اثر آبیاری با پساب صنعتی بر روند تغییرات برخی فلزات سنگین در خاک و گیاه تربچه (*Raphanus Sativus*)

قاسم رحیمی[۱*]، لیلا امرایی[۱] و علیرضا کیمیایی طلب[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۸)

چکیده

کمبود آب در مناطق خشک و نیمه خشک یکی از مهمترین عوامل محدود کننده تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. از این رو، استفاده از منابع آب غیر متعارف نظیر فاضلاب‌های تصفیه شده شهری و صنعتی در این مناطق مورد توجه قرار گرفته است. ورود پساب به خاک ممکن است باعث انباشته شدن فلزات سنگین در خاک شود. آلودگی خاک به این فلزات موجب جذب به وسیله گیاه و ورود آنها به زنجیره غذایی می‌گردد. در این پژوهش گلخانه‌ای، تغییرات غلظت فلزات سنگین (روی، مس، کادمیوم، نیکل، سرب، آهن و منگنز) حاصل از مصرف پساب صنعتی در خاک و گیاه تربچه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، آزمایش گلدانی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و آبیاری با درصدهای مختلف پساب (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) انجام گرفت. نتایج تجزیه شیمیایی خاک نشان داد که آبیاری با پساب سبب افزایش معنی‌دار نسبت جذب سدیم (SAR)، میزان شوری (ECe) و میزان کلر خاک شد. در حالی که کاربرد درصدهای مختلف پساب در مقایسه با تیمار شاهد، به‌طور معنی‌داری (P≤۰/۰۱) سبب کاهش اسیدیته خاک گردید. نتایج نشان داد که غلظت کل و فراهم عناصر سنگین در خاک آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده بیشتر از غلظت این عناصر در خاک آبیاری شده با آب معمولی بود؛ ولی مقدار آنها از حدود بحرانی عناصر سنگین در خاک کمتر بود. بدین لحاظ، تأثیر نامناسبی بر کیفیت خاک ایجاد نکرد. بعلاوه، آبیاری با پساب بر افزایش غلظت عناصر سنگین در غده و اندام هوایی گیاه تربچه مؤثر نبود.

واژه‌های کلیدی: پساب صنعتی، کیفیت خاک، منابع آب غیر متعارف

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 خشک جهان از سوی دیگر، موجب شده است در سال‌های اخیر تقاضا برای آب افزایش یابد و در نتیجه فشار بیش از اندازه به منابع آب وارد گردد (۳۰). از این رو، استفاده از منابع جدید آب به طوری که هم از جنبه‌ی اقتصادی و هم در توسعه‌ی کشاورزی مؤثر باشد در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است (۷). روش‌های جایگزین رایج برای منابع آب کشاورزی شامل نمک‌زدایی از آب‌های شور و همچنین استفاده‌ی مجدد از فاضلاب‌های شهری و صنعتی می‌باشد (۱۱).

براساس طرح جامع آب کشور، کل آب مورد نیاز صنایع و معادن در سال ۱۳۸۰ معادل ۱۰۷۹ میلیون متر مکعب بوده، که به تناسب صنعت، در مجموع ۵۰۰ میلیون متر مکعب آن در فرایند تولید مصرف شده و حدود ۵۷۹ میلیون متر مکعب آن

۱. دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. سازمان شهرک‌ها، همدان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghasmr@gmail.com

به پساب تبدیل شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سال ۱۴۰۰ آب مورد نیاز صنعت ۲۱۱۰ میلیون متر مکعب و میزان پساب تولیدی معادل ۱۰۸۸ میلیون متر مکعب خواهد بود (۱). بنابراین، کاربرد مجدد پساب حاصل از تصفیه فاضلاب‌ها در کشاورزی به علت نیاز روز افزون به این ماده حیاتی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ایران، می‌تواند تا حدودی کمبود آب را در این مناطق جبران کند و در عین حال می‌تواند به عنوان یک روش دفع ایمن زیست‌محیطی برای پساب‌های به‌کار رود (۳۴).

استفاده از پساب تصفیه شده صنعتی شاید بتواند تا حدودی کمبود آب را جبران کند. ولی آثار منفی احتمالی این آب‌ها در آلودگی محیط‌زیست باید در نظر گرفته شود. وجود عناصر سنگین در پساب‌ها و تجمع آنها در خاک از جمله موارد مهم زیست‌محیطی است (۱۴). هر چند غلظت عناصر سنگین در پساب ممکن است کم و ناچیز باشد، ولی تجمع آنها در خاک می‌تواند سبب افزایش غلظت این عناصر در گیاهان کشت شده در این خاک‌ها شود (۶). از طرفی، تجمع عناصر سنگین در گیاهان سبب ورود آنها به زنجیره غذایی شده و می‌تواند آثار نامطلوبی بر سلامت مصرف‌کنندگان بگذارد. میزان جذب هر فلز سنگین از خاک به وسیله گیاه، تابع نوع خاک و ویژگی‌های آن، نوع فلز سنگین و شکل‌های آن و نوع گیاه می‌باشد (۴).

