

مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲ شماره های ۳ و ۴ صفحه های ۱۲۵ تا ۱۴۲ (۱۳۸۰)

## اثر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در گیاهان کاهو و اسفناج در خاک های با pH متفاوت<sup>۱</sup>

### EFFECT OF SEWAGE SLUDGE ON HEAVY METAL CONCENTRATIONS OF SPINACH AND LETTUCE IN SOILS WITH DIFFERENT PH

سکینه وانقی، حسین شریعتمداری، مجید افیونی و مصطفی میلی<sup>۲</sup>

#### چکیده

استفاده از لجن فاضلاب در کشاورزی به عنوان منبع عناصر غذایی گیاهی در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مشکلاتی که با استفاده از لجن فاضلاب همراه است فراهم کردن مقادیر زیاد فلزات سنگین قابل دسترس برای گیاه و در نتیجه افزایش جذب آن ها به وسیله گیاه است. در این تحقیق تاثیر لجن فاضلاب بر جذب عناصر غذایی کم مصرف و فلزات سنگین به وسیله اسفناج و کاهو و همچنین عملکرد این گیاهان در خاک های با pH متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه انجام شد. تیمارها شامل چهار سطح لجن فاضلاب، صفر یا شاهد (S<sub>0</sub>)، ۵۰ (S<sub>1</sub>)، ۱۰۰ (S<sub>2</sub>) و ۲۰۰ (S<sub>3</sub>) تن در هکتار و یک سطح کود شیمیایی (F) شامل ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات دی آمونیوم و ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار در چهار خاک، لنگرود (pH=۴/۸)، لاهیجان (pH=۵/۷)، رشت (pH=۶/۸) و اصفهان (pH=۷/۹) برای دو گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) و کاهو (*Lactuca sativa*) در سه تکرار اعمال شدند. تاثیر لجن فاضلاب بر عملکرد گیاهان بسته به نوع خاک متفاوت بود. بیشترین عملکرد کاهو و اسفناج در خاک رشت در تیمار ۲۰۰ کیلوگرم لجن در هکتار و در خاک های اصفهان و لاهیجان در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار لجن و در خاک لنگرود در تیمار ۵۰ کیلوگرم در هکتار لجن مشاهده گردید. لجن فاضلاب باعث افزایش معنی دار غلظت فلزات آهن، زنی، مس، سرب و کادمیم در اندام هوایی و ریشه گیاهان شد، به طوری که غلظت برخی از عناصر در گیاهان رشد کرده در سطوح بالای لجن فاضلاب در خاک های لنگرود و لاهیجان، با توجه به استانداردهای تعیین شده به حد سمیت رسید. این پدیده می تواند به دلیل اسیدی بودن این خاک ها و حلالیت بالای فلزات در این خاک ها باشد. بنابراین

تاریخ پذیرش: ۸۰/۱۱/۴

۱- تاریخ دریافت: ۸۰/۸/۱۹

۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه خاکشناسی و استادیار گروه باغبانی دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، جمهوری اسلامی ایران.

#### واثقی و همکاران

می توان نتیجه گیری کرد که در صورت استفاده صحیح از لجن فاضلاب خصوصاً با توجه به pH خاک می توان از پتانسیل کودی این ماده در باروری خاک بهره برد.

واژه های کلیدی: لجن فاضلاب، فلزات سنگین، عناصر کم مصرف، اسفناج و کاهو.

#### مقدمه

لجن فاضلاب به عنوان کود آلی از دیر باز جایگاه ویژه ای در کشاورزی داشته و استفاده از آن برای تامین عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف گیاهی و مواد آلی خاک مورد توجه بوده است. لجن فاضلاب حاوی عناصر پرمصرف شامل نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر کم مصرف شامل آهن، روی، منگنز و مس می باشد. ارزش کودی لجن فاضلاب در تحقیقات مختلف نشان داده شده است (۲، ۹، ۱۲، ۱۴، ۲۵). از سوی دیگر با افزایش جمعیت و تولید روزافزون لجن فاضلاب، از نظر زیست محیطی مطمئن ترین راه پیشگیری از انباشته شدن این ماده افزودن آن به زمین های کشاورزی است.

علیرغم اثرات مفید لجن فاضلاب، استفاده از این ماده دارای خطرات بالقوه ای است که باید قبل از ارزش کودی و اقتصادی آن مورد ارزیابی قرار گیرد. یکی از مواردی که باید به آن توجه خاص شود وجود فلزات سنگین در لجن فاضلاب است. لجن فاضلاب اغلب دارای مقادیر نسبتاً زیادی فلزات سنگین نظیر کادمیم، سرب و نیکل می باشد. کاربرد مکرر لجن فاضلاب باعث تجمع این عناصر در خاک شده و می تواند مسائلی از قبیل سمیت گیاهان و صدمه به ریزجانداران خاک و یا انتقال عناصر سمی به زنجیره غذایی انسان را موجب گردد (۸، ۱۱، ۱۸، ۲۱).

افیونی و همکاران (۱) در تحقیقی که به مدت ۲ سال در اصفهان انجام شد مشاهده کردند مقدار جذب مس، روی و سرب به وسیله کاهو و اسفناج با افزایش سطح لجن فاضلاب افزایش یافته است. مطالعات برتی و همکاران<sup>۱</sup> (۵) نشان داد که عناصر آهن، روی، مس و منگنز در خاک های تحت تیمار لجن فاضلاب به حد سمیت برای گیاهان افزایش یافت. دیویس<sup>۲</sup> (۸) گزارش کردند که در بین عناصر سنگین، روی و کادمیم تمایل زیاد به انباشت در بافت های گیاهی داشته و مقدار این دو عنصر در گیاه تابعی از تعداد دفعات اضافه کردن لجن فاضلاب به خاک و مقدار کل این دو عنصر در خاک می باشد.

رفتار فلزات سنگین اضافه شده به خاک از طریق لجن فاضلاب تحت تاثیر عوامل مختلفی است که از مهمترین آنها می توان به pH خاک اشاره کرد. اسمیت<sup>۳</sup> (۲۳) گزارش کرد که رسوب عناصر به صورت هیدروکسیدها و کربنات های

اثر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در گیاهان کاهو و اسفناج...

