

مقایسه اثر کاربرد لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر زیست‌فراهمی برخی عناصر غذایی در سه بافت یک خاک آهکی پس از برداشت اسفناج (*Spinacia oleracea* L.)

حمید رضا بوستانی^{۱*} و عبدالمجید رونقی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۴/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۶/۱۷)

چکیده

لجن فاضلاب به عنوان یک منبع حاوی عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف در تولید گیاهان زراعی و سبزی‌ها در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور مقایسه اثر کاربرد لجن فاضلاب با تیمار کود شیمیایی بر فراهمی بعضی عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف در سه بافت یک خاک آهکی پس از برداشت اسفناج، آزمایشی در شرایط گلخانه به صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل سطوح لجن فاضلاب (صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ گرم در کیلوگرم خاک) و فاکتور دوم بافت خاک (شنی، لوم شنی و لوم رسی) بود. یک تیمار کود شیمیایی نیز جهت مقایسه با لجن فاضلاب تهیه گردید. نتایج نشان داد که افزایش غلظت نیتروژن کل و فسفر قابل استفاده گیاه در تیمار لجن فاضلاب در هر سه بافت خاک به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار کود شیمیایی بود. اثر کاربرد لجن فاضلاب بر افزایش مقدار پتاسیم خاک‌ها در مقایسه با افزایش فسفر و نیتروژن خاک کمتر بود، که احتمالاً به دلیل وجود مقدار کم پتاسیم در لجن فاضلاب است. غلظت آهن، روی، مس و منگنز عصاره‌گیری شده توسط DTPA با افزایش سطوح لجن فاضلاب کاربردی در بافت‌های خاک مورد مطالعه به طور معنی‌داری افزایش یافت و نسبت به نمونه‌های خاک تیمار شده با کود شیمیایی به طور معنی‌داری بیشتر بود. با توجه به سطح فراهمی عناصر غذایی در خاک پس از برداشت اسفناج، به ویژه در سطوح بالای کاربرد لجن فاضلاب، نیاز به افزودن اکثر عناصر غذایی برای کشت بعدی نمی‌باشد. غلظت کادمیم و سرب عصاره‌گیری شده توسط DTPA در سه بافت خاک پس از برداشت گیاه قابل اندازه‌گیری نبود. بنابراین با توجه به ناچیز بودن غلظت کادمیم و سرب در لجن فاضلاب کاربردی، خطر آلودگی خاک‌ها به این عناصر بعید به نظر می‌رسد، هر چند در صورت کاربرد مکرر و افزودن سطوح بالای لجن فاضلاب، انجام آزمون خاک به منظور کنترل غلظت عناصر سنگین مانند کادمیم و سرب در خاک‌های تیمار شده پیشنهاد می‌شود. قبل از هر گونه توصیه کاربرد لجن فاضلاب، نتایج این تحقیق بایستی در شرایط مزرعه نیز تأیید گردد.

واژه‌های کلیدی: عناصر پرمصرف، عناصر کم‌مصرف، فلزات سنگین

مقدمه

کشاورزی افزوده می‌شود. انتظار می‌رود با افزایش و توسعه مراکز تصفیه فاضلاب، تولید لجن فاضلاب در سال‌های آتی بیشتر شود (۱۴). امروزه کاربرد زواید آلی به عنوان یک منبع

در جهان سالانه حدود ۳۰ میلیون تن لجن فاضلاب تولید می‌شود که بیش از ۷۰ درصد آن به عنوان کود به زمین‌های

۱. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hamidboostani@gmail.com

مواد و روش‌ها

مقدار کافی از خاک با میزان رس نسبتاً زیاد با نام فامیل Fine, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از سری خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در سال ۱۳۸۷ جمع‌آوری شد و با اضافه کردن مقادیر مختلف شن، سه نوع بافت شامل بافت سنگین (بدون افزودن شن)، بافت متوسط و بافت سبک تهیه شد. پس از عبور خاک از الک دو میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن به روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (جدول ۱). بافت خاک به روش هیدرومتری (۸)، ماده آلی با روش والکلی - بلک (۲۱)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع به وسیله هدایت سنج الکتریکی و پ-هاش در خمیر اشباع به وسیله پ-هاش متر، نیتروژن کل به روش کلدال (۹)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن و همکاران (۲۲)، غلظت عناصر کم مصرف کاتیونی (منگنز، مس، روی و آهن) و عناصر سنگین (کادمیم و سرب) به روش عصاره‌گیری با DTPA (۱۹) و قرائت با دستگاه جذب اتمی و پتاسیم به وسیله عصاره‌گیری با استات آمونیوم (۱۷) و قرائت توسط دستگاه شعله سنجی تعیین شد. لجن فاضلاب از تصفیه خانه شهرک صنعتی آب باریک فارس تهیه و پس از هوا خشک نمودن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و برخی خصوصیات شیمیایی آن همانند روش‌های تجزیه خاک اندازه‌گیری شد (جدول ۲). آزمایش در شرایط گلخانه (نور معادل ۴۰۰۰۰ لوکس، میانگین دمای روزانه و شبانه به ترتیب ۳۰ و ۲۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۵٪) به صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل پنج سطح لجن فاضلاب (صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ گرم در کیلوگرم) و سه بافت خاک (شنی، لوم شنی و لوم رسی) بود. یک تیمار کود شیمیایی نیز بر اساس نتایج آزمون خاک جهت مقایسه با اثر کاربرد لجن فاضلاب در افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی تهیه شد. برای مقایسه سطوح لجن فاضلاب با تیمار کود شیمیایی در هر بافت خاک از یک طرح کاملاً تصادفی با شش

