اثر کاربرد فاضلاب بر تجمع عناصر سنگین در نیمرخ خاک تحت شرایط گلخانه‌ای - لایسیمتری

نصرالدین پارسافر و صفر معروفی[1] *

فارغ التحصیل کارشناسی‌ارشد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا؛
Parsafar.parsa63@gmail.com
دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا؛
smarofi@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق از فاضلاب خام و تصفیه‌شده، تصفیه‌خانه شهر سرکان در کشت سیب‌زمینی و در شرایط لایسیمتری استفاده گردید. لایسیمترها در گلخانه به مدت پنج ماه ب‌طور هفتگی آبیاری شدند و سپس به مدت چهار ماه آزمایش صورت گرفت. در این رابطه یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (با دو فاکتور و سه تکرار) به اجرا درآمد. تیمارهای آبیاری شامل فاضلاب خام (T_1)، فاضلاب تصفیه‌شده (T_2)، ترکیب 50 درصد فاضلاب خام و آب معمولی (T_3)، ترکیب 50 درصد فاضلاب تصفیه‌شده و آب معمولی (T_4) و آب معمولی (T_5) بودند. همچنین دو عمق خاک سطحی (0-10 و 10-20 سانتی‌متری) نیز در نظر گرفته شد. پس از برداشت محصول، از خاک لایسیمترها به منظور بررسی تجمع عناصر سنگین (کادمیوم، سرب و نیکل) نمونه‌برداری گردید. نتایج نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر غلظت عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل معنی‌دار بوده و اثر متقابل عمق خاک و کیفیت آب بر تجمع عناصر سنگین بی‌معنی می‌باشد. بر اساس این نتایج، بیشترین و کمترین مقدار این عناصر به ترتیب در تیمارهای T_1 و T_5 مشاهده گردید. به طور کلی با توجه به میزان تجمع عناصر سنگین در خاک، ترتیب بزرگی تیمارهای آبیاری به صورت $T_1 > T_3 > T_2 > T_4 > T_5$ بود. همچنین نتایج نشان داد که میزان غلظت عناصر سنگین با افزایش عمق خاک کاهش یافته‌اند. بر اساس میزان تجمع عناصر سنگین در خاک، ترتیب بزرگی عناصر به صورت Pb> Ni> Cd مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: پروفیل خاک، کادمیوم، نیکل، سرب، فاضلاب

---

1. آدرس نویسنده مسؤول: همدان، بلوارآزادگان، دانشکده کشاورزی (چرم‌سازی)، گروه آبیاری

* دریافت: مرداد، 1391 و پذیرش: بهمن، 1391

مقدمه

رشد روز افزون جمعیت جهان، همگام با گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی از یک سو و خشکسالی‌های پی در پی در اکثر کشورهای واقع در کمربند مناطق خشک از سوی دیگر موجب شده است که در سال‌های اخیر تقاضا برای مصرف آب افزایش یابد و در نتیجه فشار بیش از اندازه به منابع آب وارد گردد. از طرف دیگر، توسعه شهرنشینی و صنعتی‌شدن سبب گردیده همه ساله بخش قابل توجهی از منابع آب، به علت تغییر کیفیت آنها، از چرخه مصرف خارج شوند که نمونه بارز آن فاضلاب‌های شهری می‌باشد. با توجه به حجم عظیم فاضلاب‌های تولیدی در بخش‌های مختلف، تلاش برای دست‌یابی به شیوه‌های دفع مناسب فاضلاب ضرورت می‌یابد. پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که دفع فاضلاب خام در محیط، زیان‌های بهداشتی و زیست محیطی گوناگونی را به دنبال خواهد داشت (18). یکی از مشکلات احتمالی کاربرد پساب فاضلاب در آبیاری، تأثیر احتمالی آن بر ویژگی‌های شیمیایی خاک است. چنانچه غلظت برخی عناصر موجود در پساب از میزان استاندارد بیشتر باشد، غلظت این عناصر در خاک نیز به تدریج افزایش یافته و از حد آستانه تحمل گیاه فراتر خواهد رفت. در عین حال ممکن است موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی و بروز مشکلات زیست محیطی شوند (13).