نامحلول و کمپلکس های آلی با افزایش pH خاک، افزایش می یابد. بنابراین قابلیت دسترسی عناصر سنگین خاک برای گیاهان در pH پایین نسبت به pH بالا بیشتر است. فلزاتی مثل کادمیم و روی به راحتی با اسیدی شدن خاک متحرک می شوند، به طوری که روی تا حد سمیت می رسد و کادمیم نیز از مقدار مجاز آن در محصولات گیاهی تجاوز می کند (۱۵). با افزایش هر واحد pH تقریباً ۱۰۰ بار از حلالیت روی کاسته می شود (۱۶). در یک تحقیق انجام شده در سه نمونه خاک آهکی، خنثی و اسیدی نشان داده شده که افزودن لجن فاضلاب به خاک اسیدی باعث سمیت فلزات سنگین در گیاه چغندر قند شده است (۲۷). جان و همکاران<sup>۱</sup> (۱۰) pH را عاملی موثر در جذب کادمیم ناشی از لجن فاضلاب توسط گیاه می داند. سایر متخصصان عقیده دارند که سمیت عناصر سنگین می تواند نتیجه استفاده از مقادیر زیاد لجن فاضلاب باشد اما بالا بودن pH خاک می تواند تا حدود زیادی از بروز سمیت جلوگیری کند (۶، ۱۲، ۲۸). همچنین استریت و همکاران<sup>۲</sup> (۲۶) در تحقیقی مشاهده کردند که با افزایش pH خاک از ۵/۷ به ۷/۸، غلظت کادمیم گیاه ذرت ۷۰ درصد کاهش یافت که این کاهش ناشی از افزایش جذب کادمیم روی سطح کلوئید های خاک و یا رسوب ترکیب های کادمیم دار بوده است. بنابراین پیش از توصیه کاربرد لجن فاضلاب لازم است که حد آستانه سمیت برای هر فلز بسته به نوع گیاه و نوع خاک و شرایط محیطی مکان کاربرد لجن تعیین گردد و مقادیر کاربرد لجن بر اساس آن معرفی شود. در ایران تحقیقات کمی در مورد اثر افزایش لجن فاضلاب در خاک و تاثیر pH خاک بر جذب عناصر سنگین به وسیله گیاه انجام گرفته است. هدف از اجرای این تحقیق بررسی تاثیر کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت تعدادی از عناصر کم مصرف و سنگین در گیاهان کاهو و اسفناج در تعدادی از خاک های با pH متفاوت بود.

## مواد و روش ها

این تحقیق در سال ۱۳۷۹ در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. خاک های مورد آزمایش با تاکید بر داشتن pH متفاوت از استان های اصفهان و گیلان به ترتیب از مناطق لورک اصفهان، رشت، لاهیجان و لنگرود در استان گیلان انتخاب شدند. پس از تعیین محل نمونه برداری، نمونه های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر سطح خاک برداشت شده و به محل انجام تحقیق انتقال یافتند. لجن فاضلاب مورد استفاده از تصفیه خانه شاهین شهر اصفهان تهیه شد که از نوع هضم شده به صورت بیهوازی بود. لجن بعد از مرحله نهایی تصفیه فاضلاب کاملاً خشک و شکننده شده بود.

ابتدا نمونه های خاک و لجن جهت تعیین تعدادی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مورد تجزیه قرار گرفتند. pH نمونه های خاک و لجن در گل اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع به روش های معمول اندازه گیری شد. فسفر قابل جذب به روش اولسن و سومرز<sup>۱</sup> (۱۹)، پتاسیم قابل جذب توسط استات آمونیوم (۱۳) عصاره گیری گردید. غلظت فسفر و پتاسیم به ترتیب به وسیله دستگاه رنگ سنجی (اسپکترو فتومتر هیتاچی مدل ۲۰-۲۰۰) و شعله سنجی (فیلم فتومتر مدل ۴۱۰) تعیین شد. مواد آلی خاک با استفاده از روش والکی و بلاک و نیتروژن کل خاک ها به وسیله دستگاه کدال اندازه گیری شد. علاوه براین، غلظت قابل جذب عناصر Cd و Pb, Zn, Cu, Fe در لجن فاضلاب به وسیله DTPA ۰/۰۰۵ نرمال و غلظت کل این عناصر به وسیله هضم لجن فاضلاب به وسیله اسید نیتریک غلیظ، اسید کلریدریک ۷۰ درصد و آب اکسیژنه ۳۰ درصد عصاره گیری شد (۲۹). سپس غلظت عناصر مذکور در عصاره های حاصل توسط دستگاه جذب اتمی مدل پرکین المر ۳۰۳۰ تعیین شد.

در مرحله بعد طی یک آزمایش گلدانی اثرات کاربرد لجن با استفاده از آزمایش فاکتوریل ۵×۴×۲ در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. تیمارهای مورد آزمایش عبارت بودند از: لجن فاضلاب، شامل سطوح صفر یا شاهد (S<sub>0</sub>)، ۵۰ (S<sub>1</sub>)، ۱۰۰ (S<sub>2</sub>) و ۲۰۰ (S<sub>3</sub>) تن در هکتار و نیز یک سطح کود شیمیایی ۲۵۰ کیلو گرم فسفات دی آمونیوم در هکتار و ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار (به صورت سرک) (F)، خاک، شامل خاک های رشت، لنگرود، لاهیجان و اصفهان و گیاه، شامل کاهو<sup>۲</sup> و اسفناج<sup>۳</sup>.

لجن فاضلاب یا کود شیمیایی در مقادیر ذکر شده به هر سری خاک جداگانه اضافه شده و داخل گلدان های پلاستیکی (با ظرفیت تقریبی ۳ کیلو گرم خاک) شماره گذاری شده ریخته شد. به این ترتیب برای هر تیمار از هر سری خاک ۶ گلدان آماده گردید که به هر گیاه ۲ گلدان اختصاص داده شد. داخل هر گلدان تعداد ۱۰ بذر گیاه کاهو یا اسفناج کشت شد. پس از استقرار گیاهان، تعداد بوته ها به چهار عدد تنک گردید.

در طول دوره رشد گیاهان، عملیات آبیاری و وجین علف های هرز با دست انجام شد. آبیاری گلدان ها با آب شهر تقریباً هر ۲ الی ۴ روز یک بار انجام گرفت. هر هفته یکبار نیز گلدان ها کاملاً جابه جا شدند تا تمام گیاهان در شرایط محیطی (نور، گرما) یکسان قرار گیرند. برای تیمار کود شیمیایی (F) در اواسط دوره رشد گیاهان از کود اوره به صورت سرک استفاده شد و برای بقیه گیاهان از هیچ نوع کود شیمیایی استفاده نشد. در این آزمایش سموم آفت کش نیز به کار نرفت.

اثر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در گیاهان کاهو و اسفناج...

برداشت گیاهان در مراحل ۴ تا ۵ برگی (۴۵ روز بعد از کاشت) صورت گرفت. پس از برداشت نمونه های گیاهی عملکرد و وزن تر آن ها با توزین بخش اندام هوایی و ریشه به طور جداگانه تعیین گردید. سپس نمونه ها در آون تهویه دار در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده، وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان نیز جداگانه اندازه گیری شد. برای تعیین غلظت آهن، مس، روی، سرب و کادمیم در اندام هوایی و ریشه گیاهان، ابتدا نمونه های گیاهی پودر شده و برای هضم آن ها از روش اکسیداسیون تر با استفاده از اسید نیتریک غلیظ، اسیدکلریدریک ۷۰ درصد و آب اکسیژنه ۳۰ درصد استفاده شد (۲۹). سپس غلظت عناصر مذکور در عصاره های حاصل، به وسیله دستگاه جذب اتمی پراکین المر ۳۰۳۰ اندازه گیری شد. آنالیز آماری نتایج با استفاده از نرم افزار SAS و مقایسه میانگین ها به روش دانکن (NDMRT) انجام گردید.

