

حرکت کادمیم، کروم و کبالت در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و نمک این فلزات و جذب آن توسط سبزیجات در منطقه شرق اصفهان

مهران هودجی^۴

مهدی همایی^۲

مجید افیونی^۳

ابراهیم پناهپور^۱

(دریافت ۸۵/۱۲/۱۲ پذیرش ۸۷/۵/۲)

چکیده

از جمله عوامل اصلی افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک، مصرف روز افزون مواد حاصلخیزکننده، اصلاح کننده، آفت کش ها، فاضلابهای شهری و پسابهای صنعتی می باشد. با توجه به افزایش مصرف فاضلابها چنانچه کاربرد این مواد با رعایت استانداردها و ملاحظات مربوطه نباشد، جذب فلزات سنگین موجود در آنها توسط گیاه و ورودشان به زنجیره غذایی حیوان و انسان و نیز حرکتشان به سمت آبهای زیرزمینی، پیامدهای سوئی به دنبال خواهد داشت. هدف از انجام این پژوهش برآورد توازن جرمی سه فلز کادمیم، کروم و کبالت در یک خاک آهکی بود. بدین منظور، کرت هایی به ابعاد ۴×۴ متر انتخاب و در سه تکرار و به طور تصادفی به مقدار ۵۰ تن در هکتار از تیمارهای لجن فاضلاب غنی شده با فلزات سنگین و فرم معدنی (کلرید) این فلزات استفاده گردید. فرم قابل استخراج با HNO₃ برای این فلزات تا عمق ۱۰۰ سانتی متری خاک در لایه هایی به ضخامت ۲۰ سانتی متر، اندازه گیری و معادله توازن جرم در این خاک برآورد گردید. نتایج مربوط به توازن جرمی، حرکت Cd و Cr، Co را به سمت لایه های زیرین خاک به ترتیب برابر ۴۵/۸۵، ۳۸/۲۳ و ۱۴/۴۲ درصد از مقدار افزوده شده به خاک نشان داد. بنابراین با توجه به عدم دستیابی به توازن جرمی صد درصدی بین مقادیر اضافه شده این فلزات به خاک، مقدار فلزات موجود در خاک و همچنین میزان جذب شده توسط گیاه، این مقدار فلزات از طریق درز و شکافهای حاصل از انبساط و انقباض خاک به عمقهای پایین تر انتقال یافته است.

واژه های کلیدی: فلز سنگین، زنجیره غذایی، توازن جرمی، جریان ترجیحی، لجن فاضلاب.

Cd, Cr, and Co Motion in Soil Treated with Sewage Sludge and Salts of the Metals and their Uptake by Vegetable Crops A Case Study in East Isfahan

Ebrahim Panahpoor¹

Majid Afyuni²

Mahdi Homaei³

Mehran Hoodaji⁴

(Received Mar. 3, 2008 Accepted July 23, 2008)

Abstract

The concentration of heavy metals in soil is increasing mainly due to the use of fertilizers, pesticides, and urban and industrial wastewaters. Field application of wastewater may contaminate food chains and water resources if environmental standards are not duly observed. The objective of this research was to determine the mass balance and transport of Cd, Cr, Co in a sewage sludge amended calcareous soil. Sewage sludge was applied at 50 t/ha to 4×4 plots in three replications. After 5 years from sludge application, soil samples were collected to a depth of 100 cm at 20 cm increments and analyzed for their total heavy metal concentration. We were not able to recover 100% of the metals added into the soil at a depth of 100 cm. Our results indicate that 14, 38, and 46 percent of Cd, Cr, and Co, respectively, had been lost over five years. The results also show that some of the metals may have moved to depths below 100 cm through preferential flow paths.

Keywords: Heavy Metal, Food Chains, Mass Balance, Preferential Flow, Sludge.

1. Faculty Member & PhD Student of Soil Science, Ahwaz Branch, Azad Islamic University, epanahpoor@yahoo.com
2. Prof. of Soil Science, Isfahan University of Technology
3. Assoc. Prof. of Soil Science, University of Tarbiat Modarres, Tehran
4. Assis. Prof. of Soil Science, Khorasgan Branch, Azad Islamic University

- ۱- عضو هیئت علمی و دانشجوی دوره دکترای خاکشناسی دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات اهواز، epanahpoor@yahoo.com
- ۲- استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۳- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران
- ۴- استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان اصفهان

که پتانسیل حرکت فلزات به سمت عمق خاک و خطر آلودگی آبهای زیرزمینی وجود دارد [۵ و ۶]. در حقیقت بیشتر آزمایش‌هایی که منکر حرکت فلزات سنگین به سمت عمق خاک شده‌اند، عدم افزایش غلظت قابل ملاحظه فلز را در لایه‌های زیرین خاک به عنوان دلیل عدم حرکت آن فرض کرده‌اند، این آزمایش‌ها نتوانسته‌اند موازنه جرمی مناسبی بین مقدار فلزات اضافه شده به خاک با مقدار فلزات تعیین شده در خاک به دست آورند. نکته‌ای که نتایج آزمایش‌های فوق را (در عدم حرکت فلزات سنگین) مورد تردید قرار می‌دهد، عدم توانایی در انجام موازنه جرمی^۵ بین فلزات مصرف شده و اندازه‌گیری شده در خاک می‌باشد. در این مطالعات مقادیر متفاوتی در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد (حتی گاهی ۳۰ درصد) از فلزات کاربردی را نتوانسته‌اند در خاک اندازه‌گیری نمایند [۳ و ۷]. در تحقیقی که چانگ و همکاران با افزودن لجن فاضلاب به خاک انجام دادند، پس از در نظر گرفتن عوامل خطا و رفع آنها، به این نتیجه رسیدند که حدود ۹ درصد از کادمیم، ۴۰ درصد از کروم، ۲۴ درصد از مس و ۱۷ درصد از سرب موجود در لجن به لایه‌های پایین‌تر از عمق مورد مطالعه حرکت کرده است [۸]. این محققان کامل نبودن عصاره‌گیری اسید نیتریک (HNO_3) و تغییر جرم مخصوص ظاهری به دلیل اختلاط با لجن فاضلاب را به عنوان خطا ذکر کرده‌اند، چون با این کار حجم لایه ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار فلزات رسوب کرده در این عمق به دلیل استفاده حجم اولیه، کمتر از میزان واقعی تخمین زده می‌شود. ویلیامز و همکاران اتلاف از طریق شخم را به عنوان دلیل عدم حصول به موازنه جرمی مناسب، ذکر کردند [۴].

