اثر لجن فاضلاب بر غلظت جیوه خاک و گیاه ذرت

مریم کریم‌پور[۱]، مجید افیونی[۲*] و عباس اسماعیلی ساری[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۶/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۱۲)

چکیده

استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود در زمین‌های کشاورزی رواج زیادی یافته است. لجن سرشار از مواد مغذی مورد نیاز گیاهان است. اما از طرف دیگر غلظت بالای فلزات سنگین موجود در لجن مثل جیوه (Hg) می‌تواند منجر به آلودگی خاک، گیاه و زنجیره غذایی انسان شود. به منظور ارزیابی خطر جذب جیوه از خاک تیمار شده با لجن فاضلاب، در مرکز ایران طی پنج سال، آزمایشی با سه سطح لجن فاضلاب (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مگاگرم در هکتار $Mg\ ha^{-1}$) و تیمار شاهد (بدون لجن) در قالب طرح پلات‌های خرد شده و در سه تکرار اجرا شد. در سال اول به کل پلات، سال دوم به ۴/۵، سال سوم به ۳/۵، سال چهارم به ۲/۵ و سال پنجم به ۱/۵ هر پلات لجن اضافه گردید. بعد از پنج سال، از دو عمق ۲۰cm-۰ و ۴۰-۲۰ خاک، ریشه، ساقه و دانه گیاه ذرت بخش‌های مختلف پلات‌ها نمونه‌برداری و مقدار جیوه آن آنالیز شد. به طور کلی استفاده از لجن باعث افزایش معنی‌دار غلظت جیوه خاک هر دو عمق و بخش‌های مختلف گیاه گردید. غلظت جیوه اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک در دامنه $\mu g\ kg^{-1}$ ۲۲ (در نمونه‌های شاهد) تا $\mu g\ kg^{-1}$ ۱۲۰۰ (در پلات‌هایی که ۵ سال متوالی لجن با حجم $Mg\ ha^{-1}$ ۱۰۰ دریافت کرده بودند) متغیر بود. میانگین غلظت Hg ریشه، ساقه و دانه به ترتیب $\mu g\ kg^{-1}$ ۹۱، ۹ و ۸ اندازه‌گیری شد. کابرد لجن فاضلاب هم‌چنین باعث افزایش معنی‌دار عملکرد گیاه شد.

واژه‌های کلیدی: جیوه، لجن فاضلاب، خاک، گیاه ذرت

مقدمه

دفع لجن فاضلاب یکی از مشکلات زیست محیطی است که جوامع امروزی با آن مواجه‌اند. از طرفی این ماده سرشار از مواد مغذی مورد نیاز گیاهان (مثل نیتروزن و فسفر) بوده، می‌تواند اثرات مثبتی بر عملکرد گیاهان(۷ و ۱۱)، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک (۱۰) داشته باشد. بنابراین پیشنهاد استفاده از لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی پیشنهاد خوبی به نظر می‌رسد، چراکه از یک طرف مشکل دفع این ماده برطرف شده، از طرف دیگر این ماده به عنوان یک کود آلی ارزشمند مورد استفاده قرار گرفته است (دفع+کاربرد) (۲۰).

۱. مربی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه شهید چمران، مجتمع آموزش عالی بهبهان

۲. استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانشیار محیط زیست ، دانشکده بین‌المللی منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: afyuni@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]

اما از آنجایی که هنگام تصفیه فاضلاب، فلزات سنگینی مثل Hg از بین نمی‌روند(۱۱)، پیشنهاد استفاده از لجن در کشاورزی خالی از ریسک نیست. زیرا این اقدام باعث ورود عناصر سمی به اکوسیستم و به دنبال آن آلودگی خاک، گیاه و زنجیره‌های غذایی انسان یا حیوان می‌شود (۷ و ۱۲).

غلظت طبیعی جیوه موجود در خاک، کمتر از آن مقداری است که بتواند از طریق جذب در دسترس گیاهان قرار گیرد. بنابراین این مقدار در مقایسه با غلظت‌هایی از این عنصر که در نتیجه کاربرد لجن فاضلاب وارد خاک می‌شود، کم خطر است (۴). گیاهان خشکی قادرند جیوه را از خاک یا به صورت مستقیم از هوا به کمک روزنه‌های موجود در سطح برگ‌های خود جذب کنند (۶).

در استان اصفهان به دلیل وجود تصفیه خانه‌های فاضلاب، استفاده از لجن فاضلاب در کشاورزی مرسوم است (۱)، علی‌رغم اثبات حضور Hg در این لجن تاکنون هیچ مطالعه‌ای در زمینه ورود این آلاینده به خاک و گیاه صورت نگرفته است. در مقیاس جهانی نیز مطالعات انجام شده روی جیوه، مخصوصاً رفتار جیوه در خاک‌های تیمارشده با لجن و گیاه در این خاک‌ها بسیار محدود است. حتی آژانس محیط زیست امریکا (US-EPA) در بخش ۵۰۳ خود (استانداردهای استفاده یا دفع لجن فاضلاب US-EPA part 503)، در تعیین حدود مجاز این عنصر فقط از چهار مطالعه استفاده کرده است (۸).

