‌تر بود. هر چند کاربرد کود شیمیایی نیز سبب افزایش غلظت فسفر گیاه شد؛ اما اثر کاربرد لجن فاضلاب (٤٠ و ٨٠ گرم در کیلوگرم خاک) نسبت به کود شیمیایی به‌طور معنی‌داری در سه بافت خاک بیش‌تر بود (٤). نجفی و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که کاربرد ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب، غلظت و جذب فسفر در بخش هوایی آفتابگردان را نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۲۹ و ۲۲۹ درصد افزایش داد (۲۹). این تفاوت بین نتایج پژوهش‌ها بر اثر کودها بر غلظت فسفر می‌تواند به‌دلیل مقادیر تفاوت کودها، خاک‌ها و همچنین تفاوت نوع گیاهان باشد.

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های شاخص‌های ذرت در خاک‌های مورد مطالعه.

Table 7. Mean comparison of maize indices in the studied soils.

فسفر P ($mg\ kg^{-1}$)	غلظت فسفر P concentration ($mg\ kg^{-1}$)			ماده خشک Dry matter ($g\ pot^{-1}$)			جذب Uptake ($mg\ pot^{-1}$)		
	لجن فاضلاب sewage sludge (%)		میانگین average	لجن فاضلاب sewage sludge (%)		میانگین average	لجن فاضلاب sewage sludge (%)		میانگین average
	0	1		0	1		0	1	
0	1575	1672	1623B	5.96	16.54	11.25B	9.41[d]	27.67[b]	18.54B
50	1724	1791	1757A	7.88	20.47	14.17A	13.58[c]	36.69[a]	25.14A
میانگین average	1649B	1731A		6.29B	18.51A		11.49B	32.18A	

میانگین‌های با حروف مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

The means with the same letter are not significantly difference based on the Duncan's Multiple Range test at 5% level of significance.

همبستگی بین فسفر قابل‌جذب با شکل‌های فسفر و شاخص‌های ذرت: همبستگی بین فسفر قابل‌جذب با شکل‌های فسفر در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که بین همه شکل‌های فسفر (به غیر از فسفر باقی‌مانده) با فسفر قابل‌جذب (روش اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار) همبستگی معنی‌دار ($P<0/01$) وجود داشت. بنابراین با افزایش این شکل‌های فسفر در خاک، فسفر قابل‌جذب افزایش یافت. نتایج نشان داد که فسفر عصاره‌گیری شده به روش اولسن بیش‌ترین همبستگی را با فسفر محلول و تبادلی و فسفر متصل به آهن و آلومینیم را داشت.

نتایج بررسی همبستگی نشان داد که همه شکل‌ها با یکدیگر (غیر از فسفر باقی‌مانده) همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشتند و بیش‌ترین ضریب همبستگی بین فسفر محلول و تبادلی با فسفر متصل به آهن و آلومینیم بود. نتایج مشابهی توسط جلالی و سجادی‌تبار (۲۰۱۱) گزارش شده است. آنان همبستگی معنی‌داری ($P<0/01$) بین فسفر محلول با فسفر متصل به آهن و آلومینیم (۰/۵۳٤) و فسفر متصل به کلسیم (۰/۵۷٤) و بین فسفر متصل با کلسیم و فسفر متصل با آهن و آلومینیم (۰/۵۰٤) گزارش کردند. آنان بین فسفر عصاره‌گیری شده با روش اولسن و شکل‌های فسفر همبستگی معنی‌داری به‌دست نیاوردند (۱۸).

جدول ۸- ضرایب همبستگی (r) بین فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر در خاک‌های مورد مطالعه (n=۱۲).

Table 8. Correlation coefficients (r) between available P and P fractions in the studied soils (n=12).

	فسفر- کلرید کلسیم $P\text{-}CaCl_2$	محلول و تبادلی Soluble and exchangeable P	متصل به آهن و آلومینیم Fe- Al bound P	متصل به کلسیم Ca bound P	باقی‌مانده Residual	آلی Organic
فسفر- اولسن P-Olsen	0.89**	0.94**	0.95**	0.78**	-0.09^{ns}	0.87**
فسفر- کلرید کلسیم $P\text{-}CaCl_2$		0.91**	0.91**	0.80**	-0.03^{ns}	0.90**
فسفر محلول و تبادلی Soluble and exchangeable P			0.95**	0.78**	-0.03^{ns}	0.90**
فسفر متصل به آهن و آلومینیم Fe- Al bound P				0.79**	-0.23^{ns}	0.80**
فسفر متصل به کلسیم Ca bound P					-0.26^{ns}	0.79**
فسفر باقی‌مانده Residual P						0.24^{ns}

^{ns} و ** به‌ترتیب عدم معنی‌دار بودن و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

^{ns} and ** non-significant, significant and P<0.01, respectively.

