Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

CC BY

Research Article
Vol. 36, No. 4, Sep.-Oct. 2022, P. 511-524

Evaluation of Wastewater Effects on Soil Chemical Characteristics, Microelements Concentration, Heavy Metals Accumulation and Maize Yield (*Single Cross 704*)

F. Alizadegan[1], M.A. Gholami Sefidkouhi[2]*, S. Shiukhy[3]

Received: 11-07-2022
Revised: 30-07-2022
Accepted: 26-08-2022
Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:
Alizadegan, F., Gholami Sefidkouhi, M.A., & Shiukhy, S. (2022). Evaluation of Wastewater Effects on Soil Chemical Characteristics, Microelements Concentration, Heavy Metals Accumulation and Mize Yield (*Single Cross 704*). *Journal of Water and Soil 36*(4): 511-524. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.77424.1178

Introduction

Increased agricultural activities, the occurrence of successive droughts, and limited freshwater resources, along with increasing population, have made a priority for the importance of protecting water resources in programs of developed and developing countries. Due to the climatic conditions in Iran, which has a wide range of arid and semi-arid characteristics, facing the challenge of water resources crisis, is inevitable. Therefore, the use of wastewater is very important.

Materials and Methods

This research was conducted in the research farm of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources (SANRU), which has a silty clay soil texture. The latitude and longitude of the region are 36º 40′ N and 53º 04′ E, respectively. Its height above sea level is 21 meters. According to Demarten classification, Sari city has a temperate humid climate. The long-term average temperature of Sari is 11.18 °C and the total long-term rainfall is 780 mm. In order to evaluate the wastewater effects on soil chemical characteristics, microelements concentrations, heavy metals accumulation and Maize yield (Single Cross 704), an experiment was carried out as factorial based on a completely randomized design with treatments included; Water source factor (wastewater (A1), well water (A2)), Irrigation (subsurface method (I1) and (drip method (I2)) with three replication in 2018-2019 under lycimetric conditions, at the Sari Agriculture and Natural Resources University (SANRU), Iran.

Results and Discussion

According to this study results, the effect of type of irrigation source on soil electrical conductivity, soil microelements and heavy metals accumulation of the soil was significantly different ($P \leq 0.01$). The highest soil electrical conductivity with a value of 1.8 $dS.m^{-1}$ was observed in the conditions of using treated wastewater. The highest amount of total nitrogen, phosphorus and potassium were related to the source of treated wastewater with values of 0.086, 24.2 and 222.2 $mg.kg^{-1}$, respectively. The results showed that the accumulation of soil Pb (0.07) and Cd (0.014 $mg.kg^{-1}$) in irrigation with treated wastewater increased compare to the well water source by 0.05 and 0.010 $mg.kg^{-1}$, respectively. Also, the effect of irrigation method and the interaction effect of source and method irrigation on soil chemical characteristics, microelements concentration and heavy metals accumulation were not significant. The use of wastewater by increasing soil stability improves soil physical condition, increases soil fertility, increases photosynthetic products, increases the efficiency of plant photosynthetic system and ultimately improves plant growth. The use of subsurface irrigation resulted in a 67% increase in grain yield and 28% increase in biomass productivity compared to the drip method. Adequate nutrients during the reproductive growth stage of the plant play an important role in grain growth. Therefore, it can be said that the nutrients in the wastewater have increased the grain yield compared to using the well water source. Because the wastewater

1, 2 and 3- Master Graduate of Water Engineering, Associate Professor and Assistant Professor of Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: magholami@sanru.ac.ir)

contains nutrients and micronutrients such as: nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, zinc and iron were relative to the well water source and increased maize grain yield. The results showed that the use of effluent compared to well water, caused the absorption of more Pb and Cd in the grain, leaf and stem of maize. Due to the use of wastewater as water source, the amount of Pb uptake among different parts of the maize, with values of 27.2, 22.5 and 20.5 $mg.g^{-1}$, respectively, related to the grain, leaf and stem. However, the uptake of Cd in the grains, leaves and stems was 2.32, 1.35 and 2.01 $mg.g^{-1}$, respectively. According to the results, the high concentration of heavy metals Pb and Cd due to the use of wastewater in the grain sector directly threatens human health. Also, the concentration of heavy metals Pb and Cd in the leaf and stem parts of corn, by endangering the health of livestock and poultry, indirectly affects human health.

Conclusion

The results showed that irrigation with treated wastewater due to its richness in nutrients and microelements, improves soil fertility and creates favorable conditions by increasing soil organic matter and minerals for plant growth. Also, according to the permissible threshold values of the concentration of heavy metals Pb and Cd in plants, the accumulation of heavy metals Pb and Cd in the grain, stem and leaf of single cross 704 corn, will not be a problem for consumers. Optimal use of wastewater can increase soil fertility and the ability of plants to absorb nutrients from the soil and ultimately increase plant yield.

Keywords: Electrical conductivity**,** Grain yield, Heavy metal, Subsurface irrigation, Wastewater

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۵۲۴-۵۱۱

تأثیر پساب شهری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگینِ خاک و عملکرد ذرت سینگل کراس ۷۰۴

فاطمه علیزادگان[۱]- محمدعلی غلامی سفیدکوهی[۲*]- سعید شیوخی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

چکیده

به‌منظور بررسی اثرگذاری پساب شهری بر غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگینِ خاک و برخی ویژگی‌های ذرت، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با تیمارهای آزمایشی شامل؛ عامل منبع آب آبیاری (پساب (W1) و آب چاه (W2))، و عامل روش آبیاری (زیرسطحی (S1) و قطره‌ای نوار تیپ (S2))، در طول فصل رشد ۹۹-۱۳۹۸، در لایسیمتر مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. بر پایه یافته‌ها، تأثیر نوع منبع آبیاری بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک، غلظت عناصر پرمصرف خاک و انباشت فلزات سنگین در خاک تفاوت معنی‌دار داشت ($P \leq 0.01$). به‌طوری‌که بیشترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک با مقدار ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر، در شرایط استفاده از پساب مشاهده شد. بالاترین میزان نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۸۶، ۲۴/۲ و ۲۲۶/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به منبع آب پساب بود. نتایج نشان داد که میزان انباشت فلزات سرب (۰/۰۷) و کادمیوم (۰/۰۱۴) خاک، در آبیاری با پساب نسبت به منبع آب چاه به ترتیب با ۰/۰۵ و ۰/۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم، افزایش یافت. همچنین تأثیر روش آبیاری و اثر متقابل منبع و روش آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرفِ خاک و انباشت فلزات سنگین در خاک معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده در آبیاری با منبع پساب به‌ترتیب به میزان ۹۱۸/۶۶ کیلوگرم در هکتار و ۱/۴۵ کیلوگرم در مترمکعب مشاهده شد. بهره‌گیری از آبیاری زیرسطحی افزایش ۶۷ درصدی عملکرد دانه و ۲۸ درصدی بهره‌وری زیست‌توده در مقایسه با روش قطره‌ای نوار تیپ، را در پی داشت. بر پایه یافته‌ها، استفاده از پساب در مقایسه با آب چاه، باعث جذب میزان بیش‌تری از مقادیر سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه گیاه ذرت شد در حالیکه غلظت فلزات سنگین زه‌آب حاصل از آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشتند. به‌طور کلی، استفاده بهینه از پساب برای آبیاری، با بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش عملکرد گیاه را به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرسطحی، پساب، عملکرد دانه، فلزات سنگین، قابلیت هدایت الکتریکی

مقدمه

گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، وقوع خشک‌سالی‌های پی‌درپی و محدودیت منابع آب شیرین همگام با رشد روزافزون جمعیت، اهمیت حفاظت از منابع آب را در الویت برنامه‌های کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه جای داده است. افزایش جمعیت نه‌تنها تقاضای آب شیرین را افزایش داده، بلکه حجم فاضلاب تولیدی را نیز افزایش داده است (Mahfooz *et al.*, 2020). بنابراین استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده، نیمه‌تصفیه شده یا تصفیه نشده بیشتر موردتوجه قرار گرفته است (Abegunrin *et al.*, 2016). با توجه به اینکه مناطق وسیعی از ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشند، لذا دارای بارندگی سالانه کم و تبخیر سالانه زیادی می‌باشند. این امر موجب شده است که تأمین تقاضای آب کشاورزی با منابع معمول آب

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته، دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: magholami@sanru.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2022.77424.1178

با دشواری‌های فراوانی همراه شود (Keshavarz *et al.*, 2005).