## نتایج و بحث

### خصوصیات خاک ها

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. این خاک ها از لحاظ pH و سایر خصوصیات از قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد مواد آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم با یکدیگر تفاوت دارند.

### خصوصیات لجن فاضلاب

بعضی از ویژگی های شیمیایی لجن فاضلاب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. لجن مورد استفاده دارای حدود ۲۷ درصد ماده آلی است که می تواند باعث بهتر شدن خواص فیزیکی و شیمیایی خاک گردد. pH لجن فاضلاب به علت وجود اسیدهای آلی در آن، اسیدی است. مقدار عناصر غذایی لجن مخصوصاً نیتروژن، فسفر و پتاسیم نیز قابل توجه بوده و می تواند نیاز گیاه را تأمین کند. غلظت عناصر کم مصرف و سنگین موجود در لجن (جدول ۳) در محدوده معرفی شده برای لجن فاضلاب نقاط مختلف دنیا می باشد (۲۰).

### تأثیر لجن فاضلاب بر عملکرد اسفناج

عملکرد وزن خشک اندام هوایی اسفناج در خاک رشت متناسب با افزایش سطح لجن فاضلاب افزایش نشان داد که این افزایش برای همه تیمارها معنی دار شده است (جدول ۴). دلیل اصلی این پدیده را می توان وجود مقادیر نسبتاً زیاد مواد آلی و عناصر غذایی پرمصرف گیاهی شامل نیتروژن، فسفر و پتاسیم در لجن فاضلاب دانست. در خاک های لنگرود، لاهیجان و اصفهان نیز وزن خشک اندام هوایی اسفناج در همه سطوح لجن فاضلاب نسبت به شاهد افزایش یافت. ولی تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک لنگرود و تیمار ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک های لاهیجان و اصفهان نسبت به سطوح کمتر لجن

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد آزمایش<sup>†</sup>.

Table 1. Physical and chemical properties of different soils<sup>†</sup>.

منطقه نمونه برداری (Sampling region)	رده بندی خاک (Soil classification)	بافت (Texture)	pH	Ece (ds m <sup>-1</sup> )	مواد آلی (OM) (%)	CEC (mol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	نیتروژن (%)	فسفر (P) (mg kg <sup>-1</sup> )	پتاسیم (K) (mg kg <sup>-1</sup> )
Rasht	Calic Argiudolls	Clay Loam	6.8	1.4	2.5	31.6	0.28	120	190
Langeroud	Typic Hapludults	Sandy clay loam	4.8	1.0	1.9	14.5	0.15	65	150
Lahijan	Typic Hapludults	Clay loam	5.7	1.0	1.0	19.5	0.20	47	230
Isfahan	Typic Haplargids	Clay	7.9	3.0	0.6	13.4	0.09	35	245

<sup>†</sup> Data are mean of three samples.

<sup>†</sup> ارقام میانگین سه نمونه می باشند.

واتقی و همکاران

Table 2. Chemical properties of used sewage sludge<sup>†</sup>.

جدول ۲. خواص شیمیایی لجن فاضلاب مورد استفاده<sup>†</sup>.

خصوصیت Properties	pH	Ece (ds m <sup>-1</sup> )	مواد آلی (OM) (%)	نیتروژن (N) (%)	فسفر (P) (%)	پتاسیم (K) (%)
مقدار Amount	6.5	13.5	26.8	3.8	0.62	0.23

<sup>†</sup> Data are mean of three samples.

<sup>†</sup> ارقام میانگین سه نمونه می باشند.

اثر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در گیاهان کاهو و اسفناج...

جدول ۳- غلظت عناصر کم مصرف و فلزات سنگین (میلی گرم در کیلو گرم) موجود در لجن فاضلاب.

Table 3. Concentration of micronutrient and heavy metals (mg kg<sup>-1</sup>) in sewage sludge.

محدوده غلظت کل در لجن فاضلاب نقاط مختلف دنیا	قابل جذب <sup>†</sup>	کل	عنصر	
Total for the world	Available	Total	Element	
2-3520	2.4	60.5	Ni	نیکل
3-3410	0.2	4.3	Cd	کادمیم
58-19730	18.0	160.0	Pb	سرب
3-18	0.8	12.0	Co	کوبالت
58-7100	41.7	375.0	Mn	منگنز
85-10100	5.7	450.0	Cu	مس
108-27800	99.0	1090.0	Zn	روی
1000-153000	89.7	11910.0	Fe	آهن

† Extracted by DTPA

† عصاره گیری شده با DTPA

جدول ۴- عملکرد وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان (گرم در گلدان) در تیمارهای مختلف.

Table 4. Dry weight of plants shoots and roots (g pot<sup>-1</sup>) in different treatments.

خاک Soil	تیمار Treatment	اسفناج Spinach		کاهو Lettuce	
		اندام هوایی Shoot	ریشه Root	اندام هوایی Shoot	ریشه Root
رشت Rasht	S <sub>0</sub>	0.95d	0.09c	1.48e	0.07d
	S <sub>1</sub>	2.37b	0.26a	3.52c	0.19c
	S <sub>2</sub>	3.28a	0.28a	4.80b	0.35b
	S <sub>3</sub>	3.68a	0.29a	5.38c	0.41a
	F	1.35c	0.14b	2.46d	0.15c
لنگرود Langaroud	S <sub>0</sub>	0.80c	0.08c	2.08c	0.11c
	S <sub>1</sub>	2.14a	0.23a	4.36a	0.32a
	S <sub>2</sub>	1.95a	0.18b	3.83a	0.17b
	S <sub>3</sub>	1.01b	0.11c	2.64b	0.14b
	F	1.31b	0.11c	2.60b	0.15b
لاهیجان Lahijan	S <sub>0</sub>	1.03c	0.09b	2.43d	0.20d
	S <sub>1</sub>	1.99a	0.20a	5.10b	0.40b
	S <sub>2</sub>	2.20a	0.23a	6.07a	0.51a
	S <sub>3</sub>	1.35bc	0.10b	5.20b	0.41b
	F	1.61ab	0.11b	3.01c	0.32c
اصفهان Isfahan	S <sub>0</sub>	0.92d	0.09c	1.00d	0.13a
	S <sub>1</sub>	2.29b	0.19b	1.96c	0.15a
	S <sub>2</sub>	3.13a	0.26a	3.81a	0.18a
	S <sub>3</sub>	2.39b	0.25a	2.42b	0.17a
	F	1.65c	0.15b	2.26bc	0.14a

† In each column for each soil, means with the same letter are not different (P≤0.05).

† در هر خاک و در هر ستون، میانگین هایی که دارای حروف یکسان هستند، در سطح 5% فاقد تفاوت معنی دار می باشند.

