

اثر غرقاب، لجن فاضلاب و کود دامی بر غلظت فلزات سنگین در ریشه و بخش هوایی آفتابگردان در یک خاک شن لومی

نصرت اله نجفی*، سنیه مردمی و شاهین اوستان^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۸/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۴/۵)

چکیده

تأثیر غرقاب، لجن فاضلاب و کود دامی بر جذب و غلظت Fe، Zn، Mn، Cu، Pb و Cd در ریشه و بخش هوایی آفتابگردان (*Helianthus annuus L.*) در شرایط گلخانه‌ای بررسی شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار شامل مدت غرقاب در پنج سطح (۰، ۲، ۴، ۸، ۲۲ روز) و منبع و مقدار کود آلی در پنج سطح (شاهد، ۱۵ گرم کود دامی، ۳۰ گرم کود دامی، ۱۵ گرم لجن فاضلاب و ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر هر کیلوگرم خاک) انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش مدت غرقاب غلظت و جذب Mn در بخش هوایی و غلظت Mn ریشه افزایش یافت ولی جذب Mn در ریشه تغییر معنی‌داری نکرد. پس از غرقاب شدن خاک غلظت و جذب Fe در بخش هوایی و غلظت و جذب Cd در بخش هوایی و ریشه ابتدا افزایش یافته و دوباره کاهش یافت درحالی‌که غلظت Zn و Cu ریشه پس از یک کاهش اولیه دوباره افزایش یافت. اثر غرقاب شدن خاک بر غلظت Pb، Zn و Cu بخش هوایی معنی‌دار نبود. با کاربرد لجن فاضلاب و کود دامی جذب و غلظت Fe، Mn و Zn در بخش هوایی و جذب Cu در بخش هوایی افزایش یافت ولی جذب و غلظت سرب در بخش هوایی فقط با کاربرد لجن فاضلاب افزایش یافت. تأثیر منبع و مقدار کود آلی بر غلظت و جذب Cd در بخش هوایی، غلظت Cd در ریشه و غلظت مس در بخش هوایی معنی‌دار نبود. غلظت Fe، Mn، Cu و Zn ریشه با کاربرد لجن فاضلاب افزایش یافت ولی غلظت Pb و Cd ریشه تغییر معنی‌داری نکرد. تأثیر غرقاب شدن خاک بر جذب و غلظت فلزات سنگین در ریشه و بخش هوایی به منبع و مقدار کود آلی مصرفی بستگی داشت. بیشترین جذب فلزات سنگین مورد مطالعه در بخش هوایی با کاربرد ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک به دست آمد. گیاه آفتابگردان Fe، Cu، Zn، Mn و Pb را در ریشه انباشته کرد درحالی‌که غلظت Cd در ریشه تفاوت معنی‌داری با بخش هوایی نداشت.

واژه‌های کلیدی: آفتابگردان، غرقاب، کود دامی، لجن فاضلاب، فلزات سنگین

۱. به ترتیب استادیار، دانشجوی سابق کارشناسی‌ارشد و استادیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: n-najafi@tabrizu.ac.ir

مقدمه

فلزات سنگین عناصری هستند که چگالی اتمی آنها بیشتر از 3 g/cm^3 است (۱۰). برخی از این فلزات مانند Zn, Mn, Fe و Cu برای جانداران لازم هستند که از عناصر کم مصرف ضروری برای تغذیه و رشد گیاهان، حیوانات و انسان محسوب می‌شوند و وجود غلظت‌های مناسبی از آنها در بافت‌های گیاهان نه تنها برای رشد و عملکرد مطلوب گیاهان بلکه در زنجیره غذایی برای رشد و سلامتی حیوانات و انسان ضروری است (۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۸ و ۴۳). برخی دیگر از فلزات سنگین همچون کادمیم و سرب برای جانداران ضروری نیستند. هر دو گروه از فلزات سنگین (ضروری و غیرضروری برای جانداران) در غلظت‌های زیاد (بیشتر از غلظت آستانه) برای گیاهان، جانوران و انسان سمی هستند (۹، ۱۰، ۱۵). مواد آلی به علت آثار سازنده‌ای که بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و حاصل‌خیزی خاک دارد، به عنوان یکی از ارکان باروری خاک شناخته شده است. خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک از نظر مواد آلی بسیار فقیر هستند. میزان مواد آلی در بیش از ۶۰ درصد خاک‌های زیرکشت ایران کمتر از یک درصد و در بخش قابل توجهی از آنها کمتر از ۵٪ درصد است.

منابع تأمین مواد آلی برای خاک‌های زیرکشت ایران بسیار محدود بوده و عمدتاً شامل کودهای دامی، بقایای گیاهی و انواع کمپوست می‌باشد که جوابگوی نیاز روزافزون بخش کشاورزی به کودهای آلی نیست (۳). بنابراین در سال‌های اخیر کاربرد لجن فاضلاب در خاک‌های کشاورزی، از یک طرف به عنوان یک کود آلی و سرشار از عناصر غذایی مختلف مثل نیتروژن و فسفر و از طرف دیگر به عنوان یک روش نسبتاً ایمن برای دفن پسماند حاصل از تصفیه فاضلاب‌های شهری مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، با دفن مقادیر زیاد لجن فاضلاب در خاک، غلظت‌های فلزات سنگین در خاک زیاد شده و می‌تواند به‌وسیله گیاهان جذب شده و وارد زنجیره غذایی شود. بنابراین، در بسیاری از کشورهای جهان، فلزات سنگین موجود در لجن فاضلاب توجه زیادی را به خود جلب کرده است. میزان ورود

این فلزات به زنجیره غذایی به ویژگی‌های خاک (به‌ویژه pH درصد رس و درصد مواد آلی خاک) و میزان جذب به‌وسیله گیاهان بستگی دارد (۱۵). بنابراین، میزان کاربرد لجن فاضلاب در خاک‌های کشاورزی باید با انجام مطالعات مختلف روی خاک و گیاهان رشد یافته در این خاک‌ها تعیین شود و به‌صورت کنترل شده و با پیش‌آگاهی مصرف گردد. چند سالی است که کارخانه تصفیه فاضلاب شهر میانه فعالیت خود را شروع کرده است. علی‌رغم رایگان بودن لجن فاضلاب تولیدی این کارخانه، کشاورزان منطقه برای استفاده از آن رغبت نشان نمی‌دهند و لجن فاضلاب حاصل در محوطه کارخانه انباشته شده است. بنابراین، به‌نظر رسید که قبل از انجام هرگونه توصیه به کشاورزان منطقه برای استفاده از این ماده، تأثیر آن بر ویژگی‌های خاک، رشد گیاه آفتابگردان و ترکیب شیمیایی آن به‌ویژه از نظر غلظت‌های فلزات سنگین مورد مطالعه قرار گیرد و با کود دامی که سال‌هاست به‌وسیله کشاورزان منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه شود. آفتابگردان یکی از چهار گیاه روغنی مهم است که برای تهیه روغن خوراکی و تغذیه انسان و دام در مناطق مختلف کشور کشت می‌شود. رطوبت اضافی برای این گیاه در هر مرحله از رشد مضر است و میزان خسارت مستقیماً به طول دوره غرقاب شدن خاک بستگی دارد (۵). با این حال، خاک‌های مزارع آفتابگردان در منطقه و سایر نقاط کشور بر اثر آبیاری نادرست، بارندگی زیاد، وقوع سیل و طغیان رودخانه‌ها در معرض غرقاب قرار می‌گیرند. این تغییرات در شرایط رطوبتی خاک، می‌تواند قابلیت جذب فلزات سنگین و در نتیجه غلظت آنها در گیاهان را تحت تأثیر قرار دهد و لازم است هنگام استفاده از خاک‌ها برای دفن لجن فاضلاب در نظر گرفته شود (۹ و ۲۳). بررسی‌ها نشان می‌دهد که پس از غرقاب، pH، EC، Eh، غلظت عناصر مختلف در محلول خاک و قابلیت جذب آنها به‌طور معنی‌داری تغییر می‌کند (۱، ۳، ۱۴، ۲۳، ۳۰، ۳۸، ۳۹، ۴۰ و ۴۲). علاوه بر شرایط رطوبتی خاک، مواد آلی نیز بر رشد آفتابگردان و غلظت فلزات سنگین در آن تأثیر دارد. زیرا این مواد بر رژیم رطوبتی خاک، تهویه، فعالیت زیستی،

آن در محلول ۱:۱ آب به خاک (۲۰)، بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۶)، کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (۳۳)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیترا کردن با سود (۳۲)، pH و EC کودهای آلی در نسبت ۱:۲ آب به کود آلی اندازه‌گیری شد (۳۷). برای کشت گیاهان از گلدان‌های حاوی ۲/۵ کیلوگرم خاک با بافت شن لومی استفاده شد. علت انتخاب خاک سبک بافت این بود که در پایان مراحل رشد، جمع‌آوری سیستم ریشه‌ای گیاه و جداسازی آنها از خاک تسهیل گردد. کودهای آلی به میزان ۱۵ و ۳۰ گرم به هر کیلوگرم خاک (معادل ۳۰ و ۶۰ تن بر هکتار) قبل از کشت افزوده شد و با خاک خوب مخلوط گردید. شش عدد بذر جوانه‌دار شده آفتابگردان (*Helianthus annuus L.*) رقم محلی قلمی در هر گلدان کشت شد و در مرحله دو برگگی به دو گیاه در هر گلدان تنک گردید (۱۹).