ضرایب همبستگی بین فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و شاخص‌های ذرت در جدول ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که فسفر قابل‌جذب با هر دو روش عصاره‌گیری با همه شاخص‌های ذرت همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشت. همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود ماده خشک ذرت و جذب فسفر با همه شکل‌های فسفر به‌جز فسفر باقی‌مانده همبستگی معنی‌دار (P<۰/۰۱) داشتند. همچنین غلظت فسفر در ذرت با شکل‌های فسفر محلول و تبادلی و فسفر آلی همبستگی مثبت و معنی‌داری (P<۰/۰۱) داشت.

جدول ۹- ضرایب همبستگی (r) بین شاخص‌های گیاه و شکل‌های فسفر (n=۱۲).

Table 9. Correlation coefficients (r) between maize indices and P fractions (n=12).

شاخص‌های ذرت Maize indices	قابل استفاده		شکل‌های فسفر				
	فسفر- اولسن P-Olsen	فسفر- کلرید کلسیم $P\text{-}CaCl_2$	محلول و تبادلی Soluble and exchangeable P	متصل به آهن و آلومینیم Fe- Al bound P	متصل به کلسیم Ca bound P	باقی‌مانده Residual	آلی Organic
غلظت Concentration	0.69**	0.75**	0.72**	0.56^{ns}	0.55^{ns}	0.49^{ns}	0.86**
ماده خشک Dry matter	0.96**	0.94**	0.96**	0.98**	0.82**	-0.19^{ns}	0.86**
جذب Uptake	0.95**	0.96**	0.96**	0.97**	0.83**	-0.14^{ns}	0.89**

^{ns} و ** به‌ترتیب عدم معنی‌دار بودن و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

^{ns} and ** non-significant, significant and P<0.01, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب به‌میزان چشم‌گیری فسفر قابل‌جذب را نسبت به کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات افزایش داد. برهمکنش کودشیمیایی و لجن فاضلاب بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن معنی‌دار نبود؛ اما مقدار فسفر عصاره‌گیری‌شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار تحت‌تأثیر برهمکنش کود شیمیایی و لجن فاضلاب قرار گرفت. کاربرد کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب باعث افزایش شکل‌های فسفر در خاک شد. مطالعه کشت ذرت نشان داد که برهمکنش کود شیمیایی و لجن فاضلاب بر غلظت فسفر و ماده خشک ذرت معنی‌دار نبود؛ در حالی‌که جذب فسفر متأثر از کاربرد توأم کود شیمیایی و لجن فاضلاب قرار داشت. نتایج این مطالعه نشان داد اثر لجن فاضلاب بر ماده خشک ذرت و جذب فسفر بسیار بیش‌تر از کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات بود. با توجه به معنی‌دارنشدن برهمکنش کود شیمیایی و لجن فاضلاب بر فسفر عصاره‌گیری‌شده با روش اولسن، نتایج نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب با تأثیر بر شکل‌های قابل‌جذب فسفر بر قابلیت استفاده آن در خاک مؤثر است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد قدردانی می‌شود.