آلی برای بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک بسیار معمول شده است. لجن فاضلاب نمونه‌ای از مواد آلی است که به عنوان یک منبع حاوی عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف برای رشد گیاه و هم‌چنین بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد (۶). افزودن لجن فاضلاب می‌تواند سبب افزایش ماده آلی خاک شود. بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک جهت رشد مطلوب گیاه و از طرف دیگر افزایش میزان عناصر غذایی مورد نیاز گیاه مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و عناصر کم مصرف با کاربرد لجن فاضلاب امکان‌پذیر است (۱۳). میزان مجاز کاربرد لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی بستگی به میزان عناصر سنگین مانند کادمیم و سرب موجود در لجن فاضلاب دارد (۲۴). بنابراین قبل از کاربرد لجن فاضلاب باید از میزان عناصر کم مصرف و عناصر سنگین موجود در لجن مطلع بود. مقدار عناصر موجود در لجن فاضلاب به نوع فاضلاب و مراحل تصفیه فاضلاب بستگی دارد. هر چند نیتروژن و فسفر فراوانترین عناصر موجود در لجن نیستند، ولی به دلیل مصرف زیاد این عناصر توسط گیاه حائز اهمیت هستند (۲۵). رضایی نژاد و افیونی (۲) گزارش کردند که افزودن لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت آهن، مس و روی عصاره‌گیری شده به وسیله EDTA در خاک و جذب این فلزات توسط کاهو و اسفناج گردید. عرفان منش (۳) گزارش کرد که افزودن لجن فاضلاب در سه سطح (صفر، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی) باعث افزایش غلظت کل عناصر آهن، روی، مس، منگنز، کادمیم، نیکل و سرب نمونه‌های خاک گردید. افزایش لجن کاربردی باعث افزایش معنی‌دار غلظت شکل قابل جذب (عصاره‌گیری شده توسط EDTA) فلزات گردید. به طوری که غلظت مس، نیکل و سرب تا دو برابر و غلظت روی تا شش برابر شاهد افزایش یافت. هدف از پژوهش حاضر مقایسه اثر کاربرد لجن فاضلاب با تیمار کود شیمیایی در سه بافت خاک آهکی بر فراهمی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، مس و روی در خاک پس از برداشت اسفناج بود.

جدول ۱. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در آزمایش

لوم رسی	لوم شنی	شنی	
۹/۵	۶/۵	۳	فسفر قابل استفاده (میلی گرم در کیلوگرم)
۷/۶۸	۷/۵۹	۷/۷۱	پ- هاش (گل اشباع)
۰/۴	۰/۴	۰/۶	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)
۲۰۰	۱۹۰	۸۲	پتاسیم قابل استفاده (میلی گرم در کیلوگرم خاک)
۲۷	۶۲	۹۰	شن (%)
۳۶	۲۲	۴	سیلت (%)
۳۷	۱۶	۶	رس (%)
۰/۸	۰/۶	۰/۰۱	ماده آلی (%)
۳۴	۲۲	۱۷	کربنات کلسیم معادل (%)
۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۰۵	نیتروژن کل (%)
قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی گرم در کیلوگرم)			
۶/۹	۶	۱/۸	منگنز
۰/۵۲	۰/۸	۰/۷	روی
۶/۳	۵/۵	۳/۶	آهن
۱/۹	۱/۱	۰/۶	مس
nd	nd	nd	کادمیم
nd	nd	nd	سرب

nd = non detectable = غیر قابل اندازه‌گیری

جدول ۲. برخی از خصوصیات شیمیایی لجن فاضلاب

۴۵۰۰	آهن کل (میلی گرم در کیلوگرم)
۱۴	کادمیم کل (میلی گرم در کیلوگرم)
۱۰۵	سرب کل (میلی گرم در کیلوگرم)
۲۵۳	سدیم (میلی گرم در کیلوگرم)
۱۹۵	پتاسیم (میلی گرم در کیلوگرم)
۳۵۰	منگنز کل (میلی گرم در کیلوگرم)
۳۰۵	مس کل (میلی گرم در کیلوگرم)
۴۳۲	روی کل (میلی گرم در کیلوگرم)
۷/۴۷	پ- هاش (۱:۵)
۷/۵۰	قابلیت هدایت الکتریکی (۱:۵) (دسی‌زیمنس بر متر)
۱/۳۶	نیتروژن کل (%)
۴/۳۷	نسبت کربن به نیتروژن
۲/۵	فسفر کل (%)