انباشتگی فلزات سنگین در خاک، به ویژه در زمین‌های کشاورزی، فرایندی کند بوده و غلظت فلزات سنگین می‌تواند به آهستگی به مرزی برسد که به انسان‌ها و دام‌ها آسیب بزند (۱۲). چن و همکاران (۱۳) نشان دادند که در اثر کاربرد پساب صنعتی در تایوان بسیاری از اراضی کشاورزی به فلزات سنگین آلوده شده و غیر قابل استفاده گشته‌اند. فیضی (۳) در بررسی تجمع عناصر سنگین در مزارع شمال اصفهان که به مدت ۸ سال با فاضلاب و پساب آبیاری شدند مشاهده نمود که مقادیر روی، منیزیم، مس و آهن در خاک‌های این مزارع نسبت به مزارع آبیاری شده با آب چاه افزایش یافته است. ملاحسینی (۵) نشان داده است که کاربرد طولانی مدت پساب در اراضی جنوب تهران باعث افزایش غلظت فلزات سنگین سرب، روی و مس در گیاهان تحت آبیاری با فاضلاب نسبت به گیاهان شاهد تحت آبیاری با آب قنات شده است.

دوکوتا و اشمیت (۱۶) بیان کرده‌اند که فلزات سنگین اگر از طریق فعالیت‌های انسانی به خاک وارد شوند زیست‌فراهمی بیشتری دارند. همچنین، بر پایه نظر چوی و همکاران (۱۵) انتقال فلزات سنگین از خاک به گیاه مهمترین مسیری است که انسان را در معرض آلودگی قرار می‌دهد. بنابراین، ضرورت دارد روند استفاده مجدد از پساب‌ها جهت بررسی وضعیت فلزات سنگین در محیط خاک و گیاه مورد توجه قرار گیرد.

در این پژوهش، روند تغییر غلظت فلزات سنگین (روی، مس، کادمیوم، نیکل، سرب، آهن و منگنز) حاصل از کاربرد پساب شهرک صنعتی بوعلی همدان در خاک و گیاه تربچه مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، پساب حاصل از تصفیه‌ی فاضلاب صنعتی از شهرک صنعتی بوعلی همدان تأمین گردید. این تصفیه‌خانه در ۱۲ کیلومتری شمال شرق همدان واقع شده است. فرایند تصفیه در دو لاگون هوادهی از نوع اختلاط کامل به صورت سری و به دنبال آن لاگون ته‌نشینی و فرایند کلرزنی انجام می‌گیرد. در این آزمایش، همچنین از آب شرب به عنوان تیمار شاهد استفاده شد. ویژگی‌های شیمیایی آب و پساب در فصل رشد و به طور ماهانه اندازه‌گیری شد (جدول ۱). خاک مورد نیاز نیز از مزارع کشاورزی اطراف شهرک صنعتی بوعلی (دارای بافت شن لومی) تأمین شد. این پژوهش به صورت گلدانی و در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار شامل تیمار شاهد (T_1)، ۲۵٪ پساب + ۷۵٪ آب آبیاری (T_2)، ۵۰٪ پساب +۵۰٪ آب آبیاری (T_3)، ۷۵٪ پساب + ۲۵٪ آب آبیاری (T_4) و ۱۰۰٪ پساب (T_5) با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا انجام شد. خاک مذکور در گلدان‌های ۱۰ کیلوگرمی

جدول ۱. میانگین برخی از ویژگی‌های شیمیایی آب و پساب مورد آزمایش

پارامتر	واحد	آب شاهد	پساب	استاندارد (FAO)
اسیدیته	–	۷/۴۵	۷/۰۲	۶/۵–۸
هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	۰/۵۳	۵/۴۲	۰/۷۰
غلظت کل املاح محلول	میلی‌گرم در لیتر	۳۳۹/۲۰	۳۴۶۸	۴۵۰
درصد سدیم قابل تبادل	(٪)	۱/۳۳	۱۵/۲۳	–
نسبت جذب سدیم	(میلی‌مول بر لیتر)$^{1/2}$	۱/۵۰	۱۳/۴۱	–
کلسیم	میلی‌گرم در لیتر	۱۴۰	۲۴۰	–
منیزیم	"	۱۲	۷۲	–
سدیم	"	۳۵/۴۸	۹۰۰/۷۳	–
کلر	"	۶۲/۱۳	۱۶۸۶	۴
روی	"	۰	۰	۲
سرب	"	۰/۱۹	۰/۲۶	۵
نیکل	"	۰	۰/۰۱۶	۰/۲۱
مس	"	۰	۰	۰/۲۱
کادمیوم	"	۰	۰	۰/۰۱
آهن	"	۰/۰۳۴	۰/۲۱۶	۵
منگنز	"	۰/۰۴۲	۰/۱۲۱	۰/۲۰

برای کشت تربچه (*Raphanus Sativus*) مورد استفاده قرار گرفت.