استفاده از آب‌های نامتعارف به‌ویژه پساب شهری در کشاورزی برای تأمین نیاز آبی گیاهان و کاهش فشار بر منابع آب شیرین موجود، یک روش معمول در جهان به شمار می‌رود (Khawla *et al.*, 2019). طباطبایی و همکاران (Tabatabaei *et al.*, 2020)، بیان کردند که با وجود اینکه تخلیه فاضلاب به خاک یکی از بهترین روش‌های دفع فاضلاب است، اما فاضلاب به‌عنوان آلاینده زیست‌محیطی عمل کرده و برای جمع‌آوری، تصفیه و بازگرداندن فاضلاب به چرخه آب در طبیعت رعایت نکات و مسائل بهداشتی بایسته است. از یک‌سو، پساب می‌تواند باعث افزایش مواد مغذی و آلی خاک، بهبود فعالیت‌های بیولوژیکی و شرایط بهداشتی خاک (مواد آلی قابل‌تجزیه و میکروارگانیسم‌های مفید) گردد و درنتیجه کیفیت و پایداری خاک را ارتقا دهد. از سوی دیگر، بسته به منبع پساب، فاضلاب تصفیه شده ممکن است حاوی عناصر سمی باشد که می‌تواند در خاک و گیاه انباشته‌شده و درنتیجه سلامتی انسان را تهدید نماید (Salehi *et al.*, 2008). فلزاتی مانند روی، کادمیوم، سرب، آهن، مس و نیکل اگر به مقدار زیاد به خاک وارد شوند، ممکن است باعث سمیت خاک و گیاه شود (Gatta *et al.*, 2018).

آسولین و نارکیس (Assouline and Narkis, 2011) اظهار داشتند که کاربرد پساب به‌طور متفاوتی در پروفیل خاک بسته به پارامترهای مدیریت آبیاری و خصوصیات جذبی گیاه تأثیرگذار است. نتایج سینگ و اگروال (Singh and Agrawal, 2012) نشان داد که آبیاری با فاضلاب منجر به تغییرات مفیدی در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود. استفاده از فاضلاب باعث صرفه‌جویی در مواد مغذی غیر آلی شده و فرصتی مناسب برای دفع آن فراهم می‌آورد، اما مصرف‌کنندگان را از طریق عوامل بیماری‌زای مضر و انباشت عناصر سمی تهدید می‌کند.

اتخاذ راهکارهای مدیریتی و تصمیم‌گیری صحیح می‌تواند خطرات احتمالی مسمومیت خاک، به‌واسطه آبیاری با فاضلاب تصفیه شده را کاهش دهد (Asgari *et al.*, 2007). خاولا و همکاران (Khawla *et al.*, 2019) انتخاب روش آبیاری را راهکاری مناسب برای استفاده از پساب پیشنهاد کردند. لی و همکاران (Li *et al.*, 2015) بیان نمودند که روش آبیاری قطره‌ای برای بهره‌برداری از فاضلاب تصفیه شده در مقایسه با سایر روش‌ها برای دستیابی به عملکرد مطلوب و رعایت مسائل بهداشتی برای کشاورزان و مصرف‌کنندگان مؤثرتر است. آبیاری قطره‌ای مستلزم آب باکیفیت مناسب است تا سیستم دچار گرفتگی قطره‌چکان نشود و آب به‌طور یکنواخت در سطح مزرعه توزیع گردد. سیستم‌های آبیاری قطره‌ای می‌توانند آب و مواد شیمیایی را به میزان کارآمدتری نسبت به سایر اشکال سیستم آبیاری به منطقه ریشه گیاهان برسانند (Thorburn *et al.*, 2002). استفاده از فاضلاب از طریق سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نشان می‌دهد که انتقال عناصر سمی به محصولات تا حد زیادی کاهش می‌یابد (Lam *et al.*, 2004). اخیراً، ارزیابی مواد شیمیایی موجود در فاضلاب‌ها به‌ویژه فلزات سنگینی که توانایی نفوذ و انباشت در خاک، گیاه و درنهایت زنجیره غذایی را دارند، توجه محققان و دوستداران محیط زیست را به خود جلب کرده است.

کابوسی (Kaboosi, 2016) در تحقیق انجام شده روی خصوصیات خاک در شهر بندرگز، بیان نمود که استفاده مداوم از فاضلاب در مقایسه با آب شیرین هیچ محدودیتی در خاک از جنبه خطر شوری و سدیمی بودن ایجاد نکرد. همچنین استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای آبیاری بر اساس استانداردها و معیارهای جهانی باوجود محدودیت‌های کلر و بی‌کربنات را مناسب دانستند. برخی مطالعات حاکی از تأثیرات پساب بر افزایش آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌باشند که می‌توان به مطالعات (Hoseinpoor *et al.*, 2013; Singh and Agrawal, 2012; 2008) اشاره کرد. هنگامی‌که ظرفیت خاک برای نگه‌داری فلزات سنگین به دلیل استفاده مکرر از فاضلاب کاهش می‌یابد، خاک شروع به آزاد سازی فلزات سنگین محلول برای جذب گیاه می‌کند. درنتیجه، این عناصر وارد گیاه شده و باعث ورود نهایی آن‌ها به زنجیره غذایی می‌شوند (Tripathi *et al.*, 2016). بنابراین پساب برای استفاده مجدد باید با استانداردهای استفاده مجدد مطابقت داشته باشد، تا بتواند خطرات بهداشتی را کاهش دهد (WHO, 1989). کاربرد پساب در کشاورزی نیازمند مدیریت خاص می‌باشد تا ضمن بهره‌گیری مطلوب از آن، مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی در خاک، گیاه و منابع آب سطحی به کمترین حد ممکن برسد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثرات پساب شهری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و انباشت فلزات سنگین و عملکرد ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده بر خصوصیات شیمیایی خاک و عملکرد ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) در شرایط لایسیمتری، آزمایشی بر پایه فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. در این آزمایش عامل منبع آب آبیاری (W) در دو سطح شامل؛ پساب (W1) و آب چاه (W2) و همچنین عامل روش آبیاری (S) نیز در دو سطح شامل؛ قطره‌ای نوار تیپ (S1) و قطره‌ای زیرسطحی (S2) در نظر گرفته شد. عملیات کاشت گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، در تاریخ ۱۱ خرداد ۱۳۹۸ در عمق ۵ سانتی‌متری خاک و در فواصل ۲۰ سانتی‌متر در ردیف، به‌صورت دستی در ۱۲ لایسیمتر زهکش‌دار به شکل استوانه با قطر قاعده ۱۱۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴۵ سانتی‌متر از جنس پلی‌اتیلن انجام شد. خاک

محل آزمایش دارای بافت لومی (۳۸ درصد شن، ۴۲ درصد سیلت و ۲۰ درصد رس) بود. برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و ویژگی‌های کیفی منابع آب مورد استفاده در آزمایش (چاه و فاضلاب تصفیه شده) در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شد.

مقدار و دور آبیاری اولیه به‌منظور سبز شدن و استقرار گیاه تا مرحله پنج‌برگی یکنواخت بود. تیمارهای موردنظر پس از استقرار گیاه در مزرعه اعمال شدند. برنامه آبیاری بر اساس مدیریت آبیاری دقیق انجام شد. بدین منظور، با پایش روزانه میزان رطوبت خاک (رطوبت‌سنج Sentek مدل Diviner 2000) در منطقه توسعه ریشه، زمان آبیاری قبل از رسیدن رطوبت به حد بحرانی و مقدار آن نیز با استفاده از رابطه ۱، بر اساس کمبود رطوبت خاک تا رسیدن به حد ظرفیت زراعی انجام شد.

$$I_n = \sum_{i=1}^{m} (\theta_{FCi} - \theta_{BIi})i \times D_i \qquad (۱)$$

که در آن: I_n مقدار آب موردنیاز خاک برای رسیدن به حد ظرفیت زراعی (میلی‌متر)؛ θ_{FCi} مقدار رطوبت حجمی در حالت ظرفیت زراعی؛ θ_{BIi} میزان رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری در لایه i و Di ضخامت لایه i (میلی‌متر) می‌باشد. در سیستم آبیاری زیر سطحی، از لوله‌های زیر سطحی سان استریم با قطره‌چکان‌های درخط با فواصل ۲۰ سانتی‌متر با دبی ۱/۶ لیتر بر ساعت به‌صورت دو ردیفه و در سیستم آبیاری نوار تیپ نیز از قطره‌چکان‌های بافاصله ۲۰ سانتی‌متر و دبی ۲/۵ لیتر بر ساعت استفاده شد.