جریان ترجیحی می‌تواند تا حد زیادی سرعت حرکت املاح را به سمت آب زیرزمینی افزایش دهد. عامل دیگر که می‌تواند حرکت فلزات را افزایش دهد، حرکت فلزات به صورت کمپلکس‌های آلی فلزی محلول می‌باشد. کامبرکو و همکاران تأثیر حرکت چهار فلز کادمیم، سرب، روی و مس را تحت تأثیر جریان ترجیحی و مواد آلی محلول در ستونهای دست خورده و دست نخورده بررسی کردند و چهار فلز مذکور را در یک تیمار به صورت نمکهای محلول در آب مقطر و در تیمار دیگر همراه با مواد آلی محلول اعمال کردند و مقدار خروج این فلزات را در آب زهکش تعیین نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در ستونهای دست نخورده همراه با مواد آلی، حداکثر مقدار فلزات، در آب زهکش اندازه‌گیری شد. درصد خروج این فلزات از مقدار اعمال شده به ترتیب ۲۶، ۳۰، ۲۸ و ۲۷ درصد برای کادمیم، روی، مس و سرب به دست آمد. مقادیر مربوط به تیمار خاک دست نخورده و بدون مواد آلی به ترتیب ۳۰ و ۲۳

حاک، دریافت کننده نهایی بسیاری از ترکیبات زائد و ناخواسته حاصل از فعالیتهای بشر است. عناصر سنگین حاصل از فعالیتهای صنعتی، کارخانه‌ها و دود خودروها در هوا پراکنده شده و بر اثر بارندگی و یا هر عامل دیگر به سطح خاک بر می‌گردند. عناصر و مواد آلی موجود در زباله‌های شهری و فاضلابهای صنعتی در طول رودخانه‌ها و در مزارع کشاورزی به خاک اضافه می‌شوند. در آلودگی خاک، گیاه و آبهای زیرزمینی، جذب املاح و مواد سمی به وسیله گیاه و نیز حرکت این مواد در نیمرخ خاک و احتمال آلوده کردن سفره‌های آب زیرزمینی موجب نگرانیهای زیادی شده است. از دیگر موادی که به خاک اضافه می‌شود لجن فاضلاب بوده که حاوی مقادیر متفاوتی از فلزات سنگین است. به همین دلیل بررسی مقادیر فلزات سنگین و امکان جذب آنها توسط محصولات کشاورزی کشت شده بر روی خاکهای تیمار شده با لجن فاضلاب از اهمیت فراوانی برخوردار است. همچنین، بررسی امکان حرکت فلزات سنگین اضافه شده به خاک از طریق مصرف لجن فاضلاب و آلوده کردن سفره‌های آب زیرزمینی از نظر زیست‌محیطی اهمیت فراوان دارد [۱ و ۲].

انتقال املاح در خاک به چهار طریق انجام می‌گیرد که شامل جریان روان^۱، پخشیدگی^۲، پراکنش^۳ و جریان ترجیحی^۴ است. در جریان روان، انتقال در مواردی که سرعت جریان محلول خاک و حلالیت املاح زیاد است، بخش عمده‌ای از انتقال را در بر می‌گیرد. در پخشیدگی، املاح از محلی که دارای غلظت بیشتری است به طرف محلی که غلظت کمتری دارد حرکت می‌کنند، به طوری که عامل اصلی حرکت، شیب غلظت املاح است. در پراکنش، اختلاف سرعت محلی املاح موجب حرکت می‌گردد. جریان ترجیحی می‌تواند حرکت آب و املاح را در نیمرخ خاک تسریع نماید. آب و املاح از طریق حرکت در مسیرهای جریان ترجیحی در خاک (شامل ترکهای خاک، شکافهای حاصل از انبساط و انقباض خاک، سوراخهای ریشه و کرم‌راه‌ها یا در خاکهای درشت بافت، پدیده زبانه‌ای) اغلب توده خاک را دور می‌زنند [۳]. در این ارتباط پتانسیل حرکت فلزات سنگین به اعماق خاک از طریق آبشویی بررسی شده است.

بسیاری از پژوهشگران گزارش کرده‌اند که انتقال فلزات سنگین در خاک بسیار کم است و احتمال آلودگی آبهای زیرزمینی از این طریق اندک می‌باشد [۳ و ۴]. لکن آزمایش‌های اخیر نشان می‌دهند

¹ Mass Flow

² Diffusion

³ Dispersion

⁴ Preferential Flow

⁵ Mass Balance

هدف از انجام این پژوهش برآورد توازن جرمی سه فلز کادمیم، کروم و کبالت ناشی از کاربرد لجن فاضلاب و شکل معدنی فلزات در خاک بوده تا بتوان به اهمیت و نقش جریان ترجیحی در حرکت و انتقال فلزات سنگین به لایه‌های زیرین خاک و آلوده کردن آبهای زیرزمینی پی برد.