فاضلاب، اثر کمتری بر عملکرد وزن خشک اندام هوایی اسفناج داشته اند؛ که دلیل آن احتمالاً جذب نسبتاً زیاد برخی فلزات توسط گیاه در این تیمار (سرب و روی در خاک لنگرود و روی در خاک لاهیجان) و همچنین افزایش شوری خاک ( خاک اصفهان) می باشد. تیمار کود شیمیایی در همه خاک ها نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان داد ولی این افزایش کمتر از تیمارهای لجن فاضلاب بود. روند تغییرات وزن خشک ریشه اسفناج نیز تقریباً مشابه اندام هوایی بود. افیونی و همکاران (۱) در تحقیقی گزارش کردند که افزایش لجن فاضلاب به خاک باعث افزایش عملکرد کاهو و اسفناج شده است.

### تاثیر لجن فاضلاب بر عملکرد کاهو

وزن خشک اندام هوایی کاهو در خاک رشت با افزایش سطح لجن فاضلاب روند افزایشی نشان داد، به طوری که مقدار آن در تیمار ۲۰۰ تن لجن در هکتار به حدود ۴ برابر شاهد رسید. در خاک های لنگرود، لاهیجان و اصفهان، گیاه کاهو عکس العملی همانند اسفناج نشان داده است. یعنی در خاک لنگرود بیشترین عملکرد در تیمار ۵۰ تن لجن در هکتار و در خاک های لاهیجان و اصفهان بیشترین عملکرد در تیمار ۱۰۰ تن لجن در هکتار به دست آمد. با توجه به این که کاهو از گیاهان حساس به شوری می باشد (۲)، بالا رفتن شوری خاک ها در سطوح بالای لجن فاضلاب می تواند دلیل عملکرد کمتر گیاه نسبت به سطوح کمتر لجن فاضلاب باشد. سیمونی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۲) نیز در نتایج تحقیق خود استفاده از مقادیر زیاد لجن فاضلاب را موجب کم شدن عملکرد گیاهانی چون کاهو و یولاف دانسته اند که دلیل آن را افزایش بیش از حد شوری خاک مطرح کرده اند. در مورد وزن خشک ریشه کاهو، روند تغییرات همانند اندام هوایی بوده است.

مقایسه عملکرد وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان در تیمارهای لجن فاضلاب با تیمار کود شیمیایی، مؤثر تر بودن لجن فاضلاب را در افزایش عملکرد گیاهان نسبت به کود شیمیایی نشان می دهد (جدول ۴)، این تفاوت عملکرد ممکن است به خاطر اثر مطلوب مواد آلی بر خواص فیزیکی خاک باشد. کلینگ و همکاران (۱۲) گزارش کردند که افزایش لجن فاضلاب در سطح ۱۵ تن در هکتار باعث افزایش عملکرد محصول چاودار شد. آنان نشان دادند که غلظت نیتروژن و فسفر در بافت گیاه با افزایش لجن فاضلاب به طور مشخص زیاد شد که می تواند دلیل افزایش عملکرد باشد. تحقیقات به عمل آمده بیانگر این است که عملکرد گیاه با افزایش لجن فاضلاب به خاک بستگی به کیفیت لجن و غلظت عناصر کم مصرف و فلزات سنگین موجود در آن و نیز گونه گیاهی دارد (۷):



### غلظت عناصر کم مصرف و فلزات سنگین در اسفناج و کاهو

آهن. غلظت آهن در اندام هوایی اسفناج در خاک های لنگرود و لاهیجان متناسب با افزایش سطح لجن فاضلاب افزایش یافت (جدول ۵) که این افزایش در خاک لاهیجان بین تمام سطوح لجن معنی دار شد. در خاک لنگرود فقط تیمار های ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسب به شاهد افزایش معنی دار نشان دادند. در خاک اصفهان نیز کاربرد لجن فاضلاب نسبت به شاهد تفاوت معنی داری ایجاد کرد. گر چه تفاوت سطح ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به سطوح ۵۰ و ۱۰۰ تن لجن در هکتار معنی دار نگردید. در خاک رشت افزایش غلظت آهن در اندام هوایی اسفناج در تیمار ۵۰ و ۱۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی دار شده است.

غلظت آهن در ریشه اسفناج نیز با افزایش سطح لجن فاضلاب برای همه خاک ها افزایش یافت. در خاک اصفهان تمام سطوح لجن فاضلاب نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان دادند. در خاک های رشت، لنگرود و لاهیجان نیز افزایش غلظت آهن ریشه در سطوح ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ تن در هکتار لجن نسبت به شاهد معنی دار شد گر چه بین تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار این خاک ها و نیز بین تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ تن لجن در هکتار خاک لنگرود این تفاوت معنی دار نشد. غلظت آهن در اندام هوایی کاهو در همه خاک ها متناسب با افزایش سطح لجن فاضلاب افزایش نشان داد (جدول ۶). این افزایش در خاک اصفهان بین همه تیمارهای لجن فاضلاب معنی دار شد. در خاک لنگرود و لاهیجان نیز تمام سطوح لجن نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان دادند و در خاک رشت این افزایش در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار مشاهده شد.

غلظت آهن در ریشه کاهو نیز در خاک های لنگرود و اصفهان با افزایش سطح لجن فاضلاب تا ۲۰۰ تن در هکتار افزایش نشان داد. این افزایش در هر دو خاک در تمام سطوح لجن نسبت به شاهد معنی دار شد. در خاک های رشت و لاهیجان نیز لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت آهن در ریشه کاهو شد. تیمار کود شیمیایی با شاهد از نظر جذب اندام هوایی در هیچ یک از خاک ها و از نظر جذب آهن در ریشه به جز در خاک لاهیجان برای کاهو تفاوت معنی دار نشان نداد.

همانطور که مقایسه گروهی منعکس در جدول ۷ نشان می دهد بیشترین جذب آهن توسط گیاهان در خاک لنگرود و کمترین مقدار آن در خاک اصفهان صورت گرفت و تفاوت مقدار جذب آهن به وسیله گیاهان بین خاک لنگرود و لاهیجان معنی دار نبود ولی این خاک ها افزایش معنی داری نسبت به خاک های رشت و اصفهان نشان دادند (جدول ۷). این تفاوت متناسب با pH خاک ها بود و گیاهان در خاک های با pH کمتر (جدول ۱)، آهن بیشتری را جذب کردند. تفاوت غلظت آهن در اندام هوایی کاهو و اسفناج، معنی دار نشد (جدول ۷). حد معمول غلظت آهن در گونه های مختلف گیاهی ۷۵۰ میلی گرم در کیلو گرم معرفی شده است، که به این نکته در توصیه برای استفاده از لجن فاضلاب بایستی دقت شود.

جدول 5- غلظت فلزات (میلی گرم در کیلو گرم) در اندام هوایی و ریشه گیاه اسفناج در تیمارهای مختلف.

Table 5. Metal concentration in spinach shoots and roots ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) in different treatments.