بنابراین بررسی پیامدهای کاربرد لجن بر غلظت Hg خاک تیمارشده با این کود و گیاه پرورش یافته در این خاک ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه سعی بر آن است تا طی یک آزمایش مزرعه‌ای پنج ساله سرنوشت جیوه موجود در لجن فاضلاب را در خاک و گیاه ذرت کشت شده در این خاک مورد بررسی قرار داده، رابطه بین نرخ بارگیری Hg لجن را با غلظت جیوه موجود در خاک و بافت‌های گیاهی ارزیابی کنیم.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی

این تحقیق با کاربرد مقادیر مختلف لجن فاضلاب به عنوان فاکتور A (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مگاگرم در هکتار) و هر یک در پنج سطح B (۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سال کاربرد لجن) همراه با تیمار شاهد در قالب طرح پلات‌های خرد شده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان (32.32 N. 51.23 E) انجام شد. کشت گیاه ذرت (*Zea mays*) به صورت ردیفی، آبیاری به صورت غرقابی و مبارزه با علف‌های هرز به صورت مکانیکی انجام گرفت. مزرعه دارای خاک (Fine Lomy, Mixed, Thermic, Typic Haplands) با بافت لوم رسی و pH قلیایی است. میانگین درجه حرارت سالیانه در ایستگاه ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی ۱۴۰ میلی‌متر است. لجن مورد استفاده در این آزمایش، لجن هضم شده به روش بی هوازی می‌باشد که پس از تصفیه ثانویه (بیولوژیکی) فاضلاب شهری از تصفیه خانه شهر اصفهان تهیه شد. در سال ۱۳۷۹ در منطقه مورد مطالعه ۹ پلات در ابعاد ۱۵ × ۳ متر برای تیمار با حجم‌های مختلف لجن فاضلاب (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مگاگرم در هکتار) آماده گردید، ۳ پلات نیز به عنوان شاهد (بدون لجن) در نظر گرفته شد. در سال اول تمام پلات‌ها لجن فاضلاب دریافت کردند، در سال دوم اجرای طرح، پلات‌های مورد استفاده در سال اول بعد از انجام مراحل خاکورزی به دو قسمت نامساوی ۳ × ۳ و ۱۲×۳ متری تقسیم شدند که قسمت ۱۲ متری آن مطابق برنامه برای بار دوم لجن دریافت کرد ولی به قسمت کوچک‌تر آن لجن اضافه نشد. در سال سوم (۱۳۸۱) پلات ۱۲متری نیز به۲ قسمت نامساوی ۳× ۳ و ۹×۳ متر تقسیم شد که قسمت ۳× ۳ متری آن لجن دریافت نکرد و به قسمت ۹ متری آن مجدداً لجن داده شد. در چهارمین سال اجرای این طرح قسمت ۹ متری مشخص شده که تا سال سوم ۳ بار لجن دریافت کرده به ۲ قسمت ۳× ۳ و ۶ ×۳ متری تقسیم شد که قسمت ۳×۳ متری آن لجنی دریافت نکرد اما به قسمت دیگرآن برای چهارمین سال متوالی لجن اضافه گردید.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]

در سال پنجم (۱۳۸۳) نیز قسمت ۶ متری به دو قسمت مساوی ۳×۳ و ۳×۳ متری تقسیم و به یکی از آنها لجن اضافه شد. بنابراین مقدار کلی لجن به کار رفته در پلات‌ها بر اساس $Mg\ ha^{-1}$ به صورت: ۱۰۰ و ۵۰، ۲۵، ۰ (در پلات یکبار کاربرد لجن)، ۲۰۰ و ۱۰۰، ۵۰، ۰ (در پلات دوبار کاربرد)، ۳۰۰ و ۱۵۰، ۷۵، ۰ (در پلات سه بار کاربرد)، ۴۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰، ۰ (در پلات چهار بار کاربرد) و ۵۰۰ و ۲۵۰، ۱۲۵، ۰ (در پلات پنج بار کاربرد) است. مقدار جیوه اضافه شده در تیمارهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است.

نمونه‌برداری و آنالیز خاک و گیاه

در پاییز ۱۳۸۴ پس از پایان دوره رشد و رسیدن گیاه ذرت، نمونه‌برداری از دو عمق ۲۰cm-۰ و۴۰-۲۰ خاک و بخش‌های مختلف گیاه ذرت (ریشه، ساقه و دانه) صورت گرفت. در هر پلات پس از در نظرگرفتن حدود ۱ متر به عنوان اثر حاشیه چند نمونه برداشت، سپس در هم ادغام و یک نمونه مرکب ایجاد شد. در آزمایشگاه هریک از نمونه‌های خاک مخلوط، از الک ۲ mm گذرانده، خشک و سپس کوبیده شد. نمونه‌های گیاهی با آب معمولی و آب مقطر شسته شد، سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای $65\ ^{\circ}C$ خشک و به کمک هاون چینی و میکسر پودر شد. آنالیز جیوه نمونه‌های خاک و گیاه به کمک دستگاه Mercury Analyzer (LECO AMA 254) انجام شد. در این سیستم نمونه‌ها برای آنالیز نیاز به تیمار یا آماده‌سازی خاص یا مواد شیمیایی نیاز ندارند. حد تشخیص دستگاه در ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه بین (µg/kg) ppb ۵ تا (mg/kg) ppm ۵ می‌باشد.