مدت زمان غرقاب ۰، ۲، ۴، ۸ و ۲۲ روز بود که در مرحله شش برگگی اعمال شد (۳۵). ارتفاع آب در سطح خاک سه سانتی‌متر بود. در پایان هر یک از دوره‌های غرقاب، گلدان‌ها با ایجاد سوراخ‌هایی در ته آنها زه‌کشی شدند و زه‌آب آنها جمع‌آوری شد و در مراحل بعدی رشد با زه‌آب جمع‌آوری شده آبیاری شد تا تیمارها از نظر شوری و غلظت‌های عناصر غذایی باهم تفاوت نداشته باشند. در پایان دوره رشد، بخش هوایی گیاهان از محل طوقه برداشت شده و ریشه نیز از خاک جدا شد. ریشه و بخش هوایی گیاهان پس از شستشو با آب مقطر، در داخل دستگاه خشک‌کن نمونه‌های گیاهی با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند و ۷۲ ساعت نگهداری شدند تا خشک شوند. سپس با استفاده از آسیاب با بدنه پلاستیکی، درب شیشه‌ای و تیغه‌های آلومینیومی پودر شده و از الک پلاستیکی یک میلی‌متری عبور داده شدند. آنگاه غلظت‌های Zn، Fe، Mn، Cu، Pb و Cd در ریشه و بخش هوایی گیاهان به روش خشک‌سوزانی (۴۴) با استفاده از دستگاه جذب اتمی ساخت شرکت شیمادزو ژاپن مدل AA-6200 اندازه‌گیری شد. میزان جذب هر فلز از حاصل ضرب غلظت عنصر در ماده

پتانسیل ریداکس، قابلیت جذب عناصر و بسیاری از واکنش‌های مهم خاک اثر قابل‌ملاحظه‌ای دارند (۳۹ و ۴۱). بنابراین، به‌نظر می‌رسد میان مواد آلی و غرقاب شدن خاک از نظر تأثیر بر جذب و غلظت‌های فلزات سنگین در گیاه اثر متقابل معنی‌دار وجود داشته باشد. بنابراین، در این تحقیق، تأثیر مدت غرقاب و منبع و مقدار کودهای آلی بر غلظت فلزات سنگین Mn، Fe، Cu، Zn، Cd و Pb در ریشه‌ها و بخش هوایی گیاه آفتابگردان در شرایط گلخانه‌ای بررسی گردید. بررسی منابع نشان داد که در زمینه اثر متقابل غرقاب و کودهای آلی مطالعات کمی در دنیا انجام شده است و در داخل کشور نیز مقاله چاپ شده‌ای دیده نشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز و گلخانه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی در تابستان و پاییز ۱۳۸۷ انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار، شامل مدت غرقاب در پنج سطح (۰، ۲، ۴، ۸، ۲۲ روز) و منبع و مقدار کود آلی در پنج سطح (شاهد، ۱۵ گرم کود دامی، ۳۰ گرم کود دامی، ۱۵ گرم لجن فاضلاب و ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر هر کیلوگرم خاک) انجام شد. خاک مورد نظر از ایستگاه تحقیقات خلعت‌پوشان دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انتخاب گردید و از عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد. کودهای آلی مورد استفاده شامل لجن فاضلاب از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر میانه و کود دامی از ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت‌پوشان دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز تهیه گردید. خاک و کودهای آلی پس از هواخشک شدن کوبیده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. سپس، هم در کودهای آلی و هم در خاک، فسفر قابل جذب با عصاره‌گیر اولسن (۳۴)، پتاسیم و سدیم قابل جذب با عصاره‌گیر استات آمونیوم (۲۶)، روی، آهن، منگنز، مس، کادمیم و سرب قابل جذب با عصاره‌گیر DTPA (۲۷) استخراج شدند. pH خاک در سوسپانسیون ۱:۱ آب به خاک (۲۹) و EC

خشک بخش هوایی و ریشه محاسبه شد. فاکتور انتقال از تقسیم غلظت فلز در بخش هوایی به غلظت آن در ریشه گیاه محاسبه شد. این فاکتور شاخصی است برای تعیین توانایی گیاه در انتقال فلزات از ریشه به بخش هوایی. اگر این فاکتور بیش از یک باشد، نشانگر این است که گیاه فلز را در بخش هوایی انباشته می‌کند ولی اگر کوچک‌تر از یک باشد نشان می‌دهد که گیاه فلز را بیشتر در ریشه انباشته می‌کند و برای گیاه‌پالایی به روش استخراج فلز از بستر رشد و پالایش بستر از آلودگی به فلز مذکور، مناسب نیست (۱۷ و ۴۵). تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش گلخانه‌ای در جدول ۱ و برخی ویژگی‌های شیمیایی کود دامی و لجن فاضلاب مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

جذب و غلظت آهن در بخش هوایی و ریشه

تأثیر غرقاب شدن خاک و کودهای آلی بر جذب و غلظت آهن در بخش هوایی آفتابگردان معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که غلظت آهن بخش هوایی با غرقاب شدن ابتدا یک افزایش در سطح دو روز غرقاب داشت و بعد از یک کاهش، دوباره افزایش یافت و بیشترین مقدار در سطح دو روز غرقاب و کمترین مقدار در سطح چهار روز غرقاب مشاهده گردید هرچند که با سطح شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۳). افزایش غلظت آهن بخش هوایی گیاهان پس از غرقاب به وسیله بیجری و شیراپ (۱۴) در یولاف و خباز صابری و همکاران (۲۵) در گندم گزارش شده است و می‌تواند ناشی از افزایش آهن قابل جذب خاک پس از غرقاب باشد؛ زیرا، بررسی ما نشان داد که با غرقاب شدن خاک، غلظت

آهن قابل جذب گیاه در خاک افزایش یافت (داده‌ها ارائه نشده است) و با نتایج سایر محققان (۴ و ۱۴) مطابقت داشت. در شرایط غرقاب و با کاهش پتانسیل ریداکس، غلظت Fe^{2+} زیاد می‌شود و حتی ممکن است تا حد سمیت برای گیاه نیز برسد. این پدیده در خاک غرقاب با مواد آلی بیشتر، شدیدتر خواهد بود (۴۱). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با مصرف هر دو نوع کود آلی غلظت آهن بخش هوایی افزایش یافت.

کمترین غلظت آهن بخش هوایی گیاه در سطح بدون کود آلی بود (جدول ۳). نظری و همکاران (۶) نیز افزایش غلظت آهن بخش هوایی گیاهان گندم، جو و ذرت را با کاربرد لجن فاضلاب گزارش نمودند. محدوده غلظت مناسب برای آهن در بخش هوایی گیاه آفتابگردان ۱۰۰-۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک است و غلظت ۵۰-۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک، محدوده کمبود این عنصر در بخش هوایی گیاه محسوب می‌گردد (۱۱). بنابراین، در تعدادی از تیمارها، کمبود آهن در بخش هوایی گیاه آفتابگردان وجود داشت. این امر را می‌توان به تحرک کم آهن در گیاه (۲۳) مربوط دانست که می‌تواند باعث تجمع آهن در ریشه گیاه و عدم انتقال آن به بخش هوایی شود. هم‌چنین، کمی غلظت آهن بخش هوایی در تیمارهای دارای ۳۰ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک را می‌توان به افزایش ماده خشک گیاه در این تیمارها و وقوع اثر رقت مربوط دانست.

هم‌چنین، ممکن است ریزجانداران خاک بخشی از آهن خاک را هنگام تجزیه کود دامی مصرف و غیرمتحرک نمایند. زیرا کود دامی مصرفی به‌طور کامل پوسیده نشده بود. در اثرات متقابل کودهای آلی و غرقاب، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت آهن بخش هوایی در تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۲۲ روز غرقاب و کمترین آن در تیمار ۳۰ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک و چهار روز غرقاب مشاهده گردید که تفاوت آن با برخی دیگر از تیمارها معنی‌دار نبود (جدول ۴). میزان جذب آهن در بخش هوایی گیاه تا ۲ روز پس از غرقاب افزایش یافت ولی در ۴ روز پس از غرقاب

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

گروه بافت خاک	آهک	ماده آلی (%)	pH (1:1)	EC (dS/m)	سدیم	پتاسیم	فسفر	آهن	منگنز	مس	روی	کادمیم	سرب
شن لومی	ناچیز	۰/۱۱	۷/۶۳	۰/۱۱	۸۱/۷	۲۵۰	۱۷/۱	۱/۸	۱/۱	۱/۳	۰/۳	۰/۴	۳/۴

جدول ۲. برخی ویژگی‌های شیمیایی کود دامی و لجن فاضلاب مورد استفاده

گروه کود	pH _(1:2)	EC _(1:2) (dS/m)	سدیم	پتاسیم	فسفر	آهن	منگنز	مس	روی	کادمیم	سرب
کود دامی	۸/۷۱	۲۱/۱۵	۵۸۱۰/۷	۳۸۱۲/۴	۱۸۸/۴	۵/۷۳	۳/۷	۱/۸۴	۹/۵	۰/۴	۳/۰۴
لجن فاضلاب	۶/۱۷	۴/۱	۶۷۵/۹	۱۶۱۲/۱	۱۸۸/۴	۳۲/۳۷	۲۶/۶۶	۴۴/۷۷	۲۸/۴	۰/۸۷	۱۴/۲

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های اثر اصلی غرقاب و کودهای آلی بر غلظت (mg/kg) فلزات سنگین در بخش هوایی آفتابگردان

اثر اصلی	سطوح	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd
غرقاب (روز)	۰	۴۷/۶۷ bc	۶۶/۱۰ d	۱۷/۷۲ a	۵/۲۹ a	۳/۰۵ a	۰/۹۷ b
	۲	۷۱/۴۵ a	۸۲/۵۵ cd	۱۸/۸۳ a	۶/۱۶ a	۲/۸۷ a	۲/۵۵ a
	۴	۴۴/۷۳ c	۹۳/۵۵ bc	۱۷/۳۳ a	۶/۰۱ a	۲/۸۳ a	۱/۶۶ ab
	۸	۶۰/۸۶ ab	۱۰۱/۲ b	۱۷/۸۳ a	۵/۵۸ a	۲/۵۸ a	۱/۴۴ b
	۲۲	۵۸/۳۶ ab	۱۲۶/۴ a	۱۸/۰۶ a	۵/۹۸ a	۳/۲۹ a	۱/۴۰ b
	۰	۴۰/۴۰ b	۶۷/۰۷ c	۱۶/۹۰ a	۴/۸۱ c	۲/۱۵ c	۱/۲۷ a
کود آلی (بر کیلوگرم خاک)	۱۵ گرم کود دامی	۶۰/۷۶ a	۶۸/۷۷ c	۱۸/۸۰ a	۵/۵۰ bc	۲/۳۶ bc	۱/۹۷ a
	۳۰ گرم کود دامی	۵۴/۵۳ a	۹۷/۰۸ b	۱۹/۷۶ a	۶/۵۶ ab	۱/۴۴ c	۱/۶۷ a
	۱۵ گرم لجن فاضلاب	۶۱/۱۳ a	۸۹/۳۶ b	۱۷/۳۲ a	۵/۴۵ bc	۳/۳۷ b	۱/۱۰ a
	۳۰ گرم لجن فاضلاب	۶۶/۲۵ a	۱۴۷/۵ a	۱۶/۹۹ a	۶/۷۰ a	۵/۳۰ a	۲/۰۲ a

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ولی پس از آن تغییر معنی‌داری نکرد (جدول ۵). با توجه به اینکه غلظت آهن بخش هوایی در ۸ و ۲۲ روز غرقاب به‌طور معنی‌داری نسبت به ۴ روز افزایش یافت (جدول ۳)، عدم تغییر معنی‌دار جذب آهن در بخش هوایی پس از ۴ روز غرقاب را می‌توان به کاهش ماده خشک بخش هوایی بر اثر تنش غرقاب نسبت داد. کاهش غلظت آهن بخش هوایی در تیمار شاهد و ۲۲ روز غرقاب (جدول ۴) را می‌توان به اثر تنش کمبود اکسیژن بر جذب آهن به‌وسیله ریشه گیاه و رشد بخش هوایی گیاه نسبت داد.

