Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

The Effect of Irrigation with Magnetically Treated Effluent on Uptake of Some Heavy Metals in Maize Cultivation

Masoud Pourgholam-Amiji[1], Mojtaba Khoshravesh✉[2]

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Mpourgholam6@ut.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. khoshravesh_m24@yahoo.com, m.khoshravesh@sanru.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 22, 2022

Received: June. 7, 2022

Accepted: June. 7, 2022

Published online: July. 23, 2022

Keywords:
Mixing Water and Effluent,
Lead, Cadmium,
Magnetic Field,
Zinc,
Nickel.

ABSTRACT

At present, due to the severe crisis of water resources, the reuse of treated effluent and wastewater in the agricultural sector is of great importance. Heavy metals in wastewater are the most important types of environmental pollutants. The goal of this research is to investigate the effect of using magnetically treated effluent on the uptake of heavy metals in maize. For this purpose, a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications in 2020 at Babolsar city. Treatments included irrigation with well water (W_1), irrigation with mixed water (25% of effluent and 75% of well water, W_2), irrigation with the mixed water (50% of effluent and 50% of well water, W_3), irrigation with mixed water (75% of effluent and 25% of well water (W_4), irrigation with 100% effluent (W_5) under magnetic field (I_1) and without magnetic field effect (I_2). At the end of the period, the elements of lead, cadmium, zinc and nickel were measured in aerial parts and seeds of maize. The results showed that the effect of irrigation type and mixed water on the concentration of all elements in aerial parts and seeds of maize was significant at the level of one percent probability. By applying a magnetic field, the concentrations of lead, cadmium, zinc and nickel in the aerial parts of plant decreased by 17.84, 15.9, 14.22 and 13.92% compared to non-magnetic treatment, respectively. With increasing the percentage of effluent in the mixed water for irrigation, the concentration of all elements increased significantly. The maximum concentration of elements in aerial parts and seeds of maize was related to zinc, which was 93.19 and 74.32 mg/kg respectively. The lowest concentrations of heavy metal uptake in aerial parts and seeds of maize were cadmium (0.73 mg/kg) and nickel (3.61 mg/kg), which were corresponded to W_5 treatment. Therefore, by using magnetic effluent as irrigation, the accumulation of heavy metals in the soil can be reduced and its absorption by maize can be prevented. Due to the high uptake of elements by the maize plant, when irrigating with effluents, it is advisable to select plants that have less potential for the accumulation of heavy metals.

Cite this article Pourgholam-Amiji, M., & Khoshravesh, M. (2022) The Effect of Irrigation with Magnetically Treated Effluent on Uptake of Heavy Metals in Maize. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 1071-1091.

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.340774.669237

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۵ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر جذب برخی فلزات سنگین در کشت ذرت

مسعود پورغلام آمیجی[۱]، مجتبی خوش‌روش[۲]✉
۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: Mpourgholam6@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زارعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ایمیل: khoshravesh_m24@yahoo.com, m.khoshravesh@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۵/۱