در زمینه اثر فاضلاب‌ها بر تجمع عناصر سنگین در خاک‌ها مطالعاتی در سطح دنیا صورت گرفته است که از جمله استرک و ریچر (20) گزارش کردند که حرکت عناصر سنگین در خاک آبیاری شده با فاضلاب بسیار کند بوده، به طوری که بیش از 90 درصد تجمع غلظت عناصر سنگین نیکل، کادمیوم و سرب در عمق 15-10 سانتی‌متری خاک مشاهده گردید. سیبه (19) افزایش غلظت سرب و کادمیوم در لایه افقی خاک (30-0 سانتی‌متر) را تحت آبیاری با فاضلاب در مقایسه با آب چاه برای دوره بیش از 80 سال گزارش نمود. برار و همکاران (6) نیز نتایج مشابهی را به دست آوردند. محمد و مظهره (14) بیان کردند که غلظت سرب و کادمیوم خاک به طور معنی‌دار تحت تأثیر آبیاری با فاضلاب قرار نگرفتند. همچنین گزارش کردند که آبیاری با فاضلاب، غلظت منگنز و آهن را در خاک افزایش داده ولی هیچ اثری بر غلظت روی و مس خاک نداشته است.

عابدی کوپایی و همکاران (1) در بررسی اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده روی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک در یک منطقه خشک نتیجه گرفتند که سیستم‌های آبیاری اثر معنی‌داری روی تجمع فلزات سنگین در خاک نداشته است. تجمع سرب، منگنز، نیکل و کبالت در خاک به طور معنی‌دار در تیمار فاضلاب در مقایسه با تیمار آب زیرزمینی افزایش یافته است. تجمع سرب، منگنز، نیکل، کبالت، مس و روی با عمق خاک کاهش یافته است. بهبهانی‌نیا و همکاران (4) در بررسی آلودگی فلزات سنگین فاضلاب شهری در خاک و گیاه نشان دادند که آبیاری زمین‌های کشاورزی به‌وسیله فاضلاب‌ها به مدت چندین سال غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه را افزایش داده است. افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه به طور معنی‌داری در تیمارهای آبیاری شده به وسیله فاضلاب بیشتر از تیمار شاهد مشاهده گردید. کلی و همکاران (10) با بررسی اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده نشان دادند که محتوی فلزات سنگین در خاک به خصوص برای سرب و کادمیوم با دوره آبیاری افزایش یافته است.

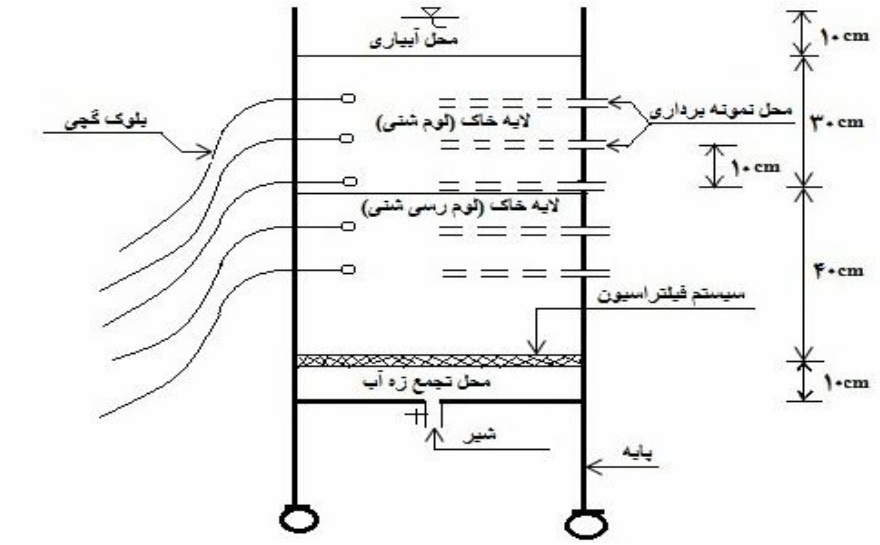
جمع‌بندی تحقیقات قبلی در زمینه تجمع عناصر سنگین در خاک در اثر کاربرد فاضلاب نشان می‌دهد که در پژوهش‌های قبلی انجام شده، عمدتاً اثر فاضلاب‌های تصفیه‌شده بررسی گردیده است. در این پژوهش سعی گردید که تیمارهای مورد استفاده حتی‌المقدور از گستردگی بیشتری برخوردار باشند. بنابراین علاوه بر فاضلاب تصفیه‌شده، فاضلاب خام و ترکیب این فاضلاب‌ها با آب معمولی نیز در نظر گرفته شد. در این

