



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 کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد، استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد،

^۲ 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 فسفوری 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 به کار 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 به صورت 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 تیمار شده به مدت یک ماه در شرایط گلخانه ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه خوابانده شدند. ذرت (رقم سینگل کراس 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 تبادل، 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 فسفر 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 عصاره‌گیری شده با روش اولسن و فسفر عصاره‌گیری شده با روش کلرید کلسیم به ترتیب ۲۱/۴ و ۶۰ درصد افزایش یافت، در حالی‌که با کاربرد یک درصد لجن فاضلاب فسفر عصاره‌گیری شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم به ترتیب 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 ($P < 0/01$) بود. برهمکنش بین کود شیمیایی فسفره و لجن فاضلاب فقط بر فسفر متصل به کلسیم معنی‌دار بود ($P < 0/05$). 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 به ترتیب ۸/۲ و ۲۵/۹ درصد افزایش یافت ($P < 0/01$). با کاربرد لجن فاضلاب غلظت فسفر در ذرت و ماده خشک گیاه به ترتیب ۴/۹ و ۱۹۴ درصد نسبت به سطح صفر لجن فاضلاب افزایش یافت. برهمکنش کود شیمیایی فسفره و لجن فاضلاب بر ماده خشک ذرت معنی‌دار ($P < 0/05$) 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 به میزان چشم‌گیری نسبت به کود شیمیایی افزایش یافت که می‌تواند به دلیل 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 (۴۷). 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 (۲۶)

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، ۱۴، ۲۳، ۳۰ و ۳۴). مصرف لجن فاضلاب به دلیل 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 سوچا (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

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 (۳۴). سیدیکو و رابینسون (۲۰۰۳) گزارش کردند که کاهش جذب و انرژی پیوند فسفر در خاک‌های تیمار شده با کود گاوی و پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات بیش‌تر از خاک تیمار شده 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 (۴۰). حجازی‌مه‌ریزی و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که در کود مرغی تا ۱۴۴۰ ساعت فسفر آزاد شده روند افزایشی و سپس کاهش داشت؛ در حالی که فسفر آزاد شده در هر مقدار کود شیمیایی، روند کاهش داشت و بعد از ۲۱۶۰ ساعت از انکوباسیون به ترتیب حدود ۸۰ درصد فسفر افزوده شده به خاک، به صورت غیرقابل دسترس تبدیل شد. آنان با توجه به کاهش فسفر آزاد شده در تیمار کود آلی بعد از ۱۴۴۰ ساعت، پیشنهاد کردند که کود شیمیایی و کود آلی به صورت هم‌زمان به کار برده شوند (۱۴). پو و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که ترکیب کود آلی و کود شیمیایی فسفر به‌عنوان یک روش مؤثر در افزایش کربن آلی خاک و درصد فسفر قابل جذب است (۳۳).

بنابراین، با توجه به تبدیل فسفر اضافه‌شده به خاک به صورت کودهای شیمیایی به شکل‌های غیرقابل جذب، 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.

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 قابل جذب 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 قابل جذب خاک افزایش یافت؛ اما مقدار فسفر محبوس شده 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 محبوس شده، بین شکل‌های معدنی فسفر و فسفر عصاره‌گیری شده 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 (۲۰۱۴) گزارش کردند که فسفر قابل استفاده (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 (۱۴، ۳۳، ۳۴ و ۴۰). 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 ($P < 0.01$) غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در خاک و دانه برنج در مقایسه با تیمار شاهد شد. کم‌ترین

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 (۴۶)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره دو به یک آب به خاک (۳۵)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون برگشتی (۴۴)، ماده آلی به روش اکسایش تر (۳۱) و گنجایش تبادل کاتیونی با استات سدیم در pH برابر با ۷ (۴۵) اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار فسفر قابل جذب 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 ۲/۶ دسی‌زیمنس بر متر، کربن آلی و نیتروژن به ترتیب ۱۷/۰۲ و ۱/۲۶ درصد و فسفر قابل جذب و کل به ترتیب ۱۵۱۷ و ۸۲۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

این پژوهش به صورت 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 به مدت یک ماه در رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه در شرایط گلخانه خوابانده شدند.