واژه‌های کلیدی:
اختلاط آب و پساب،
سرب،
کادمیوم،
میدان مغناطیسی،
روی،
نیکل

چکیده

در حال حاضر و با توجه به بحران شدید منابع آب، استفاده مجدد از پساب فاضلاب تصفیه‌شده در بخش کشاورزی حائز اهمیت است. در بین انواع آلاینده‌های محیط‌زیست، فلزات سنگین موجود در پساب‌ها بیشتر مورد توجه می‌باشند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از پساب مغناطیسی بر میزان جذب فلزات سنگین گیاه ذرت می‌باشد. بدین منظور، آزمایشی لایسیمتری در یک دوره کشت و به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۹ در شهرستان بابلسر انجام شد. محل تأمین پساب، تصفیه‌خانه فاضلاب بخش شرقی شهرستان بابلسر بود. تیمارهای آبیاری به روش قطره‌ای و شامل کاربرد ۱۰۰ درصد آب چاه (W_1)، اختلاط ۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه (W_2)، اختلاط ۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه (W_3)، اختلاط ۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه (W_4) و آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب (W_5) در شرایط اعمال میدان مغناطیسی (I_1) و بدون تأثیر میدان مغناطیسی (I_2) بود. در پایان دوره، عناصر سرب، کادمیوم، روی و نیکل در اندام هوایی و دانه گیاه ذرت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اثر نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر غلظت تمامی عناصر در اندام هوایی و دانه گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. با اعمال میدان مغناطیسی غلظت فلزات سرب، کادمیوم، روی و نیکل در اندام هوایی گیاه به‌ترتیب ۱۷/۸۴، ۱۵/۹، ۱۴/۲۲ و ۱۳/۹۲ درصد نسبت به تیمار غیرمغناطیسی کاهش داشت. کاهش عناصر فوق در دانه گیاه ذرت به‌ترتیب برابر ۱۳/۹۷، ۱۴/۵۲، ۱۲/۹۵ و ۱۳/۷۱ درصد بود. با افزایش درصد پساب مورد استفاده در آبیاری، غلظت تمامی عناصر افزایش معنی‌داری یافت. بیشترین مقدار غلظت عناصر در اندام هوایی و دانه گیاه ذرت مربوط به عنصر روی به ترتیب با مقدار ۹۳/۱۹ و ۷۴/۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. کمترین غلظت جذب فلزات سنگین در اندام هوایی و دانه گیاه ذرت به‌ترتیب مربوط به کادمیوم (۰/۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نیکل (۳/۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود که همگی از تیمار W_5 به دست آمدند. بنابراین با استفاده از فن‌آوری مغناطیسی می‌توان تجمع فلزات سنگین موجود در پساب‌ها در خاک را کاهش داد و از جذب آن توسط ذرت جلوگیری کرد. با توجه به جذب زیاد عناصر توسط گیاه ذرت، در هنگام آبیاری با پساب تصفیه‌خانه‌ها انتخاب گیاهانی که پتانسیل تجمع فلزات سنگین کمتری داشته و به مصرف مستقیم انسان و دام نمی‌رسد، قابل توصیه است.

استناد: پورغلام آمیجی، مسعود؛ خوش‌روش، مجتبی (۱۴۰۱). اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر جذب برخی فلزات سنگین در کشت ذرت. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۵)، ۱۰۹۱-۱۰۷۹.
DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.340774.669237
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.

مقدمه

سیستم‌های زیست‌محیطی ظرفیت محدودی برای جذب آلاینده‌های ورودی دارند و اگر تجمع مداوم آلاینده‌ها صورت گیرد، توانایی خاک به‌عنوان یک محیط پذیرنده به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته و یا به‌طورکلی از بین می‌رود. همچنین زمانی که به حداکثر ظرفیت نگهداری خاک برسد یا از آن بیشتر شود، سایر منابع و اجزای محیط‌زیست مثل آب‌های سطحی و زیرزمینی، گیاهان، احشام و انسان در معرض خطر قرار می‌گیرند (Razanov *et al*., 2020; Latosińska *et al*., 2021; Zhao *et al*., 2022). در اکثر شهرهای ایران به‌ویژه شمال کشور، حجم فاضلاب روزانه تولیدی قابل‌توجه می‌باشد. همچنین وجود زمین‌های حاصل‌خیز با پتانسیل تولید محصولات کشاورزی در این مناطق، به‌کارگیری پساب تصفیه‌خانه‌ها را برای کشاورزی جذاب می‌نماید ولی ورود فلزات سنگین با کاربرد پساب در خاک، یکی از معضلات زیست‌محیطی می‌باشد. تجمع فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری‌شده با پساب باعث آلودگی خاک شده و با ورود به زنجیره غذایی از طریق جذب به‌وسیله گیاه، ایجاد سمیت می‌کند (Muchuweti *et al*., 2006; Amouei *et al*., 2018; Mohammadkhani *et al*., 2020; Zafarzadeh *et al*., 2021; Pourgholam-Amiji *et al*., 2022).