خاک	Soil	تیمار	آهن		روی		مس		Cu		سرب		کادمیوم	
			اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
راشت	Rasht	S <sub>0</sub>	Shoot	645c	57.0d	47.0cd	6.5c	10.1d	18.8c	25.5c	1.2b	1.5c		
			Root	683a	99.5b	48.5c	6.5c	12.3c	23.5a	29.3a	2.3a	2.5b		
			F	670ab	104.3a	55.5b	9.5d	13.8b	20.8b	27.5b	2.8a	3.0a		
		S <sub>3</sub>	Shoot	645bc	80.8b	60.5a	11.5a	15.6a	20.1b	27.0b	2.6a	2.8ab		
			Root	638bc	69.0c	46.0d	5.5c	10.3d	18.1c	28.0b	1.3b	1.7c		
			F	793b	88.5c	91.3d	9.0c	10.5d	16.8c	36.0b	1.8b	2.0c		
		S <sub>1</sub>	Shoot	877a	101.1b	114c	11.0b	14.0c	20.5b	37.0b	2.8a	2.6b		
			Root	925a	112.1ab	14.1b	69.0b	14.5a	17.1b	27.6a	3.1a	3.4a		
			F	1088a	129.4a	154a	74.5a	16.0a	20.6a	28.8a	3.2a	3.4a		
S <sub>2</sub>	Shoot	805b	87.0c	90.0d	49.0d	7.0d	9.3d	20.8b	34.5c	1.8b	2.3bc			
	Root	672d	79.0c	78.6d	50.5c	10.5c	12.3d	27.8c	30.0c	1.3c	1.7c			
	F	822c	86.0b	104c	58.0d	13.5ab	15.1c	29.1b	31.0b	2.3b	2.5b			
لاهیجان	Lahijan	S <sub>2</sub>	Shoot	918b	102.0a	12.5b	65.0a	12.5b	17.3b	31.8a	31.0c	2.8a	2.8ab	
			Root	975a	107.0a	138a	65.5a	15.0a	19.6a	30.0ab	32.0a	3.0a	3.2a	
			F	640d	71.5c	80.5d	45.5d	10.0c	11.8d	20.0d	30.0c	1.3c	1.8c	
اصفهان	Isfahan	S <sub>0</sub>	Shoot	410c	51.0d	48.0d	42.5c	9.0b	10.8c	17.3a	29.5a	1.0c	1.5c	
			Root	476b	66.2c	59.5c	47.0b	10.0b	12.1b	16.8a	28.5ab	2.3a	2.5b	
			F	519a	71.8b	67.6b	55.0a	12.0a	14.8a	17.0a	27.5b	2.6a	3.0a	
اصفهان	Isfahan	S <sub>3</sub>	Shoot	490ab	74.5a	87.0a	52.0a	11.5a	15.1a	17.8a	27.5b	1.8b	3.0a	
			Root	438c	49.0d	43.5e	37.5c	8.5b	11.8b	13.8b	30.0a	1.1c	1.5c	
			F	438c	49.0d	43.5e	37.5c	8.5b	11.8b	13.8b	30.0a	1.1c	1.5c	

† In each column for each soil, means with the same letter are not significantly different ( $P \leq 0.05$ ).

‡ در هر خاک و در هر ستون، میانگین هایی که دارای حروف یکسان هستند، در سطح 5٪ فاقد تفاوت معنی دار می باشند.

واکنشی و همکاران  
انگورود

جدول ۶- غلظت فلزات (میلی گرم در کیلو گرم) در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو در تیمارهای مختلف.  
Table 6. Metal concentration in lettuce shoots and roots ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) in different treatments.

Soil خاک	Treatment تیمار	Fe آهن		Zn روی		Cu مس		Pb سرب		Cd کادمیم	
		Shoot اندام هوایی	Root ریشه	Shoot اندام هوایی	Root ریشه	Shoot اندام هوایی	Root ریشه	Shoot اندام هوایی	Root ریشه	Shoot اندام هوایی	Root ریشه
رشت Rasht	S <sub>0</sub>	517b <sup>†</sup>	735c	45.3cd	44.5d	7.0c	9.8c	31.8c	35.5b	1.5c	2.0b
	S <sub>1</sub>	425c	971b	48.5c	47.5c	10.5b	10.3c	34.0b	36.8ab	1.8bc	3.0ab
	S <sub>2</sub>	682a	1089a	61.0b	56.0b	12.0a	12.3b	37.3a	38.1a	2.0ab	3.5a
	S <sub>3</sub>	652a	1047a	82.1a	59.0a	13.0a	15.3a	35.3b	38.8a	2.3a	3.5a
	F	513b	765c	42.1d	40.0d	7.5c	8.6d	27.0b	34.8b	1.6bc	1.9b
لنگرود Langaroud	S <sub>0</sub>	750d	865c	83.8c	52.5c	9.5c	11.0d	37.1d	39.0c	2.3b	2.5c
	S <sub>1</sub>	825bc	1040b	102b	62.0b	13.5b	14.1c	43.5c	44.5b	2.8b	3.0bc
	S <sub>2</sub>	838b	1122b	123a	72.5a	15.5a	17.3b	46.5b	48.0a	3.3a	3.5b
	S <sub>3</sub>	920a	1225a	120a	66.0b	15.0a	19.0a	48.6a	48.5a	3.8a	4.2a
	F	790cd	894c	65.8d	50.0c	10.0c	10.0d	35.0e	39.5c	2.3b	2.1c
لاهیجان Lahijan	S <sub>0</sub>	813c	820c	52.0c	49.0c	10.0c	9.8d	34.0b	32.0d	2.3b	2.5b
	S <sub>1</sub>	943b	943b	88.8b	57.0b	12.0b	11.8c	35.5b	35.6c	2.5b	3.5a
	S <sub>2</sub>	1063a	1265a	91.0b	63.5a	14.0a	15.1b	42.3a	38.8b	2.8b	3.0ab
	S <sub>3</sub>	1025ab	1251a	114a	65.0a	14.5a	17.1a	41.1a	42.1a	3.3a	3.5a
	F	825c	950b	49.0c	50.5c	10.5bc	10.8d	34.8b	30.5e	2.3b	2.5b
اصفهان Isfahan	S <sub>0</sub>	392d	477b	48.8c	37.5d	8.0c	9.6c	28.1b	30.1c	1.8a	2.0b
	S <sub>1</sub>	525c	619a	56.5b	44.5c	9.5b	11.5b	26.3c	28.8d	2.1a	3.0a
	S <sub>2</sub>	580b	693a	46.5c	57.3a	11.5a	14.0a	30.6a	31.6b	2.3a	3.0a
	S <sub>3</sub>	623a	697a	70.1a	50.5b	12.0a	15.3a	31.3a	33.5a	2.0a	2.0b
	F	335d	455b	30.8d	41.5cd	9.0bc	9.3c	28.8b	27.3d	1.8a	2.5ab

† In each column for each soil, means with the same letter are not significantly different ( $p \leq 0.05$ ).