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی خاک پیش و پس از اجرای آزمایش

Table 1- Soil chemical characteristics before and after testing

پارامتر Parameter	پیش از آزمایش Before experiment		پس از آزمایش After experiment	
اسیدیته	pH	7.42	pH	7.6
قابلیت هدایت الکتریکی	EC ($dS.m^{-1}$)	0.71	EC ($dS.m^{-1}$)	1.62
نیتروژن کل	N (%)	0.08	N (%)	0.07
فسفر	P ($mg.kg^{-1}$)	5.66	P ($mg.kg^{-1}$)	17.54
پتاسیم	K ($mg.kg^{-1}$)	137.26	K ($mg.kg^{-1}$)	234.15
کلسیم	Ca ($meq.l^{-1}$)	4	Ca ($meq.l^{-1}$)	7.44
منیزیم	Mg ($meq.l^{-1}$)	10.27	Mg ($meq.l^{-1}$)	26.68
سدیم	Na ($meq.l^{-1}$)	0.42	Na ($meq.l^{-1}$)	7.60
سرب	Pb ($mg.kg^{-1}$)	1.33	Pb ($mg.kg^{-1}$)	1.35
کادمیوم	Cd ($mg.kg^{-1}$)	0.04	Cd ($mg.kg^{-1}$)	0.06

جدول ۲- متوسط ویژگی‌های شیمیایی آب چاه، پساب و حداکثر حد مجاز استفاده از آب پساب برای مصارف کشاورزی بر اساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی، خواروبار کشاورزی و محیط‌زیست ایران (Yazdani *et al.*, 2017)

Table 2- Chemical characteristics average of well water, treated wastewater and maximum permissible limits for treated wastewater application in agriculture according to World Health Organization (WHO), Food and Agriculture Organization (FAO) and Iranian Department of Environment (IRNDOE)

ویژگی‌ها Characteristics		آب چاه Well water	پساب wastewater	استانداردهای پساب برای کشاورزی Wastewater standards for agriculture		
				WHO (1992)	FAO (2006)	IRNDOE
pH	اسیدیته	7.3	8.07	6.5-8	6.5-8	6-8.5
EC ($dS.m^{-1}$)	هدایت هیدرولیکی	0.77	0.98	0.7	0.7	-
NTU	کدورت	10	3.48	-	-	50
TSS ($mg.l^{-1}$)	کل مواد جامد معلق	16	39.71	-	-	100
TDS	کل مواد جامد محلول	501	632.57	450	450	-
TP ($mg.l^{-1}$)	فسفر	2.22	4.13	4	4	6
Cod ($mg.l^{-1}$)	اکسیژن خواهی شیمیایی	3	18.93	-	-	200
N ($mg.l^{-1}$)	نیتروژن کل	0.6	11.45	-	-	-
Ca ($mg.l^{-1}$)	کلسیم	60	74.29	-	-	-
Na ($mg.l^{-1}$)	سدیم	73.6	97.26	-	-	-
Mg ($mg.l^{-1}$)	منیزیم	16.8	20.57	-	-	100
COD($mg.l^{-1}$)	اکسیژن خواهی بیوشیمیایی	1	6.51	-	-	100
Pb ($\mu g.l^{-1}$)	سرب	0.31	0.15	5	5	1
Cd ($\mu g.l^{-1}$)	کادمیوم	0	0.01	0.01	0.01	0.05

آب چاه با لوله به محل اجرای آزمایش انتقال داده شد و پساب مورد استفاده از تصفیه‌خانه شهر ساری واقع در روستای عالیواک تأمین شد. بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی خاک جهت تأمین نیاز غذایی گیاه، کود نیتروژن از منبع اوره در دو مرحله به مقدار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار همزمان با کود فسفاتی به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل و کود پتاسیم به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم به‌صورت قبل از کاشت و به مقدار ۷۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت سرک در اختیار گیاه قرار داده شد (Mousavi Nik, 2011).

پس از تهیه گل ا شباع، ع صاره ا شباع خاک به‌و سیله‌ی د ستگاه پمپ مکش تهیه و میزان شوری در عصاره‌ی اشباع به‌وسیله‌ی دستگاه هدایت‌سنج واسنجی شده با کلروپتاسیم ۰/۰۱ نرمال مدل JENWAY مدل اندازه‌گیری شد (Page *et al.*, 1987). برای اندازه‌گیری اسیدیته خاک از دستگاه pH متر مدل (mod 821)، استفاده شد. اندازه‌گیری کلسیم و منیزیم با تهیه نمونه نهایی با استفاده از روش تیتراسیون با ورسین EDTA و در حضور معرف اریوکروم بلک‌تی[1] (تغییر رنگ ارغوانی به آبی در منیزیم و تغییر رنگ صورتی به ارغوانی در کلسیم) انجام شد (Rezaei *et al.*, 1993). همچنین سدیم و پتا سیم محلول در ع صاره گل ا شباع با ا ستفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر مدل (Sherwood 410) به روش شعله، بعد از قرائت ا ستانداردها مورد سنجش قرار گرفت. میزان فسفر قابل‌جذب با ا ستفاده از د ستگاه ا سپکتروفتومتر مدل (T90+UV/VI) در طول‌موج ۷۲۰ نانومتر قرائت شد (Ehyaei and Behbahanizadeh, 1999). نیتروژن کل خاک به روش کربن آلی به دست آمد. به‌طوری‌که نمونه تهیه شده در حضور معرف ارتوفنل‌ترولین[2] با فروآمونیوم سولفات ۰/۵ نرمال تیتر شد و در انتهای تیتراسیون رنگ نمونه از سبز کدر به قرمز تغییر یافت. مقدار نیتروژن کل خاک با ضرب عدد به‌دست‌آمده (معادل کربن آلی خاک) در مقدار ۰/۱ محاسبه گردید (Yasrebi *et al.*, 2003). عصاره‌گیری سرب و کروم با استفاده از روش دی تی پی ای[3] لیندسی و نورول (Lindsay and Norvell, 1987) انجام و برای قرائت از دستگاه جذب اتمی Varian استفاده شد. به‌منظور اندازه گیری عملکرد و اجزای عملکرد گیاه ذرت، از هر لایسیمتر به‌صورت تصادفی ۳ بوته انتخاب و صفات موردنظر شامل عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده[4]، وزن هزار دانه با توزین نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند و تعداد دانه در ردیف نیز شمارش گردید. پس از محاسبه عملکرد محصول ذرت، برای تیمارهای مختلف با توجه به مقدار تجمعی آب مصرفی، بهره‌وری نیز محاسبه شد. همچنین ارزیابی غلظت سرب و کادمیوم در ساقه، برگ و دانه ذرت با اضافه کردن ۲/۵ میلی‌لیتر ا سیدنیتریک به ۰/۱ گرم از اندام‌های خشک شده گیاه و پس از ۲۴ ساعت با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Varian انجام شد. در انتهای فصل تمامی زه آب‌های خارج‌شده حاصل از آبیاری با استفاده از ظروف پلاستیکی به شیر خروجی که زه آب‌ها را تخلیه می‌کرد متصل و جمع‌آوری‌شده و سرب و کادمیوم موجود در آن به روش کوره گرافیتی و با دستگاه جذب اتمی مدل Savant اندازه‌گیری شد. در پایان داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SASver9.2 تجزیه و تحلیل و آزمون مقایسه با استفاده از روش SNK[5] انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه وار یانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر ویژگی های شیمیایی و غلظت فلزات سنگینِ خاک در جدول ۳ ارائه گردید. بر پایه یافته ها، تأثیر نوع منبع آبیاری بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک، غلظت عنا صر پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتا سیم) و فلزات سنگین (کادمیوم و سرب) در خاک تفاوت معنی‌دار داشت ($P \leq 0.01$). همچنین تأثیر نوع روش آبیاری و اثر متقابل نوع منبع و روش آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگین خاک معنی‌دار نبود (جدول ۳).