بذرهای تربچه در عمق ۰/۵ سانتی‌متری خاک گلدان‌ها کاشته شدند و آبیاری آنها با درصدهای مختلف پساب حاصل از تصفیه بر اساس نیاز آبی گیاه در طول دوره‌ی رشد انجام شد (میزان آب آبیاری برای هر گلدان ۲۰۰ میلی‌لیتر بود و در طول دوره آزمایش هر گلدان ۲۰ مرتبه تحت تیمار قرار گرفت). شایان ذکر است که به منظور کاهش اثر سوء پساب بر جوانه‌زنی، آبیاری گلدان‌ها تا قبل از این مرحله با آب معمولی صورت گرفت. در خاتمه، گیاهان تربچه پس از حدود ۵۰ روز برداشت شدند و پس از انتقال به آزمایشگاه، ابتدا به دو بخش غده و اندام هوایی تقسیم شدند. هر یک از نمونه‌ها به‌خوبی با آب معمولی و اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال و سپس دو بار با آب معمولی و آب مقطر شستشو داده شدند (۲). سپس نمونه‌ها هواخشک شده و به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و نهایتاً توسط آسیاب پودر شدند.

برای اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در گیاه از روش فیگوروا و همکاران (۱۷) استفاده شد. مقدار ۰/۵ گرم از نمونه خشک گیاهی داخل بالن‌های ۲۵ میلی‌لیتری ریخته شد و ۲ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به آن افزوده شد. سپس، نمونه‌ها روی گرم‌کن برای مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۶۵ درجه سلسیوس و پس از آن برای مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. در ادامه، نمونه‌ها تا رسیدن به دمای اتاق خنک شدند و ۰/۲ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن به آنها اضافه شد. نمونه‌ها برای مدت ۳۰ دقیقه برای کامل شدن واکنش رها شدند و در آخر حجم پایانی نمونه‌ها به ۲۵ میلی‌لیتر رسانیده شد و غلظت عناصر سنگین (روی، مس، کادمیوم، نیکل، سرب، آهن و منگنز) در آنها به کمک دستگاه جذب اتمی مدل واریان (Varian 220) اندازه‌گیری شد.

برای تعیین برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک بعد از کشت، خاک هر گلدان هواخشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور

جدول ۲. میانگین ویژگی‌های شیمیایی خاک قبل و بعد از کشت

معیارهای اندازه‌گیری شده / تیمار		خاک قبل از کشت	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)		۰/۲۴	۰/۲۱ e	۰/۷۰ d	۱/۱۶ c	۱/۷۸ b	۲/۱۶ a
اسیدیته		۷/۷۸	۸/۳۲a	۸/۰۲ b	۷/۷۱ c	۷/۵۲ d	۷/۴۳ e
نسبت جذب سدیم		۱۱/۱۴	۹/۲۰c	۱۱/۳۵ b	۱۲/۳۸ b	۱۴/۴۲ a	۱۴/۹۹ a
ماده آلی		۰/۵۸	۰/۵۸ a	۰/۵۹ a	۰/۵۹ a	۰/۵۹ a	۰/۶ a
کلراید (میلی‌اکی والان بر لیتر)		۴/۱۲	۳/۶۲ e	۵/۴۱ d	۸/۳۳ c	۱۴/۸۷ b	۱۹/۲۹ a
کاتیون‌های	سدیم	۲/۳۰	۱/۴۵e	۴/۸۱ d	۷/۴۸ c	۱۰/۸۷ b	۱۶/۰۸ a
محلول (میلی‌اکی	کلسیم	۲/۴۱	۱/۶۶ b	۱/۸۰ ab	۲/۰۶ ab	۲/۴۰ ab	۲/۶۰ a
والان بر لیتر)	منیزیم	۱/۴۱	۱/۴۶ b	۱/۴۶ b	۱/۸۶ ab	۲/۰۰ a	۲/۰۰ a
کاتیون‌های تبادلی	سدیم	۲/۰۲	۱/۰۴c	۱/۳۱ b	۱/۳۹ b	۱/۶۳ a	۱/۷۰ a
(سانتی‌مول در	کلسیم	۱۲/۸۰	۱۲/۲۳ a	۱۲/۲۶ a	۱۲/۳۱ a	۱۲/۴۳ a	۱۲/۴۳ a
کیلوگرم)	منیزیم	۴/۳۰	۳/۸۰ a	۳/۸۲ a	۳/۸۳ a	۳/۹۱ a	۳/۹۶ a

در هر ستون، حروف غیر هم نام نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪ بر اساس آزمون دانکن می‌باشند.