بدن انسان به عناصری مانند روی، مس، نیکل و کروم در مقادیر بسیار کم نیازمند است ولی مقادیر بسیار کم عناصری مانند کادمیوم و سرب برای سلامتی انسان خطرناک است. مصرف گیاهان آلوده به فلزات سنگین سبب کاهش برخی مواد مغذی اساسی در بدن انسان شده و موجب کاهش دفاع ایمنی بدن، تأخیر در رشد جنین، سوءتغذیه و شیوع انواع سرطان‌های معده و روده می‌شود. سرب به سیستم اعصاب مرکزی آسیب رسانده و منجر به خستگی، سردرد، تشنج، فلج مغزی و عقب‌ماندگی ذهنی می‌شود (Behbahaninia *et al*., 2010; Cimboláková *et al*., 2020; Pourgholam-Amiji *et al*., 2020a; Khoshravesh *et al*., 2021a; Latosińska *et al*., 2021; Dehvari & Babaei, 2022). جذب فلزات سنگین از خاک توسط گیاه به عوامل مختلفی مانند اسیدیته خاک، غلظت یونی محلول، غلظت کاتیونی فلز، حضور کاتیون‌های فلزی رقابت‌کننده، نوع فلز، الگوی تجمع فلز سنگین در گیاه و ویژگی‌های بیولوژیک هر گیاه دارد. علاوه بر این، آبیاری مزارع با فاضلاب‌ها نیز باعث آلودگی خاک‌ها و گیاهان به فلزات سنگین می‌شود (Devkota & Schmidt, 2000; Khoshravesh *et al*., 2016; Khoshravesh *et al*., 2021a). مکانیسم‌های جذب برای یون‌های فلزی مختلف، متفاوت است اما یون‌هایی که با مکانیسم‌های مشابه به داخل ریشه جذب می‌شوند، احتمالاً با همدیگر رقابت می‌کنند (Yusuf *et al*., 2011).

به‌دلیل این‌که گیاهان فاقد سیستم انتقال ویژه برای کروم هستند، این فلز به همراه سایر یون‌ها مانند منگنز یا آهن به اندام‌های مختلف گیاه انتقال می‌یابد. این فلز سبب اختلال در فرایند جوانه‌زنی و رشد ریشه، ساقه و برگ گیاه شده و از طریق اثر بر آنزیم‌ها، متابولیسم گیاه را تغییر می‌دهد (Shanker *et al*., 2005). با افزایش غلظت فلز مس، وزن تر، طول ساقه و ریشه و کلروفیل گیاه کاهش می‌یابد. همچنین این فلز به علت افزایش سطح گونه‌های اکسیژن فعال (ROS[1]) در محفظه‌های درون‌سلولی گیاه، سبب ایجاد تنش اکسیداتیو می‌شود. گونه‌های فعال اکسیژن به عنوان یکی از فرآورده‌های جانبی تنفس و فتوسنتز، در میتوکندری و کلروپلاست سلول‌های گیاهی در شرایط طبیعی تولید می‌شود. تنش اکسیداتیو نیز به علت افزایش و تجمع بیش از حد رادیکال‌های آزاد و عدم تعادل بین رادیکال های آزاد و آنتی اکسیدان‌ها ایجاد می‌شود (Khatun *et al*., 2008). عنصر نیکل یک فلز ضروری برای رشد گیاه بوده که غلظت زیاد آن باعث مسمومیت‌های گیاهی مثل جلوگیری از فعالیت آنزیم‌ها، سوخت‌وساز نیتروژن و کاهش رشد گیاه می‌شود. وجود یون‌های آهن و منگنز سبب کاهش انتقال نیکل به قسمت‌های مختلف گیاه می‌شود (Yusuf *et al*., 2011; Khoshravesh *et al*., 2016). مسمومیت فلز روی در گیاه سبب آسیب به ریشه، کاهش ریشه‌های جانبی، کاهش غلظت سایر فلزات ضروری مانند آهن می‌شود. غلظت زیاد عنصر ضروری آهن سبب سیاه شدن سریع، ناهنجاری و مرگ بافت سلولی می‌شود (Zoqi & Doosti, 2020). منگنز عنصر ضروری برای رشد گیاه بوده که غلظت زیاد آن باعث اختلال در فعالیت آنزیم‌ها، جذب و استفاده از سایر عناصر معدنی، تنش اکسیداتیو و کاهش رنگ سبز برگ‌ها و رشد آن‌ها می‌شود (Millaleo *et al*., 2010). نتایج مطالعات نشان داده است که به‌طورکلی ۵ تا ۱۰ سال زمان لازم است تا سطح فلزات سنگین خاک آبیاری شده با فاضلاب به بیش از حد مجاز برسد (Smith *et al*., 1996).