پس از یک ماه خوابانیدن، ۴ عدد بذر ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) 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 ۶۵ سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. نمونه‌های گیاهی پس از توزین به وسیله آسیاب برقی پودر گردید. به منظور تجزیه گیاه پس از خاکسترسازی خشک با اسید کلریدریک عصاره‌گیری (۶) 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 قابل جذب به روش‌های اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و همچنین شکل‌های فسفر به روش تغییر یافته 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 (۴۱) عصاره‌گیری شدند و غلظت فسفر با استفاده از روش رنگ‌سنجی (۲۷) تعیین گردید.

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

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

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

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

داد که اثر لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر فسفر عصاره‌گیری شده 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 عصاره‌گیری شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار معنی‌دار بود ($P < 0/05$). معنی‌دار بودن برهمکنش اثر لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر فسفر عصاره‌گیری شده 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.

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 به ترتیب ۰/۴۵ و ۳۴ درصد بود. فسفر قابل‌استفاده (به روش اولسن) و فسفر کل خاک به ترتیب 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 عصاره‌گیری شده 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

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 قابل استفاده available K (mg kg ⁻¹)	0.18	EC (1:2) (dS/m)
20	فسفر قابل استفاده 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 قابل استفاده 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، لیجن فاضلاب و اثر متقابل آن‌ها بر فسفر عصاره‌گیری شده 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 CaCl₂ 0.01 M (P-CaCl₂) and P-fractions in the studied soils.

میانگین مربعات (Mean square)								درجه آزادی df	منابع تغییر S. O. V
آلی Organic P	باقی مانده Residual P	متصل به کلسیم Ca bound P	متصل به آهن و آلومینیم Fe - Al bound P	محللول و تبادل Soluble and exchangeable P	P-CaCl ₂	P-Olsen			
2212**	2338**	564**	46.3**	58.8**	0.16**	211.8**	1	کود شیمیایی فسفره P Fertilizer	
249**	338.5 ^{ns}	1664**	1331**	307.8**	0.79**	1954**	1	لیجن فاضلاب sewage sludge	
4.17 ^{ns}	527 ^{ns}	510.9*	3.55 ^{ns}	2.3 ^{ns}	0.05*	0.75 ^{ns}	1	کود شیمیایی فسفره × لیجن فاضلاب P Fertilizer × sewage sludge	
30.29	101	85.5	1.3	0.46	0.005	15.73	8	خطا error	
7.3	6.6	5.4	2.8	4.9	13.4	9.1		ضریب تغییرات CV (%)	

*, ** و ^{ns} به ترتیب 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.

افزایش نشان داد. افزایش فسفر عصاره‌گیری شده با روش اولسن پس از کشت ذرت در خاک شاهد نسبت به قبل از کشت (جدول‌های ۲ و ۴) می‌تواند به دلیل 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 عصاره‌گیری شده 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 به صورت چشم‌گیری بیشتر بود. تأثیر مثبت کودهای آلی بر فراهمی فسفر به‌وسیله سایر پژوهشگران (۳، ۲۲ و ۳۶) نیز گزارش شده است. نتایج پژوهش لاتار و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که کاربرد ۴۰ تن در هکتار لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار فسفر قابل‌استفاده خاک‌های زیر کشت گندم شد (۲۲).

میانگین فسفر عصاره‌گیری شده با روش‌های اولسن و کلرید کلسیم در جدول ۴ 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 عصاره‌گیری شده با روش اولسن ۲۱/۴ درصد و با کاربرد یک درصد لجن فاضلاب نسبت به سطح صفر لجن فاضلاب فسفر عصاره‌گیری شده با این روش ۸۳/۲ درصد افزایش یافت. همچنین نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که اثر توأم کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری ($P < 0/05$) فسفر عصاره‌گیری شده 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 عصاره‌گیری شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار (۱۶۸ درصد) شد. در حالی‌که اضافه کردن یک درصد لجن فاضلاب در تیمار دارای ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر، فسفر عصاره‌گیری شده 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 عصاره‌گیری شده با روش کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار ۶۲/۷ درصد

جدول ۴- 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 CaCl₂ (P-CaCl₂) in the studied soils.