جدول ۳. اثر کاربرد لجن فاضلاب در بافت‌های مختلف خاک بر نیتروژن کل خاک (درصد وزنی)، فسفر و پتاسیم قابل استفاده (میلی گرم در کیلوگرم خاک) پس از برداشت اسفناج و مقایسه با تیمار کود شیمیایی

بافت خاک							سطح لجن فاضلاب (گرم در کیلوگرم خاک)	
							۸۰	۴۰
							۲۰	۱۰
							۰	میانگین
							کود شیمیایی	میانگین
نیتروژن کل	شنی	۰/۰۳۶ d(i) *	۰/۰۴۳ d(hi)	۰/۰۵۵ c(gh)	۰/۰۸۰ b(ef)	۰/۰۹۴ a(de)	۰/۰۶۱ C	۰/۰۵۰ c
	لوم شنی	۰/۰۶۱ e(g)	۰/۰۶۹ d(fg)	۰/۰۸۳ c(ef)	۰/۰۹۵ b(de)	۰/۱۲ a(c)	۰/۰۸۵ B	۰/۰۶۶ d
	لوم رسی	۰/۰۹۳ c(de)	۰/۱۰۴ c(cd)	۰/۱۱۸ c(c)	۰/۱۳۱ b(b)	۰/۱۸۲ a(a)	۰/۱۲۷ A	۰/۰۹۵ c
	میانگین	۰/۰۶۳ D	۰/۰۷۲ D	۰/۰۸۵ C	۰/۱۰۴ B	۰/۱۳۱ A		
فسفر	شنی	۱/۳۳ e(l) *	۱/۹۰ e(l)	۷/۵۳ d(j)	۱۴/۳۳ c(f)	۲۶/۷۳ a(c)	۱۱/۲۳ C	۲۲/۰۰ b
	لوم شنی	۶/۲۶ f(k)	۱۰/۰۰ e(h)	۱۶/۱۰ d(e)	۲۲/۵۰ c(d)	۳۰/۶۶ a(b)	۱۷/۱۰ B	۲۴/۵۶ b
	لوم رسی	۹/۰۰ f(i)	۱۲/۶۳ e(g)	۱۵/۳۳ d(e)	۲۳/۱۶ c(d)	۳۲/۶۶ a(a)	۱۸/۵۵ A	۲۶/۹۰ b
	میانگین	۵/۵۳ E	۸/۱۷ D	۱۲/۹۸ C	۲۰/۱۴ B	۳۰/۰۱ A		
پتاسیم	شنی	۸۱/۷ e(k) *	۸۹/۱ d(j)	۱۱۰/۶ c(i)	۱۱۹/۶ b(h)	۱۴۴/۵ a(g)	۱۰۹/۰ C	۷۹/۶۰ e
	لوم شنی	۱۸۹/۲ e(f)	۱۹۳/۸ d(e)	۲۱۲/۸ c(d)	۲۳۷/۰ b(c)	۲۵۷/۲ a(b)	۲۱۸/۰ B	۱۸۵/۸ e
	لوم رسی	۱۹۸/۷ e(e)	۲۱۴/۳ d(d)	۲۳۵/۵ c(c)	۲۶۰/۳ b(b)	۲۸۴/۲ a(a)	۲۳۸/۶ A	۴۱/۵۶ e
	میانگین	۱۵۶/۵ E	۱۶۵/۸ D	۱۸۶/۳ C	۲۰۵/۶ B	۲۲۸/۶ A		

* برای هر عنصر، در هر ردیف و ستون اعداد دارای حروف کوچک مشابه (داخل پرانتز) و در هر ردیف اعداد دارای حروف کوچک مشابه (خارج از پرانتز) از نظر آماری در سطح ۵٪ تفاوت معنی داری ندارند. اثرات اصلی با حروف بزرگ نشان داده شده است.