ویژگی‌های شیمیایی خاک، غلظت عناصر پرمصرف و انباشت فلزات سنگین در خاک

بر پایه نتایج مقای سه میانگین‌ها، منبع آب بر میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک تاثیر معنی‌داری داشت. به‌طوری‌که بیشترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک با مقدار ۱/۸ دسی‌زیمنس در متر در تیمار ا ستفاده از پساب و کمترین مقدار آن در تیمار ا ستفاده از آب چاه با مقدار ۱/۱ دسی‌زیمنس در متر، مشاهده شد (شکل ۱ الف). همچنین نتایج گویای آن بود که اثر نوع روش آبیاری و اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر میزان قابلیت هدایت الکتریکی معنی‌دار نبود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میزان اسیدیته خاک در طول آزمایش تقریباً ثابت باقی ماند (شکل ۱ ب). قابلیت هدایت الکتریکی ، توانایی خاک برای هدایت جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. افزایش بیش از حد قابلیت هدایت الکتریکی خاک باعث آسیب به خاک و محدودیت رشد گیاهان می گردد (Fath Al-Ulumi *et al.*, 2015). زارعی و همکاران (Zarei *et al.*, 2014) مدیریت منا سب آبیاری و کنترل شرایط را از

1- Eriochrome Black T
2- Orthophenoltroline
3- Diethylene thiamine pentaacetic acid
4- Biomass
5- Student-Nueman-Kouel

عوامل مهم در جلوگیری از شوری خاک در آبیاری با لجن فاضلاب بر شمردند. میزان قابلیت هدایت الکتریکی فا ضلاب‌ها معمولاً به دلیل محتوای املاح و نمک‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم بالاست. اما با توجه به تصفیه فاضلاب مورداستفاده، مدیریت آبیاری (مقدار و دور آبیاری) و زراعی (کشت در لایسیمتر)، میزان شوری خاک کنترل گردید. البته با توجه به مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در این پژوهش محدودیت چندانی در شوری خاک وجود نداشت. سینگ و اگروال (Singh and Agrawal, 2012) و محمد و مازاریح (Mohammad and Mazahreh, 2003)، افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک در استفاده از پساب نسبت به آب چاه کشاورزی را گزارش کردند، که در همسنجی با نتایج این پژوهش کاملاً همسو بود

نتایج مقایسه میانگین‌ها، نشان داد که غلظت عناصر پرمصرف در خاک در شرایط استفاده از آبیاری با پساب نسبت به منبع آب چاه بیشتر بود. به‌طوری‌که بیشترین میزان نیتروژن کل با مقدار ۰/۰۸۶ درصد در منبع آبیاری پساب و کمترین آن در منبع آب چاه با مقدار ۰/۰۵۳ درصد مشاهده شد (شکل ۲ الف). همچنین نتایج نشان داد که میزان فسفر و پتاسیم در خاک با استفاده از آبیاری با پساب در مقایسه با آبیاری با آب چاه، افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین میزان فسفر و پتاسیم خاک، در شرایط استفاده از منبع آب پساب به ترتیب با مقادیر ۲۴/۲ و ۲۲۶/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد.

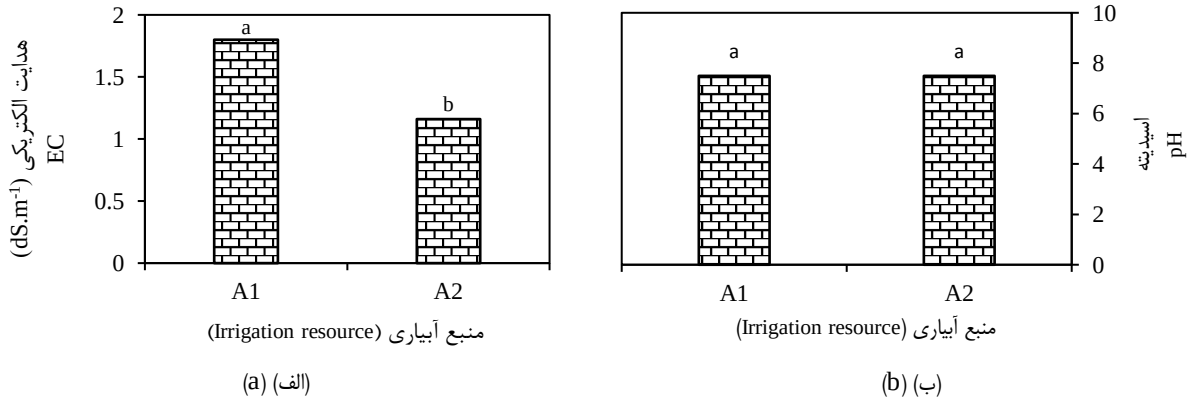
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی و غلظت فلزات سنگینِ خاک

Table 3- Analysis of variance the effect of source and irrigation method on chemical characteristics, heavy metals concentration

منابع تغییر (S.O.V)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean square)						
		ویژگی‌های شیمیایی (Chemical characteristics)			عناصر پرمصرف (Micronutrients)		فلزات سنگین (Heavy metals)	
		pH	EC ($ds.m^{-1}$)	N (%)	P ($mg.kg^{-1}$)	K ($mg.kg^{-1}$)	Pb (mg.kg-1)	Cd (mg.kg-1)
منبع آب Water resource	1	0.0008 ^{ns}	1.203 **	0.0031**	329.7 **	124.33 **	35.27 **	0.00005 **
روش آبیاری Irrigation method	1	0.0071 ^{ns}	0.0033 ^{ns}	0.0030 ^{ns}	0.3008 ^{ns}	39.603 ^{ns}	0.0075 ^{ns}	0.000008 ^{ns}
منبع × روش Resource × method	1	0.0069 ^{ns}	0.0029 ^{ns}	0.0033 ^{ns}	0.0675 ^{ns}	66.27 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.000007 ^{ns}
خطا Error	8	0.005	0.0158	0.0015	4.822	21.237	21.237	0.0005
ضریب تغییرات C.V	-	0.93	8.4	17.4	11.5	2.1	2.1	10.6

*، ** و ^{ns} به ترتیب سطوح معنی‌داری ۵ درصد، ۱ درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

*, ** and ns: significant at $p\leq0.01$, $p\leq0.05$ and non-significant, respectively.



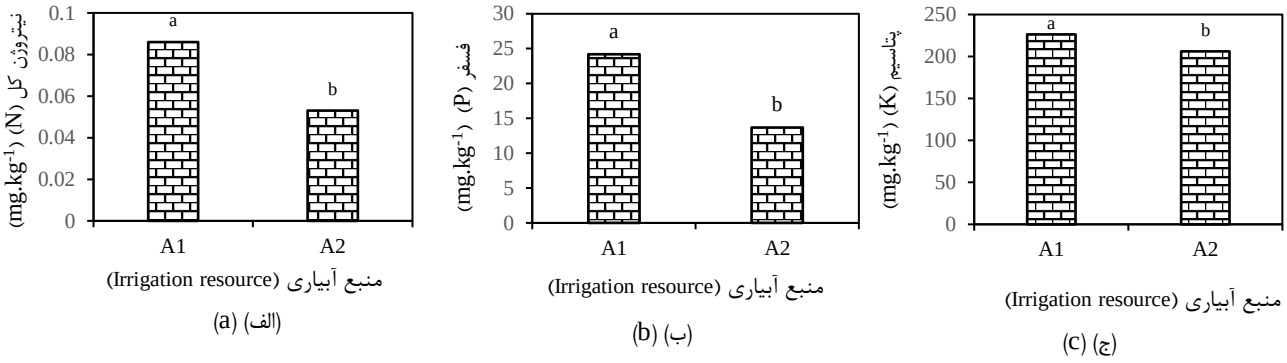
شکل ۱- مقایسه تأثیر استفاده از منبع آبِ آبیاری بر میزان قابلیت هدایت الکتریکی (الف) و اسیدیته خاک (ب)

Figure 1- Comparison of the effect of using irrigation water source on electrical conductivity (a) and soil acidity (b)

کمترین مقدار این عناصر مربوط به شرایط استفاده از منبع آب چاه به ترتیب با مقادیر ۱۳/۷ و ۲۰۵/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (شکل ۲ ب و شکل ۲ ج). بر پایه یافته‌ها، تأثیر نوع روش آبیاری و همچنین اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر غلظت عناصر پرمصرف در خاک، تفاوت معنی‌داری نداشت. آبیاری با فاضلاب با فراهم ساختن عناصر غذایی و ریزمغذی‌های ضروری، سطح باروری خاک را بهبود می‌بخشد و همچنین پتانسیل معدنی شدن نیتروژن با استفاده از آبیاری با پساب به‌واسطه افزایش مقدار نیتروژن کل، نیز افزایش می‌یابد (Singh and Agrawal, 2012). زارعی و همکاران (Zarei *et al*., 2014) اظهار داشتند که نیتروژن موجود در فاضلاب منبع و دلیل افزایش نیتروژن کل در خاک می‌باشد. نتایج مطالعات پانوراس و همکاران (Panoras *et al*., 2003) و نازاریو و همکاران (Nazario *et al*., 2019) نیز تاثیر استفاده از پساب بر افزایش غلظت عناصر پرمصرف به‌ویژه نیتروژن کل در خاک را نشان می‌دهند.