۲- مواد و روشها

این پژوهش در مزرعه آموزشی- پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان واقع در ۲۰ کیلومتری شمال شرقی شهر اصفهان با طول جغرافیایی ۵۱°۴۵' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲°۴۰' شمالی اجرا شد. این منطقه دارای آب و هوای گرم و خشک، خاکهای گچی آهکی، متوسط بارش سالانه ۱۰۰ میلی‌متر و تبخیر سالانه ۲۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. کانیهای غالب در بخش رس ریز خاکهای این ناحیه حاوی مقادیر قابل توجهی رس انبساط‌پذیر از نوع اسمکتایت^۴ و پالی گورسکایت^۵ و در بخش درشت شامل کلرایت^۶ و ایلایت^۷ بوده و رده‌بندی آن بر اساس تاکسونومی خاک^۸ در سال ۱۹۹۸ در حد فامیل^۹: کرومیک^{۱۰}، هاپلوتورتر^{۱۱}، فاین کربناتیک^{۱۱} و ترمیک^{۱۲} می‌باشد [۱۳]. ضمناً در این مزرعه به خاطر وجود کفه رسی سخت در عمق ۳۵ سانتی‌متری، یک مرتبه در سال ۱۳۸۱ توسط زیرشکن^{۱۳}، زیر شکنی صورت گرفته است.

۲-۱- تیمارهای اصلی

دو تیمار اصلی شامل S₀ به عنوان تیمار شاهد (خاک مزرعه) و S₁ به عنوان تیمار لجن فاضلاب به مقدار ۵۰ تن در هکتار لجن فاضلاب خشک بود.

۲-۲- تیمارهای فرعی

تیمارهای فرعی به قرار زیر می‌باشند:

تیمار E₀: تیمار شاهد بدون وجود فلزات سنگین

درصد برای کادمیم و روی و مقادیر ۱۵ و ۱۲ درصد برای مس و سرب به دست آمد. ستونهای دست خورده کل فلزات را در خود نگه داشته بود [۹].

استین هویز و مک براید^۱ حرکت فلزات از لجن مصرف شده به سمت عمق خاک را در مزارع و کرت‌های آزمایشی گزارش کردند [۱۰]. طبق نظر ایشان جریان ترجیحی و کمپلکس‌های آلی محلول باعث این حرکت شده بود.

باوی و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۹ در یک پژوهش در کرت‌های آزمایشی به ابعاد (۶/۱ m × ۱۲/۲ m) که بر چهار تیمار T₀ (مقدار صفر از حداکثر مصرف لجن فاضلاب)، T₁ (۱/۴ حداکثر مصرف لجن فاضلاب)، T₂ (۱/۲ حداکثر مصرف لجن فاضلاب) و T₃ (حداکثر مصرف لجن فاضلاب یعنی ۷۶۵ تن در هکتار انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که حرکت Pb < Cu < Cr < Cd < Zn < Ni به سمت لایه‌های پایین‌تر از ۷۵ سانتی‌متری خاک پس از گذشت ۷ سال و با انجام موازنه جرمی به ترتیب ۶۱، ۵۴، ۵۲، ۴۷ و ۴۰ درصد بود [۱۱].

گاسکو و همکاران^۳ در سال ۲۰۰۳ ستونهایی از یک نمونه خاک Xero fluvent را تهیه نمودند و ۱۰ سانتی‌متر بالایی ستونها را با مقادیر مختلف (۲۲/۳۲۱، ۲۲۳/۲۱۰، ۳۵۷/۱۴۲ تن در هکتار) لجن فاضلاب تجزیه شده به روش هوازی، مخلوط نمودند و در مدت شش ماه هر کدام از ستونهای خاک را با حدود ۴۷۷۶ میلی‌لیتر آب، آبیاری نمودند (در حالت غیر اشباع) و سپس از عمقهای ۰ تا ۱۰، ۴۰ تا ۵۰ و ۷۰ تا ۸۰ سانتی‌متر خاک نمونه‌برداری و غلظت عناصر سنگین (Cr, Ni, Cd, Zn, Pb) موجود در خاک و نیز آب خروجی را اندازه‌گیری نمودند. نتایج توازن جرمی، بازیافت بیش از ۸۱ درصد از مقدار اضافه شده اولیه را نشان داد. یعنی حدود ۱۹ درصد عناصر به لایه‌های پایین‌تر از عمق مطالعه انتقال یافته بود. از طرفی ۹۰ درصد از عناصر انتقال یافته در عمق ۴۰ سانتی‌متری بوده و مقدار کل عناصر آبشویی شده به غلظت عناصر در لجن و نوع لجن فاضلاب بستگی داشت [۱۲].

از آنجایی که لجن فاضلاب یک کود آلی و ارزان قیمت بوده و تولید آن نیز در اصفهان به مقدار زیادی انجام می‌گیرد و استفاده از آن در زمینهای کشاورزی در سالهای اخیر توسعه یافته و رو به گسترش نیز می‌باشد و به لحاظ دارا بودن فلزات سنگین در این فراورده، لازم است تا در رابطه با عواقب سوئی که احتمالاً در پی خواهد داشت مطالعات بیشتری صورت پذیرد.

¹ Steenhuis & McBride

² Baveye et al.

³ Gasco et al.