داده شد. در نهایت، اسیدیته به کمک دستگاه سنجش اسیدیته، شوری با دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، کلر به وسیله تیتراسیون با نیترات نقره (۲۷) و کاتیون‌های محلول و تبادلی کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم به روش راول (۲۹) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری میزان کل فلزات سنگین از روش اسپوزیتو و همکاران (۳۲) و برای اندازه‌گیری شکل فراهم آنها از روش عصاره‌گیری با DTPA (۲۵)، به ترتیب برای هضم و تهیه عصاره خاک استفاده شد. غلظت کل و قابل جذب عناصر سنگین در عصاره‌های به‌دست آمده توسط دستگاه جذب اتمی مدل واریان تعیین شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۱ مشخص شد که پارامترهای اندازه‌گیری شده در پساب شامل هدایت الکتریکی، غلظت کل املاح محلول، درصد سدیم قابل تبادل، نسبت جذب سدیم، کلسیم، منیزیم، سدیم و کلر محلول و عناصر سنگین سرب، نیکل، آهن و منگنز به مراتب بیشتر از آب شاهد بود. مقایسه فاکتورهای اندازه‌گیری شده با استاندارد سازمان خواروبار جهانی (۹) نشان داد که پساب مورد استفاده برای آبیاری از نظر میزان هدایت الکتریکی، غلظت کل املاح محلول و غلظت کلر بیشتر از حد استاندارد ارائه شده بود، هر چند از نظر اسیدیته و غلظت فلزات سنگین در حد مجاز بود.

نتایج تجزیه شیمیایی خاک (جدول ۲) نشان داد که آبیاری با پساب تصفیه شده سبب افزایش معنی‌دار نسبت جذب سدیم (SAR)، میزان شوری (ECe) و میزان کلر خاک شد. در حالی که کاربرد درصدهای مختلف پساب در مقایسه با تیمار شاهد، به‌طور معنی‌داری ($P\leq ۰/۰۱$) سبب کاهش اسیدیته خاک شد.

نتایج اندازه‌گیری غلظت کل عناصر سنگین در تیمارهای مورد بررسی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که غلظت کل روی، مس و کادمیوم از لحاظ آماری تحت تأثیر تیمار آبیاری با پساب قرار نگرفتند. شاید بتوان علت اصلی آن را عدم وجود صنایع حاوی این فلزات و به تبع آن غلظت ناچیز این عناصر در پساب کاربردی و همچنین دوره کوتاه کاربرد آن دانست. اما غلظت کل عناصر نیکل، سرب، آهن و مس با

جدول ۳. میانگین غلظت کل فلزات سنگین در تیمارهای مورد مطالعه (میلی‌گرم در کیلوگرم)

تیمار	روی	سرب	نیکل	کادمیوم	منگنز	مس	آهن
شاهد	۱۱۹/۱ a	۴۸/۳ c	۴۹/۸۵ b	۱/۷۸ a	۵۸۷/۸ c	۱۹/۸۸ a	۳۷۷۰۰ c
٪۲۵	۱۲۲/۴ a	۴۹/۹۳ bc	۵۰/۲۱ b	۱/۷۸ a	۵۸۹/۵ c	۲۰/۰۱ a	۳۷۷۱۰ c
٪۵۰	۱۲۴/۵ a	۵۰/۵۱ ab	۵۰/۷۲ b	۱/۸۰ a	۶۱۹/۸ bc	۲۰/۲۴ a	۳۸۷۸۰b
٪۷۵	۱۲۶/۲ a	۵۱/۵۸ ab	۵۲/۴۰ a	۱/۸۳ a	۶۳۵/۳ ab	۲۰/۳۲ a	۳۹۲۷۰ab
٪۱۰۰	۱۲۶/۸ a	۵۲/۳ a	۵۲/۹۰ a	۱/۸۴ a	۶۵۹/۴ a	۲۰/۴۹ a	۳۹۴۱۰a

در هر ستون، حروف غیر هم نام نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪ بر اساس آزمون دانکن می‌باشند.

جدول ۴. میانگین غلظت فلزات سنگین قابل عصاره‌گیری با DTPA در تیمارهای مورد مطالعه (میلی‌گرم در کیلوگرم)

تیمار	روی	سرب	نیکل	کادمیوم	منگنز	مس	آهن
شاهد	۵/۴۲ c	۱/۷۴ b	۰/۳۱ a	۰/۰۳ d	۷/۹۷ c	۰/۶۱ a	۸/۶۹ a
٪۲۵	۶/۸۳ bc	۱/۸۲ ab	۰/۳۱ a	۰/۰۳۲ d^{c}	۸/۵۹ bc	۰/۶۳ a	۹/۴۸ a
٪۵۰	۸/۱۰ ab	۱/۸۸ ab	۰/۳۳ a	۰/۰۳۵ cb	۹/۹۲ ab	۰/۶۴ a	۹/۵۷ a
٪۷۵	۹/۵۴ a	۱/۹۸ a	۰/۴۲ a	۰/۰۳۸ ab	۱۰/۱۸ a	۰/۶۹ a	۹/۸۰ a
٪۱۰۰	۱۰/۱۸a	۲/۰۱ a	۰/۴۲ a	۰/۰۳۹ a	۱۰/۹۲ a	۰/۷۰ a	۹/۹۴ a

در هر ستون، حروف غیر هم نام نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪ بر اساس آزمون دانکن می‌باشد.