پژوهش اثر آبیاری با نسبت‌های مختلف فاضلاب شهر سرکان بر تجمع عناصر سنگین کادمیوم، نیکل و سرب در خاک تحت کشت سیب زمینی در لایسیمترهای مخصوص بررسی گردید. همچنین مقایسه این عناصر بین دو عمق 0-10 و 10-20 سانتی‌متری و بین تیمارهای مختلف آب آبیاری بررسی گردید. در این پژوهش اثر ترکیب فاضلاب‌ها با آب معمولی در مقایسه با کاربرد جداگانه آنها نیز مورد بررسی قرار گرفت. و در نهایت بین سه عنصر مذکور از نظر میزان تجمع در خاک، مقایسه‌ای صورت گرفت. با توجه به اینکه از یک طرف تجمع عناصر سنگین در خاک سبب انتقال این عناصر از خاک به گیاه و در نهایت به انسان می گردند و از طرف دیگر به دلیل اینکه عناصر سرب، کادمیوم و نیکل حتی در غلظت‌های کم نیز برای گیاهان و انسان سمی می باشند، بنابراین تجمع عناصر فوق الذکر در خاک مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

1- آماده‌سازی بستر کشت

در اجرای این پژوهش به منظور کنترل هر چه مطلوب‌تر کلیه عوامل موثر، از لایسیمتر استفاده گردید. تعداد 15 عدد لایسیمتر استوانه‌ای فلزی (عایق‌بندی شده) با ظرفیت 220 لیتر (قطر 60 و ارتفاع 90 سانتی‌متر) استفاده شد. علت انتخاب سیب‌زمینی به‌دلیل اهمیت آن در استان همدان و سطح وسیع زیر کشت آن در این استان و کشور می‌باشد، بدین منظور این گیاه انتخاب گردید. جهت زهکشی آب موجود در قسمت پائین لایسیمترها، از یک سیستم زهکشی ویژه‌ای استفاده شد و زه‌آب‌ها در محفظه مخصوصی که بدین منظور تعبیه شده بود، جمع‌آوری گردید. در شکل 1 شمای کلی از لایسیمتر مورد استفاده ارائه شده است.



شکل1- شمایی از لایسیمتر و لایه‌های خاک به کار رفته در تحقیق

پس از طراحی، ساخت و استقرار لایسیمترها در محل مورد نظر، جهت حصول به شرایطی واقعی خاک، پر نمودن آنها در طی چند مرحله و به تدریج توأم با آبیاری صورت گرفت تا تراکم خاک لایسیمترها در حد شرایط طبیعی خاک‌های منطقه صورت گیرد. به منظور ایجاد شرایط یکنواخت در خاک مورد نظر و جداسازی

ذرات درشت دانه آن، از الک با قطر روزنه‌های یک سانتی‌متر استفاده گردید (8). ضمناً با توجه به وضعیت لایه بندی خاک‌های منطقه، از یک خاک دو لایه که لایه فوقانی (0-30 سانتی‌متر) با بافت لومی شنی و لایه زیرین (30-70 سانتی‌متر) با بافت لوم رسی شنی بود، استفاده گردید. در نهایت کلیه لایسیمترها تا ارتفاع تقریبی 10 سانتی‌متر پایین‌تر از قسمت فوقانی خود، بر اساس جرم مخصوص ظاهری (که برابر 1/41 گرم بر سانتی‌متر مکعب بود) از دو لایه مذکور خاک پر شدند. در جدول 1 بافت و درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک، در دو عمق 0-30 و 30-70 سانتی‌متری ارائه شده است. شایان ذکر است که بافت خاک مورد استفاده به روش هیدرومتری تعیین گردید.

جدول 1- درصد ذرات تشکیل دهنده خاک

بافت خاک	عمق خاک (سانتی‌متر)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)
لوم شنی	30-0	60/77	20/26	18/97
لوم رسی شنی	70-30	52/56	21/92	25/52

پس از پر شدن لایسیمترها در مهر ماه 1388، جهت جلوگیری از شستشوی خاک، عملیات آبیاری به روش آبیاری سطحی و با استفاده از یک آبپاش دستی در شرایط بدون کشت گیاه، بطور منظم و پیوسته (هفتگی) در طی یک بازه زمانی پنج ماهه صورت گرفت تا شرایط طبیعی و ایجاد مجاری رخنه و ترجیحی در خاک صورت گردید. پس از کشت گیاه در اسفند 1388 عملیات آبیاری لایسیمترها با توجه به شرایط رطوبتی خاک توسط بلوک-های گچی کنترل شد و به طور متوسط هر 11 روز یکبار انجام گرفت. به همین منظور، برای هر دوره آبیاری، فاضلاب تصفیه‌خانه شهر سرکان (به‌صورت خام و تصفیه‌شده و به‌طور جداگانه از فاصله 85 کیلومتری همدان) به محل اجرای تحقیق (گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا) حمل گردید و بلافاصله عملیات آبیاری صورت گرفت. حجم آب استفاده‌شده در هر مرحله در حدود 30 الی 35 لیتر بود و در مجموع هشت آبیاری برای همه تیمارها صورت گرفت. در اسفند 1388 غده‌های سیب‌زمینی (رقم مارفونا) به فاصله مساوی از هم و در عمق 10 سانتی‌متری در هر لایسیمتر کشت گردیدند. بدین منظور، غده‌ها چند روز قبل از کشت در یک محیط گرم و بدون نور مستقیم خورشید نگهداری شدند تا جوانه زده و آماده کشت شوند.