⁴ Smectite

⁵ Palygorskite

⁶ Chlorite

⁷ Illite

⁸ Soil Taxonomy

⁹ Chromic

¹⁰ Haplotorrets

¹¹ Fine Carbonatic

¹² Thermic

¹³ Subsoiler

جدول ۱ - غلظت فلزات سنگین اضافه شده به خاک از طریق لجن فاضلاب و شکل معدنی (کیلوگرم در هکتار)

لجن + شکل معدنی			کاربرد شکل معدنی			کاربرد لجن فاضلاب			تیمار
Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	
----	----	----	----	----	----	----	----	----	S ₀ E ₀
۱/۲۵	۲/۰۰	۲/۱۳	۱/۲۵	۲/۰۰	۲/۱۲	----	----	----	S ₀ E ₁
۲/۵۰	۴/۰۰	۴/۲۵	۲/۵۰	۴/۰۰	۴/۲۵	----	----	----	S ₀ E ₂
۰/۶۵	۱/۶۳	۰/۱۱	----	----	----	۰/۶۵	۱/۶۳	۰/۱۱	S ₁ E ₀
۱/۹۰	۳/۶۳	۲/۲۴	۱/۲۵	۲/۰۰	۲/۱۲	۰/۶۵	۱/۶۳	۰/۱۱	S ₁ E ₁
۳/۱۵	۵/۶۳	۴/۳۶	۲/۵۰	۴/۰۰	۴/۲۵	۰/۶۵	۱/۶۳	۰/۱۱	S ₁ E ₂

۱۱۱ کیلوگرم توزین و به کرتهاى مربوطه (S₁) افزوده شد و تا عمق ۲۰ سانتی متری با خاک مخلوط گردید. برای اعمال تیمار فلزات سنگین، از نمکهای کلرور کادمیم، کلرور کبالت و کلرور کروم استفاده و غلظتهای محاسبه شده توسط سمپاش دستی به طور یکنواخت بر روی تمام سطح کرتها اضافه شد [۱۶]. گیاهانی که در این کرتها کشت شدند، شامل کاهو، اسفناج و شاهی بود.

پنج سال پس از اعمال تیمارها به منظور انجام تجزیه‌های مورد نظر به وسیله مته خاکشناسی از قسمت وسط هر کرت از اعماق ۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۰، ۶۰ تا ۸۰ و ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی متری حدود ۲ کیلوگرم از نیمرخ خاک برداشته شد و به آزمایشگاه انتقال یافت. نمونه‌های خاک، هوا خشک شدند و از الک دو میلی متری عبور داده شدند. سپس از این نمونه‌ها برای انجام تجزیه استفاده شد [۱۷].

به منظور تعیین غلظت فلزات سنگین باقی مانده در خاک از روش عصاره‌گیری با اسید نیتریک ۴ مولار و برای تعیین غلظت فلزات سنگین جذب شده توسط گیاه از روش هضم با اسیدهای نیتریک، پرکلریک و سولفوریک با نسبت‌های ۱:۴:۱۰ استفاده شد [۱۸].

۲-۳- معادله توازن جرمی

به منظور تعیین این که آیا فلزات سنگین به اعماق پایین تر از عمق مورد مطالعه حرکت کرده‌اند یا خیر، باید رابطه زیر را در تمامی کرتها بررسی نمود:

$$\text{مقدار جذب شده توسط گیاه (kg/ha)} = \text{کل فلزات سنگین وارد شده به خاک (kg/ha)} + \text{مقدار باقی مانده در خاک (kg/ha)} \quad (1)$$

تساوی فوق در هر کرت به منزله این است که فلزات سنگین به سمت لایه‌های پایین تر از یک عمق به خصوص حرکتی نداشته‌اند. در غیر این صورت، یعنی چنانچه سمت چپ معادله فوق بیشتر از سمت راست معادله باشد، به همان اندازه فلزات به سمت لایه‌های زیرین خاک حرکت نموده‌اند.

تیمار E₁: معادل غلظت Cd، Cr و Co به ترتیب برابر با ۲/۱۲، ۲/۰۰ و ۱/۲۵ کیلوگرم بر هکتار

تیمار E₂: معادل غلظت Cd، Cr و Co به ترتیب برابر با ۴/۲۵، ۴/۰۰ و ۲/۵۰ کیلوگرم بر هکتار

حداکثر غلظت برای کادمیم طبق نظر آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا در لجن فاضلاب ۸۵ میلی گرم به ازای هر کیلوگرم لجن خشک مصرفی می‌باشد [۱۴ و ۱۵]. برای دو فلز سنگین کروم و کبالت غلظت مشخصی در منابع ارائه نشده است. بنابراین، در این مطالعه حداکثر غلظت کروم ۸۰ میلی گرم به ازای هر کیلوگرم لجن خشک و برای کبالت ۵۰ میلی گرم به ازای هر کیلوگرم لجن خشک در نظر گرفته شد.

در جدول ۱ مقادیر غلظت فلزات سنگین به شکلهای معدنی، لجن فاضلاب و ترکیب این دو نشان داده شده‌اند.

S₀E₀: تیمار شاهد

S₀E₁: نصف حداکثر مجاز فلزات سنگین که به شکل معدنی اضافه شده، بدون کاربرد لجن فاضلاب

S₀E₂: حداکثر مجاز فلزات سنگین که به شکل معدنی اضافه شده، بدون کاربرد لجن فاضلاب

S₁E₀: کاربرد ۵۰ تن در هکتار لجن فاضلاب خشک

S₁E₁: نصف حداکثر مجاز فلزات سنگین که به شکل معدنی اضافه شده و کاربرد ۵۰ تن در هکتار لجن فاضلاب خشک

S₁E₂: حداکثر مجاز فلزات سنگین که به شکل معدنی اضافه شده و کاربرد ۵۰ تن در هکتار لجن فاضلاب خشک