به منظور تعیین عملکرد، کل ساقه و دانه گیاهان مربوط به تیمارها در آون و در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. بعد از ۴۸ ساعت کل گیاهان مربوط به هر تیمار، به طور جداگانه برای محاسبه وزن خشک گیاه توزین شدند. آنالیز آماری به کمک SAS (Version 6.10 for personal computers) (۱۷) و تجزیه و تحلیل و مقایسه بین تیمارها به دلیل وجود شاهد در این مطالعه با استفاده از آزمون LSD (Least Significant Difference) ($P \leq ۰/۰۵$) انجام گردید (۱۹).

نتایج و بحث

اثر لجن فاضلاب بر عملکرد گیاه ذرت

افزودن لجن فاضلاب به خاک منطقه مورد مطالعه موجب افزایش معنی‌دار عملکرد گیاه گردید. به عبارت دیگر بین نرخ لجن فاضلاب مصرفی و عملکرد ساقه و دانه در سطح احتمال ۱٪ هم‌بستگی مثبت دیده شد. این یافته بیانگر اثر مثبت لجن فاضلاب بر عملکرد گیاه می‌باشد. این نتیجه با سایر بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه مطابقت می‌کند (۱ و ۱۳).

در تیمارهای ۱ سال کاربرد که از مصرف لجن در آنها ۵ سال می‌گذشت، همچنان عملکرد گیاه بالاتر از عملکرد گیاهان موجود در پلات شاهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد لجن حتی برای یک بار، در حالی که چندین سال از مصرف آن می‌گذرد و با حداقل حجم ($25\ Mg\ ha^{-1}$)، می‌شود باعث افزایش عملکرد گیاه شود (جدول ۲ و ۳). به نظر می‌رسد عناصر غذایی پر مصرف (مثل نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و کم مصرف (مثل آهن، روی و مس) موجود در لجن فاضلاب طی فرایند معدنی شدن و تجزیه مواد آلی، در اختیار گیاه قرار گرفته و نهایتاً باعث افزایش عملکرد گیاه شده است. علاوه بر این نمی توان از اثرات مثبت لجن به عنوان یک ماده آلی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک چشم‌پوشی کرد(۲).

اثر لجن فاضلاب بر غلظت جیوه خاک

غلظت جیوه در نمونه‌های خاک در دامنه‌ای بین $۱۲\ \mu g\ kg^{-1}$ (نمونه‌های شاهد) تا $۱۲۰۰\ \mu g\ kg^{-1}$ (پلات‌هایی که ۵ سال متوالی لجن با حجم $۱۰۰ Mg\ ha^{-1}$ دریافت کرده بودند) متغیر بود. به طور کلی مصرف سالیانه لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار (در سطح احتمال ۱٪) غلظت جیوه در هر دو عمق خاک گردید. غلظت جیوه در پلات‌هایی که فقط برای یک بار آن هم در سال اول لجن دریافت کرده بودند، با وجود گذشت ۵ سال زمان از آخرین بار لجن دهی در هر دو عمق مورد مطالعه همچنان بالاتر از تیمار شاهد بود. مقدار جیوه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]

جدول ۱. نرخ بارگیری تجمعی جیوه لجن در خاک ($kg\ ha^{-1}$)

تعداد سال کاربرد	۱	۲	۳	۴	۵
حجم لجن (Mg/ha)					
۲۵	۰/۱۷	۰/۳۵	۰/۵۲	۰/۷۰	۰/۸۷
۵۰	۰/۳۵	۰/۷۰	۱/۰۵	۱/۴۰	۱/۷۵
۱۰۰	۰/۷۰	۱/۴۰	۲/۱۰	۲/۸۰	۳/۵۰
شاهد	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۲. مقایسه میانگین عملکرد و جذب Hg دانه و ساقه در سال های مختلف کابرد لجن فاضلاب و پلات شاهد

تعداد سال‌های کاربرد	عملکرد دانه ($mg\ ha^{-1}$)	عملکرد ساقه ($mg\ ha^{-1}$)	جذب جیوه دانه ($mg\ ha^{-1}$)	جذب جیوه ساقه ($mg\ ha^{-1}$)
۱	۹۳۱۰ ^{b}	۱۸۵۳۵ ^{bc}	۸۱۲۸۱ ^{b}	۱۶۹۰۲۵ ^{b}
۲	۱۴۳۲۶ ^{a}	۲۰۵۰۷ ^{bc}	۹۹۷۹۳ $^{a b}$	۱۳۳۹۵۲ ^{b}
۳	۱۶۵۱۵ ^{a}	۲۲۴۶۵ ^{b}	۱۱۷۱۳۴ $^{a b}$	۱۸۸۸۴۸ ^{b}
۴	۸۲۳۰ ^{b}	۱۷۸۷۲ ^{c}	۷۵۳۹۹ ^{b}	۱۷۴۷۲۳ ^{b}
۵	۱۳۷۷۶ ^{a}	۲۷۰۱۴ ^{a}	۱۴۴۴۹۸ ^{a}	۲۶۱۲۱۰ ^{a}
شاهد	۵۲۲۶/۷ ^{b}	۱۲۸۰۶ ^{d}	۳۷۵۹۱ ^{c}	۷۸۲۲۲ ^{c}