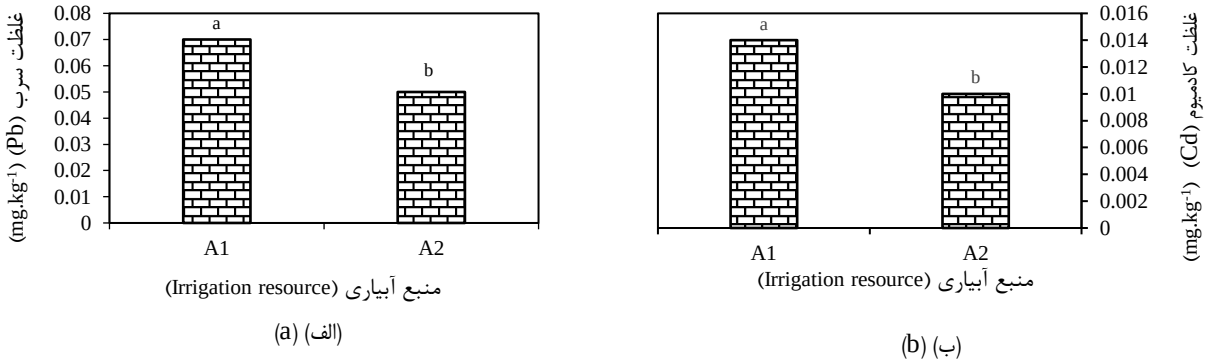
نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که انباشت فلزات سنگین در خاک تحت تأثیر استفاده از نوع منبع آب آبیاری می‌باشد. به‌طوری‌که در شرایط آبیاری با منبع آب چاه، میزان انباشت فلزات سنگین کادمیوم و سرب در خاک در مقایسه با پساب کمتر بود. بیشترین میزان انباشت فلز سرب مربوط به شرایط استفاده از پساب با مقدار ۰/۰۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و کمترین میزان آن در شرایط استفاده از منبع آب چاه با مقدار ۰/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد (شکل ۳ الف). همچنین بالاترین میزان انباشت فلز کادمیوم در خاک در آبیاری با پساب با مقدار ۰/۰۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد و پایین‌ترین میزان انباشت آن مربوط به آبیاری با آب چاه با مقدار ۰/۰۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (شکل ۳ ب).

همچنین مشابه با ارزیابی غلظت عناصر پرمصرف در خاک، نتایج بررسی اثرگذاری روش آبیاری و همچنین اثر متقابل منبع و روش آبیاری بر انباشت فلزات سنگین، بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار بود. خاولا و همکاران (Khawla *et al*., 2019)، اظهار داشتند که در پی استفاده از پساب برای کشاورزی، غلظت فلز کادمیوم در خاک افزایش می‌یابد.



شکل ۲- مقایسه تأثیر استفاده از منبع آبِ آبیاری بر غلظت عناصر پرمصرف (نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم) خاک

Figure 2- Comparison of the effect of using irrigation water source on the concentration of high consumption elements (total nitrogen (a), phosphorus (b) and potassium(c)) in soil



شکل ۳- مقایسه تأثیر استفاده از منبع آبِ آبیاری بر انباشت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک

Figure 3- Comparison of the effect of using irrigation water source on the accumulation of heavy metals lead and cadmium in soil

شایان‌ذکر است که بر اساس نتایج برخی از محققین، انباشت فلزات سنگین ازجمله کادمیوم و سرب به دلیل کم‌تحرک بودن، به‌مرور زمان در خاک صورت می‌پذیرد (Chen *et al.*, 2013; Gatta *et al.*, 2015). بر اساس گزارش خان و همکاران (Khan *et al.*, 2008)، آبیاری با فاضلاب شهری به مدت ۵۰ سال، منجر به افزایش شاخص انبا شت آلودگی روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل در خاک شد. همچنین نتایج برخی تحقیقات ازجمله مجیری و همکاران (Mojiri *et al.*, 2011) و ریچادوری و همکاران (Raychaudri *et al.*, 2014) نشان داد که استفاده از پساب تأثیر چندان قابل‌توجهی بر میزان انباشت کادمیوم و سرب در خاک نداشت و تغییر غلظت این فلزات در طول آزمایش تقریباً ثابت باقی ماند.

عملکرد دانه و غلظت فلزات سنگین در گیاه و زه‌آب

نتایج تجزیه واریانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده ذرت، غلظت فلزات سنگینِ جذب‌شده در اندام‌های گیاهی و زه‌آب حاصل از آبیاری در طول فصل رشد ۱۳۹۸-۹۹، در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تأثیر منبع و روش آبیاری بر عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده ذرت بسیار معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). این در حالی بود که اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر دو صفت مذکور، معنی‌دار نبود.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که، استفاده از پساب نسبت به آب چاه، میزان عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده را افزایش داد. به‌طوری‌که بیشترین مقدار عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده در آبیاری با منبع پساب به ترتیب با مقادیر ۹۱۸/۶۶ کیلوگرم در هکتار و ۱/۴۵ کیلوگرم در مترمکعب و کمترین میزان آن‌ها در آبیاری با منبع چاه به ترتیب با مقادیر ۵۱۶/۱۷ کیلوگرم در هکتار و ۱/۲۰ کیلوگرم در مترمکعب مشاهده شد (جدول ۵). همچنین نتایج حاکی از آن بود که میزان عملکرد دانه در روش آبیاری زیرسطحی تفاوت قابل‌توجهی را نسبت به روش قطره‌ای نوار تیپ نشان داد. افزایش ۶۷ درصدی عملکرد دانه و ۲۸ درصدی بهره‌وری زیست‌توده در روش آبیاری زیرسطحی در مقایسه با روش قطره‌ای نوار تیپ، مؤید برتری و سودمندی روش زیرسطحی بر میزان عملکرد دانه بود (جدول ۵). پساب باعث بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شده و شرایط مطلوبی را به‌واسطه افزایش مواد آلی و اصلاح خاک برای رشد گیاه فراهم می‌سازد که درنهایت باعث افزایش تولید زیست‌توده آن می‌شود (Hassanpour Darvishi *et al.*, 2010). فتح‌العلومی و همکاران (Fath Al-Ulumi *et al.*, 2015) بیان کردند که پساب با افزایش پایداری خاکدانه‌ها باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک و درنتیجه افزایش باروری خاک می‌شود. استفاده از پساب با توجه به اینکه حاوی عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریزمغذی‌ها می‌باشد، بهبود رشد گیاه ذرت را در پی داشت. تولید فرآورده‌های فتوسنتزی و افزایش میزان بهره‌وری سیستم فتوسنتزی گیاه، در گرو رشد مطلوب اندام‌های گیاهی است.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر عملکرد، غلظت فلزات سنگین جذب‌شده در گیاه ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) و زه‌آب حاصل از آبیاری

Table 4- Results of analysis of variance Effect of source and method of irrigation on yield, concentration of heavy metals adsorbed in corn (single cross 704) and drainage from irrigation