بنابراین، با توجه به تیمارهای مورد نظر و با در نظر گرفتن سه تکرار، در مجموع ۱۸ کرت آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بر روی زمینی به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع اجرا گردید و مساحت هر کرت آزمایشی ۱۶ مترمربع (۴m × ۴m) در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از خطاهای احتمالی ناشی از نفوذ جانبی، فاصله کرتها برای تیمارهای فرعی ۵۰ سانتی متر و فاصله تیمارهای اصلی از یکدیگر ۲۰۰ سانتی متر لحاظ شد. سپس لجن فاضلاب به مقدار

برای بررسی مقدار جذب فلزات سنگین توسط گیاه، سه گیاه شاهی، کاهو و اسفناج برای دو بار در سال کشت شد. پس از پایان هر کشت مقدار عملکرد در هر کرت و مقدار فلز جذب شده توسط گیاه اندازه‌گیری گردید و برای هر سه تکرار و نیز هر سه گیاه میانگین گرفته و جرم فلزات جذب شده توسط گیاه محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تجزیه شیمیایی لجن فاضلاب

برخی ویژگیهای شیمیایی لجن فاضلاب در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول CEC عبارت است از ظرفیت تبادل کاتیونی که به روش استات آمونیم یک نرمال اندازه‌گیری شد [۱۸]. O.M عبارت است از مقدار مواد آلی بر حسب درصد که از فرمول $O.C = 1/724 O.M$ به دست آمد و O.C نیز عبارت است از مقدار کربن آلی بر حسب درصد که به روش "اکسیداسیون با دی کرومات بدون حرارت خارجی" تعیین گردید [۱۸]. عبارت N_T عبارت است از مقدار ازت کل موجود در لجن که بر حسب درصد به روش کدال تعیین گردید [۱۸]. θ_m عبارت است از رطوبت جرمی که بر حسب درصد به روش کوره تعیین گردید [۱۷]. لجن فاضلاب دارای مقادیر زیادی ماده آلی، CEC زیاد و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه می‌باشد که این موارد از محاسن لجن فاضلاب بوده و باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. با این حال، لجن فاضلاب حاوی فلزات سنگین نظیر Cr، Cd، Co و Pb می‌باشد که می‌تواند از نظر زیست‌محیطی مشکلاتی را به وجود آورد. غلظت فلزات سنگین در این لجن فاضلاب به مراتب کمتر از استانداردهای پیشنهاد شده توسط USEPA می‌باشد [۱۹].

۳-۲- غلظت فلزات سنگین قابل استخراج با HNO_3

میانگین غلظت Cr، Cd و Co قابل استخراج با HNO_3 برای لایه‌های ۲۰ سانتی‌متری، تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک در جدول ۳ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که غلظت کادمیم با افزایش عمق به‌طور یکنواخت در تمامی تیمارها (بستگی به نوع تیمار) افزایش یافته است. به این صورت که میانگین غلظت کادمیم در لایه‌های ۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری به ترتیب ۲/۷۲ و

۳/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری به ۷/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافته است. غلظت کروم و کبالت نیز در لایه ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری نسبت به لایه ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری افزایش یافته است. بنابراین اگر در خاکی با شرایط ذکر شده در قسمت مواد و روشها، سطح آب زیر زمینی بالا باشد و همین غلظتها به آن راه یابند و این مقادیر را با "دامنه مقدار عناصر کیمیا در آبهای زیرزمینی" که توسط دفتر ارزیابی تکنولوژی ایالات متحده آمریکا تعیین گردیده مقایسه نماییم، کادمیم و کروم ایجاد آلودگی نکرده لیکن کبالت باعث آلودگی آبهای زیر زمینی خواهد شد [۲۰].

۳-۳- جذب فلزات سنگین توسط گیاه

میانگین عملکرد خشک برای سه گیاه کاهو، اسفناج و شاهی بر حسب تن بر هکتار محاسبه و مشاهده شد که عملکرد خشک برای گیاهان، در تیمارهایی که لجن فاضلاب استفاده شده به دلیل مواد آلی فراوان و عناصر غذایی موجود در لجن به مراتب بیشتر از تیمارهای دیگر است. بنابراین، انتظار می‌رود جذب فلزات سنگین در این تیمارها نیز بیشتر از تیمارهای دیگر باشد، این نتایج در جدول ۴ ذکر شده است [۱۶].

در چهار سال بعدی نیز کشت در این مزرعه کشت ادامه یافت. بنابراین، از مقدار جذب این سه گیاه در هر سه تکرار میانگین گرفته و در تعداد دفعات کشت که دو بار در سال می‌باشد ضرب نموده تا مقدار جذب برای پنج سال محاسبه گردد (جدول ۵).

۳-۴- غلظت فلزات سنگین باقی‌مانده در خاک

در جدول ۶ غلظت فلزات سنگین باقی‌مانده در لایه‌های مورد مطالعه محاسبه و نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود غلظت فلزات با افزایش عمق، افزایش یافته است. به نظر می‌رسد این رشد به دلیل بافت سنگین، CEC زیاد و نیز افزایش جرم مخصوص ظاهری با افزایش عمق نیم‌رخ خاک باشد [۲۱].