منابع

1. Ahmad, M., Ahmad, M., El-Naggar, A.H., Usman, A.R.A., Abduljabbar, A., Vithanage, M., Elfaki, J., Al-Faraj, A., and Al-Wabel, M.I. 2017. Aging effect of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil. Pedosphere. 28: 6. 873-883.
2. Al Zoubi, M.M., Arslan, A., Abdelgawad, G., Pejon, N., Tabbaa, M., and Jouzdan, O. 2008. The effect of sewage sludge on productivity of a crop rotation of wheat, maize and vetch and heavy metals accumulation in soil and plant in Aleppo Governorate. American Eurasian. J. Agric. Environ. Sci. 3: 4. 618-625.
3. Aziz, T., Ullah, S., Sattar, A., Nasim, M., Farooq, M., and Khan, M.M. 2010. Nutrient availability and maize (*Zea mays*) growth in soil amended with organic manures. Inter. J. Agric. Biol. 12: 4. 621-624.
4. Boostani, H.R., and Ronaghi, A. 2011. Comparison of sewage sludge and chemical fertilizer application on yield and concentration of some nutrients in spinach (*Spinosa olerace* L.) in three textural classes of a calcareous soil. J. Sci. Technol. Greenhouse Cul. 2: 6. 65-74. (In Persian)
5. Briceño, M., Escudey, M., Galindo, G., Borchardt, D., and Chang, A. 2004. Characterization of chemical phosphorus forms in volcanic soils using ^{31}P-NMR spectroscopy. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 35: 1323-1337.
6. Campbell, C.R., and Plank, C.O. 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. P 37-50, In: Y.P. Kalra (ed.) Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press.
7. Casado-Vela, J., Sellés, S., Navarro, J., Bustamante, M.A., Mataix, J., Guerrero, C., and Gomez, I. 2006. Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils. Waste Management 26: 9. 946-952.
8. Farshi, A.A., and Mirlatifi, M. 2003. On-Farm Irrigation Water Management. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Pp: 148-150. (In Persian)
9. Fathololomi, S., Asghari, S., and Goli, K.E. 2015. Effects of municipal sewage sludge on the concentration of macronutrients in soil and plant and some agronomic traits of wheat. Elec. J. Soil Manage. Sust. Prod. 5: 2. 49-70. (In Persian)

10. Frišták, V., and Soja, G. 2015. Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. Nova Biotechnologica et Chimica, 14: 1. 104-115.
11. Gee, G.H., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P 383-409, In: A. Klute (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2 physical properties. American Society of Agronomy Madison. Wisconsin.
12. Gerdelidani, A.F., and Hosseini, H.M. 2018. Effects of sugar cane bagasse biochar and spent mushroom compost on phosphorus fractionation in calcareous soils. Soil Research, 56: 2. 136-144.
13. Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., and Chauhan, B. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. Soil Sci. Soc. Amer. J. 46: 970-976.
14. Hejazi Mehrizi, M., Ayeeneheydari, M., and Abbaszadeh, F. 2016. An investigation of phosphorus dynamics in a calcareous soil treated with different levels of poultry manure and chemical fertilizer. Water and Soil Science, 26: 3. 293-303. (In Persian)
15. Hejazi Mehrizi, M., Shariatmadari, H., and Afyuni, M. 2013. Cumulative and residual effect of sewage sludge on inorganic p fractions and p availability in a calcareous soil. JWSS-Isfahan University of Technology, 17: 64. 33-43. (In Persian)
16. Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes, a review. Plant and Soil. 237: 173-195.
17. Jalali, M., and Ranjbar, F. 2010. Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. Geoderma. 155: 1-2. 101-106
18. Jalali, M., and Sajadi Tabar, S. 2011. Chemical fractionation of phosphorus in calcareous soils of Hamedan, western Iran under different land use. J. Plant Nutr. Soil Sci. 174: 4. 523-531.
19. Karami, M., Rezainejad, Y., Afyuni, M., and Shariatmadari, H. 2007. Cumulative and residual effects of sewage sludge on lead and cadmium concentration in soil and wheat. J. Water Soil Sci. 11: 1. 79-95. (In Persian)
20. Kazemalilou, S., Najafi, N., and Reyhanitabar, A. 2018. Increasing the yield and yield components of sunflower by integrated application of phosphorus and sewage sludge under optimum and limited irrigation. J. Water Soil. 31: 6. 1637-1650. (In Persian)
21. Kuo, S. 1996. Phosphorus. P 869-919. In: D.L. Sparks (ed)., Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods, Soil Science Society of America. Madison, WI.
22. Latare, A.M., Kumar, O., Singh, S.K., and Gupta, A. 2014. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. Ecological Engineering. 69: 17-24. 19.
23. Liu, J., Aronsson, H., Ulen, B., and Bergström, L. 2012. Potential phosphorus leaching from sandy topsoils with different fertilizer histories before and after application of pig slurry. Soil Use and Management. 28: 4. 457-467.
24. Mao, X., Xu, X., Lu, K., Gielen, G., Luo, J., He, L., and Song, Z. 2015. Effect of 17 years of organic and inorganic fertilizer applications on soil phosphorus dynamics in a rice-wheat rotation cropping system in eastern China. J. Soils Sed. 15: 9. 1889-1899.
25. Marschner, H. 2011. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic, London, 672p.
26. Moghimi, N., Hosseinpur, A., and Motaghian, H. 2018. The effect of vermicompost on transformation rate of available p applied as chemical fertilizer in a calcareous clay soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 49: 17. 2131-2142.
27. Murphy, J.A.M.E.S., and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta, 27: 31-36.
28. Najafi N., and Towfighi, H. 2014. Changes in available phosphorus and inorganic native phosphorus fractions after waterlogging in the paddy soils of north of Iran. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Science, 18: 67. 151-163. (In Persian)