میانگین Average	فسفر- کلرید کلسیم P-CaCl ₂ (mg kg ⁻¹)		فسفر- اولسن P-Olsen (mg kg ⁻¹)		فسفر P (mg kg ⁻¹)	
	لجن فاضلاب (%)		لجن فاضلاب (%)			
	Sewage sludge		Sewage sludge			
	1	0	Average	1	0	
0.40B	0.59 ^b	0.22 ^c	39.25B	51.77	26.74	0
0.64A	0.96 ^a	0.31 ^c	47.66A	60.67	34.65	50
	0.78A	0.26B		56.22A	30.69B	میانگین average

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.

و مایکوریزا می‌توانند بر تغییر فسفر معدنی از فسفر غیرقابل استفاده (یا کم‌تر قابل استفاده) به فسفر قابل استفاده باشد (۱۶). 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 عصاره‌گیری شده با پتاسیم کلرید (محلول و قابل تبادل) شد. در بررسی اثرات اصلی کودهای به‌کار برده شده، فسفر محلول و تبدالی 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 ($P < 0/05$) یافت که می‌تواند به دلیل وجود فسفر محلول در کود لجن فاضلاب و آزاد شدن 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 عصاره‌گیری شده 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 ۶۰/۴۰ درصد افزایش یافت.

سورمی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که بر اثر استفاده از کود مرغی میزان فسفر قابل جذب افزایش یافت. آنان بیان کردند که آزادسازی فسفر از کود آلی به دلیل فعالیت میکروبی و آنزیم‌های موجود در کود باعث آزاد شدن فسفر غیرقابل جذب می‌شود و این امر موجب افزایش فسفر قابل جذب خاک شد (۴۳). فسفر قابل جذب 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 طولانی مدت 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 قابل جذب می‌شود (۱). بنابراین کود آلی علاوه بر دارا بودن فسفر و آزاد شدن آن در طول تجزیه، به صورت غیرمستقیم با تأثیر بر جذب فسفر به شکل غیرقابل جذب، بر فسفر قابل جذب خاک مؤثر است (۱۲). دلیل افزایش فسفر عصاره‌گیری شده با روش اولسن پس از کشت ذرت می‌تواند اثرات ناشی از کشت گیاه و رشد ریشه 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

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های شکل‌های فسفر در خاک‌های مورد مطالعه.
 Table 5. Mean comparison of P fractions in the studied soils.

میانگین Average	فسفر آلی Organic P (mg kg ⁻¹)		فسفر باقی مانده Residual-P (mg kg ⁻¹)		فسفر متصل به کلسیم Ca bound P (mg kg ⁻¹)		فسفر متصل به آهن و آلومینیم Fe - Al bound P (mg kg ⁻¹)		فسفر محلول و تبادل Soluble and exchangeable P (mg kg ⁻¹)		فسفر P (mg kg ⁻¹)
	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 (%)	میانگین Average	
60.9B	74.8	47.1	138	137	166 ^b	156 ^b	48.9	28.9	17.0	5.9	0
88.1A	103	73.1	152	178	193 ^a	157 ^b	53.9	31.7	20.5	11.3	50
88.9A	60.1B	145A	157B	180A	156B	30.3B	51.4A	18.7A	8.6B	average	

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

در این پژوهش به جای 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 ۴۴/۵۴ درصد و با کاربرد ۱ درصد لجن فاضلاب ۴۷/۹۶ 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 به دلیل افزایش زیست‌توده ریزجانداران بوده و در تیمارهای لجن فاضلاب علاوه بر افزایش زیست‌توده ریزجانداران به دلیل 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 به ترتیب فسفر متصل به کلسیم \leq فسفر باقی‌مانده $<$ فسفر متصل به آهن و آلومینیم $<$ فسفر محلول و تبادل 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 ۴۲). سفیدگر