منابع تغییر (S.O.V)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean of square)									
		عملکرد Yield		فلزات سنگین گیاه Plant HV						فلزات سنگین زه‌آب Water drainage HV	
		GY ($kg.ha^{-1}$)	BP ($kg.m^{-3}$)	Pb_G (mg/g)	Pb_L (mg/g)	Pb_S (mg/g)	Cd_G (mg/g)	Cd_L (mg/g)	Cd_S (mg/g)	Pb_{wd} (µg/l)	Cd_{wd} (µg/l)
منبع آب Water resource	1	60.39**	117.77**	33.24**	66.03**	32.64**	125.58**	23.78**	24.30**	0.85 ns	1.22 ns
روش آبیاری Irrigation method	1	48.35**	212.24**	0.33 ns	0.02 ns	0.01ns	1.06 ns	7.50 ns	0.55ns	1.41 ns	1.10 ns
منبع × روش Resource × method	1	0.54ns	1.84 ns	0.27 ns	0.09 ns	0.01ns	4.69 ns	5.44 ns	0.18 ns	3.16 ns	1.10 ns
خطا Error	8	405.23	0.0015	62.31	21.01	35.14	0.1128	0.106	0.823	12.51	0.03
ضریب تغییرات C.V	-	12.46	2.92	15.9	39.0	15.0	27.0	16.5	15.8	15.1	17.3

Grain Yield (GY): عملکرد دانه، Biomass productivity (BP): بهره‌وری زیست‌توده، Pb Grain (Pb_G): غلظت سرب دانه، Pb leaf (Pb_L): غلظت سرب برگ، Pb Stem (Pb_S): غلظت سرب ساقه، Cd Grain (Cd_G): غلظت کادمیوم دانه، Cd Leaf (Cd_L): غلظت کادمیوم برگ، Cd Stem (Cd_S): غلظت کادمیوم ساقه، Pb Water drainage (Pb_{wd}): غلظت سرب زه‌آب و Cd Water drainage (Cd_{wd}): غلظت کادمیوم زه‌آب. *، ** و ns به ترتیب سطوح معنی‌داری ۵ درصد، ۱ درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

*, ** and ns: significant at $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$ and non-significant, respectively.

فراهمی عناصر غذایی موردنیاز گیاه به‌ویژه نیتروژن در خاک، با افزایش رشد اندام هوایی باعث گستردگی سطح برگ و درنهایت سایه‌بان گیاه می شود. افزایش میزان دریافت تابش‌های خور شیدی با سطح برگ گیاه، ارتباط تنگاتنگی دارد. به‌طوری که با افزایش یا کاهش سطح برگ گیاه، میزان در یا فت نور و درنها یت فعالیت فتوسنتزی و انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی افزایش و یا کاهش می‌یابد (Kouchaki *et al.*, 2010). زارعی و هم کاران (Zarei *et al.*, 2014) نشان دادند که پساب عم دتاً به دلیل دارا بودن عناصر غذایی ضروری موجب افزایش تعداد برگ می‌گردد. افزایش تعداد برگ باعث افزایش میزان فتوسنتز در گیاه و درنتیجه افزایش عملکرد می شود. بهره‌برداری از عناصر غذایی موجود در پساب در طول دوره‌ی ر شد، در مراحل مختلف از ر شد گیاه به‌ویژه در مرحله ر شد زایشی که حساسیت بالایی نسبت به کمبود آن‌ها وجود دارد، افزایش عملکرد را به همراه دارد (Yazdani *et al.*, 2017). بدیعی و همکاران (Badiei *et al.*, 2016) اظهار داشتند که وجود عناصر غذایی کافی در مرحله رشد زایشی گیاه، نقش مهمی را در رشد دانه‌ها بازی می‌کند. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان نمود که عناصر مغذی موجود در پساب باعث افزایش عملکرد دانه با استفاده از منبع آب پساب شده است. به دلیل اینکه پساب حاوی عناصر غذایی و ریزمغذی‌هایی ازجمله؛ نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، روی و آهن بود نسبت به منبع آب چاه، افزایش عملکرد دانه ذرت را به دنبال دا شت (Mousavi and Shahsavari, 2014). نتایج دهقانی سانیج و همکاران (Dehghani Sanij *et al.*, 2014) نشان داد که روش قطره‌ای ضمن افزایش عملکرد می‌تواند در کاهش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از عناصر موجود در آب مؤثر باشد. در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، آلودگی خاک سطحی کمتر از روش قطره‌ای سطحی است (Oron *et al.*, 1999). لی و هم کاران (Li *et al.*, 2015) بیان کردند که روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با بهره‌برداری از پساب در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری، افزایش عملکرد را به همراه داشت. همسنجی یافته‌های این پژوهش با نتایج قضاوی و ارست (Qazavie and Earst, 2016)، بدیعی و همکاران (Badiei *et al.*, 2016) و یزدانی و همکاران (Yazdani *et al.*, 2017) کاملاً همسو بود.

همان‌طور که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود، اثر منبع آبِ آبیاری بر غلظت فلزات سنگین جذب‌شده در اندام‌های گیاهی (دانه، برگ و ساقه) ذرت، معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). اما اثر روش آبیاری و همچنین اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر آن، تفاوت چندان قابل‌توجهی نداشت. همچنین نتایج حاکی از آن بود که تأثیر منبع آب، روش آبیاری و اثر متقابل آن‌ها، بر غلظت فلزات سنگینِ زه‌آب حاصل از آبیاری، معنی‌دار نبود. نتایج مقایسه میانگین‌ها، نشان داد که استفاده از منبع آب پساب در مقایسه با آب چاه، باعث جذب میزان بیش‌تری از فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه گیاه ذرت شد. به‌طوری‌که در اثر استفاده از منبع آب پساب، میزان جذب فلز سرب در میان بخش‌های مختلف گیاه ذرت، به ترتیب با مقادیر ۲۷/۲، ۲۲/۵ و ۲۰/۵ میلی‌گرم بر گرم مربوط به بخش دا نه، برگ و ساقه بود.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین‌های تأثیر منبع و روش آبیاری بر غلظت فلزات سنگینِ جذب‌شده در گیاه ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) و زه‌آب حاصل از آبیاری

Table 5- Results of analysis of variance Effect of source and method of irrigation on yield, concentration of heavy metals adsorbed in corn (single cross 704) and drainage from irrigation

تیمار Treatment	سطح Level	میانگین مربعات (Mean of square)									
		عملکرد Yield		فلزات سنگین گیاه Plant HV						فلزات سنگین زه‌آب Water drainage HV	
		GY (kg.ha^{-1})	BP (kg.m^{-3})	Pb_G (mg/g)	Pb_L (mg/g)	Pb_S (mg/g)	Cd_G (mg/g)	Cd_L (mg/g)	Cd_S (mg/g)	Pb_{wd} (µg/l)	Cd_{wd} (µg/l)
منبع آب Water resource	پساب Wastewater	918.66 a	1.45 a	27.2 a	22.52 a	20.5 a	2.32 a	1.35 a	2.01 a	1.19 a	0.11 a
	چاه Well water	516.17 b	1.20 b	0.97 b	0.99 b	0.98 b	0.15 b	0.43 b	0.33 b	1.30 a	0.12 a
روش آبیاری Irrigation method	زیرسطحی Subsurface	897.33 a	1.49 a	15.4 a	11.9 a	10.9 a	1.14 a	0.65 a	1.43 a	1.46 a	0.11 a
	قطره‌ای نوار تیپ Drip	538.22 b	1.16 b	12.7 a	11.5 a	10.5 a	1.34 a	0.63 a	1.82 a	1.03 a	0.11 a

Grain Yield (GY): عملکرد دانه، Biomass productivity (BP): بهره‌وری زیست‌توده، Pb Grain (Pb_G): غلظت سرب دانه، Pb leaf (Pb_L): غلظت سرب برگ، Pb Stem (Pb_S): غلظت سرب ساقه، Cd Grain (Cd_G): غلظت کادمیوم دانه، Cd Leaf (Cd_L): غلظت کادمیوم برگ، Cd Stem (Cd_S): غلظت کادمیوم ساقه، Pb Water drainage (Pb_{wd}): غلظت سرب زه‌آب و Cd Water drainage (Cd_{wd}): غلظت کادمیوم زه‌آب.

میانگین‌ها با حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشند.

Means that carry the same letter on each column have no significant difference.

این در حالی بود که میزان جذب فلز کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه به ترتیب ۲/۳۲، ۱/۳۵ و ۲/۰۱ میلی‌گرم بر گرم مشاهده شد. همچنین نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میزان فلزات سنگین زه‌آب حاصل از آبیاری، در اثر استفاده از منبع آب (پساب و چاه) و نوع روش آبیاری (زیرسطحی و قطره‌ای نوار تیپ) اختلاف چندانی نداشتند.