جدول ۳. مقایسه میانگین عملکرد و جذب Hg دانه و ساقه ($kg\ ha^{-1}$) در سطوح مختلف کاربرد لجن فاضلاب

حجم لجن (Mg/ha)	عملکرد دانه ($mg\ ha^{-1}$)	عملکرد ساقه ($mg\ ha^{-1}$)	جذب جیوه دانه($mg\ ha^{-1}$)	جذب جیوه ساقه($mg\ ha^{-1}$)
۲۵	۱۸۶۲۰ ^{b}	۱۰۷۰۸ ^{a}	۸۴۶۳۵ ^{a}	۱۶۲۴۳۸ ^{a}
۵۰	۲۳۰۳۸ ^{a}	۱۲۳۴۸ ^{a}	۱۱۲۰۰۶ ^{a}	۱۸۳۶۹۴ ^{a}
۱۰۰	۲۲۱۷۹ ^{a}	۱۴۲۳۸ ^{a}	۱۱۴۲۲۱ ^{a}	۲۱۰۵۲۳ ^{a}

اندازه‌گیری شده در عمق cm ۲۰- ۰ در مقایسه با عمق cm ۴۰- ۲۰ به طور معنی‌داری بیشتر بود (جدول ۴). به طور کلی تحرک، جابه‌جایی و آبشویی جیوه در خاک بسیار محدود می‌باشد (۱۵ و ۲۱). با این وجود به دلیل انجام مراحل خاکورزی و شخم، لجن فاضلاب به طور کامل با خاک مخلوط شده و بها عمق پایین‌تر انتقال یافته است. در نتیجه در عمق دوم خاک بین غلظت جیوه خاک پلات شاهد و تیمارهای مختلف لجن فاضلاب اختلاف معنی‌داری دیده شد (جدول ۴).

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون، ۹۰ تا ۱۰۰ درصد کل جیوه‌ای که طی ۵ سال گذشته از طریق لجن فاضلاب به خاک این منطقه اضافه شده است، همچنان در عمق ۴۰ سانتی‌متری سطح خاک قرار دارد (شکل ۱. الف). در این مطالعه مقدار Hg اندازه‌گیری شده در خاک تیمار $100\ Mg\ ha^{-1}$ لجن به مدت ۵ سال ($1/2\ mg\ kg^{-1}$)، از حداکثر غلظت قابل قبول Hg خاک‌های کشاورزی در کشور آلمان ($1\ mg\ kg^{-1}$) (۱۸) و نیز از استاندارد BSI (British Standards Institution's Publicly Available Specification) PAS 100 در انگلیس و اسکاتلند ($1\ g\ kg^{-1}$) (۲۲) بالاتر بود.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]

جدول۴. تیمارهای مختلف لجن فاضلاب و پلات شاهد ($\mu g\ kg^{-1}$)

تیمار ($Mgha^{-1}$)	(غلظت جیوه خاک $\mu g\ kg^{-1}$)		
	۰ -۲۰ cm	۲۰ -۴۰ cm	۰ -۴۰ cm
۲۵	۸۷/۵ de	۵۸/۸ de	۷۳/۱ d
۲×۲۵	۷۹/۲ de	۶۶/۴ de	۷۲/۸ d
۳×۲۵	۸۱/۵ de	۷۷/۴ de	۸۹/۸ d
۴×۲۵	۱۱۰/۳ de	۱۰۶/۸ de	۹۴/۸ d
۵×۲۵	۱۲۱/۴ de	۱۵۳/۶ d	۱۳۷/۵ cd
۵۰	۱۵۶/۰ de	۱۰۰/۰ de	۱۲۸/۰ cd
۲×۵۰	۱۷۸/۸ d	۱۳۹/۷ de	۱۵۹/۲ cd
۳×۵۰	۲۸۴/۰ cd	۲۰۷/۹ cd	۲۴۵/۹ cd ±۲۶/۵
۴×۵۰	۲۵۸/۲ cd	۲۴۲/۳ cd	۲۵۰/۲ cd ±۳۰/۰
۵×۵۰	۳۶۷/۹ c	۳۰۹/۹ c	۳۳۸/۹ c
۱۰۰	۱۷۷/۹ de	۲۱۸/۸ cd	۱۹۸/۳ cd
۲×۱۰۰	۲۸۴/۵ cd	۳۸۸/۹ cd	۲۵۷/۲ cd
۳×۱۰۰	۷۲۳/۱ b	۴۶۳/۰ b	۵۹۳/۱ b
۴×۱۰۰	۸۲۳/۷ b	۸۴۱/۶ a±۲۳۴/۰	۸۳۲/۷ a
۵×۱۰۰	۱۲۰۴/۸ a	۷۱۷/۹ a	۹۶۱/۴ a
شاهد	۲۲/۸ e	۲۲/۴ e	۲۲/۶ cd