افزایش درصد پساب کاربردی در خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و غلظت آنها در تیمار ۱۰۰٪ پساب به بیشترین میزان خود (به ترتیب ۵۲/۹۰، ۵۲/۳، ۳۹۴۱۰ و ۲۰/۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) رسید. با این حال با مقایسه میانگین غلظت کل عناصر سنگین با حدود معمول و بحرانی آنها در خاک مشخص شد که غلظت کل این فلزات در حد مجاز بود.

جدول ۴ غلظت عناصر سنگین قابل عصاره‌گیری با DTPA را در تیمارهای مورد بررسی نشان می‌دهد. طبق این جدول، با افزایش درصد پساب کاربردی در خاک، غلظت قابل جذب عناصر سنگین روی، کادمیوم، منگنز و سرب افزایش نشان داد. این امر احتمالاً می‌تواند به دلیل کاهش پ- هاش و افزایش سدیم و کلر در تیمارها در مقایسه با تیمار شاهد باشد (۶، ۱۰ و ۲۴). غلظت زیاد کلر در پساب که سبب ایجاد کمپلکس‌های محلول و متحرک کلر با عناصر سنگین می‌شود می‌تواند سبب افزایش قابلیت جذب آنها برای گیاه شود. بینگهام و همکاران (۱۰) بیان کرده‌اند که در خاک‌های شور، به دلایل بسیاری از جمله تشکیل کمپلکس‌های کادمیوم و کلر و نیز تبادل سدیم با کادمیوم در محل‌های جذب سطحی ذرات جامد خاک، حلالیت کادمیوم و قابلیت جذب آن به وسیله گیاه افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که از بین فلزات سنگین مورد بررسی، غلظت مس، آهن و نیکل قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک افزایش کمی نشان دادند؛ ولی از نظر آماری تحت تأثیر تیمار آبیاری با پساب قرار نگرفتند. باید توجه کرد که در مورد تجمع عناصر سنگین (قابل استخراج با DTPA) در خاک نباید انتظار داشت که در یک دوره‌ی کوتاه مدت میزان غلظت عناصر در خاک افزایش معنی‌دار نشان دهد؛ زیرا غلظت این عناصر در پساب فاضلاب تصفیه شده بسیار ناچیز است. تجمع عناصر سنگین در خاک طی آبیاری با فاضلاب به عوامل مختلفی از جمله غلظت این عناصر در فاضلاب، مدت آبیاری با فاضلاب، بافت خاک، اسیدیته و درصد مواد آلی خاک بستگی دارد (۱۹، ۲۲ و ۳۳).

نتایج مربوط به تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر عملکرد

جدول ۵. میانگین میزان زیست توده تولید شده در تیمارهای مورد مطالعه

	وزن تر		وزن خشک	
تیمار	اندام هوایی	غده	اندام هوایی	غده
شاهد	۲۷/۳۰ab	۲۶/۲۷ b	۲/۶۲ ab	۲/۱۵ ab
٪۲۵	۴۴/۴۱a	۴۸/۳۴ a	۳/۷۳ ab	۲/۸۴ a
٪۵۰	۴۳/۳۳ a	۴۱/۰۴ ab	۴/۰۴ a	۲/۹۱ a
٪۷۵	۲۶/۸۹ ab	۲۷/۴۶ ab	۲/۲۹ b	۱/۷۳ b
٪۱۰۰	۱۷/۸۰ b	۲۲/۹۱ b	۲/۱۰b	۱/۸۱ b

در هر ستون، حروف غیر هم نام نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪ بر اساس آزمون دانکن می‌باشد

جدول ۶. آنالیز آماری غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی تربچه در تیمارهای مورد مطالعه

منبع پراکنش	درجه آزادی	مس	روی	نیکل	سرب	کادمیوم	آهن	منگنز
		Ms						
تیمار	۴	۰/۰۴^{ns}	۵/۴۰^{ns}	۰/۱۱۲^{ns}	۰/۰۱۲۷^{ns}	۰/۰۱۱^{ns}	۱۰۴/۷۰^{ns}	۱/۸۷^{ns}
خطای آزمایشی	۱۰	۰/۰۱۳۵	۱/۶۴	۰/۰۵۳۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۳۲	۹۳/۷۷	۱/۸۱۷
خطای نمونه برداری	۱۵	۰/۰۲۸۵	۴/۱۴	۰/۰۴۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳۹	۱۰۵/۹۸	۲/۰۴۹

ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار

جدول ۷. آنالیز آماری غلظت فلزات سنگین در غده تربچه در تیمارهای مورد مطالعه

منبع پراکنش	درجه آزادی	مس	روی	نیکل	سرب	کادمیوم	آهن	منگنز
		Ms						
تیمار	۴	۰/۱۷۴^{ns}	۲۷/۲۱^{ns}	۰/۴۰۲^{ns}	۰/۰۷۰^{ns}	۰/۰۳۱^{ns}	۴۸۶/۵۹ ^{ns}	۰/۵۹ ^{ns}
خطای آزمایشی	۱۰	۰/۰۸۴۰	۷//۵۷	۰/۱۷۲۵	۰/۲۵۸	۰/۰۱۰۹	۱۷۵/۰۲	۰/۸۴۱
خطای نمونه برداری	۱۵	۰/۰۶۵۹	۳/۸۵	۰/۰۸۶۰	۰/۶۵۸	۰/۰۱۲۲	۸۸/۷۷	۱/۸۶۶

ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار

وزنی تربچه در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، با کاربرد درصدهای مختلف پساب، عملکرد ماده تر و خشک تربچه تا تیمار ٪۵۰ پساب افزایش و پس از آن کاهش یافت؛ هر چند روند منظمی در مورد برخی از تیمارها مشاهده نشد. بر همین مبنا می‌توان گفت که فاضلاب تصفیه شده برای آبیاری، عمدتاً به علت دارا بودن عناصر غذایی مختلف مورد نیاز تربچه، سبب افزایش عملکرد ماده تر و خشک گیاهی در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ درصد مصرف پساب در مقایسه با تیمار شاهد شده است. کاهش عملکرد دو تیمار ۷۵ و ۱۰۰ درصد کاربرد پساب نیز احتمالاً به دلیل افزایش شوری خاک بوده است. شایان ذکر است که تربچه به علت اینکه محصول نیمه مقاومی به شوری می‌باشد تا تیمار ۵۰ درصد پساب تحت تاثیر شوری و املاح محلول خاک قرار نگرفته است. اما در دو تیمار ۷۵ و ۱۰۰ درصد، به علت افزایش هدایت الکتریکی تا ۲ دسی-زیمنس بر متر، مقدار جزیی کاهش عملکرد داشته است.

نتایج آنالیز آماری نشان داد که غلظت عناصر سنگین در اندام هوایی و غده تربچه تحت تأثیر تیمار آبیاری با پساب قرار نگرفت (جداول ۶ و ۷). با وجود افزایش غلظت عناصر سنگین

جدول ۸ ضریب همبستگی فرم فراهم فلزات سنگین در خاک و عناصر جذب شده به وسیله گیاه

خاک	روی		مس		نیکل		سرب		کادمیوم		آهن		منگنز	
	اندام هوایی	غده	اندام هوایی	غده	اندام هوایی	غده	اندام هوایی	غده	اندام هوایی	غده	اندام هوایی	غده	اندام هوایی	غده
روی	۰/۴۰۳*	۰/۵۱۸**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
مس	-	-	-۰/۱۹۱ ns	-۰/۳۷۰ *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
نیکل	-	-	-	-	۰/۱۴۱ ns	۰/۴۷۷*	-	-	-	-	-	-	-	-
سرب	-	-	-	-	-	-	۰/۳۴۴ ns	۰/۲۴۷ ns	-	-	-	-	-	-
کادمیوم	-	-	-	-	-	-	-	-	۰/۴۸۷**	۰/۴۵۳*	-	-	-	-
آهن	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-۰/۲۳۷ ns	-۰/۳۵۲ ns	-	-
منگنز	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-۰/۲۳۸ ns	-۰/۱۵۹ ns

**، * و ns به ترتیب نشان دهنده همبستگی معنی‌دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و عدم وجود همبستگی قابل توجه از جنبه آماری

سپس در گیاه افزایش یابد.

آبیاری با پساب، بر افزایش غلظت این عناصر در گیاه تربچه مؤثر نبود که ممکن است به علت ناچیز بودن عناصر سنگین در پساب کاربردی و یا کوتاه بودن دوره کشت باشد که گیاه تربچه قادر به جذب و تجمع بیش از حد فلزات سنگین نبوده است. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج پژوهش‌های

علیزاده و همکاران (۸)، جاراش ورهایم و همکاران (۲۰) و هنینگ و همکاران (۱۸) مطابقت دارد، اما مغایر با نتایج پژوهش کالاوروزیوتیس و همکاران (۲۳) می‌باشد. دلیل این مغایرت را می‌توان به وجود برخی تفاوت‌ها در شرایط اقلیمی، گیاهی، کیفیت خاک و متغیر بودن خصوصیات فاضلاب نسبت داد.

