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[1]

(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 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. 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 به‌دست 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 ۳/۵ g/cm^3 است (۱۰). برخی از این فلزات مانند Fe، Mn، Zn و Cu برای جانداران لازم هستند که از عناصر کم‌مصرف 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 به‌علت آثار سازنده‌ای که بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و حاصل‌خیزی خاک دارد، به‌عنوان 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 ۰/۵ 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 و۲۳). 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،

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 Fe، Mn، Zn، Cu، 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 ۲۰-۰ 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 قابل‌جذب با عصاره‌گیر اولسن (۳۴)، پتاسیم و سدیم قابل‌جذب با عصاره‌گیر استات آمونیوم (۲۶)، روی، آهن، منگنز، مس، کادمیم و سرب قابل‌جذب با عصاره‌گیر DTPA (۲۷) استخراج شدند. pH خاک در سوسپانسیون ۱:۱ آب به خاک (۲۹) و EC 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 تیتر 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 برگی به دو گیاه در هر گلدان تنک گردید (۱۹).

مدت زمان غرقاب ۰، ۲، ۴، ۸ و ۲۲ روز بود که در مرحله شش برگی 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 حاصل‌ضرب غلظت عنصر در ماده

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 به‌وسیله بیجری و شیراپ (۱۴) در یولاف و خباز صابری و همکاران (۲۵) در گندم گزارش شده است و می‌تواند ناشی از افزایش آهن قابل‌جذب خاک پس از غرقاب باشد؛ زیرا، بررسی ما نشان داد که با غرقاب شدن خاک، غلظت آهن قابل‌جذب 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

جدول۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

گروه بافت خاک	آهک	ماده آلی	pH (۱:۱)	EC (dS/m)	سدیم	پتاسیم	فسفر	آهن	منگنز	مس	روی	کادمیم	سرب
	(٪)				(mg/kg)								
شن‌لومی	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

	$pH_{(1:2)}$	$EC_{(1:2)}$ (dS/m)	سدیم	پتاسیم	فسفر	آهن	منگنز	مس	روی	کادمیم	سرب
			(mg/kg)								
کود دامی	۸/۷۱	۲۱/۱۵	۵۸۱۰/۷	۳۸۱۲/۴	۱۸۸/۴	۵/۷۳	۳/۷	۱/۸۴	۹/۵	۰/۴	۳/۰۴
لجن‌فاضلاب	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	۱۸/۸۳a	۶/۱۶a	۲/۸۷a	۲/۵۵a
	۴	۴۴/۷۳ c	۹۳/۵۵ bc	۱۷/۳۳ a	۶/۰۱ a	۲/۸۳ a	۱/۶۶ ab
	۸	۶۰/۸۶ab	۱۰۱/۲b	۱۷/۸۳a	۵/۵۸a	۲/۵۸a	۱/۴۴b
	۲۲	۵۸/۳۶ ab	۱۲۶/۴ a	۱۸/۰۶ a	۵/۹۸ a	۳/۲۹ a	۱/۴۰ b
کود آلی (برکیلوگرم‌خاک)	۰	۴۰/۴۰b	۶۷/۰۷ c	۱۶/۹۰ a	۴/۸۱ c	۲/۱۵ c	۱/۲۷ a
	۱۵گرم کود دامی	۶۰/۷۶ a	۶۸/۷۷ c	۱۸/۸۰ a	۵/۵۰ bc	۲/۳۶ bc	۱/۹۷ a
	۳۰گرم کود دامی	۵۴/۵۳ a	۹۷/۰۸ b	۱۹/۷۶ a	۶/۵۶ ab	۱/۴۴ c	۱/۶۷ a
	۱۵گرم لجن فاضلاب	۶۱/۱۳a	۸۹/۳۶b	۱۷/۳۲a	۵/۴۵bc	۳/۳۷b	۱/۱۰a
	۳۰گرم لجن فاضلاب	۶۶/۲۵a	۱۴۷/۵a	۱۶/۹۹a	۶/۷۰a	۵/۳۰a	۲/۰۲a

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 (جدول۳)، 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