عناصر سنگین (کادمیم و سرب) به روش‌های ذکر شده برای خاک‌های پس از برداشت گیاه اندازه‌گیری شد. برای بررسی اثر تیمارهای لجن فاضلاب بر غلظت برخی عناصر کم مصرف و پرمصرف در خاک‌های پس از برداشت اسفناج، تجزیه آماری و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن، با استفاده از نرم‌افزار رایانه‌ای MSTATC و SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

کاربرد لجن فاضلاب سبب افزایش معنی دار نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده گیاه در هر سه بافت خاک شد و برهمکنش بین سطوح لجن و بافت خاک معنی دار بود ($P=0/05$) (جدول ۳ و ۴). افزایش نیتروژن کل در بافت‌های شنی، لوم شنی و لوم رسی در تیمار ۸۰ گرم لجن فاضلاب در کیلوگرم خاک به ترتیب معادل ۱۶۱، ۹۷ و ۹۶ درصد و در تیمار کود شیمیایی معادل ۴۰

تیمار و سه تکرار استفاده شد. تیمار کود شیمیایی شامل ۱۵۰ میلی گرم نیتروژن از منبع اوره و ۵۰ میلی گرم فسفر از منبع منوکلسیم فسفات، ۵ میلی گرم روی از کلات روی، ۵ میلی گرم آهن از کلات آهن، ۵ میلی گرم منگنز از سولفات منگنز و ۵ میلی گرم مس از سولفات مس، در کیلوگرم خاک بود که بر اساس نتایج آزمون خاک اضافه شد. بذره‌های اسفناج (*Spinosa olerace*) رقم Viroflay در عمق حدود دو سانتی متری خاک کاشته شد و حدود یک هفته پس از جوانه زنی به سه گیاه در هر گلدان کاهش داده شد. در طول دوره رشد، رطوبت گلدان‌ها در حد ظرفیت مزرعه توسط توزین روزانه نگه داشته شد. هشت هفته پس از کاشت، اندام هوایی گیاه برداشت شد و خاک گلدان‌ها پس از هوا خشک کردن برای تجزیه آزمایشگاهی استفاده شد. در آزمایشگاه، غلظت نیتروژن کل، فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده، عناصر کم مصرف کاتیونی (منگنز، مس، روی و آهن) و

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد لجن فاضلاب در بافت‌های مختلف خاک بر غلظت برخی عناصر
پر مصرف در خاک پس از برداشت اسفناج

منبع تغییرات	درجه آزادی	نیترژن کل (%)	فسفر (میلی گرم در کیلوگرم)	پتاسیم (میلی گرم در کیلوگرم)	میانگین مربعات
بافت خاک	۲	۰/۰۱۶**	۲۸۶/۶۷**	۷۲۵۰۴/۶۷**	
سطوح لجن فاضلاب	۴	۰/۰۰۷**	۸۷۸/۱۲**	۸۱۸۳/۷۳**	
برهمکنش بین سطوح لجن و بافت خاک	۸	۰/۰۰**	۴/۹۵**	۹۶/۰۹**	
خطا	۳۰	۰/۰۰۰	۰/۲۸۴	۰/۰۷۲	

** نشان دهنده معنی دار بودن در سطح احتمال ۱٪ است.

غلظت فسفر در بافت لوم رسی نسبت به بافت شنی ۶۵٪ بیشتر بود (جدول ۳). باور و بلک (۷) گزارش کردند که افزودن لجن فاضلاب به خاک مقدار فسفر قابل استفاده خاک را به طور معنی داری افزایش داد.

افزودن ۸۰ گرم لجن فاضلاب در کیلوگرم خاک در بافت‌های مورد مطالعه، میزان پتاسیم خاک را نسبت به تیمار شاهد به ترتیب معادل ۷۷، ۳۶ و ۴۳ درصد افزایش داد (جدول ۳). هر چند تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر افزایش مقدار پتاسیم خاک‌ها نسبت به افزایش فسفر و نیترژن کمتر بود، که به دلیل کم بودن میزان پتاسیم در لجن فاضلاب است (جدول ۳). پس از جدا شدن لجن فاضلاب از پساب، پتاسیم عمدتاً به صورت محلول در پساب باقی مانده و به همین دلیل میزان پتاسیم در لجن فاضلاب کم می‌باشد. مقدار پتاسیمی که با افزودن لجن فاضلاب به خاک اضافه می‌شود در خاک‌های مبتلا به کمبود پتاسیم اغلب تأمین کننده نیاز گیاه نیست و لازم است که کمبود پتاسیم از طریق افزودن منابع شیمیایی کود پتاسیمی جبران گردد (۱۱).

مقدار آهن عصاره‌گیری شده توسط DTPA در هر سه بافت خاک با افزایش کاربرد سطوح لجن فاضلاب به طور معنی داری افزایش یافت و برهمکنش بین سطوح لجن و بافت خاک معنی دار شد ($P=0/05$) (جدول ۵ و ۶). غلظت آهن عصاره‌گیری شده از ۳/۵۴، ۳/۸۲ و ۴/۱۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک در تیمار شاهد به ترتیب در بافت‌های مورد مطالعه به