اثر لجن فاضلاب بر غلظت بافت‌های گیاهی

غلظت جیوه ریشه

به طور کلی غلظت جیوه در ریشه گیاه ذرت نسبت به سایر قسمت‌های گیاه (دانه و ساقه) بیشتر بود (جدول ۵). این نتیجه با یافته‌های قبلی مبنی بر این که جیوه در گیاهان بیشتر در ریشه تجمع یافته (۵) و این سیستم همچون حصاری تا حدودی مانع انتقال Hg به سایر قسمت‌های گیاه می‌شود (۱۴) مطابقت می‌کند.

بین مقدار Hg موجود در ریشه گیاهان پلات شاهد و تیمارهای مختلف لجن فاضلاب تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول ۵). با این وجود با افزایش تعداد سال‌های کاربرد لجن، غلظت Hg ریشه (بدون در نظر گرفتن شاهد) به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۵). یافته‌ها حاکی از آن است که بیشتر فلزات سنگین آزاد شده در خاک در نتیجه تجزیه مواد آلی لجن، جذب اختصاصی ذرات خاک شده و یا رسوب می‌کنند و بنابراین دیگر به آسانی قابل دسترس نیستند (تا گیاه بتواند آنها را جذب کند)(۳).

از آنجایی که در پلات‌هایی که یک یا دو مرتبه در طول ۴ یا ۵ سال لجن دریافت کرده‌اند احتمالاً فرصت کافی برای انجام فرایند تجزیه مواد آلی خاک وجود داشته و جیوه اضافه شده به خاک طی فرایند تجزیه مواد آلی در خاک تثبیت و غیر قابل دسترس شده است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که قابلیت دسترسی جیوه برای گیاه در این تیمارها به میزان قابل توجهی کمتر از تیمارهایی باشد که لجن بیشتری دریافت کرده‌اند. این امر بیانگر اهمیت فاکتور زمان در جذب Hg توسط گیاه بوده و تأکیدی بر نظریه

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]

جدول۵. میانگین جیوه بخش‌های مختلف گیاه (ریشه، ساقه و دانه) در سال‌های مختلف کاربرد لجن و پلات شاهد

تعداد سال کاربرد لجن	غلظت Hg ($\mu g\ kg^{-1}$)		
	ریشه	ساقه	دانه
۱	۸۰/۳ b	۸/۵ ab	۸/۶ ab
۲	۸۱/۱ b	۶/۴ b	۷/۶ b
۳	۸۴/۹ab	۸/۳ ab	۷/۳ b
۴	۱۰۰/۶a	۸/۹ a	۸/۳ ab
۵	۱۱۱/۱a	۹/۰ a	۹/۲ a
شاهد	۱۰۰/۳a	۶/۰ b	۷/۱ b

"کهنه شدن" است. بدین مفهوم که قابلیت دسترسی فلزات سنگین وارد شده به خاک ازطریق لجن فاضلاب، با گذشت زمان کاهش می‌یابد. این امر می‌شود به علت جذب شدید آنها توسط خاک و مواد آلی لجن باشد (۱۶). بین غلظت جیوه ریشه با Hg موجود در لجن فاضلاب و هم‌چنین با جیوه موجود در خاک هم‌بستگی مثبت دیده شد ($P \leq ۰/۰۵$).

غلظت جیوه ساقه و دانه

بر خلاف آنچه که انتظار می‌رفت، غلظت جیوه ساقه و دانه ($\mu g\ Hg/\ kg\ tissue$) با هیچ یک از پارامترهایی که احتمال می‌رفت با آنها در ارتباط باشد (نرخ بارگیری تجمعی Hg لجن در خاک، جیوه خاک و جیوه ریشه)، هم‌بستگی نشان نداد. علاوه بر این بین غلظت جیوه موجود در دانه و غلظت جیوه ساقه نیز رابطه‌ای معنی‌داری دیده نشد.

با توجه به افزایش معنی‌دار عملکرد گیاه ذرت در تیمارها لجن فاضلاب به نظر می‌رسد غلظت این عناصر رقیق شده است. بنابراین به جای غلظت جیوه ($\mu g\ Hg/\ kg\ tissue$) از مقدار جذب (uptake) یا جیوه جذب شده توسط ساقه و دانه گیاه موجود در هر هکتار ($\mu g\ ha^{-1}$) استفاده شد. نرخ کاربرد لجن و فاکتور تعداد سال مصرف آن باعث افزایش معنی‌دار جذب Hg ساقه و دانه گیاه گردید (جدول ۲ و ۳). مقدار جذب در ساقه ($P \leq ۰/۰۱$) و دانه گیاه ($P \leq ۰/۰۵$) با نرخ بارگیری تجمعی جیوه لجن در خاک (شکل۱. ب و ج) و با غلظت جیوه خاک سطحی (۲۰cm– ۰) هم‌بستگی مثبت نشان داد.