به‌نظر می‌رسد در ۲۲ روز غرقاب، سرعت جذب و انتقال آهن به بخش هوایی بیشتر از سرعت رشد گیاه کاهش می‌یابد. در نتیجه، غلظت آهن در بخش هوایی کاهش می‌یابد. تأثیر غرقاب شدن خاک و کودهای آلی بر جذب و غلظت آهن در ریشه آفتابگردان معنی‌دار بود. جذب و غلظت آهن در ریشه تا ۲ روز غرقاب تغییر معنی‌داری نکردند ولی در ۴ روز غرقاب به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند و پس از آن دوباره افزایش یافتند (جدول‌های ۷ و ۹). با کاربرد لجن فاضلاب غلظت آهن ریشه به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کودهای آلی بر غلظت (mg/kg) فلزات سنگین در بخش هوایی آفتابگردان

Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	مدت غرقاب (روز)	کود آلی
۰/۹۰c	۴/۷۹a-d	۴/۹۰abc	۱۹/۸۷a-e	۳۴/۸۰k	۴۰/۵۶e-k	۰	
۱/۸۶abc	۱/۹۰efg	۳/۹۴c	۱۴/۱۹de	۴۲/۰۷jk	۳۳/۶۲ g-k	۲	
۰/۷۷c	۱/۴۸fg	۴/۰۶bc	۱۵/۹۹b-e	۴۷/۲۶ijk	۵۳/۷۷b-i	۴	۰
۰/۸۸c	۲/۲۵d-g	۵/۴۶abc	۱۶/۵۵a-e	۶۶/۷۹f-k	۵۷/۷۲b-h	۸	
۱/۹۶abc	۰/۳۵g	۵/۷۳abc	۱۷/۸۹a-e	۱۴۴/۴a-d	۱۶/۳۱jk	۲۲	
۱/۸۵abc	۲/۹۸c-g	۵/۷۷abc	۲۰/۵۸a-e	۵۴/۸۸hjk	۷۴/۰۴a-e	۰	
۳/۸۶a	۱/۷۸efg	۶/۸۹ab	۲۱/۲۳a-e	۶۱/۱۷g-k	۸۳/۹ab	۲	
۲/۵۱abc	۰/۷۸g	۵/۲۰abc	۱۸/۲۹a-d	۸۱/۰۴e-j	۲۷/۸۱h-k	۴	۱۵ گرم کود دامی
۰/۸۸c	۲/۴۵d-g	۴/۸۸abc	۱۶/۶۹a-e	۶۹/۵۳f-k	۷۱/۵۳a-e	۸	برکیلوگرم خاک
۰/۷۸c	۳/۸۶b-f	۴/۷۹abc	۱۷/۲۳a-e	۷۷/۲۲e-k	۴۶/۵۵c-k	۲۲	
۰/۶۷c	۰/۷۸g	۵/۱۸abc	۱۶/۸۱a-e	۴۹/۵۱hjk	۳۵/۸f-k	۰	
۳/۶۱ab	۱/۲۳ fg	۷/۵۱a	۲۳/۲۴a	۸۷/۳۴e-i	۸۴/۸۴ab	۲	
۰/۸۷c	۲/۵۶ d-g	۷/۱۰ab	۱۴/۶۸cde	۸۷/۹۹e-i	۱۵/۳۹k	۴	۳۰ گرم کود دامی
۱/۰۸bc	۱/۳۷ fg	۶/۱۸abc	۲۲/۴۰ab	۱۱۷/۵۰cde	۷۱/۸۴a-e	۸	برکیلوگرم خاک
۲/۱۴abc	۱/۳۰ fg	۶/۸۴ab	۲۱/۶۵abc	۱۴۳/۰a-d	۶۱/۷۸a-g	۲۲	
۰/۷۸c	۲/۸۹ c-g	۵/۲۲abc	۱۷/۷۲a-e	۷۰/۷۶f-k	۶۴/۶a-g	۰	
۱/۰۳c	۵/۰۱ a-d	۵/۷۸abc	۱۸/۰۱a-e	۱۰۵/۱۰d-e	۷۹/۶۴abc	۲	
۲/۱۸abc	۳/۶۱ b-f	۶/۵۷abc	۲۰/۲۱a-e	۹۲/۸۸e-h	۴۹/۲۶c-j	۴	۱۵ گرم لجن فاضلاب
۰/۵۹c	۱/۲۸ fg	۳/۹۱c	۱۴/۷۴cde	۷۱/۴۹f-k	۴۳/۲۱d-k	۸	برکیلوگرم خاک
۰/۹۳c	۴/۰۶ b-f	۵/۸۰abc	۱۵/۹۲b-e	۱۰۶/۶۰def	۶۸/۹۳a-f	۲۲	
۰/۶۹c	۳/۸۵ b-f	۵/۴۲abc	۱۳/۶۴Ve	۱۲۰/۶۰b-e	۲۳/۳۶ijk	۰	
۲/۴۳abc	۴/۴۵ a-e	۶/۷۳abc	۱۷/۴۶a-e	۱۱۷/۱cde	۷۵/۲۷a-d	۲	
۱/۹۹abc	۵/۷۵ ab	۷/۱۲a	۱۷/۴۷a-e	۱۵۸/۶۰abc	۷۷/۴۴a-d	۴	۳۰ گرم لجن فاضلاب
۳/۸۰a	۵/۵۷ abc	۷/۴۸a	۱۸/۷۸a-e	۱۸۰/۶۰a	۶۰b-h	۸	برکیلوگرم خاک
۱/۲۲bc	۶/۹۱ a	۶/۷۷abc	۱۷/۵۹a-e	۱۶۰/۷۰ab	۹۵/۲a	۲۲	

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ۵. مقایسه میانگین‌های اثر اصلی غرقاب و کودهای آلی بر جذب (mg/pot) فلزات سنگین در بخش هوایی آفتابگردان

Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	سطوح	اثر اصلی
۰/۰۳ b	۰/۱۰ a	۰/۱۷ a	۰/۵۷ a	۲/۳۶ c	۱/۵۸ b	۰	
۰/۰۸ a	۰/۰۸a	۰/۱۸a	۰/۵۴ab	۲/۵۲bc	۲/۱۰a	۲	غرقاب
۰/۰۵ b	۰/۰۹ a	۰/۱۸ a	۰/۵۲ ab	۳/۰۰ abc	۱/۴۱ b	۴	(روز)
۰/۰۵ b	۰/۰۸a	۰/۱۶a	۰/۵۳ab	۳/۱۴ab	۱/۸۰ab	۸	
۰/۰۴ b	۰/۰۹ a	۰/۱۵ a	۰/۴۶ b	۳/۲۶ a	۱/۶۰ b	۲۲	
۰/۰۳ a	۰/۰۴ c	۰/۱۰ d	۰/۳۶c	۱/۴۰c	۰/۸۸d	۰	
۰/۰۶ a	۰/۰۶c	۰/۱۴c	۰/۵۰b	۱/۸۱c	۱/۶۵bc	۱۵ گرم کود دامی	کود آلی
۰/۰۵ a	۰/۰۴ c	۰/۱۸ b	۰/۵۴ ab	۲/۶۶ b	۱/۵۱ c	۳۰ گرم کود دامی	(بر کیلوگرم)
۰/۰۴ a	۰/۱۱b	۰/۱۸b	۰/۵۸ab	۲/۹۲b	۲/۰۴ab	۱۵ گرم لجن فاضلاب	خاک)
۰/۰۸ a	۰/۱۹a	۰/۲۴a	۰/۶۳a	۵/۴۹a	۲/۴۲a	۳۰ گرم لجن فاضلاب	

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

به طوری که علی‌رغم وجود مقادیر قابل ملاحظه آهن در ریشه به دلیل کندی سرعت انتقال آن به بخش هوایی، در برخی تیمارها گیاه دچار کمبود آهن بود. نظری و همکاران (۶) تجمع آهن را در ریشه گیاه گندم به دلیل غیرپویا بودن این عناصر در گیاه گزارش کرده‌اند.

جذب و غلظت منگنز در بخش هوایی و ریشه

تأثیر غرقاب شدن خاک و کودهای آلی بر جذب و غلظت منگنز در بخش هوایی آفتابگردان معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۵). با غرقاب شدن خاک غلظت و جذب منگنز در بخش هوایی افزایش یافت و در سطح ۲۲ روز غرقاب به بیشترین مقدار رسید. این نتایج با گزارش‌های سایر محققان (۱۴، ۲۵ و ۳۹) مطابقت داشت. میان مدت غرقاب و غلظت منگنز بخش هوایی آفتابگردان رابطه معنی‌دار:

افزایش یافت ولی بین دو سطح لجن فاضلاب مصرفی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. با کاربرد ۱۵ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک غلظت آهن ریشه نسبت به شاهد کاهش یافت ولی در سطح ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک مجدداً افزایش یافت. در اثر متقابل کودهای آلی و غرقاب، بیشترین غلظت آهن ریشه در تیمار ۱۵ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و بدون غرقاب و کمترین آن در تیمار ۱۵ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک و ۸ روز غرقاب بود (جدول ۸). جذب آهن در ریشه آفتابگردان با کاربرد هر دو نوع کود آلی افزایش یافت ولی میان دو سطح لجن فاضلاب و میان سطح ۱۵ گرم کود دامی و شاهد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۱۰). مقدار فاکتور انتقال آهن در تمامی تیمارها کمتر از یک بود (به‌طور میانگین ۰/۳) که نشان‌دهنده این است که غلظت آهن ریشه آفتابگردان به‌طور میانگین ۳/۳۳ برابر غلظت آن در بخش هوایی بود. به عبارت دیگر، گیاه آفتابگردان آهن را در ریشه خود انباشته کرد؛

تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۲۲ روز غرقاب بود درحالی‌که بیشترین جذب منگنز در ریشه در تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۲ روز غرقاب مشاهده گردید (جدول‌های ۸ و ۱۰) که ناشی از کاهش ماده خشک ریشه در ۲۲ روز غرقاب بود. فاکتور انتقال منگنز در اغلب تیمارها کمتر از یک و به‌طور میانگین برای تمام تیمارها ۰/۵۵ بود که بیانگر این است که میانگین غلظت منگنز در بخش هوایی تقریباً نصف ریشه بود.