۸ و ۲ درصد نسبت به تیمار بدون کاربرد لجن فاضلاب (تیمار شاهد) بیشتر بود (جدول ۳). بنابراین تأثیر لجن فاضلاب در افزایش نیترژن کل خاک به مراتب بیشتر از کود شیمیایی بود که نشان دهنده برتری لجن فاضلاب در تأمین این عنصر غذایی ضروری در خاک می‌باشد. مقایسه میانگین نیترژن کل در بافت‌های خاک نشان داد که نیترژن کل در بافت لوم رسی معادل ۲ برابر بافت شنی بوده است که عمدتاً به دلیل تفاوت در مقدار اولیه نیترژن خاک می‌باشد (جدول ۳). لجن فاضلاب به دلیل داشتن ماده آلی نسبتاً زیاد سبب افزایش نیترژن کل در خاک‌ها می‌شود. افزایش میزان نیترژن کل بر اثر کاربرد سطوح لجن فاضلاب در خاک‌ها توسط محققین مختلف گزارش شده است (۱۰، ۱۵ و ۲۶).

افزودن لجن فاضلاب (۸۰ گرم در کیلوگرم) به بافت‌های مورد مطالعه (شنی، لوم شنی و لوم رسی) به ترتیب میزان فسفر قابل جذب گیاه را از ۱/۳۳، ۶/۲۶ و ۹ میلی گرم در کیلوگرم خاک در شاهد به ۲۶/۷۳، ۳۰/۶۶ و ۳۲/۶۶ میلی گرم در کیلوگرم خاک افزایش داد که به ترتیب معادل ۲۰، ۵ و ۳/۵ برابر تیمار شاهد می‌باشد (جدول ۳). هر چند کاربرد کود شیمیایی نیز در هر سه بافت خاک سبب افزایش معنی داری در میزان فسفر قابل استفاده گردید، اما این افزایش به طور معنی داری کمتر از تیمار لجن فاضلاب بود (جدول ۳). مقایسه میانگین غلظت فسفر در سه بافت خاک نشان داد که

جدول ۵. اثر کاربرد لجن فاضلاب در بافت‌های مختلف خاک بر آهن، روی، منگنز و مس عصاره‌گیری شده توسط DTPA در خاک پس از برداشت اسفناج (میلی گرم در کیلوگرم) و مقایسه با تیمار کود شیمیایی

بافت خاک							سطح لجن فاضلاب (گرم در کیلوگرم خاک)	
							۸۰	۴۰
							۲۰	۱۰
							۰	میانگین
							۱۵/۵۶ A	۱۰/۵۹ B
							۷/۵۷ C	۵/۵۸ D
							۳/۸۲ E	
آهن	شنی	۳/۵۴ d(d)*	۵/۲۵ cd(g)	۷/۱۰ c(e)	۱۰/۷۶ b(c)	۱۳/۴۳ a(b)	۸/۰۱ C	۵/۰۷ cd
	لوم شنی	۳/۸۲ d(h)	۵/۶۹ cd(fg)	۸/۸۰ c(d)	۱۰/۷۶ b(c)	۱۷/۰۶ a(a)	۹/۲۲ A	۵/۸۰ cd
	لوم رسی	۴/۱۰ b(h)	۵/۸۲ b(fg)	۶/۸۱ b(ef)	۱۰/۲۵ a(c)	۱۶/۲۷ a(a)	۸/۶۵ B	۶/۸۲ b
	میانگین							
روی	شنی	۰/۷۲ e ^x	۱/۸۰ d	۳/۱۵ c	۶/۳۹ b	۱۰/۸۹ a	۴/۵۹ A	۱/۹۱ d
	لوم شنی	۰/۸۳ d	۲/۱۸ c	۲/۹۷ c	۵/۹۵ b	۱۰/۷۲ a	۴/۵۳ A	۳/۰۲ c
	لوم رسی	۰/۴۳ e	۲/۴۲ d	۳/۶۳ c	۵/۶۵ b	۱۰/۴۴ a	۴/۳۱ A	۳/۶۱ c
	میانگین	۰/۶۶ E	۲/۱۳ D	۳/۲۵ C	۵/۹۹ B	۱۰/۶۷ A		
منگنز	شنی	۱/۵۱ e(k)*	۱/۶۱ de(k)	۱/۹۴ d(j)	۲/۳۵ c(i)	۲/۹۸ a(h)	۲/۰۸ C	۲/۶۵ b
	لوم شنی	۶/۰۱ d(g)	۶/۳۹ cd(f)	۶/۹۹ c(e)	۷/۶۱ b(d)	۸/۷۸ a(b)	۷/۱۵ B	۷/۶۶ b
	لوم رسی	۶/۳۱ f(fg)	۷/۴۷ e(d)	۸/۵۶ cd(c)	۸/۸۶ c(b)	۱۰/۵۳ a(a)	۸/۲۹ A	۹/۷۰ b
	میانگین	۴/۶۱ E	۵/۱۶ D	۵/۷۳ C	۶/۲۷ B	۷/۴۳ A		
مس	شنی	۰/۵۴ d(g)*	۰/۹۵ c(ef)	۱/۰۲ b(def)	۱/۰۳ b(def)	۱/۱۵ a(d)	۰/۹۳ C	۰/۵۷ d
	لوم شنی	۰/۸۹ c(f)	۱/۰۱ bc(def)	۱/۰۷ b(de)	۱/۰۸ a(de)	۱/۴۰ a(e)	۱/۰۹ B	۰/۹۲ bc
	لوم رسی	۰/۹۵ c(ef)	۱/۱۱ b(de)	۱/۳۷ b(c)	۱/۵۶ a(b)	۲/۰۵ a(a)	۱/۴۰ A	۱/۲۲ bc
	میانگین	۰/۷۹ D	۱/۰۵ C	۱/۱۵ B	۱/۲۲ B	۱/۵۳ A		