در پژوهشی Rattan *et al*. (2005) نشان دادند که در صورت آبیاری با فاضلاب به مدت پنج سال، فقط غلظت آهن موجود در خاک افزایش یافته و به مدت ۱۰ سال، غلظت فلزات سنگین روی، آهن، نیکل و سرب نیز بیشتر شد. نتایج مطالعه Amusan *et al*. (2005) در کشور نیجریه نشان داد که غلظت فلزات سنگین در سبزیجات برگی و میوه‌ها و همچنین نمونه‌های خاک تحت آبیاری با پساب‌های شهری بیشتر از نمونه‌های شاهد بود. برخی تحقیقات نشان دادند که مقدار تجمع فلزات سنگین بسته به نوع فلز، شرایط خاک

1 Reactive Oxygen Species

و گونه گیاهی متفاوت بوده ولی عمدتاً مقدار تجمع در اندام هوایی، به‌ویژه برگ و ساقه، بیشتر از سایر اندام‌ها و در دانه، بسیار کمتر از برگ و ساقه می‌باشد. اما برخی نیز گزارش کرده‌اند که اغلب فلزات تمایل دارند که در قسمت ریشه گیاهان باقی بمانند (Pruvot *et al*., 2006). همچنین Rusan *et al*. (2007) با بررسی تأثیر مدت‌زمان‌های مختلف دو، پنج و ۱۰ سال آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده در عمق‌های مختلف سطح خاک تا ۶۰ سانتی‌متری بر عناصر مس، روی، آهن، منگنز، سرب و کادمیوم به این نتیجه رسیدند که برای عناصر مس، سرب و کادمیوم بین تیمارهای مختلف، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، اما مقدار عناصر روی، آهن و منگنز در خاک با افزایش مدت‌زمان آبیاری، افزایش یافت و بیشترین تجمع آن‌ها در سطح خاک بود. در مطالعه‌ای Mojiri & Aziz (2011) نیز با بررسی اثر فاضلاب شهری بر تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه گندم با دو روش آبیاری به این نتیجه رسیدند که فاضلاب شهری در هر دو روش آبیاری باعث افزایش تجمع فلزات سنگین (آهن، منگنز، نیکل و کادمیوم) شد. تجمع فلزات سنگین در ریشه بیشتر از اندام هوایی بود و در گیاه گندم در سیستم آبیاری غرقابی بیشتر از سیستم قطره‌ای بود.

گیاه ذرت دارای پتانسیل زیادی در جذب و خارج ساختن فلزات سنگین از خاک می‌باشد زیرا علاوه بر تولید زیست‌توده زیاد، به‌عنوان یک گیاه بیش اندوز فلزات سنگین نیز شناخته شده است (Park *et al*., 2012). در پژوهشی Alizadeh *et al*. (2009) در بررسی مقدار تجمع فلزات سنگین در گیاهان علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب نتیجه گرفتند که مقدار تجمع در بوته ذرت آبیاری‌شده با فاضلاب، ۱/۵ برابر بوته ذرت آبیاری‌شده با آب چاه بود. به غیر از منگنز و روی، تجمع سایر عناصر در بوته ذرت بیش از حد مجاز و در بلال و دانه ذرت مقادیر نیکل، کروم، سرب و روی کمتر از حد مجاز و منگنز و کادمیوم بیشتر از حد مجاز درون گیاه دیده شد. همچنین Fatahi Kiasari *et al*. (2010) با بررسی پالایش سرب توسط سه گیاه ذرت، آفتابگردان و پنبه نشان دادند که ذرت در بین سه گیاه مذکور توان بیشتری در جذب و انتقال سرب دارا می‌باشد. در مطالعه‌ای Parsafar & Marofi (2013) با کاربرد فاضلاب برای آبیاری گیاه سیب‌زمینی دریافتند که اثر تیمارها بر ضریب انتقال عناصر سنگین از خاک به اندام هوایی (به‌جز کادمیوم) و غده‌های سیب‌زمینی (به‌جز روی و مس) در سطح یک درصد معنی‌دار شد. بیشترین انتقال از خاک به اندام هوایی به‌ترتیب مربوط به کادمیوم، روی، مس و سرب بوده و در خصوص غده‌های سیب‌زمینی، بیشترین مقدار به‌ترتیب مربوط به کادمیوم، مس، روی و سرب دیده شد. Beigi Harchegani & Banitalebi (2013) نیز با کاربرد آبیاری سطحی با پساب شهری بر انباشت برخی فلزات سنگین در خاک و انتقال به دانه‌های گندم و ذرت نشان دادند که بزرگ‌ترین شاخص انتقال به دانه‌های گندم و ذرت مربوط به کادمیوم (۶/۱۴ و ۴/۸۸) و سرب (۴/۸۵ و ۴/۹۶) و کمترین مربوط به کروم (۰/۲۲ و ۰/۳) و نیکل (صفر) بود. غلظت کادمیوم، کروم و سرب در دانه گندم و ذرت فراتر از حد مجاز اتحادیه اروپا بود. شاخص خطر سرب برای کودکان و بزرگ‌سالان در گندم و ذرت و شاخص خطر کادمیوم برای کودکان در ذرت بزرگ‌تر از یک بود که به مفهوم خطر جدی و فزاینده مصرف گندم و ذرت تولیدشده در این ناحیه است.