جذب و غلظت مس در بخش هوایی و ریشه

تأثیر غرقاب شدن خاک، منبع و مقدار کودهای آلی بر غلظت مس بخش هوایی گیاه معنی‌دار نبود ولی بر جذب مس در بخش هوایی معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۵). جذب مس در بخش هوایی تا ۸ روز غرقاب تغییر معنی‌داری نکرد ولی در ۲۲ روز غرقاب به‌طور معنی‌دار کاهش یافت که با نتایج بیجری و همکاران (۱۴) مطابقت داشت. این کاهش را می‌توان به کاهش ماده خشک بخش هوایی گیاه نسبت داد (جدول ۳). جذب مس در بخش هوایی با کاربرد هر دو سطح لجن فاضلاب و سطح ۳۰ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک افزایش یافت (جدول ۶). این نتایج نشان می‌دهد که عدم تغییر معنی‌دار غلظت مس بخش هوایی با کاربرد کودهای آلی ناشی از افزایش ماده خشک بخش هوایی گیاه و وقوع پدیده اثر رقت می‌باشد. اگر غلظت مس در بخش هوایی ۵-۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک باشد، گیاه به کمبود مس مبتلا است. دامنه کفایت یا غلظت نرمال مس در بخش هوایی ۳۰-۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۲۲، ۳۶). بنابراین، غلظت مس بخش هوایی آفتابگردان در تمام تیمارها در محدوده کفایت قرار داشت. این نتیجه با توجه به مقدار مس قابل جذب خاک و کودهای آلی مورد استفاده در این بررسی (جدول‌های ۱ و ۲) دور از انتظار نبود. تأثیر غرقاب شدن خاک و کودهای آلی بر غلظت مس ریشه معنی‌دار بود. تأثیر غرقاب بر جذب مس در ریشه معنی‌دار نبود ولی اثر کود آلی معنی‌دار بود (جدول‌های ۷ و ۹). با غرقاب شدن خاک به مدت ۸ روز

$$R^2 = 0/975 \text{ با } C_{Mn} = -0/131(\text{Time})^2 + 5/457(\text{Time}) + 69/58 \quad [1]$$

و میان مدت غرقاب و جذب منگنز در بخش هوایی آفتابگردان رابطه معنی‌دار:

$$UP_{Mn} = -0/004(\text{Time})^2 + 0/143(\text{Time}) + 2/352 \quad [2]$$

با $R^2 = 0/942$ مشاهده گردید. بررسی ما نشان داد که با غرقاب شدن خاک، غلظت منگنز قابل جذب گیاه در خاک افزایش یافت (داده‌ها ارائه نشده است) و با نتایج سایر محققان (۳۹ و ۳۱، ۴) مطابقت داشت. با کاربرد هر دو نوع کود آلی و با افزایش سطوح مصرفی آنها غلظت منگنز بخش هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که با نتایج پورتر و همکاران (۳۹) مطابقت داشت. افزایش غلظت منگنز با مصرف لجن فاضلاب بیشتر از زمانی بود که به خاک کود دامی افزوده شد به‌طوری‌که بیشترین غلظت منگنز بخش هوایی در سطح ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک بود. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کودهای آلی بر جذب و غلظت منگنز در بخش هوایی آفتابگردان نشان داد که بیشترین جذب و غلظت منگنز بخش هوایی در تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۸ روز غرقاب و کمترین غلظت در تیمار بدون کود آلی و بدون غرقاب بود هرچند که با برخی تیمارها از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول‌های ۴ و ۶).

تأثیر غرقاب شدن خاک و کودهای آلی بر غلظت منگنز ریشه معنی‌دار بود. تأثیر غرقاب بر جذب منگنز در ریشه معنی‌دار نبود ولی اثر کود آلی معنی‌دار بود (جدول‌های ۷ و ۹). غلظت منگنز ریشه تا ۸ روز غرقاب تغییر معنی‌داری نکرد ولی در ۲۲ روز غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. جذب و غلظت منگنز در ریشه با مصرف هر دو نوع کود آلی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. هم‌چنین با افزایش سطوح مصرفی آنها غلظت و جذب منگنز در ریشه افزایش یافت. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کود آلی بر غلظت و جذب منگنز در ریشه نشان داد که بیشترین غلظت منگنز ریشه در

جدول ۶. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کودهای آلی بر جذب (mg/pot) فلزات سنگین در بخش هوایی آفتابگردان

Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	مدت غرقاب (روز)	کود آلی
۰/۰۲ b	۰/۱۱ b-g	۰/۱۱g-j	۰/۴۴ b-e	۰/۷۹ j	۰/۹۱ hij	۰	
۰/۰۵b	۰/۰۵e-h	۰/۱۰ij	۰/۳۵e	۱/۰۴ij	۰/۸۳ ij	۲	
۰/۰۲ b	۰/۰۳ fgh	۰/۰۹ j	۰/۳۵ e	۱/۰۳ ij	۱/۱۶ f-j	۴	۰
۰/۰۲b	۰/۰۵e-h	۰/۱۱ghi	۰/۳۴e	۱/۳۹hij	۱/۲۱e-j	۸	
۰/۰۴ b	۰/۰۱ h	۰/۱۱ ghi	۰/۳۵e	۲/۷۶ e-h	۰/۳۲ j	۲۲	
۰/۰۶ ab	۰/۱۰ b-g	۰/۱۹ c-i	۰/۶۶abC	۱/۷۶g-j	۲/۳۶a-d	۰	
۰/۱۰ ab	۰/۰۵e-h	۰/۱۸c-i	۰/۵۵a-e	۱/۵۶hij	۲/۱۸ a-f	۲	
۰/۰۷ ab	۰/۰۲ gh	۰/۱۴ e-i	۰/۴۹ a-e	۲/۱۷ f-j	۰/۷۵ ij	۴	۱۵ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک
۰/۰۳b	۰/۰۷d-h	۰/۱۴f-i	۰/۴۷a-e	۱/۹۴g-j	۱/۹۸b-h	۸	
۰/۰۲b	۰/۰۸c-h	۰/۱۰hij	۰/۳۷de	۱/۶۳hij	۱/۰۱g-i	۲۲	
۰/۰۲ b	۰/۰۲ gh	۰/۱۵ d-j	۰/۵۰ a-e	۱/۴۳ hij	۱/۱۱ f-j	۰	
۰/۱۰ab	۰/۰۳fgh	۰/۲۰a-g	۰/۶۱a-d	۲/۳۱f-j	۲/۲۳ a-f	۲	
۰/۰۳ b	۰/۰۷ d-h	۰/۲۱ a-f	۰/۴۲ cde	۲/۵۱ f-j	۰/۴۲ j	۴	۳۰ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک
۰/۰۳b	۰/۰۴e-h	۰/۱۸c-i	۰/۶۵abc	۳/۳۶efg	۲/۱۰b-h	۸	
۰/۰۶ ab	۰/۰۳ fgh	۰/۱۸ c-i	۰/۵۷ a-e	۳/۷۵ ef	۱/۷۲ c-i	۲۲	
۰/۰۳ b	۰/۱۲ b-g	۰/۲۱ a-f	۰/۷۱a	۲/۸۵e-h	۲/۶۰abc	۰	
۰/۰۴ b	۰/۱۷ab	۰/۱۹b-h	۰/۵۹a-e	۳/۳۵efg	۲/۶۸ abc	۲	
۰/۰۸ ab	۰/۱۳ b-e	۰/۲۴ a-d	۰/۷۲ a	۳/۲۷ f-j	۱/۷۲ c-i	۴	۱۵ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک
۰/۰۲b	۰/۰۴e-h	۰/۱۳f-i	۰/۴۹a-e	۳/۳۷efg	۱/۴۴d-j	۸	
۰/۰۳b	۰/۱۰b-g	۰/۱۵d-i	۰/۴۱cde	۲/۷۸fgh	۱/۷۸c-i	۲۲	
۰/۰۳b	۰/۱۶ abc	۰/۲۲ a-e	۰/۵۷a-e	۵/۰bcd	۰/۹۶hij	۰	
۰/۰۸ ab	۰/۱۵a-d	۰/۲۴abc	۰/۶۲abc	۴/۳۵cde	۲/۶۲ abc	۲	
۰/۰۸ ab	۰/۲۲ a	۰/۲۷ ab	۰/۶۸ ab	۶/۰۵ ab	۳/۰۲ ab	۴	۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک
۰/۱۴a	۰/۲۱a	۰/۲۸a	۰/۷۰a	۶/۶۶a	۲/۳۱a-e	۸	
۰/۰۴b	۰/۲۳a	۰/۲۳a-d	۰/۶۱a-d	۵/۴۲abc	۳/۱۹a	۲۲	

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ۷. مقایسه میانگین‌های اثر اصلی غرقاب و کودهای آلی بر غلظت (mg/kg) فلزات سنگین در ریشه آفتابگردان

Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	سطوح	اثر اصلی
۰/۹۷ b	۲۹/۶۷ a	۱۲۹/۳ a	۷۴/۶۷ abc	۱۸۱/۳ b	۱۹۲۲ a	۰	
۲/۵۵a	۳۲/۲۱ a	۱۳۲/۳ a	۷۰/۵۷ bc	۱۸۰/۷ b	۱۷۹۰ a	۲	
۱/۶۶ ab	۳۰/۵۶a	۹۹/۴۰b	۷۷/۴۹ ab	۱۶۷/۰b	۱۵۳۴b	۴	غرقاب
۱/۴۴b	۳۱/۵۳a	۱۰۸/۷ ab	۶۶/۸۶c	۱۸۲/۴b	۱۸۲۹a	۸	(روز)
۱/۴۰ b	۳۲/۷۶ a	۱۲۲/۶ ab	۸۰/۰۲ a	۲۱۹/۲ a	۱۸۷۵ a	۲۲	
۱/۲۷ a	۳۱/۶۲ abc	۵۶/۲۶ d	۶۳/۱۷ d	۱۳۳/۹ c	۱۶۰۸ c	۰	
۱/۹۷ a	۲۷/۵۱c	۵۹/۵۷ d	۵۵/۵۵e	۱۴۲/۵c	۱۲۸۹d	۱۵ گرم کود دامی	
۱/۶۷ a	۳۳/۱۲ ab	۹۵/۶۴ c	۷۲/۸۵ c	۱۹۷/۳ b	۱۷۳۵ c	۳۰ گرم کود دامی	کود آلی
۱/۱۰a	۲۹/۶۴bc	۱۵۸/۵b	۸۱/۷۳b	۲۱۱/۰a	۲۲۵۳a	۱۵ گرم لجن فاضلاب	(بر کیلوگرم خاک)
۲/۰۲a	۳۴/۸۳ a	۲۲۲/۳ a	۹۶/۳۲a	۲۴۵/۷ a	۲۰۶۴ b	۳۰ گرم لجن فاضلاب	

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۲ روز غرقاب و کمترین آن در تیمار بدون کود آلی و ۸ روز غرقاب بود. بیشترین غلظت مس ریشه در تیمارهای دارای ۳۰ گرم لجن فاضلاب بود (جدول‌های ۸ و ۱۰). فاکتور انتقال مس در تمام تیمارها کمتر از یک بود (به‌طور میانگین برای تمام تیمارها ۰/۲۶) که بیانگر این است که مس نیز همانند سایر فلزات کم‌مصرف در ریشه گیاه غلظت بیشتری نسبت به بخش هوایی دارد.

جذب و غلظت روی در بخش هوایی و ریشه

تأثیر غرقاب شدن خاک بر جذب و غلظت روی در بخش هوایی گیاه معنی‌دار نبود (جدول‌های ۳ و ۵). با این حال، بیجری و شیراپ (۱۴) گزارش دادند که با افزایش مدت غرقاب، جذب و غلظت روی در بخش هوایی یولاف کاهش یافت. بررسی ما نشان داد که با غرقاب شدن خاک، غلظت روی قابل جذب گیاه در خاک کاهش یافت (داده‌ها ارائه نشده است) و با نتایج توفیقی و نجفی (۱) مطابقت داشت. به نظر می‌رسد که غلظت روی در بخش هوایی گیاه تحت تأثیر (۱) غلظت روی قابل جذب خاک، (۲) سرعت جذب و انتقال آن از

غلظت مس ریشه به‌طور معنی‌دار کاهش یافت در حالی که در سایر سطوح تفاوت معنی‌داری با سطح شاهد نداشت. سرعت رشد ریشه، سرعت جذب مس به‌وسیله آنها، سرعت انتقال مس به اندام‌های هوایی به‌طور هم‌زمان غلظت مس در ریشه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به جدول ۶، به‌نظر می‌رسد میزان انتقال مس به بخش هوایی در سطوح مختلف غرقاب تقریباً یکسان بوده است. بنابراین، کاهش غلظت مس در سطح ۸ روز غرقاب را می‌توان به بیشتر بودن سرعت رشد ریشه از سرعت جذب مس به‌وسیله آنها نسبت داد. هم‌چنین، بررسی ما نشان داد که با غرقاب شدن خاک، غلظت مس قابل جذب گیاه در خاک کاهش یافت (داده‌ها ارائه نشده است) و با نتایج ساح و مندال (۴۰) مطابقت داشت. بنابراین، کاهش غلظت مس قابل جذب گیاه پس از غرقاب شدن خاک نیز می‌تواند غلظت مس ریشه را کاهش دهد. جذب و غلظت مس در ریشه، با کاربرد هر دو سطح لجن فاضلاب و ۳۰ گرم کود دامی بر کیلوگرم خاک، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ تأثیر لجن فاضلاب در این افزایش بیشتر از کود دامی بود. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کود آلی بر غلظت و جذب مس در ریشه نشان داد که بیشترین جذب مس در ریشه در

جدول ۸. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کودهای آلی بر غلظت (mg/kg) فلزات سنگین در ریشه آفتابگردان

Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	مدت غرقاب (روز)	کود آلی (بر کیلوگرم خاک)
۱/۰۴cd	۲۹/۲۲a-d	۴۸/۳۲i	۶۷/۴۶c-g	۱۶۷/۶d-i	۱۸۵۳efg	۰	
۰/۸۴۳d	۳۰/۹۳a-d	۴۷/۹۴i	۵۲/۳۳f-i	۱۳۹/۶ghi	۱۱۹۱ hi	۲	
۰/۹۴۴d	۳۳/۴۷a-d	۵۲/۵۵i	۸۵/۷۵bc	۱۰۳/۲ij	۱۲۰۷hi	۴	۰
۰/۹۵۶d	۲۹/۵۲a-d	۷۰/۳۳ghi	۴۷/۴۶hi	۱۱۹/۸ij	۲۴۷۹ab	۸	
۱/۱۷cd	۳۴/۹۷a-d	۶۲/۱۷hi	۶۲/۸۷e-i	۱۳۹/۴g-j	۱۳۱۱h	۲۲	
۱/۳۷۲cd	۲۴/۴d	۵۱/۳۳i	۴۹/۷۲ghi	۱۱۶/۵ij	۱۲۶۶h	۰	
۱/۹۹۷bcd	۲۷/۶۲bcd	۵۵/۰۵i	۴۷/۱۲hi	۱۷۲/۲d-i	۱۱۷۲hi	۲	
۲/۷۴۲bc	۲۶/۲۵cd	۴۵/۹i	۴۳/۷۵i	۷۴/۰j	۱۳۴۵h	۴	۱۵ گرم کود دامی
۱/۱cd	۲۸/۶bcd	۵۶/۷۲hi	۵۶/۵۶f-i	۱۳۲/۱hij	۸۲۷i	۸	
۰/۸۶d	۳۰/۷a-d	۸۸/۸۶e-i	۸۰/۶۰b-e	۲۱۷/۷a-g	۱۸۳۶efg	۲۲	
۰/۸۵۵d	۲۸/۵۸bcd	۱۰۰/۷۰d-i	۷۹/۴۹b-e	۱۴۹/۷f-j	۱۵۶۶gh	۰	
۱/۳۵۱cd	۳۶/۶۱ abc	۹۲/۹۹۵d-i	۶۷/۹۹c-g	۱۶۳/۹e-i	۱۹۳۵d-g	۲	
۰/۹۴۵d	۳۱/۱۵ a-d	۸۵/۱۳f-i	۷۰/۸۸c-f	۱۸۰/۶c-i	۱۱۷۵hi	۴	۳۰ گرم کود دامی
۱/۲۳cd	۳۸/۰۱ ab	۹۷/۴۲d-i	۶۴/۷۵d-h	۲۷۸/۳ab	۲۰۳۰c-f	۸	
۲/۰۸bcd	۳۱/۲۳ a-d	۱۰۲/۰d-i	۸۱/۱۲b-e	۲۱۴/۲a-g	۱۹۶۷c-g	۲۲	
۰/۸۳۱d	۲۹/۲۳ bcd	۱۷۰/۶bc	۸۲/۵۹b-e	۲۴۴/۱a-e	۲۵۵۶a	۰	
۰/۸۹۷cd	۲۶/۱ cd	۱۳۳/۱c-g	۷۸/۸۶b-e	۱۶۸/۹e-i	۲۳۲۳a-d	۲	
۱/۹۸۳bcd	۳۰/۹۵ a-d	۱۸۷/۵bc	۸۲/۲۲b-e	۲۵۰/۳a-d	۲۲۰۵a-e	۴	۱۵ گرم لجن فاضلاب
۰/۶۵۹d	۳۰/۰۸ a-d	۱۵۷/۰be	۸۲/۱۳b-e	۱۶۶/۷d-i	۲۰۲۴c-f	۸	
۱/۰۴۸cd	۳۱/۸۶ a-d	۱۴۴/۴c-f	۸۲/۸۳b-e	۲۲۵/۱a-f	۲۱۵۶a-f	۲۲	
۰/۷۹۵d	۳۶/۹۴ abc	۲۷۵/۵a	۹۴/۰۸ab	۲۲۸/۴a-f	۲۳۶۸abc	۰	
۲/۱۱۲bcd	۳۹/۸۱ a	۳۳۲/۳a	۱۰۶/۵۰a	۲۵۸/۹abc	۲۳۲۷a-d	۲	
۲/۲۰۴bcd	۳۰/۹۵ a-d	۱۲۵/۹c-h	۱۰۴/۹۰a	۲۲۶/۹a-f	۱۷۳۷fg	۴	۳۰ گرم لجن فاضلاب
۳/۲۵۹ab	۳۱/۴۳ a-d	۱۶۲/۱bcd	۸۳/۴۱bcd	۲۱۴/۹b-h	۱۷۸۳efg	۸	
۱/۳۰۹cd	۳۵/۰۵ a-d	۲۱۵/۶b	۹۲/۶۸ab	۲۹۹/۳a	۲۱۰۵b-f	۲۲	

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ۹. مقایسه میانگین‌های اثر اصلی غرقاب و کودهای آلی بر جذب (mg/pot) فلزات سنگین در ریشه آفتابگردان

Cd×1000	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	سطوح	اثر اصلی
۷/۲۶ c	۰/۲۲ b	۰/۸۸ a	۰/۵۷ a	۱/۴۰ a	۱۴/۹۴ a	۰	
۱۶/۵۸a	۰/۲۶ a	۰/۹۷ a	۰/۵۹a	۱/۵۲ a	۱۵/۱۸ a	۲	
۱۳/۲۸ ab	۰/۲۲ b	۰/۶۶ b	۰/۵۸ a	۱/۲۵ a	۱۱/۴۰c	۴	غرقاب (روز)
۱۱/۵۱abc	۰/۲۴ ab	۰/۸۱ ab	۰/۵۲a	۱/۴۶ a	۱۳/۸۲ ab	۸	
۸/۶۹ bc	۰/۲۱ b	۰/۷۵ ab	۰/۵۲ a	۱/۴۳ a	۱۲/۳۹ bc	۲۲	
۶/۳۰ b	۰/۲۰ c	۰/۳۴ d	۰/۴۱ d	۰/۸۶ c	۱۰/۰۲ c	۰	
۱۱/۳۲ ab	۰/۱۹ c	۰/۴ d	۰/۳۸d	۰/۹۷ c	۸/۸۴ c	۱۵ گرم کوددامی	کود آلی (بر کیلوگرم خاک)
۱۴/۶۴ a	۰/۲۵ b	۰/۷۱ c	۰/۵۵ c	۱/۵۲ b	۱۳/۳۱ b	۳۰ گرم کوددامی	
۸/۴۶b	۰/۲۳ b	۱/۲۵b	۰/۶۵b	۱/۶۹b	۱۸/۱۵a	۱۵ گرم لیجن فاضلاب	
۱۶/۶۱a	۰/۲۹a	۱/۷۵ a	۰/۸۱a	۲/۰۴a	۱۷/۴۱a	۳۰ گرم لیجن فاضلاب	