† در هر خاک و در هر ستون، میانگین هایی که دارای حروف یکسان هستند، در سطح 5٪ فاقد تفاوت معنی دار می باشند.

جدول ۷- نتایج مقایسه های گروهی میانگین غلظت عناصر در اندام هوایی گیاهان (میلی گرم در کیلو گرم).

Table 7. Group comparison of element concentration in plant shoots ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).

موارد مقایسه	آهن Fe	روی Zn	مس Cu	Pb سرب	Cd کادمیم
<b>Soil خاک:</b>					
Rasht رشت	605b	64.1c	8.9c	26.7b	1.96c
Langaroud لنگرود	861a	108.5a	12.1a	32.5a	2.75a
Lahijan لاهیجان	870a	92.1b	12.2a	32.7a	2.41b
Isfahan اصفهان	464c	54.2d	9.9b	22.9c	1.91c
<b>Fertilizer کود:</b>					
S <sub>0</sub>	621d	63.1d	8.7d	26.5c	1.66c
S <sub>1</sub>	697c	80.4c	10.8c	28.8b	2.29b
S <sub>2</sub>	755b	91.5b	12.5b	31.8a	2.77a
S <sub>3</sub>	802a	105.7a	13.6a	31.7a	2.79a
F	623d	57.7e	8.5d	24.8b	1.73c
<b>Plant گیاه:</b>					
اسفناج Spinach	698a	88.4a	10.6a	21.9b	2.15b
کاهو Lettuce	702a	71.0b	11.1a	35.5a	2.47a

† In each column for each factor, means with the same letter are not significantly different ( $P \leq 0.05$ ).

† در هر ستون و در هر مورد، میانگین هایی که دارای حروف یکسان هستند، در سطح ۵٪ فاقد تفاوت معنی دار می باشند.

**روی.** غلظت روی در اندام هوایی اسفناج با افزایش سطح لجن در خاک ها (به جز برای ۲۰۰ کیلو گرم در هکتار خاک رشت) افزایش نشان داد (جدول ۵). این افزایش در همه خاک ها در تمام سطوح لجن فاضلاب نسبت به شاهد معنی دار گردید و تیمار های لجن فاضلاب نیز در این خاک ها تفاوت معنی دار نشان دادند.

غلظت روی در ریشه اسفناج نیز متناسب با افزایش سطح لجن در خاک ها افزایش یافت که این افزایش در خاک های لاهیجان و اصفهان در تمام سطوح لجن فاضلاب نسبت به شاهد معنی دار شد ولی در خاک های رشت و لنگرود این افزایش فقط در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی دار گردید.

اثر تیمارهای لجن فاضلاب بر غلظت روی در گیاه کاهو (جدول ۶) نشان می دهد که غلظت روی در اندام هوایی کاهو در خاک های رشت و لاهیجان متناسب با افزایش سطح لجن تا ۲۰۰ تن در هکتار افزایش یافت این افزایش در خاک لاهیجان و لنگرود در تمام سطوح لجن فاضلاب، در خاک رشت در سطوح ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن و در خاک اصفهان در تیمارهای ۵۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی دار شد. در خاک لاهیجان بین تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ تن لجن در هکتار و در خاک لنگرود بین تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار تفاوت معنی داری مشاهده نشد.

غلظت روی در ریشه کاهو در خاک های رشت و لاهیجان با افزایش سطح لجن تا ۲۰۰ تن در هکتار افزایش نشان داد. این افزایش در هر دو خاک در تمام سطوح لجن نسبت به شاهد معنی دار گردید. در خاک های لنگرود و اصفهان نیز

تیمارهای لجن نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان دادند ولی تیمار ۲۰۰ تن لجن در هکتار این دو خاک نسبت به تیمار ۱۰۰ تن لجن در هکتار اثر کمتری بر غلظت روی در ریشه کاهو نشان داد.

با توجه به این که حد معمول غلظت روی در گونه های مختلف گیاهی ۲۷ تا ۱۵۰ و حد سمی آن ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی گرم در کیلو گرم وزن خشک می باشد (۲۰)، مقدار روی در اندام هوایی اسفناج در همه تیمارهای لجن فاضلاب در خاک لنگرود و در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک لاهیجان به حد سمیت رسید. از طرف دیگر مقایسه گروهی تیمارها نشان داد که جذب روی در اندام هوایی اسفناج نسبت به کاهو بیشتر است (جدول ۷). این مطلب نظر پیس و جونز<sup>۱</sup> (۲۰) مبنی بر این که اسفناج از گیاهان تجمع دهنده روی می باشد را تأیید می کند. جذب روی به وسیله گیاهان در خاک های مختلف تفاوت معنی دار نشان داد و بیشترین جذب روی در هر دو گیاه در خاک لنگرود صورت گرفت (جدول ۷). بیشتر بودن غلظت روی در گیاهان (حد سمیت) در خاک های اسیدی نسبت به خاک های آهکی، توشط والدرز و همکاران<sup>۲</sup> (۲۷) نیز گزارش شده است. دلیل این امر بالا بودن حلالیت روی در خاک های اسیدی می باشد (۳)، که خاک لنگرود نیز بین چهار خاک آزمایش شده کمترین pH را دارا می باشد.

مس. افزایش سطح لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت مس در اندام هوایی اسفناج شد (جدول ۵). این افزایش در خاک های لنگرود و لاهیجان در تمام سطوح لجن فاضلاب و در خاک های رشت و اصفهان در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی دار گردید. غلظت مس در ریشه اسفناج نیز در همه خاک ها در تمام سطوح لجن نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان داد و فقط بین تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک اصفهان تفاوت معنی داری مشاهده نشد.

اثر تیمارهای لجن فاضلاب بر غلظت مس در کاهو (جدول ۶) نشان می دهد که غلظت مس در اندام هوایی کاهو در هر ۴ نوع خاک در تمام سطوح لجن فاضلاب نسبت به شاهد افزایش معنی داری نشان داد. بین تیمار کود شیمیایی و شاهد در این خاک ها تفاوت معنی داری مشاهده نشد. تیمار کود شیمیایی در خاک های لاهیجان و اصفهان با تیمار ۵۰ تن لجن در هکتار نیز تفاوت معنی دار نشان نداد.

روند افزایشی غلظت مس در ریشه کاهو نیز مشاهده گردید. این افزایش در تمام خاک ها برای تمام سطوح لجن فاضلاب (به جز ۵۰ تن لجن در هکتار خاک رشت) نسبت به شاهد معنی دار شد. تیمار کود شیمیایی و شاهد در همه خاک ها فاقد تفاوت معنی دار بودند و بین تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک اصفهان نیز تفاوت معنی داری مشاهده نشد.

دو گیاه کاهو و اسفناج تفاوت معنی داری در جذب مس نشان ندادند ولی تفاوت بین خاک ها در جذب مس توسط گیاهان معنی دار گردید و بیشترین جذب مس در خاک های لنگرود و لاهیجان صورت گرفت (جدول ۷)، این یافته ها می تواند به دلیل بیشتر بودن غلظت مس قابل جذب خاک های اسیدی نسبت به خاک های غیر اسیدی باشد (۴، ۷، ۲۴).