جدول ۲- تجزیه شیمیایی لجن فاضلاب مورد مطالعه [۱۹]

Cr*	Co*	Cd*	Fe*	Mn*	Cu*	Zn*	Ni*	Pb*	K (ppm)	P _{ave} (ppm)	pH	CEC (comol/kg)	EC (dS/M)	N _T (%)	O.M (%)	θ_m^* (%)	پارامتر
۳۲/۵	۱۳	۲/۲۵	۹۰۲۵	۲۱۲/۵	۱۶۲/۵	۹۷۵	۴۳/۷۵	۱۱۳	۴۳/۷۵	۳/۶۴	۵/۷ ۶	۶۴/۲	۱۰/۸۸	۳/۶۴	۳۰/۱	۳۹	مقدار موجود در لجن
۶۰۰	۲۵	۳	۱۷۰۰۰	۲۶۰	۱۳۵	۳۰۰	۷۵	۲۵۰	-	-	-	-	-	-	-	-	مقدار استاندارد

* غلظت کل فلز بر حسب mg/kg

جدول ۳- میانگین غلظت فلزات سنگین قابل استخراج با HNO₃، پنج سال پس از اعمال تیمارها (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

S ₁ E ₂			S ₁ E ₁			S ₁ E ₀			S ₀ E ₂			S ₀ E ₁			S ₀ E ₀			تیمار
Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	فلز عمق (سانتی‌متر)
۱۴/۳	۱۵/۲	۲/۹۳	۱۵/۵	۱۵/۰	۲/۷۳	۱۲/۱	۱۴/۹	۲/۵۲	۱۶/۱	۱۵/۲	۲/۹۲	۱۶/۲	۱۴/۹	۲/۷۳	۱۱/۶	۱۴/۸	۲/۵۱	۰-۲۰
۱۳/۴	۱۹/۳	۳/۱۸	۱۳/۴	۱۹/۸	۳/۰۶	۱۶/۸	۲۰/۳	۲/۹۳	۱۳/۶	۱۹/۵	۳/۱۶	۱۴/۳	۱۹/۹	۳/۰۸	۱۲/۵	۲۰/۳	۲/۹۲	۲۰-۴۰
۱۶/۳	۲۷/۹	۳/۳۴	۱۲/۷	۲۷/۵	۳/۲۱	۱۵/۹	۲۷/۱	۳/۱۹	۱۲/۸	۲۸/۶	۳/۳۱	۱۶/۱	۲۷/۶	۳/۲۵	۱۷/۰	۲۶/۹	۳/۱۹	۴۰-۶۰
۱۲/۷	۳۰/۷	۳/۷۱	۱۶/۵	۳۰/۳	۳/۵۹	۱۳/۰	۲۹/۹	۴/۴۷	۱۶/۲	۲۹/۲	۳/۶۹	۱۳/۵	۲۹/۸	۳/۵۸	۱۶/۱	۳۰/۱	۳/۴۶	۶۰-۸۰
۱۹/۱	۲۵/۱	۳/۷۸	۱۷/۳	۲۵/۰	۳/۷۰	۱۷/۱	۲۴/۸	۳/۶۴	۱۷/۱	۲۵/۳	۳/۷۵	۱۵/۴	۲۴/۹	۳/۶۹	۱۷/۴	۲۴/۷	۳/۶۴	۸۰-۱۰۰

جدول ۴- میانگین جذب گرم در هکتار فلزات سنگین در گیاهان مورد مطالعه (غلظت عنصر × عملکرد خشک)

تیمار	فلزات سنگین			میانگین عملکرد خشک (تن در هکتار)
	کادمیم	کروم	کیالت	
S ₀ E ₀	۲/۱۲	۱۰/۴۳	۷/۴۷	۱/۵۲
S ₀ E ₁	۶/۰۲	۹/۸۳	۸/۰۱	۱/۵۶
S ₀ E ₂	۶/۶۹	۷/۴۳	۶/۳۴	۱/۵۰
S ₁ E ₀	۴/۳۸	۳۰/۱۵	۱۵/۶۵	۲/۹۹
S ₁ E ₁	۱۴/۰۶	۱۵/۰۴	۱۲/۱۰	۲/۵۲
S ₁ E ₂	۱۹/۸۳	۱۶/۳۱	۱۰/۵۴	۲/۴۳

جدول ۵- میانگین جذب خالص فلزات سنگین در گیاهان مورد مطالعه (تیمار - شاهد) (گرم در هکتار)

تیمار	جذب خالص		
	کادمیم	کروم	کیبالت
S ₀ E ₁	۳/۹۰±۰/۲	----*	۵/۳۹±۰/۳۸
S ₀ E ₂	۴/۵۷±۰/۲۴	----*	----*
S ₁ E ₀	۲/۲۶±۰/۱۸	۱۹/۷۲±۱/۳۴	۸/۱۸±۰/۲
S ₁ E ₁	۱۱/۹۴±۱/۲۸	۴/۶۲±۰/۶	۴/۶۳±۰/۱۸
S ₁ E ₂	۱۷/۷۱±۱/۳	۵/۸۹±۰/۶۳	۳/۰۷±۰/۳۲

*مقدار فلز جذب شده در این تیمارها کوچک تر یا مساوی تیمار شاهد بود.

جدول ۶- غلظت فلزات سنگین باقی مانده در هر لایه (کیلوگرم در هکتار)