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ۱۰. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کودهای آلی بر جذب (mg/pot) فلزات سنگین در ریشه آفتابگردان

Cd×1000	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	مدت غرقاب (روز)	کود آلی (بر کیلوگرم خاک)
۷/۹ cde	۰/۲۲ c-f	۰/۳۶ j	۰/۵۰ e-i	۱/۲۶ d-h	۱۳/۹۰ d-h	۰	۰
۵/۶e	۰/۲۱c-f	۰/۳۲j	۰/۳۵g-j	۰/۹۴fgh	۸/۰۱ ij	۲	
۶/۱ e	۰/۲۱ c-f	۰/۳۳ j	۰/۶۰ c-f	۰/۶۶ gh	۷/۶۲ ih	۴	
۴/۸e	۰/۱۴f	۰/۳۵j	۰/۲۳j	۰/۶۱h	۱۲/۵۴e-i	۸	
۷/۲ cde	۰/۲۲ c-f	۰/۳۸ ij	۰/۳۹ f-j	۰/۸۵ gh	۸/۰۴ ij	۲۲	
۸/۴cde	۰/۱۵ f	۰/۳۱ j	۰/۳۰ij	۰/۷۱gh	۷/۷۲ij	۰	۱۵ گرم کود دامی
۱۳/۴ cde	۰/۱۸ef	۰/۳۶j	۰/۳۱ij	۱/۱۵d-h	۷/۸۶ ij	۲	
۲۰/۶ bcd	۰/۲۰ def	۰/۳۵ j	۰/۳۳ hij	۰/۵۷ h	۱۰/۱۰ g-j	۴	
۸/۴cde	۰/۲۲c-f	۰/۴۳hij	۰/۴۳f-j	۱/۰۱e-h	۶/۳۹j	۸	
۵/۸e	۰/۲۰c-f	۰/۵۸g-j	۰/۵۳c-i	۱/۴۴c-h	۱۲/۱۱e-i	۲۲	
۶/۰ e	۰/۲۰ def	۰/۶۸g-j	۰/۵۶ c-g	۱/۰۰ e-h	۱۰/۶۰ f-j	۰	۳۰ گرم کود دامی
۱۱/۹cde	۰/۲۹bc	۰/۷۵f-j	۰/۵۵c-h	۱/۳۴c-h	۱۵/۶۸ c-f	۲	
۷/۰ cde	۰/۲۳ c-f	۰/۶۳ g-j	۰/۲۴ d-i	۱/۳۴ d-h	۸/۷۰ hij	۴	
۱۰/۲cde	۰/۳۲b	۰/۸۲e-i	۰/۵۶c-g	۲/۴۰ab	۱۷/۴۶cde	۸	
۱۴/۸cde	۰/۲۲ c-f	۰/۷۲ f-i	۰/۵۸ c-g	۱/۵۳ c-g	۱۴/۱۲ d-g	۲۲	
۷/۷ de	۰/۲۷ c-f	۱/۵۷ bc	۰/۷۶bc	۲/۲۵abc	۲۳/۶۱ab	۰	۱۵ گرم لیجن فاضلاب
۷/۷ cde	۰/۲۲c-f	۱/۱۳c-g	۰/۶۷b-e	۱/۴۶c-h	۱۹/۸۸ abc	۲	
۱۴/۵ cde	۰/۲۳ cc-f	۱/۳۸ cde	۰/۶۱ c-f	۱/۸۵ b-e	۱۶/۱۸ cde	۴	
۵/۵e	۰/۲۲c-f	۱/۲۸c-f	۰/۶۷b-e	۱/۳۶d-h	۱۶/۴۴cde	۸	
۷/۳cde	۰/۲۲c-f	۰/۹۵c-g	۰/۵۶c-g	۱/۵۳c-g	۱۴/۶۴c-g	۲۲	
۶/۴ de	۰/۲۹ bc	۲/۱۹ b	۰/۷۵bcd	۱/۸۲b-f	۱۸/۸۴bcd	۰	۳۰ گرم لیجن فاضلاب
۲۱ bc	۰/۴۱a	۳/۴۳a	۱/۱۱a	۲/۷۵a	۲۴/۴۶ a	۲	
۱۸/۵ b-e	۰/۲۶ b-e	۰/۸۷ d-h	۰/۸۷ b	۱/۸۷ b-e	۱۴/۴۰ c-g	۴	
۲۸/۷ab	۰/۲۹bcd	۱/۴۶bcd	۰/۷۶bc	۱/۹۴bcd	۱۶/۲۸cde	۸	
۸/۴cde	۰/۲۱c-f	۱/۳۲c-f	۰/۵۸c-g	۱/۸۵b-e	۱۳/۰۶e-i	۲۲	

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

گیاه وجود نداشت، بلکه لازم بود برای بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه از نظر روی، مقداری کود شیمیایی روی نیز همراه این کودهای آلی مصرف می‌شد. جدول ۶ نشان می‌دهد که تأثیر مدت غرقاب شدن خاک بر غلظت روی بخش هوایی آفتابگردان به منبع و مقدار کود آلی مورد استفاده بستگی داشت. بیشترین غلظت روی بخش هوایی آفتابگردان در تیمار ۸ روز غرقاب و ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و کمترین آن در تیمار ۲ روز غرقاب و بدون کود آلی مشاهده گردید هرچند که با برخی از تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشت. تأثیر غرقاب شدن خاک و کودهای آلی بر غلظت و جذب روی در ریشه معنی‌دار بود. جذب و غلظت روی در ریشه تا ۲ روز پس از غرقاب تغییر معنی‌داری نداشت ولی در سطح ۴ روز غرقاب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و بعد از آن تغییر معنی‌داری نکرد (جدول‌های ۷ و ۹).

کاهش غلظت روی در ریشه ممکن است ناشی از کاهش غلظت روی قابل‌جذب گیاه در خاک پس از غرقاب (۱) و کاهش غلظت اکسیژن در محیط پیرامون ریشه پس از غرقاب و وقوع تنش کمبود اکسیژن باشد که شدت تنفس ریشه و در نتیجه جذب فعال روی را کاهش می‌دهد (۲۸). کاربرد ۳۰ گرم کود دامی و ۱۵ و ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، جذب و غلظت روی در ریشه را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد. افزایش جذب و غلظت روی در ریشه با کاربرد لجن فاضلاب بیشتر از کود دامی بود. با افزایش سطح مصرفی هر دو کود آلی جذب و غلظت روی در ریشه افزایش یافت. تأثیر غرقاب بر غلظت و جذب روی در ریشه به منبع و مقدار کود آلی مصرفی بستگی داشت و برعکس؛ به‌طوری‌که تأثیر غرقاب بر غلظت روی ریشه فقط در سطح ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک معنی‌دار بود. بیشترین غلظت و جذب روی در ریشه مربوط به تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۲ روز غرقاب بود (جدول‌های ۸ و ۱۰). مقدار فاکتور انتقال روی در تمام تیمارها کمتر از یک بود (به‌طور میانگین ۰/۰۷). به عبارت دیگر، غلظت روی ریشه بسیار بیشتر

ریشه به بخش هوایی و ۳) سرعت رشد گیاه است. با افزایش مدت غرقاب غلظت روی قابل‌جذب خاک کاهش یافته و انتظار این است که سرعت جذب و انتقال آن از ریشه به بخش هوایی نیز کاهش یابد و در نتیجه غلظت روی در بخش هوایی کاهش یابد ولی از طرف دیگر با افزایش مدت غرقاب ماده خشک بخش هوایی کاهش یافته و بر اثر وقوع اثر تغلیظ، غلظت روی در بخش هوایی افزایش می‌یابد. در نتیجه، برآیند اثر این عامل‌ها طوری است که اثر غرقاب بر غلظت روی در بخش هوایی معنی‌دار نمی‌باشد. تأثیر منبع و مقدار کودهای آلی بر جذب و غلظت روی در بخش هوایی گیاه معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۵). با کاربرد ۳۰ گرم کود دامی و ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، غلظت روی بخش هوایی به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. تأثیر لجن فاضلاب در این افزایش بیشتر از کود دامی بود. بیشترین غلظت روی بخش هوایی در سطح ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک مشاهده گردید؛ هر چند که با ۳۰ گرم کود دامی تفاوت معنی‌دار نداشت.

با کاربرد لجن فاضلاب، غلظت روی قابل‌جذب خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (داده‌ها ارائه نشده است). هم‌چنین کاهش pH خاک بر اثر تجزیه مواد آلی حاصل از افزودن لجن فاضلاب و نیز تشکیل کی‌لیت‌های روی به‌وسیله ترکیبات آلی اضافه شده، در افزایش قابلیت جذب روی خاک مؤثر می‌باشد. مواد آلی کوتاه زنجیر از طریق پیوند یافتن با روی، تحرک و انحلال روی در خاک را افزایش داده و قابلیت جذب آن را برای گیاه افزایش می‌دهند (۷). نظری و همکاران (۶) افزایش غلظت روی در بخش هوایی گیاهان گندم، جو و ذرت را بر اثر کاربرد لجن فاضلاب گزارش نمودند. دامنه غلظت نرمال روی در بخش هوایی گیاهان ۱۵۰-۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک و حد سمیت آن ۵۰۰-۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک است (۲۲ و ۳۶). با توجه به این غلظت‌ها، غلظت روی بخش هوایی در تمامی تیمارهای مورد مطالعه کمتر از غلظت نرمال بود. به عبارت دیگر، نه تنها سمیت روی در

از غلظت آن در بخش هوایی بود که نشانگر تجمع این عنصر در ریشه بود. نظری و همکاران (۶) مشاهده کردند که غلظت روی در ریشه گندم به دلیل غیرپویا بودن آن بیشتر از بخش هوایی بود.