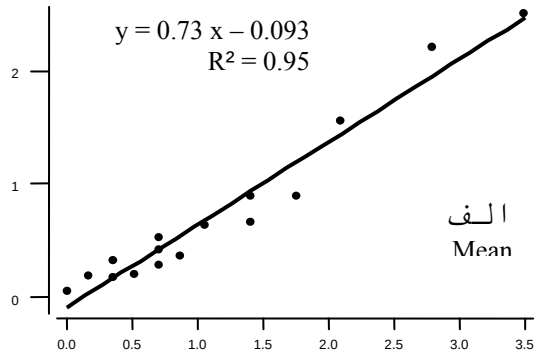
هم‌چنین مقدار جذب Hg در دانه با مقدار جذب Hg در ساقه هم‌بستگی مثبت و معنی‌دار داشت ($P \leq ۰/۰۱$). اما جذب Hg ساقه و دانه با غلظت جیوه موجود در ریشه و با غلظت جیوه عمق دوم خاک (cm ۴۰– ۲۰) هم‌بستگی نداشت. این یافته‌ها بیانگر آن است که: احتمالاً میزان انتقال جیوه از ریشه به ساقه و دانه گیاه بسیار ناچیز است. اندام‌های هوایی گیاه منتقل می‌شود. احتمالاً جیوه موجود در لجن و خاک از طریق مسیر دیگری غیر از مسیر ریشه وارد گیاه شده است. این نتیجه با یافته‌های قبلی موجود در این زمینه مطابقت می‌کند(۵، ۸، ۹ و ۱۴).

در U.S. EPA part 503 برای مشخص کردن محدوده مجاز فلزات سنگین موجود در لجن و ارزیابی خطر استفاده از لجن در کشاورزی، از ضریب جذب (Utilized Uptake Coefficients, UCs) استفاده می‌شود. منظور از ضریب جذب هر عنصر، آن مقدار از عنصر است که از خاک وارد محصولات گیاهی کشت شده در این خاک می‌شود. ضریب جذب تعیین شده درU.S. EPA part 503 برای علوفه دامی، غلات و دانه‌ها (kg metal/ha soil) / (mg metal/kg tissue) ۰/۰۴۳ است.

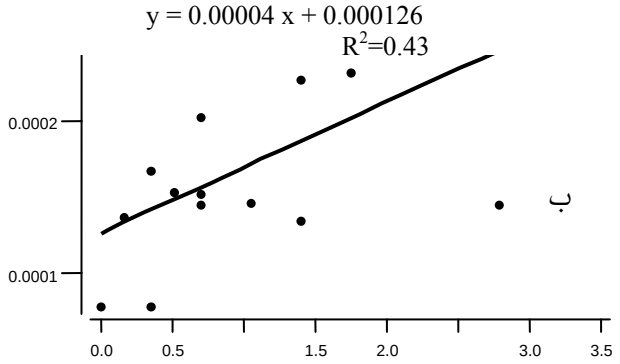
به منظور محاسبه UC_{Hg} در ساقه و دانه گیاه ذرت کشت شده در منطقه مورد مطالعه و مقایسه آن با استانداردهای U.S. EPA part 503، لازم است آنالیز رگرسیون برای رابطه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

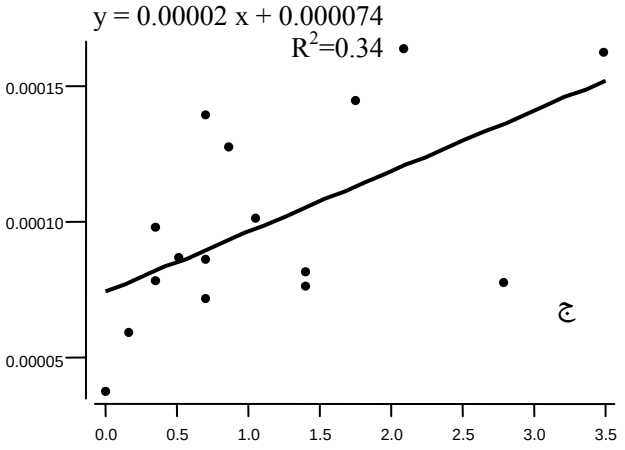
[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]



مقدار جیوه اضافه شده به خاک در اثر کاربرد لجن(kg/ha)



مقدار جیوه اضافه شده به خاک در اثر کاربرد لجن(kg/ha)



مقدار جیوه اضافه شده به خاک در اثر کاربرد لجن(kg/ha)

شکل ۱. اثرات کاربرد لجن بر: (الف) غلظت Hg خاک (عمق cm ۴۰- ۰)، جذب Hg ساقه (ب) و دانه (ج)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]

غلظت Hg ساقه و دانه با نرخ بارگیری Hg در خاک انجام شود (روابط ۱ و ۲). سپس شیب خط رگرسیون از طریق ضرب در عدد ۰/۰۰۱ (تبدیل واحد غلظت بافت گیاهی از $\mu g\ kg^{-1}$ به $mg\ kg^{-1}$) می‌شود تبدیل به UC_{Hg} شود.