2- اندازه‌گیری عناصر سنگین در فاضلاب‌های ورودی

از فاضلاب‌های خام و تصفیه شده قبل از هر آبیاری نمونه‌برداری به عمل آمد. ظروف نمونه‌برداری ابتدا با مواد شوینده چندین بار شسته شده و در پایان نیز با آب مقطر شستشو داده شدند. غلظت عناصر سنگین (کادمیوم، نیکل و سرب) از روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی (با شعله) اندازه‌گیری شدند. به دلیل وجود ذرات شناور در فاضلاب‌های خام و تصفیه شده، نمونه‌ها ابتدا با محلولی از اسید کلریدریک غلیظ و اسید نیتریک غلیظ (نسبت 3 به 1) هضم شدند و سپس قرائت انجام پذیرفت.

3- اندازه‌گیری عناصر سنگین در خاک

به منظور تعیین عناصر سنگین (کادمیوم، سرب و نیکل) در خاک در اثر کاربرد فاضلاب، نمونه‌های خاک مربوط به هر تیمار از دو عمق 0-10 و 10-20 سانتی-متری جمع‌آوری و در آزمایشگاه، در محلی سرپوشیده هوا خشک شدند. نمونه‌های خشک شده در مرحله بعد

به‌صورت مکانیکی خرد شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و سپس پنج گرم از هر نمونه در ظرف پلی-اتیلنی ریخته و عصاره خاک با استفاده از مخلوطی اسید سولفوریک 0/025 نرمال و اسید کلریدریک 0/05 نرمال تهیه شد. در مرحله آخر عناصر سنگین عصاره جمع‌آوری شده، اندازه‌گیری گردید. برای تعیین غلظت عناصر سنگین در خاک از روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی (با شعله) استفاده شد (3).

4- طرح آماری

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار (در شرایط کشت گیاه) به اجرای درآمد. جهت اجرای این تحقیق پنج تیمار آبیاری که شامل فاضلاب خام (T_1)، فاضلاب تصفیه‌شده (T_2)، ترکیب 50 درصد فاضلاب خام و آب معمولی (T_3)، ترکیب 50 درصد فاضلاب تصفیه‌شده و آب معمولی (T_4) و آب معمولی (T_5) می‌باشند، به کار گرفته شد. همچنین دو عمق خاک سطحی که شامل 0-10 و 20-10 سانتی‌متری می‌باشند، در نظر گرفته شد.

5- تحلیل نتایج

در این تحقیق به منظور مقایسه تجمع عناصر سنگین در دو عمق خاک (در تیمارهای مختلف فاضلاب) و مقایسه آنها با تیمار شاهد که آب معمولی بود، مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن و در محیط نرم‌افزار SAS 9.1 صورت گرفت. ضمناً معنی‌داری در سطح پنج درصد (p <0.05) در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

1- غلظت عناصر سنگین در فاضلاب خام و تصفیه‌شده

در جدول 2 غلظت عناصر سنگین در فاضلاب خام و پساب تصفیه شده همراه با مقادیر مجاز آنها (با توجه به استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران و سازمان فائو) ارائه گردیده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود در فاضلاب تصفیه شده کلیه عناصر در حد مجاز می‌باشند. در فاضلاب خام نیز تمامی عناصر سنگین (به جزء کادمیوم) در حد مجاز قرار دارند.

جدول 2- غلظت عناصر سنگین (میلی‌گرم بر لیتر) فاضلاب خام و فاضلاب تصفیه شده و مقایسه آنها با استانداردها

پارامتر	نوع فاضلاب		میزان مجاز استانداردها	
	خام	تصفیه شده	استاندارد ایران*	فائو**
کادمیوم	0/014	0/010	0/05	0/01
نیکل	0/059	0/034	2	0/20
سرب	0/064	0/034	1	5

* استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران، ** نقل از پسکات (1992)

2- اثر تیمارهای آبیاری بر تجمع عناصر سنگین در اعماق خاک

جداول 3 الی 5 آنالیز آماری و تجزیه واریانس حاصل از غلظت عناصر سنگین (کادمیوم، سرب و نیکل) تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و عمق خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر کیفیت آب بر غلظت سرب در خاک در سطح یک درصد معنی‌دار و اثر عمق خاک بر غلظت سرب در خاک در سطح پنج درصد معنی‌دار مشاهده گردید. همچنین اثر کیفیت آب و عمق خاک بر غلظت کادمیوم و نیکل در خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود. نتایج این تحقیق نشان داد که اثر متقابل عمق خاک و کیفیت آب بر غلظت سه عنصر مذکور غیر معنی‌دار بوده است.