با توجه به این که حد معمول غلظت مس در گونه های مختلف گیاهی بین ۵ تا ۳۰ و حد سمی آن ۲۰ تا ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک می باشد (۲۰)، غلظت مس فقط در ریشه اسفناج در تیمار ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک لنگرود به حد سمیت رسید.

سرب: غلظت سرب در اندام هوایی اسفناج در خاک لنگرود با افزایش سطح لجن فاضلاب افزایش نشان داد که این افزایش در تمام سطوح نسبت به شاهد معنی دار شد. در خاک های رشت و لاهیجان نیز افزایش لجن فاضلاب باعث افزایش سرب در اندام هوایی اسفناج گردید. لیکن در خاک اصفهان تیمارهای لجن فاضلاب تاثیری بر غلظت سرب در اندام هوایی اسفناج نداشت که دلیل آن احتمالاً وجود pH بالا در این خاک می باشد که باعث رسوب سرب و جلوگیری از جذب آن به وسیله گیاه شده است.

افزایش لجن فاضلاب در هر سه سطح در خاک های لاهیجان و رشت موجب افزایش سرب در ریشه اسفناج نسبت به شاهد گردید. در خاک لنگرود این افزایش تنها در ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی دار شد. در خاک اصفهان، غلظت سرب ریشه اسفناج با افزایش مقدار ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد کاهش معنی دار نشان داد. در این مورد شاید بتوان اظهار نظر نمود که حضور سایر فلزات از جمله مس با غلظت قابل توجه در این تیمارها با جذب سرب در سطح ریشه رقابت نموده و غلظت آن را کاهش داده است. از طرفی کاهش غلظت سرب ریشه در تیمار کود شیمیایی مشاهده نشد که می تواند مؤید این نکته باشد.

لجن فاضلاب اثر معنی دار بر غلظت سرب در اندام هوایی کاهو داشت (جدول ۶) و غلظت آن در خاک های رشت و لنگرود در تمام سطوح لجن فاضلاب و در خاک های لاهیجان و اصفهان در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان داد. روند افزایشی غلظت سرب در ریشه کاهو نیز مشاهده شد. در خاک های لنگرود و لاهیجان، تمام سطوح فاضلاب و در خاک های رشت و اصفهان تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان دادند.

با توجه به این که حد معمول غلظت سرب در گونه های مختلف گیاهان ۵ تا ۱۰ و حد سمی آن ۲۰ تا ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک است (۲۰)، مقدار سرب در اندام هوایی اسفناج در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک لاهیجان و در اندام هوایی کاهو در خاک های رشت، لاهیجان و لنگرود به حد سمیت رسید.

اثر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در گیاهان کاهو و اسفناج...

مقایسه های گروهی (جدول ۷) نشان داد که جذب سرب در اندام هوایی کاهو نسبت به اسفناج، افزایش معنی دار نشان داد و بیشترین جذب سرب توسط گیاهان در خاک لنگرود و لاهیجان صورت گرفت. دلیل آن اسیدی بودن این خاک ها و خلالت بیشتر سرب در آنهاست که قابلیت جذب بیشتری برای گیاهان پیدا کرد و دلیل جذب کم سرب توسط گیاهان در خاک اصفهان، pH بالای این خاک می باشد. رسوب عناصر به صورت هیدروکسید ها و کربنات های نامحلول و کمپلکس های آلی با افزایش pH خاک افزایش می یابد. بنابراین قابلیت دسترسی فلزات برای جذب شدن توسط گیاهان در pH پایین نسبت به pH بالا بیشتر است (۴، ۱۶، ۲۲).

**کادمیم.** تیمارهای لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت کادمیم در اندام هوایی اسفناج شده است (جدول ۵)، به طوری که مقدار آن در همه خاک ها در تمام سطح لجن فاضلاب نسبت به شاهد افزایش نشان داد. البته در خاک لنگرود و رشت بین تیمارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار و در خاک لاهیجان بین تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار تفاوت معنی دار مشاهده نشد. در خاک اصفهان نیز تفاوت بین تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ تن لجن در هکتار این خاک معنی دار نگردید. تیمار کود شیمیایی و شاهد نیز در همه خاک ها فاقد تفاوت معنی دار بودند.

غلظت کادمیم در ریشه اسفناج نیز با افزودن لجن فاضلاب افزایش نشان داد که این افزایش برای کلیه سطوح لجن فاضلاب در همه خاک ها در مقایسه با شاهد معنی دار شد، ولی بین تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار در همه خاک ها تفاوت معنی داری مشاهده نشد. تیمار کود شیمیایی نیز در هیچ یک از خاک ها تفاوت معنی داری با شاهد نشان نداد.

غلظت کادمیم در اندام هوایی کاهو در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک های رشت و لنگرود و در تیمار ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک لاهیجان نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان داد (جدول ۶). در خاک اصفهان تاثیر تیمارهای لجن فاضلاب بر غلظت کادمیم در اندام هوایی کاهو معنی دار نشد.

غلظت کادمیم ریشه کاهو در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک های رشت و لنگرود و تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ تن لجن در هکتار خاک اصفهان و تیمارهای ۵۰ و ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک لاهیجان نسبت به شاهد افزایش معنی دار نشان داد. با توجه به این که حد سمی غلظت کادمیم در گیاهان بین ۵ تا ۳۰ میلی گرم در کیلو گرم وزن خشک می باشد (۲۰)، غلظت کادمیم در هر دو گیاه در همه خاک ها زیر حد سمیت بود.

نتایج مقایسه های گروهی نشان داد که جذب کادمیم در اندام هوایی کاهو نسبت به اسفناج افزایش معنی دار نشان داد (جدول ۷). به طور کلی کاهو و اسفناج از گیاهان تجمع دهنده کادمیم می باشند (۸، ۲۰). گیاهان در خاک لنگرود نسبت به خاک های دیگر مقدار کادمیم بیشتری را جذب کردند و در خاک های با pH بالاتر جذب کادمیم کمتری توسط گیاهان صورت گرفته است (جدول ۷). این کاهش می تواند ناشی از افزایش جذب کادمیم روی کلونیدهای خاک و یا رسوب

کاتی-های کادمیم دار باشد (۷، ۱۷، ۲۶). افزایش غلظت کادمیم با افزایش لجن فاضلاب به خاک در تحقیقات متعدد گزارش شده است (۴، ۷، ۱۰، ۱۱، ۲۴، ۲۸).