تیمار	S ₀ E ₀			S ₀ E ₁			S ₀ E ₂			S ₁ E ₀			S ₁ E ₁			S ₁ E ₂			عمق (سانتی متر)		
	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd	Co	Cr	Cd			
۰-۲۰	۶/۹۳	۴۰/۸۵	۳۲/۰۱۶	۷/۵۳	۴۱/۱۲	۴۴/۷۱	۴۱/۹۵	۸/۰۶	۴۴/۴۴	۶/۹۵	۴۱/۱۲	۶۱/۹۵	۱۲/۰۳	۴۴/۰۱	۹۷/۱۵	۱۱/۶۷	۵۲/۴۹	۹۸/۱۳	۱۱/۲۸	۶۰-۸۰	
۲۰-۴۰	۹/۱۷	۶۳/۷۴	۳۹/۲۵	۹/۶۷	۶۲/۴۹	۴۴/۹۰	۹/۹۲	۶۱/۲۳	۴۲/۷۰	۹/۲۰	۶۳/۷۴	۶۱/۲۳	۹/۹۲	۴۴/۹۰	۶۲/۴۹	۹/۶۷	۳۹/۲۵	۶۳/۷۴	۹/۱۷	۲۰-۴۰	
۴۰-۶۰	۱۰/۲۱	۸۶/۰۸	۵۴/۴۰	۱۰/۴۰	۸۸/۳۲	۵۱/۵۲	۱۰/۵۹	۵۱/۵۲	۴۰/۹۶	۹۱/۵۲	۱۰/۵۹	۵۱/۵۲	۱۰/۴۰	۴۴/۰۱	۹۷/۱۵	۱۱/۶۷	۵۲/۴۹	۹۸/۱۳	۱۱/۲۸	۴۰-۶۰	
۶۰-۸۰	۱۱/۲۸	۹۸/۱۳	۵۲/۴۹	۱۱/۶۷	۵۲/۴۹	۴۴/۰۱	۹۷/۱۵	۱۱/۶۷	۴۴/۰۱	۹۷/۱۵	۱۱/۶۷	۵۲/۴۹	۹۸/۱۳	۱۱/۲۸	۶۰/۰۸	۸۶/۰۸	۵۴/۴۰	۱۰/۲۱	۸۶/۰۸	۵۴/۴۰	۶۰-۸۰
۸۰-۱۰۰	۱۱/۸۷	۸۰/۵۲	۵۶/۷۲	۱۲/۰۳	۸۱/۱۷	۵۰/۰۲	۸۱/۱۷	۱۲/۰۳	۵۶/۷۲	۸۰/۵۲	۵۰/۰۲	۸۱/۱۷	۱۲/۰۳	۵۶/۷۲	۸۰/۵۲	۵۶/۷۲	۸۰/۵۲	۱۱/۸۷	۱۱/۸۷	۸۰-۱۰۰	
جمع کل	۴۹/۴۶	۳۶۹/۳۲	۲۳۴/۸۸	۵۱/۳۰	۳۷۰/۲۵	۲۳۵/۳۵	۵۱/۸۰	۲۳۵/۳۵	۲۳۶/۶۶	۳۷۲/۳۷	۵۲/۸۰	۲۳۵/۳۵	۳۷۰/۲۵	۲۳۴/۸۸	۳۶۹/۳۲	۲۳۴/۸۸	۳۶۹/۳۲	۴۹/۴۶	۴۹/۴۶	جمع کل	

(جرم خاک، kg/ha × غلظت فلز در خاک، mg/kg) = ۱۰^{-۶} = فلزات سنگین باقی مانده در خاک، kg/ha

۴- نتیجه گیری

کبات به سمت لایه های زیر ۱۰۰ سانتی متری با شدت بیشتری ملاحظه گردید، طوری که متوسط این حرکت برای تمامی تیمارها ۴۵/۸۵ درصد بود.

این نتایج در نگاه اول و در مقایسه با آنچه که در منابع در رابطه با انتقال فلزات سنگین گزارش شده به خاطر شرایط pH خاک و وجود درصد بالای آهک، زیاد به نظر می رسد. لکن باید به این نکته دقت کرد که خاک مورد مطالعه دارای مقادیر قابل توجهی رس انبساط پذیر بوده و به واسطه درز و ترکهایی که در طول فصل خشک ایجاد می گردد باعث حرکت کلوییدی ذرات از طریق جریان ترجیحی در خاک می شود، به طوری که این ذرات فلزات مذکور را همراه خود به لایه های زیرین انتقال داده اند. از طرف دیگر در رابطه با نتایج حاصله نباید از نظر دور داشت که به خاطر وجود کفۀ سخت رسی در عمق ۳۵ سانتی متری، از زیر شکن برای زیر شکنی این کف استفاده شده که این امر در تولید جریانهای ترجیحی و انتقال ذرات خاک و فلزات سنگین متصل به آن دخیل بود. ضمناً از آنجایی که در این پژوهش تا حدودی نتایج مربوط به حرکت فلزات سنگین که در مطالعات و پژوهشهای گذشته انجام گرفته بود به خاطر وجود جریانهای ترجیحی و حرکت کلوییدی مواد از طریق درز و شکافها نقض گردید، لازم است این پژوهش در خاکهای مشابه و در شرایط کاملاً کنترل شده انجام گیرد و این کار به عنوان پایه ای برای پژوهشهای آتی منظور شود.

نتایج توازن جرمی نشان داد که کادمیم در تیمارهای S_0E_2 و S_0E_1 که هیچ گونه لجن فاضلابی در آنها مصرف نشده است به ترتیب برابر ۱۳/۲۳ و ۲۱/۳ درصد و برای تیمارهای S_1E_1 و S_1E_2 که از لجن فاضلاب استفاده کردند به ترتیب ۲۳/۰۴ و ۱۴/۵۵ درصد از میزان اضافه شده به سطح خاک، از لایه ۱۰۰ سانتی متری خاک پایین تر رفته است. بنابراین حرکت این فلز در طول نیمرخ خاک کاملاً مشهود می باشد و از طرف دیگر نقش لجن فاضلاب به عنوان یک ماده آلی که دارای CEC بوده (جدول ۲) و از حرکت فلز به صورت محلول جلوگیری می کند نیز نمایان می شود. در تیمار S_1E_0 که لجن فاضلاب وجود داشته ولی فرم معدنی فلز اضافه نگردیده، حرکت کادمیم در عمق کمتر از ۸۰ سانتی متری متوقف گردید. در مجموع به طور متوسط مقدار ۱۴/۴۲ درصد از کادمیم اضافه شده به کرتها از لایه ۱۰۰ سانتی متری خاک به قسمت های پایین تر نفوذ کرده بود. در رابطه با کروم در تیمارهای S_0E_2 و S_0E_1 که در آنها لجن فاضلاب مورد استفاده قرار نگرفته بود، به ترتیب ۵۳/۵ و ۲۳/۷۵ درصد از فلز اضافه شده، به زیر لایه ۱۰۰ سانتی متری و در تیمارهای S_1E_2 و S_1E_1 ، S_1E_0 که از لجن فاضلاب استفاده کرده بودند به ترتیب ۶۸/۴۸، ۳۰/۰۸، ۲۱/۳۲ و به طور متوسط ۳۸/۲۳ درصد از فلز اضافه شده به فرم معدنی و همراه با لجن فاضلاب به زیر لایه ۱۰۰ سانتی متری خاک حرکت کرد.