مانسینو و پیر (12) دریافتند که کاربرد فاضلاب سبب تجمع معنی‌دار دو عنصر مس و روی در لایه بالایی خاک (25-30 سانتیمتری) شده است. اما صابر (17) گزارش کرد که کاربرد فاضلاب اثر معنی‌داری بر غلظت مس در خاک نداشته است. همچنین نتایج عابدی کوپایی و همکاران (1) افزایش معنی‌دار غلظت دو عنصر سرب و نیکل در خاک آبیاری شده با فاضلاب در مقایسه با خاک آبیاری شده با آب زیر زمینی را نشان دادند. بهبهانی‌نیا و همکاران (4) نشان دادند که افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاه به طور معنی‌داری در تیمارهای آبیاری شده به‌وسیله فاضلاب بیشتر از تیمار شاهد مشاهده گردید. همچنین آلهم و همکاران (2) یک افزایش در غلظت مس، منگنز و آهن در خاک را در ارتباط با غلظت-های بالای موجود در فاضلاب نشان داد.

جدول 3- آنالیز آماری حاصل از اندازه‌گیری غلظت فلز سرب خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
کیفیت آب	4	60/235	15/059**
عمق	1	2/76	2/76*
کیفیت × عمق	4	2/48	0/621ns
خطا	20	10/89	0/546

**: معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشند، * معنی داری در سطح 5 درصد، ns غیر معنی دار

جدول 4- آنالیز آماری حاصل از اندازه‌گیری غلظت فلز کادمیوم خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
کیفیت آب	4	0/143	0/036**
عمق	1	0/047	0/047**
کیفیت × عمق	4	0/014	0/003ns
خطا	20	0/047	0/0024

**: معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشند، *: معنی‌داری در سطح 5 درصد، ns: غیر معنی‌دار

جدول 5- آنالیز آماری حاصل از اندازه‌گیری غلظت فلز نیکل خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
کیفیت آب	4	44/67	11/167**
عمق	1	29/4	29/403**
کیفیت × عمق	4	8	2ns
خطا	20	14/056	0/703

**: معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشند، ns: غیر معنی‌دار

جدول 6 مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر سنگین خاک را در کیفیت‌های مختلف آب نشان می‌دهد. طبق این جدول، بیشرین غلظت عناصر سنگین در خاک آبیاری شده با فاضلاب خام و کمترین غلظت در خاک آبیاری شده با آب معمولی مشاهده گردید. ترکیب فاضلاب خام و آب معمولی، فاضلاب تصفیه شده و ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب معمولی به ترتیب بعد از تیمار فاضلاب خام دارای بیشترین میانگین غلظت است. همچنین نتایج نشان داد که بین تیمارهای فاضلاب خام و شاهد، بین تیمارهای فاضلاب تصفیه شده و شاهد

(به جز نیکل) و همچنین بین تیمارهای فاضلاب خام و فاضلاب تصفیه شده در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار مشاهده گردید. کلی و همکاران (10) نشان دادند که غلظت عناصر سنگین به ویژه غلظت دو فلز سرب و کادمیوم با دوره آبیاری افزایش می‌یابد. برار و همکاران (6) نیز نتایج مشابهی را به دست آوردند. محمد و مظهره (14) بیان کردند که غلظت سرب و کادمیوم خاک به طور معنی‌داری تحت تاثیر آبیاری با فاضلاب قرار نگرفتند. همچنین گزارش کردند که آبیاری با فاضلاب، غلظت منگنز و آهن را در خاک افزایش داده ولی هیچ اثری بر غلظت روی و مس خاک نداشته است. بول و همکاران (5) گزارش کردند که کاربرد فاضلاب در آبیاری غلظت عنصر روی را در خاک، تا حد سمیت افزایش داده است. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب فاضلاب‌های خام و تصفیه شده با آب معمولی، تجمع غلظت عناصر مورد مطالعه را نسبت به استفاده منفرد این فاضلاب‌ها در خاک کاهش داده است. در این تحقیق ترتیب غلظت عناصر سنگین (تجمع یافته در خاک) در همه تیمارهای آبیاری به صورت Pb> Ni> Cd مشاهده گردید که نشان دهنده تجمع بیشتر غلظت عنصر سرب در خاک در مقایسه با سایر عناصر مورد بررسی می‌باشد. گوپتا و همکاران (7) نشان دادند که ترتیب تجمع عناصر سنگین در خاک آبیاری شده با فاضلاب به صورت Fe> Pb> Mn> Cr> Cd می‌باشد. همچنین کارانجا و همکاران (9) روند غلظت عناصر سنگین در خاک را به صورت Pb> Cd> Cr گزارش کردند. پژوهش‌های مالاندرینو و همکاران (11)نشان دادند که سرب با قدرت زیادی توسط ذرات خاک نگه داشته می‌شود، در حالی که کادمیوم در خاک بسیار متحرک است.