کیفیت محصول به‌راحتی تحت تأثیر فلزات سنگین موجود در خاک ازجمله؛ سرب، کروم و کادمیوم قرار می‌گیرد (Sadeghi *et al.*, 2020). یون‌های فلزی سمی همراه با مواد مغذی از محلول خاک وارد بافت های گیاهی می شوند (Dal Corso *et al.*, 2013). شایع‌ترین پیامد فیزیولوژیکی مواجهه با فلزات سنگین در گیاهان، کاهش رشد است. ساختار و فیزیولوژی برگ همراه با کاهش فتوسنتز و تنفس تغییر می‌کند. درنتیجه این تغییرات متابولیسم تحت تأثیر قرار می‌گیرد و تولید انرژی کاهش می‌یابد (Hu *et al.*, 2013). تعرق و انتقال مواد بین اندام‌های مختلف نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. توانایی ریشه برای جذب مواد مغذی و آب نیز کاهش می یابد. به دلیل جذب فلزات سنگین، عملکرد محصولات کشاورزی کاهش می‌یابد و با ورود آنها به زنجیره غذایی اثرات خطرناک سلامتی مشاهده می‌شود. در میان فلزات سنگین مختلف، کادمیوم برای گیاهان بسیار سمی است و مانع فتوسنتز و کاهش رشد ریشه و اندام هوایی می‌شود (Shahid *et al.*, 2015). زیاد بودن غلظت سرب و کادمیوم در دانه سلامت انسان را تهدید می‌نماید. همچنین غلظت سرب و کادمیوم در برگ و ساقه ذرت با به خطر انداختن سلامت دام و طیور، به‌طور غیرمستقیم نیز سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما نتایج این پژوهش نشان داد که با توجه به اینکه مقادیر معمول فلز سرب در گیاهان بین ۵-۲ میلی‌گرم در کیلوگرم (Chaney, 1989) و همچنین فلز کادمیوم که عنصر ضروری برای رشد گیاهان نبوده و غلظت‌های مجاز آن ۳-۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم (Baker and Brooks, 1989) در گیاهان می‌باشد، میزان غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، ساقه و برگ ذرت سینگل کراس ۷۰۴، مشکلی را برای مصرف‌کنندگان بوجود نخواهد آورد. همچنین غلظت سرب و کادمیوم در زه‌آب حاصل از آبیاری در مقایسه با حد آستانه مجاز استانداردهای FAO[1] و WHO[2]، بسیار کم‌تر بود و بدین ترتیب خطر انتقال سرب و کادمیوم به منابع آب زیرزمینی را به مقدار بسیار قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر فاضلاب تصفیه شده بر غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگینِ خاک و برخی ویژگی‌های ذرت سینگل کراس ۷۰۴، حاکی از آن بود که آبیاری با پساب به دلیل غنی بودن از عناصر غذایی و ریزمغذی‌ها، باعث بهبود حاصلخیزی خاک شده و شرایط مطلوبی را به‌واسطه افزایش مواد آلی و املاح خاک برای رشد گیاه فراهم می‌سازد. به‌طوری‌که بیشترین میزان عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک در شرایط استفاده از پساب مشاهده شد. همچنین بالاترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی و انباشت فلزات سنگین سرب و کادمیوم خاک، مربوط به منبع پساب در مقایسه با آب چاه بود. اما به دلیل اینکه از مقادیر حد آستانه استانداردهای سازمان بهداشت جهانی، خواروبار کشاورزی و محیط‌زیست ایران کمتر بود، استفاده از پساب در آبیاری گیاه ذرت محدودیت خاصی در خاک ایجاد نکرد. بر پایه یافته‌ها، استفاده از پساب شرایط مطلوب برای تولید فرآورده‌های فتوسنتزی را به همراه داشت و باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری زیست‌توده گیاه ذرت سینگل کراس ۷۰۴ گردید. بر پایه نتایج، غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه در اثر استفاده از پساب در مقایسه با آب چاه، تفاوت بسیار معنی‌داری داشت؛ که در این میان بیشترین میزان جذب فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش دانه ذرت مشاهده شد؛ به‌طور کلی، می‌توان اینگونه اظهار داشت که استفاده بهینه از پساب می‌تواند برخی از ویژگی‌های فیزیکی و حاصلخیزی خاک را افزایش دهد و درنتیجه با افزایش توان جذب عناصر مغذی توسط گیاه از خاک، عملکرد گیاه نیز افزایش یابد. ذکر این نکته ضروری است که این آزمایش باید برای چندین سال متوالی انجام گیرد تا بتوان اثرات باقیمانده فلزات سنگین در خاک ناشی از آبیاری سال های قبل را مورد بررسی قرار داد.

1- Food and agriculture organization of the united nations
2- World health organization

منابع

1. Abegunrin, T.P., Awe, G.O., Idowu, D.O., & Adejumobi, M.A. (2016). Impact of wastewater irrigation on soil Physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. *Catena* 139: 167-178. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.014.
2. Ali Ehyaei, M., & Behbahanizadeh, A. (1999). *Description of soil chemical decomposition methods*. Soil and Water Research Institute. 893: 128p. (In Persian)
3. Asgari, K., Najafi, P., & Solymani, A. (2007). Effect of treated wastewater on growth parameters of sunflower in the irrigation treatment condition. *Crop Research* 33: 82–87. (In Persian)
4. Assouline, S., & Narkis, K. (2011). Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the hydraulic properties of a clayey soil. *Water Resources Research* 47: 1–12. https://doi.org/10.1029/2011WR010498.
5. Badiei, A., Karandish, F., & Tabatabai, S. (2016). The effect of irrigation with raw and treated municipal wastewater on wheat yield and microbial properties of soil and plants. *Journal of Water and Soil Science 4*(2): 215-228. (In Persian)
6. Baker, A.J., & Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 2: 81-126.
7. Chaney, R.L. (1989). Toxic element accumulation in soils and crops: protecting soil fertility and agricultural food chains. *Inorganic Contaminants in the Vadose Zone* 140-158. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74451-8_10.
8. Chen, W., Lu, S., Pen, C., Jiao, W., & Wang, M. (2013). Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation. *Environmental Pollution* 178: 294–299. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.036.
9. Dal Corso, G., Fasani, E., & Furini, A. (2013). Recent advances in the analysis of metal hyper accumulation and hyper tolerance in plants using proteomics. *Frontiers in Plant Science* 4: 1-7. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00280.
10. Dehghani Sanij, H., Khazaei, A., & Zakerei Nia, M. (2014). The role of accurate irrigation in water consumption and water use efficiency. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1: 180-186. (In Persian with English abstract)
11. Fath Al-Ulumi, S., Asghari, S.h., & Goli Kalanpal, E. (2015). The effect of municipal sewage sludge on the concentration of high consumption elements in soil and plants and some agronomic traits of wheat. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 2: 49-70. (In Persian with English abstract)
12. Gatta, G., Libutti. A., Gagliardi, A., Beneduce, L., Brusetti, L., Borruso, L., Disciglio, G., & Tatantino, E. (2015). Treated agro-industrial wastewater irrigation of tomato crop: Effects on qualitative/quantitative characteristics of production and microbiological properties of the soil. *Agricultural Water Management* 149: 33-43. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2014.10.016.
13. Hassanpour Darvishi, H., Manshouri, M., & Aliabadi Farahani, H. (2010). The effect of irrigation by domestic waste water on soil properties. *Journal of Soil Sciences and Environmental Management* 1: 30-33. https://doi.org/10.5897/JSSEM.9000071.
14. Hoseinpoor, A., Haghnia, G.H., Alizadeh, A., & Fotovat, A. (2008). Effect of irrigation with raw and treated wastewaters on some chemical characteristic of soil in different depth under continuously and intermittent flood conditions. *Iran Journal of Irrigation and Drainage* 2: 73–85 .(In Persian with English abstract)
15. Hu, Y.F., Zhou, G., Na, X.F., Yang, L., Nan, W.B., Liu, X., Zhang, Y.Q., Li, J.L., & Bi, Y.R. (2013). Cadmium interferes with maintenance of auxin homeostasis in Arabidopsis seedlings. *Journal of Plant Physiology* 170: 965–975. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.02.008.
16. Judicial, R. (2016). Evaluation of the effect of irrigation with urban wastewater on the accumulation of some chemical elements in the plant and ecological characteristics of Eucalyptus (*Eucalyptus camadulensis* Dehnh.). *Journal of Plant Ecology* 8: 13-29.
17. Kaboosi, K. (2015). *Evaluation of the effect of irrigation with treated wastewater on soil characteristics (Case study: Bandargaz)*. The 1th national conference on drainage in sustainable agriculture, Iranian Irrigation and Drainage Association, 8 March, Tehran, Iran.
18. Kaboosi, K. (2017). The assessment of treated wastewater quality and the effects of mid-term irrigation on soil physical and chemical properties (case study: Bandargaz-treated wastewater). *Applied Water Science* 5: 2385-2396. https://doi.10.1007/s13201-016-0420-5.
19. Keshavarz, A., Ashrafi, S., Hydari, N., Pouran, M., & Farzaneh, E. (2005). *Water allocation and pricing in agriculture of Iran*. In Water Conservation, Reuse, and Recycling, Proceedings of an Iranian-American Workshop, National Research Council, The National Academic Press: pp. *153-172*.
20. Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y.M., Hung, Y.Z., & Zhu, Y.G. (2008). Health risk of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution 152*(3): 686-692. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.056.
21. Khawla, K., Besma, K., Enrique, M., & Mohamed, H. (2019). Accumulation of trace elements by corn (*Zea mays*) under irrigation with treated wastewater using different irrigation methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*