رابطه غلظت جیوه موجود در ساقه گیاه با نرخ بارگیری تجمعی Hg لجن در خاک:

$y = ۰/۵۳\ x + ۷/۴ \quad R^2 = ۰/۱۴$ [۱]

x = نرخ بارگیری جیوه لجن در خاک ($kg\ ha^{-1}$)

y = غلظت جیوه ساقه ($\mu g\ kg^{-1}$)

رابطه غلظت جیوه موجود در دانه گیاه با نرخ بارگیری تجمعی Hg لجن در خاک:

$y = ۰/۳۱\ x + ۷/۷ \quad R^2 = ۰/۰۶$ [۲]

x = نرخ بارگیری جیوه لجن در خاک ($kg\ ha^{-1}$)

y = غلظت جیوه دانه ($\mu g\ kg^{-1}$)

در این مطالعه UC_{Hg} ساقه گیاه ذرت (mg / kg Hg/ha soil) / (Hg/kg tissue) ۰/۰۰۰۵ و UC_{Hg} دانه گیاه ذرت (kg Hg/ha soil) / (mg Hg/kg tissue) ۰/۰۰۰۳ محاسبه شد.

مطابق ضریب جذب U.S. EPA به ازای هرکیلوگرم جیوه‌ای که در خاک منطقه بارگیری می‌شود، از نظر U.S. EPA با توجه به ماکزیمم نرخ بارگیری جیوه در خاک منطقه مورد مطالعه، غلظت جیوه علوفه و دانه کشت شده در این منطقه می‌بایست $\mu g\ kg^{-1}$ ۲۱۵ باشد (این مقدار یازده برابر بیشترین غلظتی است که برای ساقه و دانه گیاه کشت شده در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شد). به نظر می‌رسد UC_{Hg} مشخص شده در U.S. EPA برای علوفه و غلات، احتمالاً بیشتر از آن مقداری است که در طبیعت رخ می‌دهد. گرانا‌تو و همکاران نیز در سال ۱۹۹۵ به چنین نتیجه‌ای رسیدند (۸).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با انجام یک بررسی مزرعه‌ای ۵ ساله در خاک‌های آهکی مرکز ایران، به بررسی آثار استفاده از لجن فاضلاب بر غلظت Hg خاک تیمار شده با این ماده و تجمع جیوه در گیاه ذرت کشت شده در این خاک پرداخته شد. بنا بر نتایج حاصل از این بررسی کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت کل جیوه خاک موجود در تیمارهای مختلف لجن فاضلاب در مقایسه با پلات شاهد گردید. استفاده از مقادیر مختلف لجن در ۵ سال موجب افزایش ۱۴ برابری متوسط غلظت Hg خاک تیمارهای مختلف لجن در مقایسه با پلات شاهد برای خاک سطحی (۲۰cm– ۰) و حدوداً ۱۲ برابر برای خاک اعماق (۴۰cm– ۲۰) شد. غلظت جیوه خاک تیمارشده با لجن فاضلاب تحت تأثیر فاکتورهای تعداد سال استفاده از لجن، مقدار لجن مصرفی و عمق خاک بود. با افزایش مقدار لجن و تعداد سال استفاده، غلظت Hg خاک نیز بیشتر بود. غلظت Hg در عمق سطحی خاک (۲۰cm– ۰) بیشتر از اعماق (۴۰cm– ۲۰) بود. گذشت زمان نیز بر غلظت Hg مؤثر بود، در تیمارهایی که جدیداً لجن دریافت کرده بودند، غلظت Hg خاک آنها بیشتر بود. البته غلظت جیوه پلات‌هایی که ۵ سال پیش لجن دریافت کرده بودند همچنان بیشتر از Hg خاک شاهد بود. در این مطالعه حداکثر نرخ بارگیری تجمعی جیوه $۵\ kg\ ha^{-1}$ (در پلات ۵ سال کاربرد لجن با حجم $Mg\ ha^{-1}$ ۱۰۰) و نرخ بارگیری سالیانه Hg لجن در خاک تیمارهای لجن با حجم ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مگاگرم در هکتار به ترتیب ۰/۱۸، ۰/۳۵ و ۰/۷۰ کیلوگرم جیوه در هر هکتار خاک برآورد گردید.

هرچه از کاربرد لجن در زمین مدت زمان بیشتری می‌گذرد، انباشتگی Hg در بافت گیاهی کمتر می‌شود. این نتیجه بیانگر اهمیت فاکتور زمان بر فرایند جذب جیوه توسط گیاه است. با افزایش حجم لجن مصرفی غلظت جیوه بافت‌های گیاهی افزایش یافت ولی این افزایش معنی‌دار نبود. به عبارت دیگر آثار باقی‌مانده لجن (تعداد سال کاربرد) بر مقدار جیوه بافت‌های گیاهی بیشتر از اثرات تجمعی (حجم لجن مصرفی) آن بود. این نتیجه با یافته کرمی (۱) در این خصوص مطابقت دارد.