* برای هر عنصر، در هر ردیف و ستون، اعداد دارای حروف کوچک مشابه (داخل پرانتز) و در هر ردیف اعداد دارای حروف کوچک مشابه (خارج از پرانتز) از نظر آماری در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند. اثرات اصلی با حروف بزرگ نشان داده شده است.

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد لجن فاضلاب در بافت‌های مختلف خاک بر غلظت عناصر کم مصرف عصاره‌گیری شده توسط DTPA در خاک پس از برداشت اسفناج (میلی گرم در کیلوگرم خاک)

میانگین مربعات					منبع تغییرات
مس	منگنز	روی	آهن	درجه آزادی	
۰/۸۶**	۱۶۴**	۰/۰۳**	۵/۶۸ **	۲	بافت
۰/۶۶**	۱۰/۵۷**	۱۳۱/۸۱**	۱۹۱/۹۲**	۴	سطوح لجن فاضلاب
۰/۰۷۸**	۰/۷۷**	۰/۳۲ ^{ns}	۲/۵۱**	۸	برهمکنش بین سطوح لجن و بافت خاک
۰/۰۰۸	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۴۱	۳۰	خطا

** و ns به ترتیب نشان دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱٪ و بدون اختلاف معنی‌دار است.

۱۳/۴۳، ۱۷/۰۶ و ۱۶/۲۷ میلی گرم در کیلوگرم خاک در تیمار ۸۰ گرم لجن فاضلاب در کیلوگرم خاک رسید. کاربرد کود شیمیایی نیز سبب افزایش مقدار آهن نسبت به تیمار شاهد در هر سه بافت خاک شد، ولی این افزایش معنی دار نبود (جدول ۵). هم چنین مقایسه میانگین آهن عصاره گیری شده توسط DTPA در سه بافت خاک نشان داد که غلظت آهن بر اثر کاربرد لجن فاضلاب در بافت لوم شنی ۱/۱۵٪ نسبت به بافت شنی بیشتر بود (جدول ۵). افیونی (۵) مشاهده کرد که مقدار آهن قابل جذب با افزایش سطوح لجن فاضلاب در یک خاک آهکی افزایش یافته است. به طور کلی می توان گفت که مواد آلی با تشکیل کلات با آهن حالیت آنرا در خاک بالا می برند (۱۶). هم چنین نقش لجن در کاهش پ- هاش خاک نیز می تواند بر افزایش قابلیت جذب آهن خاک (ظرفیت بافری کم) مؤثر باشد. علاوه بر این، وجود مقدار قابل توجه آهن در لجن فاضلاب کاربردی سبب افزایش آهن قابل جذب گیاه شده است (جدول ۲).

کاربرد لجن فاضلاب سبب افزایش معنی دار روی عصاره گیری شده توسط DTPA در هر سه بافت خاک شد. اما برهمکنش بین سطوح لجن و بافت خاک معنی دار نبود (جدول ۵). مقدار روی قابل عصاره گیری توسط DTPA در بافت های مورد مطالعه به ترتیب از ۰/۷۲، ۰/۸۳ و ۰/۴۳ میلی گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۰/۸۹، ۱۰/۷۲ و ۱۰/۴۴ میلی گرم در کیلوگرم خاک در تیمار ۸۰ گرم لجن فاضلاب در کیلوگرم خاک رسید که به ترتیب معادل ۱۵، ۱۳ و ۲۴ برابر تیمار شاهد بود. میزان افزایش روی عصاره گیری شده توسط DTPA در بافت های مورد مطالعه در تیمار کود شیمیایی نسبت به لجن فاضلاب به مراتب کمتر بود (جدول ۵). هم چنین مقایسه میانگین روی عصاره گیری شده توسط DTPA در سه بافت خاک نشان داد که تفاوت معنی داری بین سه بافت در غلظت روی بر اثر کاربرد لجن فاضلاب وجود نداشت (جدول ۵). تحقیقات کلباسی و همکاران (۱۶) نشان داد که در خاک های آهکی، روی به صورت کربنات روی رسوب کرده و از دسترس

گیاه خارج می شود. به همین دلیل کمبود روی یکی از مشکلات اساسی تغذیه گیاه در خاک های آهکی بوده و به نظر می رسد کاربرد لجن فاضلاب بتواند تا حدود زیادی در رفع این کمبود مؤثر باشد. لیندسی (۱۸) نشان داد که پ- هاش اثر زیادی بر قابلیت جذب روی در خاک ها داشته و با افزایش هر واحد پ- هاش، ۱۰۰ برابر از غلظت روی محلول کاسته می شود.