29. Najafi N., Mardomi, S., and Oustan, S. 2012. The effect of waterlogging, sewage sludge and manure on selected macronutrients and sodium uptake in sunflower plant in a loamy sand soil. J. Water Soil. 26: 3. 619-636. (In Persian)
30. Najafi, N., and Mardomi, S. 2012. The effects of waterlogging, sewage sludge and manure on the growth characteristics of sunflower in a sandy loam soil. J. Water Soil. 25: 6. 1264-1276. (In Persian)
31. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 961-1010. In: D.L. Sparks. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods, Soil Science Society of America. Madison, WI.
32. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus. P 403-430. In: A.L. Page. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI.
33. Pu, S., HE, X.H., XU, M.G., Zhang, H.M., Chang, P., Gao, H.J., Hua, L., Xu, Y.M., Song, Q., and Xiao, H.J. 2014. Soil organic carbon accumulation increases percentage of soil Olsen-P to total P at two 15-year Mono-Cropping systems in Northern China. J. Integr. Agric. 13: 597-603.
34. Ranjbar, M., Ghorbani, H., and Ghajar Sepanlou, M. 2017. The Effect of Long-term Application of municipal solid waste compost on macro elements concentration in soil and rice. J. Crop Improv. 18: 4. 753-764.
35. Rhoades, J.D. 1996. Salinity electrical conductivity and total dissolved solids. P 417-437. In: D.L. Sparks (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3 chemical methods. American Society of Agronomy Madison WI.
36. Saad, S., Abdalla, M.A., Omer, E.T.A., and Hago, T. 2009. Phosphorus supply and *Phaseolus vulgaris* performance grown in Shambat clay alkaline soil and influenced by farmyard manure. Austr. J. Bas. Appl. Sci. 3: 2598-2606.
37. Saadat, K., Barani, M.M., Dordipour, E., and Ghasemnezhad, A. 2012. Influence of sewage sludge on some soil properties, yield and concentration of lead and cadmium in roots and shoots of Maize. Iran. J. Soil Water Res. 49: 3. 653-664. (In Persian)
38. Samavati, M. 2011. Phosphorus fractions and availability in some calcareous soils in Hamedan province. J. Water Soil Sci. 15: 55. 127-138. (In Persian)
39. Sefidgar, S.S., Barani, M.M., and Dordipour, E. 2013. Availability and fractionation of inorganic phosphorus in a sewage sludge-amended calcareous soil. Elec. J. Soil Manage. Sust. Prod. 3: 2. 53-73. (In Persian)
40. Siddique, M.T., and Robinson, J.S. 2003. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. J. Environ. Qual. 32: 1114-1121.
41. Sommers, L.E., and Nelson, D.W. 1972. Determination of Total phosphorus in soils: a rapid perchloric acid digestion procedure. Soil Sci. Soc. Amer. J. 36: 902-904.
42. Song, K., Xue, Y., Zheng, X., Lv, W., Qiao, H., Qin, Q., and Yang, J. 2017. Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil. Scientific Reports. 7: 1164-1173.
43. Soremi, A.O., Adetunji, M.T., Azeez, J.O., Adejuyigbe, C.O., and Bodunde, J.G. 2017. Speciation and dynamics of phosphorus in some organically amended soils of southwestern Nigeria. Chemical Speciation Bioavailability. 29: 1. 42-53.
44. Staunton, S., and Leprince, F. 1996. Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: implications for P bioavailability. Europ. J. Soil Sci. 47: 231-239.
45. Sumner, M.E., and Miller, W.P. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. P 1201-1231. In: D.L. Sparks (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical methods. Soil Science Society of America. Madison. WI.