170: 530-537. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.12.025.
22. Kouchaki, A., Nasiri Mahallati, M., Khorram Del, S., Anvarkhah, S., Sabet Teymouri, M., & Sanjani, S. (2010). Evaluation of growth indices of hemp (*Cannabis sativa* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.) in intercropping with replacement and additive series. *Journal of Agroecology* 1: 27-36. (In Persian with English abstract)
23. Lam, C.W., Tanabe, S., Chan, S.K., Yuen, E.K., Lam, M.H., & Lam, P.K. (2004). Trace element residues in tissues of green turtles (*Chelonia mydas*) from South China Waters. *Marine Pollution Bulletin* 48: 174–182. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.09.003.
24. Li, X., Kang, Y., Wan, S., Chen, X., & Chu, L. (2015). Reclamation of very heavy coastal saline soil using drip-irrigation with saline water on salt-sensitive plants. *Soil and Tillage Research* 146: 159-73. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.005.
25. Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.
26. Mahfooz, Y., Yasar, A., Guijan, L., Islam, Q.U., Akhtar, A.B., Rasheed, R., Irshad, S., & Naeem, U. (2020). Critical risk analysis of metals toxicity in wastewater irrigated soil and crops: a study of a semi-arid developing region. *Scientific Reports* 10: 1-10. https://doi.org/10.1038/S41598-020-69815-0.
27. Mohammad, M.J., & Mazahreh, N. (2003). Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated waste water. *Communication in Soil Sciences and Plant Analysis* 34(9-10): 1281–1294. https://doi.org/10.1081/CSS-120020444.
28. Mojiri, A., & Aziz, H.A. (2011). Effects of municipal wastewater on accumulation of heavy metals in soil and wheat (*Triticum aestivum* L.) with two irrigation methods. *Roman Agriculture Researches* 28: 217-222.
29. Mousavi Nik, M. (2011). Study of the effects of planting density on grain yield and yield components and some morphological traits of grain maize cultivars. *Scientific Journal of Crop Ecophysiology (Agricultural Sciences)* 17: 89-98. (In Persian with English abstract)
30. Mousavi, S.R., & Shahsavari, M. (2014). Effects of treated municipal wastewater on growth and yield of maize (*Zea mays*). *Biological Forum 6*(2): 228-233. https://doi.org/10.2166/wst.2012.624.
31. Nazario, A.A., Zution, I., Agnellos Barbosa, E., Nazario, L., Rodrigues, D., & Matsura, E.E. (2019). Impact of the application of domestic wastewater by subsurface drip irrigation on the soil solution in sugarcane cultivation. *Applied and Environmental Soil Science* 1: 1-11. https://doi.org/10.1155/2019/8764162.
32. Oron, G., Campos, C., Gillerman, L., & Salgot, M. (1999). Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities. *Agricultural Water Management* 38: 223-234. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00066-3.
33. Page, M.C., Sparks, D.L., Noll, M.R., & Hendricks, G.J. (1987). Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. *Soil Science Society of American Journal* 51: 1460-1465. https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060011x.
34. Panoras, A., Evgenidis, G., Bladenopoulous, S., Melidis, V., Doitsinis, A., Samaras, I., Zdragkas, A., & Matsi, T.h. (2003). Corn Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater. *GlobalNEST International Journal 5*(1): 39-45.
35. Qazavie, R., & Earst, M. (2016). Evaluation of the effect of irrigation with municipal effluent on the accumulation of some chemical elements in the plant and ecological characteristics of the eucalyptus plant (*Eucalyptus camadulensis* Dehnh). *Journal of Plant Ecology* 8: 13-29. (In Persian)
36. Raychaudri, S., Raychaudri, M., Rautaray, S.K., & Kumar, A.(2014). *Impact of urban wastewater on soil and crop*. Edition: DWM Bulletin No. 64. Publisher: Directorate of Water Management, Bhubaneswar, Orissa. 32pp.
37. Rezaei, H., Behran, S.H., & Mosharei, S.H. (1993). *Instructions for soil science tests in saline and alkaline soils and their modification*. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)
38. Sadeghi, M., Noroozim, M., Kargar, F., & Mehrbakhsh, Z. (2020). Heavy Metal Concentration of Wheat Cultured in Golestan Province, Iran and Its Health Risk Assessment. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development 5*(2): 993-1000. https://doi.org/10.18502/jehsd.v5i2.3386.
39. Salehi, A., Tabari, M., Mohammadi, J., & Aliarb, A. (2008). Effect of Irrigation with Municipal Effluent on Soil and Growth of Pinus Eldarica Medw. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* 16: 186–196. (In Persian with English abstract)
40. Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G.h., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Aslam, M., & Dumat, C. (2015). *Heavy Metal Stress and Crop Productivity*. Crop Production and Global Environmental Issues. Edition: 1, Publisher: Springer, 1-25pp. https://doi: 10.1007/978-3-319-23162-4_1.
41. Singh, A., & Agrawal, M. (2012). Effects of Waste Water Irrigation on Physical and Biochemical Characteristics of Soil and Metal Partitioning in *Beta vulgaris* L. *Agriculture Researches* 4: 379–391. https://doi.org/10.1007/s40003-012-0044-4.
42. Singh, P.K., Deshbhratar, P.B., & Ramteke, D.S. (2012). Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agricultural Water Management* 103: 100-104. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.022.
43. Tabtabaei, S.H., Nourmahnad, N., Golestani Kermani, S., Tabtabaei, S.A., Najafi, P., & Heidarpour, M. (2020).

Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions - A review. International. *Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture* 9: 193-220. https://doi.org/10.30486/IJROWA.2020.671672.

44. Thorburn, P.J., Cook, F.J., & Bristow, K.L. (2002). *New water-saving production technologies: advances in trickle irrigation Proceedings*. Water for Sustainable Agriculture in Developing Regions–More Crop from Every Scarce Drop 53-62.
45. Tripathi, V.K., Rajput, T.B., & Patel, N. (2016). Biometric properties and selected chemical concentration of cauliflower influenced by wastewater applied through surface and subsurface drip irrigation system. *Journal of Cleaner Production* 139: 396-406. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.054.
46. Wang, J.F., Wang, G.X., & Wanyan, H. (2007). Treated wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: Wastewater recycling in the loess area of China. *Journal of Environmental Science* 19: 1093-1099. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60178-8.
47. WHO. (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Technical report series no. 778. World Health Organization, Geneva.
48. Yasrebi, J., Karimian, N.J., Maftoon, M., Abtahi, A., Ronaghi, A., & Asad, M.T. (2002). Distribution of nitrogen forms in cultivated calcareous soils of Fars province and their relationship with soil characteristics. *Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources 7*(4): 39-51.
49. Yazdani, A., Saffari, M., & Ranjbar, G.H. (2017). Effect of treatment with treated municipal wastewater on grain yield and accumulation of heavy metals in grain of barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences* 4: 284-296. (In Persian with English abstract)
50. Zarei, M., Charm, M., & Moallemei, N. (2014). Effect of treated municipal wastewater sludge on chemical properties and essential nutrients of soil and physiological characteristics of olive seedlings. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)* 2: 1-15. (In Persian)