جذب و غلظت سرب در بخش هوایی و ریشه

تأثیر غرقاب شدن خاک بر جذب و غلظت سرب در بخش هوایی معنی دار نبود (جدول‌های ۳ و ۵). سون و همکاران (۴۲) گزارش دادند که پس از غرقاب غلظت کادمیم محلول در آب+تبدالی خاک کاهش یافت. بیجری و شیراپ (۱۴) گزارش دادند که با افزایش مدت غرقاب، جذب و غلظت سرب در بخش هوایی یولاف کاهش یافت. به نظر می‌رسد معنی دار نشدن تأثیر غرقاب بر جذب و غلظت سرب در بخش هوایی به همان دلایلی است که در مورد روی بیان گردید. تأثیر منبع و مقدار کود آلی مصرفی بر جذب و غلظت سرب در بخش هوایی معنی دار بود (جدول‌های ۳ و ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که افزودن کود دامی بر جذب و غلظت سرب در بخش هوایی اثر معنی دار نداشت ولی افزودن لجن فاضلاب به خاک، جذب و غلظت سرب در بخش هوایی را به‌طور معنی‌دار افزایش داد. با افزایش مقدار لجن فاضلاب مصرفی، میزان افزایش جذب و غلظت سرب در بخش هوایی نیز بیشتر شد (جدول‌های ۳ و ۵). غلظت سرب در لجن فاضلاب مورد استفاده ۱۴/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که چندین برابر خود خاک بود. در نتیجه، با کاربرد لجن فاضلاب، غلظت سرب خاک و به دنبال آن، جذب و غلظت سرب در بخش هوایی به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. کاباتا پندیاس و پندیاس (۲۲) بیان داشتند که کاهش pH خاک و زیادی لیگاندهای آلی سبب افزایش جذب سرب توسط گیاه و انتقال آن به بخش هوایی گیاه می‌شود. غلظت نرمال سرب در بخش هوایی گیاهان ۱۰-۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد سمیت آن ۳۰-۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (۲۲، ۳۶). میانگین غلظت سرب بخش هوایی برای تمامی تیمارها و تکرارها، ۲/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. جدول ۴ نشان می‌دهد که در تمامی

تیمارهای مورد مطالعه غلظت سرب بخش هوایی کمتر از ۶/۹۱ mg/kg و در اغلب آنها حتی کمتر از غلظت نرمال بود. به عبارت دیگر با کاربرد لجن فاضلاب تا ۶۰ تن بر هکتار در یک خاک شن لومی غلظت سرب در بخش هوایی گیاه بسیار کمتر از غلظت‌های سمی بود. بیشترین غلظت سرب بخش هوایی مربوط به تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۲۲ روز غرقاب و کمترین آن (۰/۳۵mg/kg) مربوط به تیمار بدون کود آلی و ۲۲ روز غرقاب می‌باشد (جدول ۴). تأثیر مدت غرقاب بر جذب و غلظت سرب در بخش هوایی به سطوح کود آلی بستگی داشت (جدول‌های ۴ و ۶)؛ به‌طوری که غلظت سرب بخش هوایی با افزایش زمان غرقاب در سطح بدون کود آلی روند کاهشی، در سطح ۳۰ گرم لجن فاضلاب روند افزایشی و در سایر سطوح روند کاهشی و سپس افزایشی داشت. این نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی تأثیر مدت زمان غرقاب بر غلظت سرب بخش هوایی گیاه ساده نیست.

تأثیر غرقاب شدن خاک بر جذب سرب در ریشه معنی‌دار بود ولی بر غلظت سرب در ریشه معنی‌دار نبود (جدول‌های ۷ و ۹). جذب سرب در ریشه با افزایش مدت غرقاب به ۲ روز افزایش یافت ولی در سطوح بعدی غرقاب مجدداً کاهش یافت که با توجه عدم تغییر معنی‌دار غلظت سرب در سطوح مختلف غرقاب، می‌تواند ناشی از تغییرات ماده خشک ریشه باشد. تأثیر کودهای آلی بر غلظت و جذب سرب در ریشه معنی‌دار بود (جدول‌های ۷ و ۹). غلظت سرب ریشه با افزایش سطوح کود آلی مصرفی از ۱۵ به ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ البته هیچ‌کدام از سطوح تفاوت معنی‌داری با سطح شاهد نداشتند. کرمی و همکاران (۲) نیز گزارش کردند که لجن فاضلاب بر غلظت سرب ریشه نسبت به شاهد تأثیر معنی‌دار نداشت. جدول‌های ۸ و ۱۰ نشان می‌دهند که بیشترین جذب و غلظت سرب در ریشه در تیمار ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و ۲ روز غرقاب بود. میانگین فاکتور انتقال سرب برای تمامی تیمارها و تکرارها ۰/۱ بود. به عبارت دیگر، غلظت سرب در ریشه آفتابگردان ۱۰ برابر

کیلوگرم است (۳۶). کاباتا پندیاس و پندیاس (۲۲) غلظت بحرانی کادمیم در بخش هوایی گیاه برای ۱۰ درصد کاهش رشد آن را $20-10$ mg/kg گزارش دادند. بنابراین، غلظت کادمیم بخش هوایی آفتابگردان حتی با کاربرد لجن فاضلاب نیز کمتر از غلظت‌های سمی بود؛ زیرا بیشترین غلظت کادمیم بخش هوایی $3/86$ mg/kg بود (جدول ۴). جدول‌های ۴ و ۶ نشان می‌دهند که تأثیر غرقاب بر جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی به منبع و سطح کود آلی مصرفی بستگی داشت؛ به‌طوری‌که که تأثیر غرقاب بر جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی در برخی سطوح کود آلی معنی‌دار نبود.

تأثیر غرقاب شدن خاک بر جذب و غلظت کادمیم در ریشه معنی‌دار بود. جذب و غلظت کادمیم در ریشه تا ۲ روز غرقاب افزایش یافت ولی پس از آن به تدریج کاهش یافت (جدول‌های ۷ و ۹). این کاهش جذب و غلظت در ریشه را می‌توان به اثر تنش کمبود اکسیژن بر کاهش جذب فعال کادمیم به‌وسیله ریشه گیاه نسبت داد. تأثیر منبع و مقدار کود آلی مصرفی بر غلظت کادمیم بخش هوایی معنی‌دار نبود ولی بر جذب کادمیم معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۵). بنابراین، تغییر معنی‌دار جذب کادمیم در ریشه با کاربرد کودهای آلی را می‌توان به تغییرات ماده خشک ریشه نسبت داد. کاربرد 30 گرم کود دامی و 30 گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک به‌طور معنی‌داری جذب کادمیم در ریشه را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. کرمی و همکاران (۲) افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم ریشه گیاه گندم را با کاربرد لجن فاضلاب گزارش نمودند. کیلر و همکاران (۲۴) مشاهده کردند که غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه‌های گیاهان لوبیا، ذرت، چغندر قند، سیب‌زمینی، کاهو و اسفناج بر اثر مصرف لجن فاضلاب نسبت به شاهد افزایش یافت. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل غرقاب و کودهای آلی نشان داد که تأثیر غرقاب بر جذب و غلظت کادمیم در ریشه به منبع و سطح کود آلی مصرفی بستگی داشت؛ به‌طوری‌که که تأثیر غرقاب بر جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی در برخی سطوح کود آلی معنی‌دار نبود (جدول‌های ۸ و ۱۰). میانگین فاکتور انتقال

بخش هوایی بود. تجمع سرب در ریشه گیاه می‌تواند از انتقال آن به چرخه غذایی جلوگیری نماید.

جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه

تأثیر غرقاب شدن خاک بر جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی معنی‌دار بود. غلظت و جذب کادمیم در بخش هوایی گیاه پس از ۲ روز غرقاب افزایش یافت ولی در سطوح بعدی غرقاب دوباره کاهش یافت؛ به‌طوری‌که با تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول‌های ۳ و ۵). بیجری و شیراپ (۱۴) گزارش دادند که با افزایش مدت غرقاب، جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی یولاف کاهش یافت. سون و همکاران (۴۲) گزارش دادند که پس از غرقاب غلظت کادمیم محلول در آب و تبادل‌ی خاک کاهش یافت. تأثیر منبع و مقدار کود آلی مصرفی بر جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی معنی‌دار نبود (جدول‌های ۳ و ۵). با توجه به اینکه تأثیر منبع و مقدار کود آلی مصرفی بر جذب کادمیم در ریشه معنی‌دار بود (جدول ۹)، این نتیجه را می‌توان به تجمع کادمیم جذب شده در ریشه گیاه و عدم انتقال آن به بخش هوایی نسبت داد که به‌وسیله کرمی و همکاران (۲) نیز گزارش شده است. با این حال، بیدول و دودی (۱۳) گزارش کردند که مصرف لجن فاضلاب همواره منجر به افزایش تجمع کادمیم در ساقه و برگ گیاه ذرت نسبت به تیمار شاهد گردید.

هودجی و همکاران (۸) نتیجه گرفتند که با مصرف لجن فاضلاب غلظت کادمیم بخش هوایی و ریشه کاهو و اسفناج افزایش یافت. آنان بیان نمودند که برای مصرف لجن فاضلاب به عنوان یک کود آلی ارزان قیمت، توجه به غلظت کادمیم در ترکیب لجن فاضلاب اهمیت دارد و در صورت کشت سبزیجات در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب که دارای غلظت کادمیم زیادی می‌باشد، امکان جذب و تجمع کادمیم در بخش هوایی و ریشه سبزیجات و ورود این عنصر به زنجیره غذایی وجود دارد. غلظت نرمال کادمیم در بخش هوایی گیاهان $0/2-0/5$ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد سمیت آن $30-5$ میلی‌گرم بر

طریق تأثیر بر مقدار عناصر قابل جذب خاک، وضعیت تهویه، فعالیت میکروبی، شدت تنفس ریشه و رشد آنها بر عامل‌های فوق اثر گذاشته و جذب و غلظت عناصر در گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۱۵، ۳۹ و ۴۱). میانگین فاکتور انتقال فلزات سنگین مورد مطالعه به ترتیب $Cd=1.1 < Mn=0.55 < Fe=0.3 < Cu=0.26 < Pb=0.1 < Zn=0.07$ بود. بنابراین، گیاه آفتابگردان Fe, Cu, Zn, Mn و Pb را در ریشه انباشته کرد در حالی که غلظت Cd در ریشه تفاوت معنی‌داری با بخش هوایی نداشت. با توجه به کمتر بودن pH ، EC ، غلظت سدیم در لجن فاضلاب نسبت به کود دامی (جدول‌های ۱ و ۲)، و کمتر بودن غلظت فلزات سنگین در بخش هوایی آفتابگردان از سطوح بحرانی سمیت در تمامی تیمارها، و با در نظر گرفتن فاکتور انتقال فلزات سنگین، می‌توان لجن فاضلاب تصفیه‌خانه شهر میانه را به عنوان یک کود آلی در مزارع آفتابگردان توصیه کرد و ضمن مصرف کنترل شده آن از کودهای شیمیایی آهن و روی نیز استفاده نمود تا کمبودهای آنها در گیاه بروز ننماید.