۵- مراجع

- 1- Davies, B. E. (1980). *Applied trace elements*, 2nd Ed., J. Willey, Chichester, London.
- 2- Davies, B. E. (1992). *Trace metals in the environment: Retrospect and prospect*, In: *Biogeochemistry of trace elements*, 12th Ed., D.C. Adriano, ed., Lewis Publishers, Boca Raton, 1-17.
- 3- Chang, A. C., Warneke, J. E., Page, A. L., and Lund, L. J. A. (1984). "Accumulation of heavy metals in sewage sludge treated soils." *J. Environ. Qual.*, 13 (1), 87-91.
- 4- Williams, D. E., Vlamis, J., Pukite, A. H., and Corey, J. E. (1987). "Metal movement in sludge amended soils: a nine year study." *Soil Science*, 143(2), 124-131.
- 5- Richards, B. K., Steenhuis, T. S., Poverly, J. H., and McBride M. B. (1998). "Metal mobility at and old, heavily loaded sludge application site." *Environmental Pollution*, 99, 365-377.
- 6- Schwab, A. P., Banks, M. K., and Erickson, L. E. (2002). "Fate and transport of heavy metals and radionuclide in soil: the impact of vegetation." Kansas state university, <<http://www.Engg.ksu.edu/HSRC/fate.html>> (May 10, 2004).
- 7- Stvech, T., and Richter, J. (1997). "Heavy metal displacement in a sandy soil at the field scale: I: Measurements and parameterization of sorption." *J. Environ. Qual.*, 26, 49-56.
- 8- Dunigan, E. P., and Dick, R. P. (1980). "Nutrient and Coliform losses in runoff from fertilizer and sewage sludge treated soil." *J. Environ.*, 138-153.

- 9- Camobreco, V. J., Richards, B. K., Steenhuis, T. S., Peverly, J. H., and McBride, M. (1996). "Movement of heavy columns." *Soil Science*, 161 (11), 740-750.
- 10- Steenhuis, T. S., and McBride, M. B. (2001). "Preferential flow and organic enhancement of metals transport to groundwater from land-applied bioslids in the northeastern U.S." *Water Resources Grant Proposal*, <[http://water.usgs.gov/wrri/98grants/NY Preferential.pdf](http://water.usgs.gov/wrri/98grants/NY_Preferential.pdf)> (Aug. 20, 2000).
- 11- Baveye, P., and Murray, B. (1999). "Mass balance and distribution of sludge-borne trace elements in a silt loam soil following Long-term applications of sewage sludge." *The Science of the Total Environment*, 227, 13-28.
- 12- Gasco, G., Lobo, M., and Guerrero, F. (2003). "Heavy metals mass balance in a typic xerofluent treated with aerobically digested sewage sludges." *Ejeafche-ssues*, 2, 1-19.
- ۱۳- هنرجو، ن. (۱۳۷۱). "مقایسه چگونگی تحول و تکامل و بررسی کانیهای رسی در خاکهای تراس‌های رودخانه زاینده رود اصفهان." پایان نامه دوره کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- 14- Logan, T. J., Harrison, B. J., Mcavoy, D. C., and Greff, J. A. (1996). "Effects of olestra in sewage sludge on soil on soil physical properties." *J. Environ. Qual.*, 25, 153-161.
- 15- Van Genuchten, M. T., and Cleary, R. W. (1976). *Movement of solutes in soil: Computer-simulated and laboratory results*, In: *Soil chemistry: B. physico-chemical models*, G. H. Bolt, ed., Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam.
- ۱۶- هودجی، م. (۱۳۸۰). "حرکت سه فلز سنگین کادمیم، کبالت و کرم در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و جذب آنها به وسیله گیاه." رساله دکتری خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- ۱۷- کلباسی، م. (۱۳۷۰). *دستور العمل آزمایشات خاکشناسی عمومی*، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- 18- Baker, D. E., and Macher, M. C. A. (1982). *Nickel, Copper, Zink, and Cadmium*, In: *Methods of soil analysis, Part 2- chemical and microbiological properties*, A. L. Page R. H. Miller, and D. R. Keeney, eds., *Agronomy* 9, 323-334.
- 19- Jelinek, C. F., and Braude, G. L. (1978). "Management of sludge use on land." *J. Food Prot.*, 41, 476-480.
- 20- F. Vander Leaden, L. T. Troise, and D. K. Todd, eds. (1990). *The water encyclopedia*, 5th Ed., Lewis Publishers, Boca Roton, FL.
- 21- Metcalf and Eddy. (1991). *Wastewater engineering, treatment, desposal, reuse*, 3rd Ed., McGraw Hill, New York.