در پژوهشی Behbahaninia et *al*. (2010) میزان جذب فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل و کروم در سبزیجات پیاز، تربچه، کاهو، نعناع و تره که با پساب تصفیه‌خانه‌ها آبیاری شده بودند را در دانشگاه رودهن بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار کروم و کادمیوم موجود در گیاهان هم برای گیاه و هم برای انسان از مقادیر استاندارد بیشتر بود. بیشترین مقدار کروم و کادمیوم به‌ترتیب در کاهو و تربچه با ۳۱/۳ و ۲/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار در پیاز و نعناع به‌ترتیب برابر ۷ و ۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در همین باره، Karimi *et al*. (2016) تأثیر فاضلاب تصفیه‌شده شهری را بر میزان و الگوی تجمع برخی فلزات سنگین در نیمرخ خاک زیر کشت ذرت و گوجه‌فرنگی بررسی کردند. این آزمایش در شرایط گلخانه در دانشگاه کردستان انجام شد و فاضلاب مورد استفاده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر سنندج تهیه شد. نتایج نشان داد که میزان غلظت عناصر سنگین خاک با افزایش عمق و فاصله افقی از گیاه کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج میزان تجمع عناصر سنگین در خاک، منگنز به مقدار ۷/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین میزان تجمع در خاک را داشت و پس از آن فلزات آرسنیک، آهن، روی و مس در رتبه‌های دوم تا پنجم قرار داشتند. با توجه به آلودگی این گیاهان به عناصر سنگین، پیشنهاد شد که از فاضلاب تصفیه‌شده برای آبیاری محصولات غیرخوراکی استفاده شود. در تحقیقی Rezapour *et al*. (2019) نیز میزان غلظت فلزات سنگین در گندم زمستانه را با استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده بررسی کردند. نتایج آن‌ها وجود میزان قابل‌توجهی از فلزات سنگین در خاک و بخش‌های مختلف گندم را نشان داد. میانگین غلظت این فلزات در دانه گندم در حد مجاز بود. آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده منجر به افزایش قابل‌توجهی از غلظت فلزات سنگین در گندم نسبت به تیمار شاهد شد که شامل Zn> Cu > Ni > Cd > Pb بودند. غلظت فلزات سنگین در ریشه گندم به‌طور معنی‌داری بیشتر از دانه‌ها و ساقه‌ها بود که به‌ترتیب Cu> Zn> Pb> Cd> Ni بود.

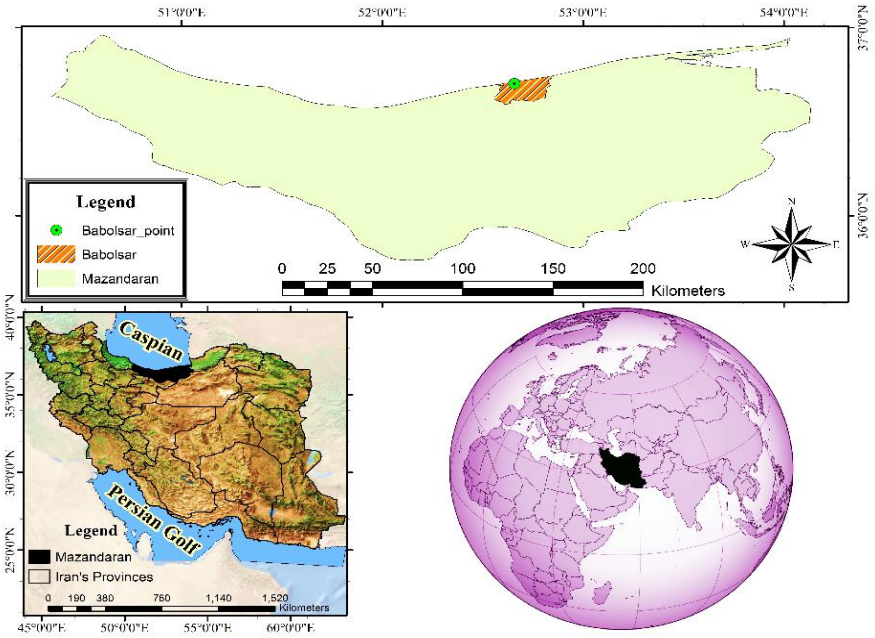
کم‌آبی و هزینه‌های بسیار زیاد توسعه منابع آبی جدید و حفاظت محیط‌زیست، انگیزه استفاده از آب‌های نامتعارف از جمله پساب‌ها