کود آلی	مدت غرقاب (روز)	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd
۰	۰	۴۰/۵۶e-k	۳۴/۸۰k	۱۹/۸۷a-e	۴/۹۰abc	۴/۷۹a-d	۰/۹۰c
	۲	۳۳/۶۲ g-k	۴۲/۰۷jk	۱۴/۱۹de	۳/۹۴c	۱/۹۰efg	۱/۸۶abc
	۴	۵۳/۷۷b-i	۴۷/۲۶ijk	۱۵/۹۹b-e	۴/۰۶bc	۱/۴۸fg	۰/۷۷c
	۸	۵۷/۷۲b-h	۶۶/۷۹f-k	۱۶/۵۵a-e	۵/۴۶abc	۲/۲۵d-g	۰/۸۸c
۱۵ گرم کود دامی برکیلوگرم خاک	۲۲	۱۶/۳۱jk	۱۴۴/۴a-d	۱۷/۸۹a-e	۵/۷۳abc	۰/۳۵g	۱/۹۶abc
	۰	۷۴/۰۴a-e	۵۴/۸۸hjk	۲۰/۵۸a-e	۵/۷۷abc	۲/۹۸c-g	۱/۸۵abc
	۲	۸۳/۹ab	۶۱/۱۷g-k	۲۱/۲۳a-e	۶/۸۹ab	۱/۷۸efg	۳/۸۶a
	۴	۲۷/۸۱h-k	۸۱/۰۴e-j	۱۸/۲۹a-d	۵/۲۰abc	۰/۷۸g	۲/۵۱abc
	۸	۷۱/۵۳a-e	۶۹/۵۳f-k	۱۶/۶۹a-e	۴/۸۸abc	۲/۴۵d-g	۰/۸۸c
	۲۲	۴۶/۵۵c-k	۷۷/۲۲e-k	۱۷/۲۳a-e	۴/۷۹abc	۳/۸۶b-f	۰/۷۸c
۳۰ گرم کود دامی برکیلوگرم خاک	۰	۳۵/۸f-k	۴۹/۵۱hjk	۱۶/۸۱a-e	۵/۱۸abc	۰/۷۸g	۰/۶۷c
	۲	۸۴/۸۴ab	۸۷/۳۴e-i	۲۳/۲۴a	۷/۵۱a	۱/۲۳ fg	۳/۶۱ab
	۴	۱۵/۳۹k	۸۷/۹۹e-i	۱۴/۶۸cde	۷/۱۰ab	۲/۵۶ d-g	۰/۸۷c
	۸	۷۱/۸۴a-e	۱۱۷/۵0cde	۲۲/۴۰ab	۶/۱۸abc	۱/۳۷ fg	۱/۰۸bc
	۲۲	۶۱/۷۸a-g	۱۴۳/۰a-d	۲۱/۶۵abc	۶/۸۴ab	۱/۳۰ fg	۲/۱۴abc
۱۵ گرم لجن فاضلاب برکیلوگرم خاک	۰	۶۴/۶a-g	۷۰/۷۶f-k	۱۷/۷۲a-e	۵/۲۲abc	۲/۸۹ c-g	۰/۷۸c
	۲	۷۹/۶۴abc	۱۰۵/۱۰d-e	۱۸/۰۱a-e	۵/۷۸abc	۵/۰۱ a-d	۱/۰۳c
	۴	۴۹/۲۶c-j	۹۲/۸۸e-h	۲۰/۲۱a-e	۶/۵۷abc	۳/۶۱ b-f	۲/۱۸abc
	۸	۴۳/۲۱d-k	۷۱/۴۹f-k	۱۴/۷۴cde	۳/۹۱c	۱/۲۸ fg	۰/۵۹c
	۲۲	۶۸/۹۳a-f	۱۰۶/۶۰def	۱۵/۹۲b-e	۵/۸۰abc	۴/۰۶ b-f	۰/۹۳c
۳۰ گرم لجن فاضلاب برکیلوگرم خاک	۰	۲۳/۳۶ijk	۱۲۰/۶0b-e	۱۳/۶۴۷e	۵/۴۲abc	۳/۸۵ b-f	۰/۶۹c
	۲	۷۵/۲۷a-d	۱۱۷/۱cde	۱۷/۴۶a-e	۶/۷۳abc	۴/۴۵ a-e	۲/۴۳abc
	۴	۷۷/۴۴a-d	۱۵۸/۶۰abc	۱۷/۴۷a-e	۷/۱۲a	۵/۷۵ ab	۱/۹۹abc
	۸	۶۰b-h	۱۸۰/۶۰a	۱۸/۷۸a-e	۷/۴۸a	۵/۵۷ abc	۳/۸۰a
	۲۲	۹۵/۲a	۱۶۰/۷۰ab	۱۷/۵۹a-e	۶/۷۷abc	۶/۹۱ a	۱/۲۲bc

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

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

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

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؛ به‌طوری‌که علی‌رغم وجود مقادیر قابل ملاحظه آهن در ریشه به‌دلیل 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 (جدول‌های۳و۵). 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 منگنزبخش هوایی آفتابگردان رابطه معنی‌دار:

C_{Mn}=-۰/۱۳۱(Time)^2+ ۵/۴۵۷ (Time)+ ۶۹/۵۸ با R^2= ۰/۹۷۵ [۱]