کادمیم ۱/۱ بود که نشان‌دهنده این بود که غلظت کادمیم بخش هوایی تفاوت چندانی با ریشه‌های آفتابگردان نداشت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون تی استیودنت نیز نشان داد که میان غلظت کادمیم در ریشه و بخش هوایی تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. به‌طور کلی، تأثیر غرقاب، منبع و مقدار کودهای آلی بر غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه به عامل‌های زیر بستگی دارد: (۱) سرعت رشد گیاه، (۲) سرعت جذب و انتقال عنصر به اندام‌های هوایی گیاه. در این مورد سه حالت ممکن است رخ دهد: (۱) اگر با اعمال تیمار نسبت سرعت رشد گیاه به سرعت جذب و انتقال عنصر به اندام‌های هوایی گیاه بیشتر از سرعت جذب و انتقال عنصر به اندام‌های هوایی گیاه افزایش یابد، به دلیل وقوع اثر رقت غلظت عنصر در گیاه کاهش خواهد یافت. (۲) اگر سرعت رشد گیاه کمتر از سرعت جذب و انتقال عنصر به اندام‌های هوایی گیاه افزایش یابد؛ در این حالت، به دلیل وقوع اثر تغلیظ غلظت عنصر در گیاه افزایش خواهد یافت. غرقاب شدن خاک و کاربرد کودهای آلی از

منابع مورد استفاده

- توفیقی، ح. و ن. نجفی. ۱۳۸۰. بررسی تغییرات بازیافت و قابلیت استفاده روی خاک و روی اضافه شده به خاک در شرایط غرقابی و غیرغرقابی در خاک‌های شالیزاری شمال ایران. صفحات ۳۸۴-۳۸۲. هفتمین کنگره علوم خاک ایران، ۷-۴ شهریور، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
- کریمی، م.، ی. رضایی‌نژاد، م. افیونی و ح. شریعتمداری. ۱۳۸۶. اثرات باقیمانده لجن فاضلاب شهری بر غلظت عناصر سرب و کادمیم در خاک و گیاه گندم. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۱ الف): ۷۹-۹۴.
- کلباسی، م. ۱۳۷۵. وضعیت مواد آلی در خاک‌های ایران و نقش کود کمپوست. خلاصه مقالات پنجمین کنگره علوم خاک ایران، ۱۰ تا ۱۳ شهریور، آموزشکده کشاورزی کرج، کرج.
- کلباسی، م. و ع. حسین‌پور. ۱۳۷۶. اثر مانداب شدن موقت سه خاک آهکی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و تغییرات آنها پس از زه‌کشی. مجله علوم کشاورزی ایران ۲۸(۳): ۴۹-۵۸.
- میرنظامی ض. ح. ۱۳۸۰. فن‌آوری روغن و پالایش آن. نشر علوم دانشگاهی، تهران.
- نظری، م. ع. ح. شریعتمداری، م. افیونی، م. مبللی و ش. رحیلی. ۱۳۸۵. اثر کاربرد پساب و لجن فاضلاب بر غلظت برخی عناصر و عملکرد گندم، جو و ذرت. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۰(۳ الف): ۹۷-۱۱۰.

۷. واثقی س.، م. افیونی، ح. شریعتمداری و م. مبلی. ۱۳۸۳. اثر لجن فاضلاب بر غلظت تعدادی از عناصر غذایی و ویژگی‌های شیمیایی خاک. آب و فاضلاب ۱۶: ۱۵-۲۲.
۸. هودجی، م.، م.ج. عابدی، م. افیونی و ف. موسوی. ۱۳۸۱. تأثیر مصرف لجن فاضلاب و کادمیوم بر غلظت کادمیوم در شاهی، کاهو و اسفناج. مجله علمی و پژوهشی علوم کشاورزی ۹: ۵۷-۷۲.
9. Alloway, B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. 2nd ed., Blackie Academic & Professional, Glasgow, UK.
10. Appenroth, K.J. 2010. Definition of "Heavy Metals" and Their Role in Biological Systems. PP. 19-30. In: I. Sherameti and A. Varma (Eds.). Soil Heavy Metals. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
11. Barker, A.V. and D.J. Pilbeam. 2007. Handbook of Plant Nutrition. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, London, New York.
12. Berdanier, C.D. and T.K. Atkins. 1998. Advanced Nutrition. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA.
13. Bidwell, A.M., R.H. Dowdy. 1987. Cadmium and zinc availability to corn following termination of sewage sludge applications. J. Environ. Quality 16: 4438-4442.
14. Bjerre, G.K. and H.H. Schierup. 1985. Influence of waterlogging on availability and uptake of heavy metals by oat grown in different soils. Plant and Soil 88: 45-56.
15. Bolan, N.S. and V.P. Duraisamy. 2003. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilisation and phytoavailability of heavy metals: A review involving specific case studies. Aust. J. Soil Res. 41:533-555.
16. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron. J. 54: 494-465.
17. Das, M. and S.K. Maiti. 2007. Metal accumulation in 5 native plants growing on abandoned CU-tailings ponds. Appl. Ecol. and Environ. Res. 5(1): 27-35.
18. Fageria, N.K., V.C. Baligar and R.B. Clark. 2002. Micronutrients in crop production. Advances in Agronomy, 77:185-268.
19. Grassinia, P., G.I. Indacoa, M.L.Pereirab, A.J. Hala and N. Troponia. 2006. Responses to short-term waterlogging during grain filling in sunflower. Field Crops Res. 101:352-363.
20. Gupta, P.K. 2000. Soil, Plant, Water, and Fertilizer Analysis. Agrobios, New Delhi, India.
21. Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale and W.L. Nelson. 2004. Soil Fertility and Fertilizers an Introduction to Nutrient Management. 7th ed., Prentice Hall, USA.
22. Kabata Pendias, A. and H. Pendias. 2001. Trace Element in Soils and Plants. 3rd ed., CRC Press, New York, USA.
23. Kashem, M.A. and B.R. Singh. 2001. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn. Nutr. Cycling in Agrecoecosys. 61: 247-255.
24. Keller, C., A. Kayser, A. Keller, and R. Schulin. 2000. Heavy-metal uptake by agricultural crops from sewage-sludge treated soils of the upper Swiss Rhine valley and the effect of time. PP. 273-291. In: I.K. Iskandar (Ed.), Environmental Restoration of Metals Contaminated Coils. Lewis Pub., USA.
25. Khabaz-Saberi, H., T.L. Setter and I. Waters. 2006. Waterlogging induces high to toxic concentrations of iron, aluminum, and manganese in wheat varieties on acidic soil. J. Plant Nutr. 29(5): 899-911.
26. Knudsen, D., G.A. Peterson, and P.F. Pratt. 1982. Lithium, sodium, and potassium. PP. 225-246. In: A. L. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2, ASA-SSA, Madison, WI., USA.
27. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Sci. Soc. Amer. J. 42: 421-428.
28. Marschner, H. 2003. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, USA.
29. Mclean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. PP. 199-224. In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties. 2nd ed., Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison USA.
30. Najafi N. and H. Towfighi. 2008. Changes in pH, EC and concentration of phosphorus in soil solution during submergence and rice growth period in some paddy soils of North of Iran. PP. 555-567. International Meeting on Soil Fertility, Land Management, and Agroclimatology, 29 October - 1 November, Kusadasi, Turkey.
31. Narteh, L.T., and K.L. Sahrawat. 1999. Influence of flooding on electrochemical and chemical properties of West African soils. Geoderma 87: 179-207.
32. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. PP. 181-197. In: A. L. Page et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part II. 2nd ed., ASA, SSSA, Madison, WI. USA.
33. Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 539-579. In: A. L. Page et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part II. 2nd ed., ASA, SSSA, Madison, WI. USA.
34. Olsen, S.R., and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403-430. In: Page et al. (eds.), Methods of Soil Analysis. Part II. 2ed. ASA, SSSA, Madison, WI. USA.

35. Orchard, P.W. and R.S. Jessop. 1984. The response of sorghum and sunflower to short-term waterlogging. I. Effects of stage of development and duration of waterlogging on growth and yield. *Plant and Soil* 81:119-132.
36. Pais, I. J. and J.B. Jones. 1997. *The Handbook of Trace Elements*. St. Luice Press, Boca Raton, FL., USA.
37. Peters, J. 2003. *Recommended Methods of Manure Analysis*. Cooperative Extension Pub., University of Wisconsin, USA.
38. Ponnampereuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. in Agron.* 24: 29-96.
39. Porter, G.S., J.B. Bajita, N.V. Hue and D. Strand. 2004. Manganese solubility and phytotoxicity affected by soil moisture, oxygen levels, and green manure additions. *Commun. in Soil Sci. and Plant Anal.* 35(1): 1532-2416.
40. Saha, J.K. and B. Mandal. 1998. Effect of submergence on copper fractions in Alfisols. *J. Ind. Soc. of Soil Sci.* 46:32-36.
41. Salim, H.M. and D.L. Sparks. 2001. *Heavy Metals Release in Soils*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA.
42. Sun, L., S. Chen, L. Chao and T. Sun. 2007. Effects of flooding on changes in Eh, pH and speciation of cadmium and lead in contaminated soil. *Bull. Environ. Contamin. and Toxicol.* 79:514-518.
43. Welch, R.M. 2002. The impact of mineral nutrients in food crops on global human health. *Plant and Soil* 247: 83-90.
44. Westerman, R.L. 1990. *Soil Testing and Plant analysis*. 3rd ed., Soil Science Society of America Book Series, Number 3, Madison, Wisconsin, USA.
45. Yoon, J., Cao X., Zho Q. and Ma L.Q. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Sci. of the Total Environ.* 368: 456-464.