از بین فلزات قابل جذب خاک، روی و کادمیوم فراهم همبستگی مثبت و معنی‌داری را با روی و کادمیوم موجود در گیاه نشان دادند (جدول ۸)، که این رابطه هم در بخش هوایی و هم در غده دیده شد. این احتمال وجود دارد که با افزایش میزان این عناصر در خاک، به‌دلیل حلالیت زیادی که دارند، توسط غده و به‌دنبال آن بخش هوایی گیاه جذب شدند. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج پژوهش منیر و همکاران (۲۶) مطابقت دارد. نیکل فراهم در خاک تنها با نیکل جذب شده توسط غده همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد، ولی با نیکل جذب شده توسط اندام هوایی رابطه معنی‌داری نشان نداد (جدول ۸). جذب سرب توسط تربچه، رابطه معنی‌داری با سرب فراهم خاک نداشت (جدول ۸). بسیاری از نتایج نشان می‌دهند که غلظت سرب در خاک به‌خوبی با مقدار جذب شده توسط گیاه همبستگی ندارد (۳۵). اما بعضی نتایج نشان دادند که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین سرب موجود در ساقه و سرب عصاره‌گیری شده با نیترات آمونیوم وجود دارد (۳۱). بین شکل فراهم فلزات مس، آهن و منگنز و میزان جذب شده توسط تربچه همبستگی منفی دیده شد که این همبستگی فقط برای میزان مس جذب شده توسط غده‌ی تربچه معنی‌دار بود (جدول ۸). راتان و همکاران (۲۸) نیز گزارش کردند که در اثر افزایش غلظت فلزات قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک رابطه خطی با جذب فلز توسط گیاهان حاصل نشد.

آگاروال (۶) بیان کرده است که میزان جذب هر فلز سنگین از خاک به وسیله گیاه، تابع نوع خاک و ویژگی‌های آن، نوع فلز سنگین و شکل‌های آن و نوع گیاه می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که استفاده از پساب و تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های خاک تا حدودی بر جذب عناصر سنگین توسط گیاه مؤثر بود، به طوری که جذب برخی فلزات افزایش یافته و برخی کاهش یافته‌اند. کاهش جذب فلزات گفته شده ممکن است به دلیل فراوانی یون سدیم در پساب و افزایش درصد سدیم تبادلی خاک باشد. جوان و همکاران (۲۱) بیان کرده‌اند که گیاهان رشد یافته در شرایط شور مقدار زیادی سدیم انباشته می‌کنند که منجر به عدم تعادل یونی، اثرهای ویژه یونی و نشانه‌های کمبود عناصر غذایی کم‌مصرف و پر مصرف در گیاهان می‌شود. افزایش جذب فلزات سنگین نیز ممکن است به علت مقادیر زیاد کلر و تشکیل کمپلکس‌های محلول و متحرک عناصر سنگین با آن باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که کاربرد پساب صنعتی باعث افزایش معنی‌دار غلظت کل عناصر نیکل، سرب، آهن و مس و افزایش معنی‌دار غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA عناصر روی، کادمیوم، منگنز و سرب در تیمارهای مورد بررسی گردید. ولی این افزایش غلظت از حدود بحرانی آنها در خاک کمتر بود. همچنین، با وجود اینکه بهره‌گیری از پساب سبب افزیش غلظت فلزات سنگین موجود در خاک شد، اما این تغییر به همان نسبت به گیاه تربچه منتقل نشد. شایان ذکر است که نتایج این تحقیق به یک فصل رشد مربوط بوده و شاید با ادامه کاربرد پساب صنعتی و تکرار فصول کشت و کار، غلظت عناصر سنگین بررسی شده در خاک و سپس در گیاه افزایش یابد.

منابع مورد استفاده

۱. شرکت مهندسین مشاور جاماب. ۱۳۸۶. طرح مطالعات برنامه سازگاری با اقلیم خشک و نیمه خشک. گزارش آب مورد نیاز صنعت و معدن، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۲. عرفانی آگاه، ع. ۱۳۷۸. بررسی کارآیی فاضلاب تصفیه شده خانگی در آبیاری زراعت کاهو و گوجه فرنگی. همایش جنبه‌های زیست محیطی استفاده از پساب در آبیاری، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، وزارت نیرو، صفحات ۶۱-۷۹.

۳. فیضی، م. ۱۳۸۰. مقایسه تأثیر مصرف پساب فاضلاب و آب چاه بر روی خاک و گیاه در شمال اصفهان. گزارش نهایی طرح، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان.

۴. مرادمند، م. و ح. بیگی هرچگانی. ۱۳۸۸. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر توزیع سرب و نیکل در اندام فلفل سبز و خاک. پژوهش آب ایران ۳(۵): ۶۳-۷۰.

۵. ملاحسینی، ح.، م. هراتی.، غ. اکبری. و ن، حریری. ۱۳۸۴. تجمع فلزات سنگین در اندام‌های ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب. مجموعه مقالات نهمین کنگره علوم خاک ایران.