با توجه به نتایج حاصل از این بررسی پیشنهاد استفاده از لجن فاضلاب در کشاورزی، نیز مانند سایر تصمیمات زیست

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]

محیطی مزایا و معایب خاص خود را دارد. اجرای این تصمیمات نیاز به مدیریت صحیح دارد تا در سایه این مدیریت اثرات مثبت به بالاترین حد ممکن افزایش و اثرات منفی به حداقل مقدار خود کاهش یابد.

منابع مورد استفاده

۱. کرمی، م. ۱۳۸۳. اثرات تجمعی و باقیمانده لجن فاضلاب بر غلظت عناصر آرسنیک، جیوه، سرب و کادمیوم در خاک و گیاه گندم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

2. Afyuni, M., Y.Rezaeineja and R.Schulin. 2006. Extractability and Plant Uptake of Cu, Zn, Pb and Cd from a Sludge-amended Haplargid in Central Iran. Arid Land Res. Manag. 20(1): 29-41.
3. Brown, S; R. L. Chaney, J. S.Angle and J. A. Ryan. 1998. The phytoavalibility of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils. J. Environ. Qual. 27:1071-1078.
4. Egler, S.G.; S. Rodrigues-Filho; R.C. Villas-Boas and C. Beinhoff. 2005. Evaluation of mercury pollution in cultivated and wild plants from two small communities of the Tapajo´ s gold mining reserve, Para´ State, Brazil, Science of the Total Environment. Available online at www. sciencedirect. com.
5. Eisler, R. 2000. Handbook of Chemical Risk Assessment: Health Hazards to Humans, Plants, and Animals. Volume 1-Metals. Lewis Pub., Boca Raton, FL, USA.
6. Ericksen, J.A., M. S. Gustin, D.E. Schorran, D.W. Johnson, S.E. Lindberg and J.S. Coleman. 2003. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage. Atmos Environ. 37:1613– 22.
7. Evanylo, G.K. 1999. Agricultural Land Application of Biosolids in Virginia: Risks and Concerns, Department of Crop and Soil Environmental Sciences, Virginia Tech, Virginia Cooperative Extension Publication, 304- 452.
8. Granato, T.C., R.I. Pietz, J. Gschwind and C. Lue-Hing. 1995. Mercury in soils and crops from fields receiving high cumulative sewage sludge applications: validation of 9. U.S. EPA's risk assessment for human ingestion. Water, Air and Soil Pollut. 80: 1119-1127.
9. Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 2000. Trace Elements in Soils and Plants. 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.
10. Kilbride, C. 2006. Application of sewage sludge and composts, Note 6 BPG (Best Practice Guidance for land regeneration), forest research (the research agency of forestry commission), The Land Regeneration and Urban Greening Research Group. www.forestresearch.gov.uk
11. McBride, M.B. 1998. Growing food crops on sludge-amended soils problems with the U.S. Environmental Protection Agency method of estimating toxic metal transfer. Environ. Toxicol. and Chem. 17:2274–2281.
12. McBird, M.B. 2003. Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks. Adv. Environ. Res. 8: 5-19.
13. Morera, M.T., J. Echeverria and J. Garrido. 2002. Bioavailability of heavy metals in soils amended with sewage sludge. Can. J. Soil Sci. 82: 4-14.
14. Patra, M. and A. Sharma. 2000. Mercury toxicity in plants. Bot. Rev. 66: 379-409.
15. Peacival, H.J. 2003. Soil and soil solution chemistry of a Newzealand pasture soil amended with heavy metal-containing sewage sludge. Aust. J. Soil Res. 41: 1-17.
16. Rundle, H.; M. Calcroff and C. Hoh. 1982. Agricultural disposal of sludges on a historic sludge disposal site. Water Pollut. Control. 81: 619-632.
17. SAS. 1993. SAS User's Guide: statistics. Version 6.10. SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA.
18. Singh, B.R. 1994. Contamination by Heavy Metals, Advances in Soil Science., *In*: R.Lal. and B.A., Stewar. Lewis Pub. London.
19. Steel, R.G.D. and J.H. Torrie. 1980. Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach. McGraw-Hill, New York.
20. Stehouwer, R.C. 2003. Land application of sewage sludge in Pennsylvania: Effects of biosolids on soil and crop quality. Environmental Soil Issues, Pen State College of Agric. Sci., University Park, PA.
21. Sterckeman, T., F. Douay, N. Proix, H. Fourrier and E. Perdrix. 2002. Assessment of the contamination of cultivated soils by eighteen trace elements around smelters in the north on France. Water, Air and Soil Pollut. 135: 173-194.
22. WRAP (2006). Introduction to PAS 100 2005. Summary for the BSI specification for compostedmaterials. www.wrap.org.uk/ materials/organics/ compost_ pecifications/ bsi_ pas_100/bsi_pas_100_1.html.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.9.4]