جدول 6- مقایسه مقادیر میانگین غلظت (میلی‌گرم بر لیتر) عناصر سنگین در خاک در اثر اعمال تیمارها (آزمون دانکن)

تیمار	سرب	نیکل	کادمیوم
فاضلاب خام	30/517[a]	9/09[a]	0/933[a]
فاضلاب تصفیه شده	28/2[bc]	7/988[b]	0/817[bc]
ترکیب فاضلاب خام و آب معمولی	28/98[b]	8/46[ab]	0/842[b]
ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب معمولی	27/68[c]	7/69[b]	0/77[cd]
آب معمولی (شاهد)	26/23[d]	5/495[c]	0/73[d]

*: میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

جدول 7 مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر سنگین خاک را در عمق‌های مختلف خاک نشان می‌دهد. طبق این جدول، بیشترین غلظت عناصر سنگین در عمق 10-0 سانتی‌متری خاک مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد که بین دو عمق مورد نظر در سطح پنج درصد اختلاف معنی دار وجود دارد. استرک و ریچر (20) گزارش کردند که حرکت عناصر سنگین در خاک آبیاری شده با فاضلاب بسیار کند بوده، به طوری که بیش از 90 درصد تجمع غلظت عناصر سنگین نیکل، کادمیوم و سرب در عمق 15-10 سانتی‌متری خاک مشاهده گردید. عابدی کوپایی و همکاران (1) نتیجه گرفتند که غلظت عناصر سنگین سرب، منگنز و روی با افزایش عمق کاهش می‌یابند. بهبهانی‌نیا و همکاران (4) نیز نشان دادند که تجمع بیشتر عناصر سنگین در لایه سطحی خاک بوده است. تحقیقات برخی محققان دیگر نیز کاهش غلظت عناصر سنگین را با افزایش عمق خاک گزارش کردند (6). در مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین با حدود معمولی و بحرانی (3 و 15) ارائه شده در جدول 8 نتیجه‌گیری می‌شود که غلظت کلیه عناصر در حد مجاز بوده است.

جدول 7- مقایسه مقادیر میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم) فلزات سنگین در اعماق خاک (آزمون دانکن)

عمق	سرب	نیکل	کادمیوم
10-0	28/627[a]	8/735[a]	0/858[a]
20-10	28/02[b]	6/755[b]	0/779[b]

*: میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

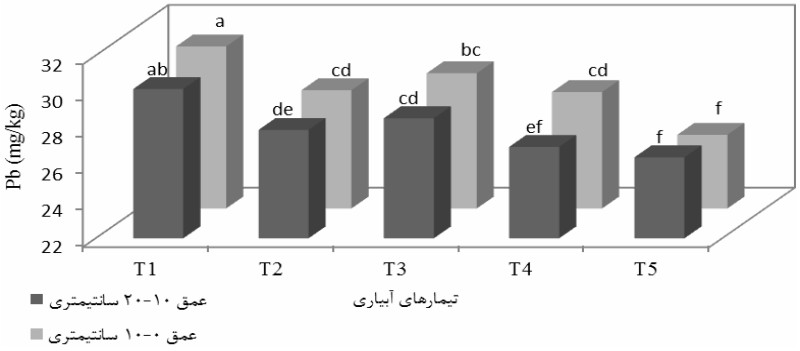
جدول 8- حدود غلظت معمولی و بحرانی عناصر سنگین در نمونه‌های خاک (3 و 15)

عنصر	غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	
	معمولی	بحرانی
نیکل	100-2	200
کادمیوم	2 - 0/01	8 -3
سرب	300- 2	400 -100

غلظت عناصر سنگین تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و عمق خاک در شکل‌های 2 الی 4 نشان داده شده است. طبق این اشکال: **سرب:** اثر فاضلاب خام (T_1)، تیمار شاهد (T_5) و ترکیب فاضلاب خام و آب معمولی (T_3) در دو عمق 10-0 و 20-10 سانتی‌متر بر غلظت سرب در سطح پنج درصد غیر معنی‌دار و اثر فاضلاب تصفیه شده (T_2) و ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب معمولی (T_4) در سطح پنج درصد معنی‌دار مشاهده گردید (شکل 2).