6. Agarwal, S.K. 2002. Pollution Management: Water Pollution. A.P.H. Publ., New Delhi.
7. Alizadeh, A., M.E. Bazari, S. Velayati, M. Hasheminia and A. Yaghmaie. 2001. Irrigation of corn with wastewater. PP. 147-154. *In:* Ragab, R., G. Pearce, J. Changkim, S. Nairizi and A. Hamdy (Eds.), ICID International Workshop on Wastewater Reuse and Management, Seoul, South Korea.
8. Bingham, F.T., G. Sposito and J.E. Strong. 1984. The effect of chloride on the availability of cadmium. J. Environ. Qual. 13: 71-74.
9. Brenner, A., S. Shandalov, R. Messalem, A. Yakirevich, G. Oron and M. Rebhun. 2000. Wastewater reclamation for agricultural reuse in Israel: Trends and experimental results. Water Air Soil Pollut. 123: 167-182.
10. Chen, Y., C. Wang and Z. Wang. 2005. Residues and source identification of persistent organic pollutants in farmland soils irrigated by effluents from biological treatment plants. Environ. Int. 31: 778-783.
11. Chen, Z.S., S.L. Lo and H.C. Wu. 1994. Summary analysis and assessment of rural soils contamination with Cd in Toayuan. Project of Scientific Technology Advisor Group (STAG), Executive Yuan,Taipei, Taiwan.
12. Chui, Y.J., Y.G. Zhu, R.H. Zhai, D.Y. Chenc, Y.Z. Huanga, Y. Qiub and J.Z. Liang. 2004. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. Environ. Int. 30: 785-791.
13. Cid, B.P., M. De, J. Gonzalez and E.F. Gomez. 2002. Analyst. 126: 1304-1311.
14. Devkota, B. and G.H. Schmidt. 2000. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. Agric. Ecosyst. Environ. 78: 85-91.
15. FAO. 1985. Water Quality for Agriculture. Ayers, R.S. and Westcott, D.W. Irrig. and Drain. Paper No. 29, Rev., FAO, Rome, 174 p.
16. Figueroa, J.A., K. Wrobel, S. Afton, J.A. Caruso, J. Corona Felix Gutierrez and K. Wrobel 2008. Effect of some heavy metals and soil humic substance on the phytochelation production in wild plants from silver mine areas of Guanajuato, Mexico. Chemosphere 70(11): 2084-2091.
17. Hayssam, M.A., M.M. Sayed, A.H. Fatma and A.T. Mohamed. 2011. Usage of sewage effluent in irrigation of some woody tree seedlings. Part 3: *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq. Saudi J. Biol. Sci. 18: 201-207.
18. Henning, B.J., H.G. Snyman and T.A.S. Aveling. 2001. Plant-soil interactions of sludge-borne heavy metals and the effect on maize (*Zea mays* L.) seedling growth. Water South Africa 27: 71-78.
19. Ibekwe, A.M., J.S. Angle, R.L. Chaney and P. van Burkum. 1995. Sewage sludge and heavy metal effects on nodulation and nitrogen fixation of legumes. J. Environ. Qual. 24: 1199-1204.
20. Jaraush-wehrheim, B., B. Mocqout and M. Mench. 2000. Distribution of sludge-borne manganese in field-grown maize. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31: 305-319.
21. Jian, Xu, J. Wu. Laosheng, C.C. Andrew and Z. Yuan. 2010. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment. J. Hazard Mater. 183: 780-786.
22. Juan, M., M. Rivero, L. Romero and J.M. Ruiz. 2005. Evaluation of some nutritional and biochemical indicators in selecting salt-resistant tomato cultivates. Environ. Exp. Bot. 54: 193-201.
23. Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 1992. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, FL.
24. Kabata-pendias, A. and H. Pendias. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, 413 p.

25. Kalavrouziotis, I.K., P. Robolas, P.H. Koukoulakis and A.H. Papadopoulos. 2008. Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro- and micro- elements status of soil and of Brassica oleracea var. Italica, and B. oleracea var. Gemmifera. Agric. Water Manage. 95: 419-426.
26. Lindsay, W.L. 1979. Chemical Equilibria in Soils. John Wiley and Sons, Inc., New York.
27. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. Environ. Pollut. 152: 686-692.
28. Miner, G.S., R. Gutierrez and L.D. King. 1997. Soil factors affecting plant concentration of cadmium, copper, and zinc on sludge-amended soils. J. Environ. Qual., 26(4): 989-994.
29. Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeney. 1982. The Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties, Second Edition, Soil Sci. Soc. Am., Inc., Madison, WI.
30. Rattan, R.K., S.P. Datta, P.K. Chhonkar, K. Suribabu and A.K. Singh. 2005. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-a case study. Agric. Ecosys. Environ. 109: 310-322.
31. Rowell, D.L. 1994. Soil Science: Methods and Applications. Part 7, Measurement of the Composition of Soil Solution, Harlow: Longman Scientific and Technical, 350 p.
32. Shuval, H.I., A. Adin, B. Fattal, E. Rawitz and P. Yekutiel. 1986. Wastewater irrigation in developing countries-health effects and technical solutions. The World Bank, Washington, D. C.
33. Song, J. 2002. Assessment of phytoavailability of soil metals and phytoremediation of soils contaminated with copper. PhD Thesis, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, China. (In Chinese).
34. Sposito, G., L.J. Lund and A.C. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge, I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 260-264.
35. WHO. 1992. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture. Technical Report No. 778, World Health Organization, Geneva, 74 p.
36. Yang, Z.Y. and F.S. Zhang. 1993. The lead of soil-plant systems. Prog. Soil Sci. 21(5): 1-10. (In Chinese).