برهمکنش بین کود شیمیایی فسفر و لجن فاضلاب بر این شکل فسفر معنی‌دار نبود ($P > 0/05$). 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 ($P < 0/05$). 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 ۲۰/۲۴ 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 ۴۲ درصد فسفر باقی‌مانده؛ فسفر آلی است که فسفونواسترها به‌صورت اینوزیتول هگزافسفات هستند (۵ و ۴۸). همان‌گونه که بیان شد

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 ۶ 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 ($P < 0/01$) بود. همچنین برهمکنش لجن فاضلاب و کود شیمیایی پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات بر جذب فسفر معنی‌دار بود ($P < 0/05$). معنی‌دار شدن 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 ۶۰ 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).

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 از کودها به‌ویژه کود آلی باعث تجمع شکل‌های اکتا و دی‌کلسیم فسفات و فسفر متصل به آلومینیم در خاک شده و باعث مشکلات زیست‌محیطی می‌شود (۴۲). ماو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که فسفر باقی‌مانده غالباً شکل غیرقابل‌جذب 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 (۲۴). 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 می‌تواند 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 کود شیمیایی و لجن فاضلاب قرار داشت.

جدول ۶- 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.

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

*، ** و ^{ns} به ترتیب 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.

جذب فسفر را ۳۲/۶ 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 به دلیل 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 (۴، 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).

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 به ترتیب 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 به ترتیب ۴/۹ و ۱۹۴ 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 به صورت کود شیمیایی، ۴۴/۳ درصد افزایش یافت. افزودن یک درصد لجن فاضلاب به تیمار شاهد باعث افزایش به ۱۹۴ درصدی جذب فسفر شد؛ در حالی‌که کاربرد یک درصد لجن فاضلاب در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر،

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 به ترتیب ۱۲۹ و ۲۲۹ درصد افزایش داد (۲۹). این تفاوت بین نتایج پژوهش‌ها بر اثر کودها بر غلظت فسفر می‌تواند به دلیل مقادیر تفاوت کودها، خاک‌ها و همچنین تفاوت نوع گیاهان باشد.

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 (۴۰ و ۸۰ گرم در کیلوگرم خاک) نسبت به کود شیمیایی به‌طور معنی‌داری در سه بافت خاک بیش‌تر بود (۴). نجفی و همکاران (۲۰۱۲)

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 (%)		لجن فاضلاب sewage sludge (%)		لجن فاضلاب sewage sludge (%)	
	میانگین average	1	0	میانگین average	1	0
0	1623B	1672	1575	11.25B	16.54	5.96
50	1757A	1791	1724	14.17A	20.47	7.88
میانگین average	1731A	1649B		18.51A	6.29B	

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.

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 تبدالی 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 (۰/۵۳۴) و فسفر متصل به کلسیم (۰/۵۷۴) و بین فسفر متصل با کلسیم و فسفر متصل با آهن و آلومینیم (۰/۵۰۴) گزارش کردند. آنان بین فسفر عصاره‌گیری شده با روش اولسن و شکل‌های فسفر همبستگی معنی‌داری به‌دست نیاوردند (۱۸).

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 تبدالی و فسفر متصل به آهن و آلومینیم را داشت.

جدول ۸- ضرایب همبستگی (r) بین فسفر قابل جذب و شکل های فسفر در خاک های مورد مطالعه (n=۱۲).

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

آلی Organic	باقی مانده Residual	متصل به کلسیم Ca bound P	متصل به آهن و آلومینیم Fe- Al bound P	محلول و تبادل Soluble and exchangeable P	فسفر - کلرید کلسیم P-CaCl ₂	
0.87**	-0.09 ^{ns}	0.78**	0.95**	0.94**	0.89**	فسفر- اولسن P-Olsen
0.90**	-0.03 ^{ns}	0.80**	0.91**	0.91**		فسفر- کلرید کلسیم P-CaCl ₂
0.90**	-0.03 ^{ns}	0.78**	0.95**			فسفر محلول و تبادل Soluble and exchangeable P
0.80**	-0.23 ^{ns}	0.79**				فسفر متصل به آهن و آلومینیم Fe- Al bound P
0.79**	-0.26 ^{ns}					فسفر متصل به کلسیم Ca bound P
0.24 ^{ns}						فسفر باقی مانده Residual P

^{ns} و ^{**} به ترتیب عدم معنی دار بودن و معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد.