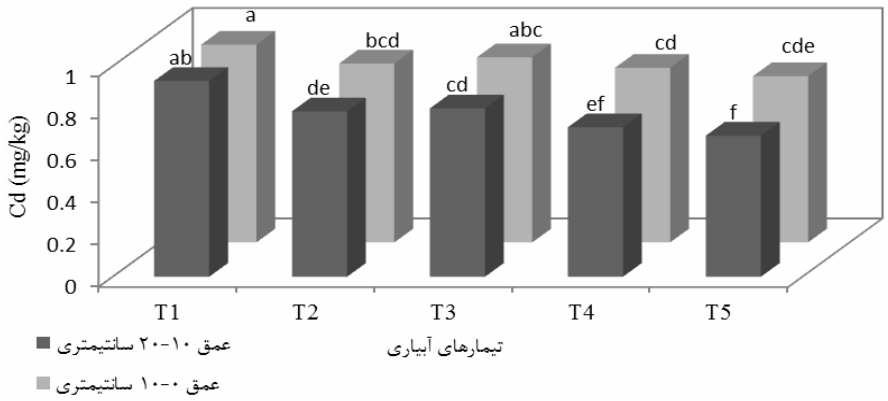
کادمیوم: اثر فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده و ترکیب فاضلاب خام و آب معمولی در دو عمق 10-0 و 20-10 سانتی‌متر بر غلظت کادمیوم در سطح پنج درصد غیر معنی‌دار و اثر تیمار شاهد و ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب معمولی در سطح پنج درصد معنی‌دار مشاهده گردید (شکل 3).

نیکل: اثر تیمار ترکیب فاضلاب خام و آب معمولی، فاضلاب تصفیه شده و ترکیب فاضلاب تصفیه و آب معمولی در دو عمق 10-0 و 20-10 سانتی‌متر بر غلظت نیکل در سطح پنج درصد غیر معنی‌دار و اثر تیمار شاهد و فاضلاب خام در سطح پنج درصد معنی‌دار مشاهده گردید (شکل 4).



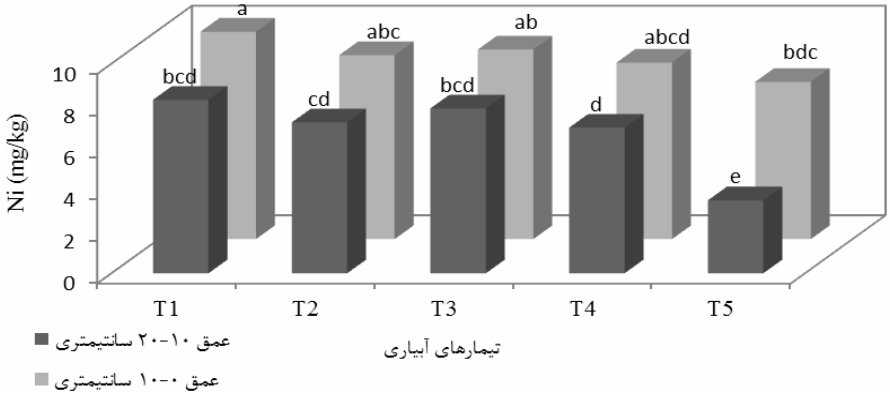
شکل 2- اثر کیفیت آب بر غلظت سرب در عمق خاک

(ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند)



شکل 3- اثر کیفیت آب بر غلظت کادمیوم در عمق خاک

(ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند)



شکل 4- اثر کیفیت آب بر غلظت نیکل در عمق خاک

(ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تیمارهای آبیاری با فاضلاب خام، تصفیه‌شده و ترکیب آنها با آب معمولی، بر میزان تجمع عناصر سمی کادمیوم، سرب و نیکل در خاک مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین و کمترین مقادیر عناصر سنگین به ترتیب در تیمارهای فاضلاب خام و آب معمولی مشاهده گردید. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب فاضلاب با آب معمولی می‌تواند از میزان اثرات زیان‌بار (از قبیل تجمع عناصر سنگین در خاک) کاربرد آنها به منظور آبیاری گیاهان بکاهد و در درازمدت می‌توان از فاضلاب‌های شهری به عنوان منابع جدید آب، بدین صورت استفاده نمود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، استفاده از فاضلاب خام می‌تواند امکان آلودگی خاک را افزایش دهد. به طور کلی بر اساس مقادیر تجمع عناصر سنگین در خاک، ترتیب بزرگی تیمارهای آبیاری به صورت $T_1 > T_3 > T_2 > T_4 > T_5$ بود. همچنین بر اساس این پژوهش، سرب و کادمیوم به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقادیر تجمع در خاک بودند. مقایسه غلظت این سه عنصر در دو عمق خاک نشان داد که با افزایش عمق، مقدار آنها کاهش نشان می‌دهد. به‌طور کلی استفاده از فاضلاب سبب تجمع این عناصر در خاک می‌شود و هر چه میزان این عناصر در خاک بیشتر شود، احتمال جذب