46.Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. P 475-490. In: D.L. Sparks. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods, Soil Science Society of America. Madison, WI.
47.Tunnicliffe, H., Duckett, A., Jansen, R., Forsdyke, D., Revel, A., and Mawby. L. 2014. A simple recipe for recycling electronics waste: soak, simmer, reuse. Chemical Engineering. 872: 1-64.
48.Velásquez, G., Ngo, P., Rumpel, C., Calabi-Floody, M., Redel, Y., Turner, B.L., Condron, L.M., and de la Luz Mora, M. 2016. Chemical nature of residual phosphorus in Andisols. Geoderma. 271: 27-31.

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 9(2), 2019
http://ejsms.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejsms.2019.15468.1832

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Effect of P fertilizer and sewage sludge on availability and fractions of P and maize (*Zea Mays* L.) indices in a calcareous soil

F. Shahbazi[1], A.R. Hosseinpur[2] and *H.R. Motaghian[3]
[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University,
[2]Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University,
[3]Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University
Received: 08.06.2018; Accepted: 01.13.2019

Abstract

Background and Objectives: The deficiency of available phosphorus (P) is considered as a main problem in Iran's soils. In order to increase the available P, chemical fertilizers are used. However, P in chemical fertilizers are transformed into less available forms over time. To improve the efficiency of P fertilizers, organic amendments could be effective. Sewage sludge contains an abundance of organic matter and nutrients and is used to improve the productivity of farmland and enhance yield. This study conducted to investigate the effect of the interaction of sewage sludge and P fertilizers on availability and mineral of P and maize (*Zea Mays* L.) indices in a calcareous soil.

Materials and Methods: This study was conducted based on factorial experiment in a completely randomized design with 3 replications. The experimental factors were chemical fertilizer (0 and 50 mg/kg of KH_2PO_4) and sewage sludge (0 and 1% w/w). The treated soils were kept in 80% of the field capacity in greenhouse condition for one month. The maize (single cross 704) was planted in 3 kg pots under greenhouse of Shahrekord University. After 2 months planting, shoot was removed and maize indices (P concentration, dry matter and uptake) were determined. Also, after planting, soil sampled from pots and the various fractions of P including (soluble P, Fe-Al bonded P, Ca bonded P, residual P and organic P) and available (P Olsen and $CaCl_2$ 0.01 M methods) were determined.

Results: The results showed that interaction between P fertilizer and sewage sludge on P extracted by Olsen method wasnot significant ($P>0.05$), while in P extracted by $CaCl_2$ 0.01 M was significant ($P<0.05$). The results revealed that by addition the 50 mg/kg P, P-Olsen and P-$CaCl_2$ increased 21.4 and 60%, respectively, while 1% sewage sludge application P extracted by Olsen and $CaCl_2$ 0.01 M methods increased 83.2 and 200%, respectively. The effect sewage sludge (except residual P) and chemical fertilizers on all P fractions were significant ($P<0.01$). In addition, the interaction between chemical fertilizer and sewage sludge was only significant on Ca -bound P ($P<0.05$). The effect of sewage sludge on P fractions was more remarkable than chemical fertilizer and their interaction effect. By addition 50 mg/kg P fertilizer, P concentration in maize and the dry matter increased 8.2 and 25.9%, respectively. Similarly, in comparison with without sewage sludge, by sewage sludge application these indices increased 4.9 and 194%, respectively. The interaction of sewage sludge and P fertilizers was significant on maize uptake ($P<0.05$). The P uptake increased 32.5% in sewage sludge + 50 mg/kg P fertilizer compared to 1% sewage sludge and increased 170% compared to 50 mg/kg P fertilizer.

Conclusion: The results showed that the effect of chemical P fertilizer application on extracted P by Olsen method wasn't related to sewage sludge application. In treated soil with sewage sludge, available P considerably increased compared to treated soils with P fertilizer that could be attributed to different impact of treatments on P fractions. Also, the effect of chemical fertilizer application on uptake of P was related to sewage sludge rates.

Keywords: Fractionation, Organic matter, Phosphorous uptake

* Corresponding Author; Email: motaghian.h@yahoo.com