## نتیجه گیری

- ۱- لجن فاضلاب مورد استفاده با دارا بودن ۳/۸ درصد نیتروژن، ۰/۶۲ درصد فسفر و ۰/۲۳ درصد پتاسیم باعث افزایش عملکرد گیاهان شده است که نشان می دهد این ماده سهم مهمی در حاصلخیزی خاک داشته است.
- ۲- تأثیر لجن فاضلاب بر عملکرد گیاهان بسته به نوع خاک متفاوت بود. تیمار ۲۰۰ تن لجن در هکتار خاک رشت و ۵۰۰ تن لجن در هکتار خاک لنگرود و نیز تیمار ۱۰۰ تن لجن در هکتار خاک لاهیجان و اصفهان بیشترین عملکرد وزن خشک گیاهان کاهو و اسفناج را داشته اند، که این نتایج می تواند به طور تقریبی حد مجاز کاربرد لجن در خاک ها را برای این دو گیاه تحت شرایط این آزمایش نشان دهد. لازم به ذکر است که این آزمایش باید در شرایط مزرعه تکرار شود.
- ۳- افزایش لجن فاضلاب به خاک باعث افزایش غلظت عناصر در ریشه و اندام هوایی گیاهان شد، به طوری که مقادیر بالای آن در برخی از خاک ها باعث رسیدن غلظت برخی از عناصر به حد سمیت گردید، که می تواند دلیلی برای کاهش عملکرد گیاهان در این تیمارها نسبت به سطوح کمتر لجن فاضلاب در این خاک ها باشد.
- ۴- با توجه به این که جذب فلزات سنگین به وسیله گیاهان در خاک های اسیدی (خاک لنگرود و لاهیجان) به دلیل حلالیت بالای فلزات در این خاک ها نسبت به خاک های غیر اسیدی (خاک رشت و اصفهان) بیشتر بوده است، توصیه می شود از به کاربردن سطوح بالای لجن فاضلاب (۱۰۰ و ۲۰۰ تن در هکتار) در خاک های اسیدی تر خودداری شود.
- ۵- به هر حال لازم به یاد آوری است که این پژوهش بایستی در مزرعه تکرار و در طی چند سال اثرات تجمعی استفاده از لجن فاضلاب از هر جهت بررسی گردد.

## REFERENCES

## منابع

۱. افیونی، م.، ی. رضایی نژاد، وب. خیام باشی. ۱۳۷۷. اثر لجن فاضلاب بر عملکرد و جذب فلزات سنگین به وسیله کاهو و اسفناج. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۳۰-۱۹:۱.
۲. عرفان منش، م. ۱۳۷۶. اثر تیمارهای لجن فاضلاب بر برخی خصوصیات خاک و جذب و تراکم عناصر به وسیله اسفناج و گوجه فرنگی. پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.



4. Basta, N.T. and J.J. Sloan. 1999. Bioavailability of heavy metals in strongly acidic soils with exceptional quality biosolids. *J. Environ. Qual.* 28:633-638.
5. Berti, W.R. and L. W. Jacobs. 1996. Chemistry and phytotoxicity of soil trace elements from repeated sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.* 25:1025-1032.
6. Bierman, P.M. and J. Rosen. 1994. Sewage sludge incinerator ash effects on soil chemical properties and growth of lettuce and corn. *Soil Sci. Plant Anal.* 25:2409-2437.
7. Cunningham, J.D., J.A. Ryan, and D.R. Keeney. 1975. Phytotoxicity and metal uptake from soil treated with metal amended sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 4:422-428.
8. Davis, R.D. 1984. Cadmium in sludge used as fertilizer. *Environ. Protec. Direct.* 40:117-126.
9. Hyun, H., A.C. Chang, D.R. Parker and A.L. Page. 1988. Cd solubility and phytoavailability in sludge-treated soil: Effect of soil organic carbon. *J. Environ. Qual.* 27:329-334.
10. John, M.K., C.J. Valaerhoven and H.H. Chuah. 1972. Factors effecting plant uptake and phytotoxicity of Cd assed to soils. *Environ. Sci. Techn.* 6: 1005-19009.
11. Kabata, P. and A.H. Pendias. 1992. Trace element in soil and plants. 2nd edition, New York.
12. Kelling, K. A., A. E. Peterson, L.M. Waldh, J.A. Ryan and D.R. Keeney. 1977. A field study of the agricultural use of sewage sludge: Effect of crop yield and uptake of N and P. *J. Environ. Qual.* 6:339-343.
13. Knudsen, D. and G.A. Peterson. 1990. Lithium, sodium, and potassium. In: A.L. Page. (eds.), *Methods of soil analysis. Part2.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, U.S.A. 225-246.
14. Korte, N.E., J. Skopp, W. Fuller, E.E. Nieble and B.A. Alesh. 1974. Trace element movement in soil: Influence of soil physical and chemical properties. *Soil Sci.* 122:350-359.
15. Krebs, R., S.K. Gupta and R. Sehulin. 1998. Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge-amended soils. *J. Environ. Qual.* 27:18-23.
16. Lindsay, W.I. 1992. *Chemical equalibria in soils.* John Wiley and Sons, New York, NY, U.S.A.
17. McBride, M.B. 1995. Toxic metals accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulation protective?. *J. Environ. Qual.* 24:5-18.
18. McGrath, S.P., F.J. Zhao, S.J. Dunham, A.R. Crosland and K. Coleman. 2000. Long-term changes in the extractability and bio availability of zinc and cadmium after sludge application. *J. Environ. Qual.* 29:815-883.
19. Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1990. Phosphorus. pp. 403-431. In: A. L. Page. (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9, A.S.A, Madison, WI, U.S.A.
20. Pais, I.J., and B. Jones. 1997. *The handbook of trace elements.* St. Luci Press, N. W. Boca Roton, FL, U.S.A.

21. Silveira, 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.
22. Simeoni, L.A., K.A. Barbarik and B.R. Sabey. 1984. Effect of small-scale composting of sewage sludge on heavy metal availability to plants. *J. Environ. Qual.* 13:264-268.
23. Smith, S.R. 1994. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge treated soil. I: Nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass. *Environ. Pollut.* 85:321-327.
24. Smith, S.R. 1994. Effect of pH on availability to crops of metals in sewage sludge treated soils. II: Cadmium uptake by crops and implication for human dietary intake. *Environ. Pollut.* 86:5-13.
25. Sommers, L.E. 1977. Chemical composition of sewage sludge and analysis of their potential use as fertilizer. *J. Environ. Qual.* 6:225-231.
26. Street, J.J., B.R. Sabey and W.L. Lindsay. 1978. Influence of pH, Phosphorus, cadmium, sewage sludge, and incubation time on the solubility and plant uptake of cadmium. *J. Environ. Qual.* 7:286-290.
27. Valderr, J.M., M. Gal, U. Mingelgrin and A.L. Page. 1983. Some heavy metals in soil treated with sewage sludge, their effect on yield and their uptake by plants. *J. Environ. Qual.* 12:49-57.
28. Villaroel, J.R., A.C. Chang and C., Amrhein. 1993. Cd and Zn phytoavailability of a field-stabilized sludge treated soil. *J. Environ. Qual.* 15: 197-205.
29. Westerman, R.L. 1990. Soil testing and plant analysis. SSSA, Madison, WI.