مقدار منگنز قابل عصاره گیری توسط DTPA با افزایش کاربرد سطوح لجن فاضلاب در هر سه بافت خاک افزایش یافت و برهمکنش بین سطوح لجن و بافت خاک نیز معنی دار بود ($P=0/05$) (جدول ۵ و ۶). به نحوی که در تیمار ۸۰ گرم لجن فاضلاب در بافت های مورد مطالعه به ترتیب معادل ۹۷، ۴۶ و ۶۶/۵ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد داشت. تیمار کود شیمیایی نیز در هر سه بافت خاک سبب افزایش معنی دار غلظت منگنز قابل عصاره گیری توسط DTPA شد. مقدار افزایش منگنز قابل استفاده در تیمار حداکثر لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار کود شیمیایی در بافت های مورد مطالعه نسبت به تیمار شاهد به طور معنی داری بیشتر بود (جدول ۵). مقایسه میانگین منگنز قابل عصاره گیری توسط DTPA در سه بافت خاک، نشان داد که غلظت منگنز در بافت لوم رسی ۴ برابر بافت شنی بود (جدول ۵). افزایش غلظت منگنز قابل جذب همراه با افزایش کاربرد سطوح لجن فاضلاب توسط محققین دیگر گزارش شده است (۱، ۳ و ۱۸).

با افزایش کاربرد سطوح لجن فاضلاب مقدار مس قابل عصاره گیری توسط DTPA در هر سه بافت خاک به طور معنی داری افزایش یافت و برهمکنش بین سطوح لجن و بافت خاک نیز معنی دار بود ($P=0/05$) (جدول ۵ و ۶)، به طوری که غلظت مس به ترتیب در بافت های مورد مطالعه از ۰/۵۴، ۰/۸۹ و ۰/۹۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک در تیمار شاهد به ۱/۴۰ و ۲/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک در تیمار حداکثر کاربرد لجن فاضلاب رسید که به ترتیب معادل ۵۷، ۱۱۳ و ۱۱۶ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد بود. تیمار کود شیمیایی نیز سبب افزایش غلظت مس قابل عصاره گیری توسط DTPA در

بافت‌های مورد مطالعه شد ولی این افزایش معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین مس قابل عصاره‌گیری توسط DTPA در اثر کاربرد لجن فاضلاب در سه بافت خاک نشان داد که غلظت مس در بافت لوم رسی نسبت به بافت شنی معادل ۵۰٪ بیشتر است (جدول ۵). لو و کریستی (۲۰) عقیده دارند که در خاک‌های آهکی فراهمی عناصر کم مصرف مانند مس برای گیاهان کم می‌باشد و به عنوان یکی از راه‌های افزایش این عنصر در خاک استفاده از کودهای آلی مانند لجن فاضلاب را پیشنهاد می‌کند. محققین مختلفی افزایش مقدار مس قابل جذب در خاک‌ها را بر اثر افزون لجن فاضلاب گزارش کرده‌اند (۳، ۱۲ و ۲۳).

کادمیم و سرب عصاره‌گیری شده توسط DTPA در هر سه بافت خاک در تیمار شاهد و سطوح لجن فاضلاب و تیمار کود شیمیایی کمتر از حد کشف دستگاه جذب اتمی بود.

نتیجه‌گیری

با توجه به سطح فراهمی عناصر غذایی در خاک پس از

برداشت اسفناج، به ویژه در سطوح بالای لجن فاضلاب (۴۰ و ۸۰ گرم)، نیاز به افزودن اکثر عناصر غذایی برای کشت بعدی نمی‌باشد. هر چند در بافت شنی احتمالاً نیاز به افزودن برخی عناصر مانند نیتروژن و فسفر تکمیلی در سطح کمتر لجن کاربردی وجود دارد. غلظت عناصر غذایی کم مصرف حتی در کمترین سطح لجن فاضلاب کاربردی بیشتر از حد بحرانی گزارش شده است. تأمین عناصر غذایی کم مصرف، به ویژه آهن و روی، در خاک‌های آهکی با کاربرد لجن فاضلاب حائز اهمیت است. با توجه به ناچیز بودن غلظت کادمیم و سرب در لجن فاضلاب کاربردی، خطر آلودگی خاک به این عناصر دور از انتظار است؛ هر چند در صورت کاربرد مکرر، به ویژه در سطوح بالای لجن فاضلاب کاربردی، انجام آزمون خاک به منظور اطمینان از عدم تجمع و آلودگی خاک به کادمیم و سرب پیشنهاد می‌شود. آثار باقی مانده لجن فاضلاب و غلظت عناصر غذایی در کشت‌های بعدی نیز باید مورد ارزیابی قرار گیرد. قبل از هر گونه توصیه لجن فاضلاب، نتایج این پژوهش در شرایط مزرعه نیز بایستی مورد تأیید قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