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

داشت. همان طور که در جدول ۹ مشاهده می شود ماده خشک ذرت و جذب فسفر با همه شکل های فسفر به جز فسفر باقی مانده همبستگی معنی دار (P<۰/۰۱) داشتند. همچنین غلظت فسفر در ذرت با شکل های فسفر محلول و تبادل و فسفر آلی همبستگی مثبت و معنی داری (P<۰/۰۱) داشت.

ضرایب همبستگی بین فسفر عصاره گیری شده با روش های اولسن و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و شاخص های ذرت در جدول ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که فسفر قابل جذب با هر دو روش عصاره گیری با همه شاخص های ذرت همبستگی مثبت و معنی داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۹- ضرایب همبستگی (r) بین شاخص های گیاه و شکل های فسفر (n=۱۲).

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

شکل های فسفر				قابل استفاده			شاخص های ذرت Maize indices
آلی Organic	باقی مانده Residual	متصل به کلسیم Ca bound P	متصل به آهن و آلومینیم Fe- Al bound P	محلول و تبادل Soluble and exchangeable P	فسفر - کلرید کلسیم P-CaCl ₂	فسفر- اولسن P-Olsen	
0.86**	0.49 ^{ns}	0.55 ^{ns}	0.56 ^{ns}	0.72**	0.75**	0.69**	غلظت Concentration
0.86**	-0.19 ^{ns}	0.82**	0.98**	0.96**	0.94**	0.96**	ماده خشک Dry matter
0.89**	-0.14 ^{ns}	0.83**	0.97**	0.96**	0.96**	0.95**	جذب Uptake

^{ns} و ^{**} به ترتیب عدم معنی دار بودن و معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد.

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

حالی که 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 بیش تر از کود شیمیایی پتاسیم دی هیدروژن فسفات بود. با توجه به معنی دارنشدن برهمکنش کود شیمیایی و لجن فاضلاب بر فسفر عصاره گیری شده با روش اولسن، نتایج نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب با تأثیر بر شکل های قابل جذب فسفر بر قابلیت استفاده آن در خاک مؤثر است.

سیاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد قدردانی می شود.

نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب به میزان چشم گیری فسفر قابل جذب را نسبت به کود شیمیایی پتاسیم دی هیدروژن فسفات افزایش داد. برهمکنش کود شیمیایی و لجن فاضلاب بر فسفر عصاره گیری شده با روش اولسن معنی دار نبود؛ اما مقدار فسفر عصاره گیری شده با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار تحت تأثیر برهمکنش کود شیمیایی و لجن فاضلاب قرار گرفت. کاربرد کود شیمیایی پتاسیم دی هیدروژن فسفات و لجن فاضلاب باعث افزایش شکل های فسفر در خاک شد. مطالعه کشت ذرت نشان داد که برهمکنش کود شیمیایی و لجن فاضلاب بر غلظت فسفر و ماده خشک ذرت معنی دار نبود؛ در

منابع

- 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.
- 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.
- 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.
- 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)
- Briceño, M., Escudey, M., Galindo, G., Borchardt, D., and Chang, A. 2004. Characterization of chemical phosphorus forms in volcanic soils using ³¹P-NMR spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 35: 1323-1337.
- 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.
- 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.
- Farshi, A.A., and Mirlatif, M. 2003. *On-Farm Irrigation Water Management*. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Pp: 148-150. (In Persian)
- 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., Rezajnejad, 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.



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

F. Shahbazi¹, A.R. Hosseinpour² and *H.R. Motaghian³

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University,

²Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University,

³Assistant 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 was not 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

Arci