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

UP_{Mn}=-۰/۰۰۴(Time)^2+۰/۱۴۳ (Time)+ ۲/۳۵۲ [۲]

باR^2=۰/۹۴۲ 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 (۳۱،۴و۳۹) 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 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 قابل‌جذب 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

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

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

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

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

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

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 قابل‌جذب گیاه در خاک کاهش یافت (داده‌ها ارائه نشده است) و با نتایج ساح و منذال (۴۰) مطابقت داشت. بنابراین، کاهش غلظت مس قابل‌جذب 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 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 (جدول‌های۸ و۱۰). 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 قابل‌جذب 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

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

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

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

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

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

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

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

ریشه به بخش هوایی و ۳) سرعت رشد گیاه است. با افزایش مدت غرقاب غلظت روی قابل جذب 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 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

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 به‌دلیل 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 معنی‌دار نبود (جدول‌های ۳ و ۵). سون و همکاران (۴۲) گزارش دادند که پس از غرقاب غلظت کادمیم محلول در آب+تبادلی خاک کاهش یافت. بیجری و شیراپ (۱۴) گزارش دادند که با افزایش مدت غرقاب، جذب و غلظت سرب در بخش هوایی یولاف کاهش یافت. به‌نظر می‌رسد معنی‌دار 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 معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که افزودن کود دامی بر جذب و غلظت سرب در بخش هوایی اثر معنی‌دار 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 و۵). غلظت سرب در لجن فاضلاب مورد استفاده ۱۴/۲میلی‌گرم 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 ۳۰۰-۳۰ 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 ۷و۹). 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

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 (جدول۹)، 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 ۰/۲–۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد سمیت آن ۳۰–۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۳۶). کاباتا پندیاس و پندیاس (۲۲) غلظت بحرانی کادمیم در بخش هوایی گیاه برای ۱۰ درصد کاهش رشد آن را mg/kg ۲۰–۱۰ 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 ۳/۸۶mg/kg بود (جدول۴). 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 ۳۰ گرم کود دامی و ۳۰ 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، چغندرقند، 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؛ به‌طوریکه‌که تأثیر غرقاب بر جذب و غلظت کادمیم در بخش هوایی در برخی سطوح کود آلی معنی‌دار نبود (جدول‌های ۸ و ۱۰). میانگین فاکتور انتقال

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 تغییر نکند، تأثیر تیمار بر غلظت عنصر معنی‌دار نخواهد شد؛ ۲) اگر سرعت رشد گیاه بیشتر از سرعت جذب و انتقال عنصر به اندام‌های هوایی گیاه افزایش یابد، به‌دلیل وقوع اثر رقت غلظت عنصر در گیاه کاهش خواهد یافت. ۳) اگر سرعت رشد گیاه کمتر از سرعت جذب و انتقال عنصر به اندام‌های هوایی گیاه افزایش یابد؛ در این حالت، به‌دلیل وقوع اثر تغلیظ غلظت عنصر در گیاه افزایش خواهد یافت. غرقاب شدن خاک و کاربرد کودهای آلی از طریق تأثیر بر مقدار عناصر قابل‌جذب 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 به‌ترتیب> Cd=1.1 >۰/۵۵= Mn > Zn=0.07< Pb= ۰/۱ < Cu=0.26 Fe=۰/۳ 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 سطوح‌بحرانی 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.

منابع مورد استفاده

۱.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.

۲.کرمی، م.، ی. رضایی‌نژاد، م. افیونی و ح. شریعتمداری. ۱۳۸۶. اثرات باقیمانده لجن فاضلاب شهری بر غلظت عناصر سرب و کادمیوم در خاک و گیاه گندم. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۱ الف): ۷۹-۹۴.

۳.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.

۴.کلباسی، م. و ع. حسین‌پور. ۱۳۷۶. اثر ماندآب شدن موقت سه خاک آهکی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و تغییرات آنها پس از زه‌کشی. مجله علوم کشاورزی ایران ۲۸(۳): ۴۹-۵۸.

۵.میرنظامی ض. ح. ۱۳۸۰. *فن‌آوری روغن و پالایش آن*. نشر علوم دانشگاهی، تهران.

۶.نظری، م.ع.، ح. شریعتمداری، م. افیونی، م. مبلی 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 بـر غلظـت تعـدادی از عناصـر غـذایی و ویژگـی‌هـای 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، کـاهو 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: 4.438-442.
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 Agrecosys. 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, Baca Raton, Fl., USA.
37. Peters, J. 2003. Recommended Methods of Manure Analysis. Cooperative Extension Pub., University of Wisconsin, USA.
38. Ponnamperuma, 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.