۱. خیامباشی، ب. ۱۳۷۶. اثر استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود در آلاش و انباشت عناصر سنگین در خاک و گیاه. پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۶۹ صفحه.
۲. رضایی نژاد، ی. و م. افیونی. ۱۳۷۹. اثر مواد آلی بر خواص شیمیایی، جذب عناصر به وسیله ذرت و عملکرد آن. علوم و فنون کشاورزی ۴: ۱۹-۲۹.
۳. عرفان منش، م. ۱۳۷۶. اثر تیمارهای لجن بر برخی خصوصیات خاک و جذب و تراکم عناصر سنگین به وسیله اسفناج و گوجه‌فرنگی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۵۶ صفحه.
۴. بوستانی، ح. م. و ع. م. رونقی. ۱۳۹۰. مقایسه اثر کاربرد لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر عملکرد و غلظت برخی عناصر غذایی در گیاه اسفناج (*Spinosa olerace L.*) در سه بافت یک خاک آهکی. مجله علوم و فنون کشت گلخانه‌ای ۲(۶): ۶۵-۷۳.
5. Afyuni, M. 1986. Extractability of iron, zinc and cadmium in sludge amended calcareous soil. MSc. Thesis, New Mexico State University, Las Cruces, USA.
6. Baran, A., G. Cayci, C. Kutak and R. Hartmann. 2001. The effect of grape mare as growing medium on growth of hypotases plant. Biorece. Technol. 78: 103-106.
7. Bauer, A. and A. L. Black. 1992. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 252-257.
8. Bouyoucos, C. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron. J. 54: 464-465.
9. Bremner, J. M. 1996. Nitrogen-total. PP. 1085-1122. In: Sparks et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 3, 3rd

- Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
10. Brown, S. L., R. L. Chaney, J. S. Angle and J. A. Rayan. 1998. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils. *J. Environ. Qual.* 27: 1071-1078.
 11. Bramryd, T. 2002. Impact of sewage sludge application on the long term nutrient balance in soils of scots pine (*Pinus sylvestris*, L.) forests. *Water, Air and Soil Pollution* 140: 381-399.
 12. Chaney, R. L. 1973. Crop and food chain effects of toxic elements in sludge and effluents. In: *Recycling municipal sludges and effluents on land*, Nat. Assoc. St. Univ. and Land Grant College, Washington DC, pp. 129-141.
 13. Coker, E. J. and P. J. Mathew. 1983. Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture. *Water Sci. Res.* 15: 209-222.
 14. Hassan, D. and M. M. Mishra. 1994. Influence of Cd on carbon and nitrogen mineralization in sewage sludge amended soils. *Environ. Pollut.* 84: 285-290.
 15. Hyun, H., A. C. Chang, D. R. Parker and A. L. Page. (1988). Cadmium solubility and phytoavailability in sludge treated soil: Effects of soil organic carbon. *J. Environ. Qual.* 17: 329-334.
 16. Kalbasi, M., J. G. Racz and L. A. Lewen-Rudger. 1978. Reaction products and solubility of applied zinc compounds in some Manitoba soils. *Soil Sci.* 25: 55-64.
 17. Knudsen, D., G. A. Peterson and P. F. Pratt. 1982. Lithium, sodium and potassium. PP. 225-246. In: Page, A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*, Am. Soc. Agron., Madison, WI.
 18. Lindsay, W. L. 1976. *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley and Sons, New York.
 19. Lindsay, W. L., and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-448.
 20. Luo, Y. M., and P. Chirstie. 1998. Bioavailability of copper and zinc in soil treated with alkaline stabilized sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 27: 335-342.
 21. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 961-1010. In: Sparks et al. (Eds.), *Method of Soil Analysis, Part 3*, 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
 22. Olsen, S. R. C., V. Cole, F. S. Watanable and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Cir. 939, US Govern. Printing Office, Washington, DC.
 23. Silveria, D. J. and L. E. Sommers. 1977. Extractability of copper, zinc, cadmium and lead in soils incubated with sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 6: 47-52.
 24. Sims, J. T. and J. S. Kline. 1991. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 20: 387-395.
 25. Sommers, L.E., D. W. Nelson and K. J. Yost. 1976. Variable nature of chemical composition of sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 5: 303-306.
 26. Sloan, J. J., R. H. Dowdy and M. S. Dolan. 1998. Recovery of biosolids-applied heavy metals sixteen years after application. *J. Environ. Qual.* 27: 1312-1317.