آنها توسط گیاه نیز افزایش می‌یابد. در این پژوهش مقادیر غلظت عناصر مورد بررسی (تجمع‌یافته در خاک) در دوره کاربرد فاضلاب (یک فصل کشت) در حد مجاز قرار داشتند. شایان ذکر است که این پژوهش در یک فصل کشت اجرا گردیده و دوره طولانی کاربرد فاضلاب می‌تواند بر میزان این تجمع بیافزاید که جهت اظهار نظر دقیق‌تر به بررسی‌های بیشتری نیاز است.

فهرست منابع:

1 حسین‌پور، ا.غ، ح حق نیا، ا. علیزاده، و ا. فتوت. 1388. بررسی تغییرات کیفیت شیمیایی فاضلاب خام و پساب شهری در اثر عبور از ستو نهای خاک، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 23(3):45-56.

2. Abedi-Koupai, J., B. Mostafazadeh-Fard, M. Afyuni and M. R. Bagheri. 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. Plant, soil and Environment. 52(8):335-344.
3. Al-Lahham, O.; N. M. El Assi and M. Fayyad. 2007. Translocation of heavy metals to tomato (Solanum lycopersicom L.) fruit irrigated with treated wastewater. Scientia Horticulturae Amsterdam. 113:250-254.
4. Alloway, B. J. 1990. Heavy metal in soil. Blackie and Son Ltd., Lonodon, 339P.
5. Behbahaninia, A., S. A. Mirbagheri, N. Khorasani, J. Nouri and A. H. Javid. 2009. Heavy metal contamination of municipal effluent in soil and plants. Journal of Food, Agriculture and Environment. 7(3 & 4):851-856.
6. Boll, R., H. Dernbach and R. Kayser. 1986. Aspects of land disposal of wastewater as experienced in Germany. Journal of Water Science and Technology. 18:383-390.
7. Brar, M. S., M. P. S.Khurana and B. D. Kansal. 2002. Effect of irrigation by untreated sewage effluents on the micro and potentially toxic elements in soils and plants, Department of Soils, Punjab Agricultural University, Ludhiana, Punjab, India.
8. Gupta, S., S. Satpati, S. Nayek and D. Garai. 2010. Effect of wastewater irrigation on vegetables in relation to bioaccumulation of heavy metals and biochemical changes. Environmental Monitoring and Assessment. 165(1-4):169-77.
9. Karanja, N. et al. 2010. Assessment of environmental and public health hazards in wastewater used for urban agriculture in Nairobi, Kenya. Tropical and subtropical Agro systems. 12:85-97.
10. Klay, S., A. Charef, A. Ayed, B. Houman and F. Rezgu. 2010. Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). Desalination. 253:180-187.
11. Malandrino, M., O. Abollino, S. Buoso, A. Giacomino, C. L. Gioia and E. Mentasti. 2011. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite. Chemosphere. 82:169-178.
12. Mancino, C. F., and I. L. Pepper. 1992. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: soil quality, Agronomy Journal. 84(4):650-654.
13. Martinez, J. 1999. Irrigation with saline water. Agricultural Water Management. 40:213-225.
14. Mohammad, M and N. Mazahreh. 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. Communications in Soil Science and Plant Analalysis. 34 (9 & 10):1281-1294.
15. Pendias, A. K. and Pendias, H. 1992. Trace elements in soils and plants. 2nd ed. Boca Raton Arbor, London, p. 187-198.

16. Pescod, M. B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO Irrigation and Drainage. Paper no. 47, Rome, Italy.
17. Saber, M. S. M. 1986. Prolonged effect of land disposal of human wastes on soil conditions. Journal of Water Science and Technology. 18.371-374.
18. Shuval, H. I., A. Adin, B. Fattal, E. Rawitz and P. Yekutie. 1986. Wastewater irrigation in developing countries. The World Bank, Washington, D.C.
19. Siebe, C. 1998. Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico, Soil-Use-Manage, CAB International, Oxford, pp. 119-122.
20. Streck, T and J. Richter. 1997. Heavy metal displacement in a sandy soil at the field scale: I. Measurements and parameterization of sorption. Journal of Environmental Quality. 26: 49-56.