را ضروری می‌سازد. یافتن راه‌های سریع‌تر و ارزان‌تر برای اصلاح این آب‌ها بسیار با اهمیت است. یکی از راه‌کارها، استفاده از فناوری‌های نوین از جمله فناوری مغناطیسی به‌عنوان یک روش دوست‌دار محیط زیست می‌تواند بسیار مفید باشد. عبور آب از یک میدان مغناطیسی باعث تغییر بعضی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب مانند کشش سطحی، قابلیت حل نمک‌ها، تغییر ساختار خوشه‌ای، زنجیره پیوند هیدروژنی مولکول‌ها، افزایش اثرات دوقطبی مولکول‌های آب و تغییر در ضریب شکست نور و اسیدیته آب می‌شود (Heidarpour *et al*., 2016; Khoshravesh *et al*., 2018). این تغییرات به‌وجود آمده به‌واسطه عبور آب از یک میدان مغناطیسی به عوامل بسیاری بستگی دارد، مانند شدت میدان مغناطیسی، جهت میدان، مدت‌زمان قرار گرفتن در معرض میدان مغناطیسی، نرخ جریان محلول، کیفیت و pH آب (Mostafazadeh-Fard *et al*., 2011). از این‌رو، قرار گرفتن گیاهان در میدان‌های مغناطیسی و یا عبور دادن آب مورد استفاده برای آبیاری آن‌ها از یک میدان مغناطیسی و پاسخ متفاوت گیاهان به شدت‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی می‌تواند راهی جهت افزایش کیفیت آب، کمیت و کیفیت محصول باشد (Ghadami Firouzabadi *et al*., 2016). در تحقیق دیگری نشان داده شد که آب مغناطیسی سبب افزایش نفوذپذیری غشای سلولی دانه، تغییر pH دو طرف غشای سلولی، افزایش فعالیت یون کلسیم و کاهش فعالیت موجودات ذره‌بینی مضر می‌شود (Biryukov *et al*., 2005).

با توجه به وجود منبع پساب تصفیه‌شده در شهرستان بابلسر و همچنین کشت گیاه ذرت در منطقه، استفاده از اهمیت برخوردار می‌باشد (Pourgholam-Amiji *et al*., 2022). همچنین راهکار مغناطیسی نمودن آب می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای برای کاهش اثرات منفی فلزات سنگین در خاک و در نهایت، کاهش انتقال آن‌ها به گیاه مطرح باشد. تاکنون پژوهش‌هایی در مورد اثر آب مغناطیسی بر خاک و گیاهان انجام شده ولی در مورد اثر پساب متأثر از میدان مغناطیسی بر میزان تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه، به انجام نرسیده است. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر فاضلاب تصفیه‌شده و سپس بر میزان جذب فلزات سنگین در اندام‌های هوایی گیاه ذرت با روش آبیاری قطره‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹۹ در مزرعه روستای آرمیچ‌کلای شهرستان بابلسر (استان مازندران) با مختصات ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه عرض جغرافیایی (°N) و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول جغرافیایی (°E) در ارتفاع ۲۱- متر از سطح دریاهای آزاد انجام شد. طبق داده‌های درازمدت و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه دارای آب‌وهوای مرطوب می‌باشد. مطابق آمار درازمدت ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱)، متوسط بارندگی سالانه منطقه ۸۹۱ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوا ۱۷/۵ درجه سلسیوس است (Pourgholam-Amiji *et al*., 2021). شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزرعه مورد مطالعه

گیاه ذرت رقم SC 704 در لایسیمتر کشت شد. لایسیمترها از جنس PVC با قطر ۶۰ ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر بودند و روی سطح زمین قرار داشتند. برای خارج کردن آب اضافی لایسیمترها، لوله‌های PVC به قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر استفاده شدند. روی لوله‌ها سوراخ‌هایی به قطر دو میلی‌متر و به فاصله ۲/۵ سانتی‌متر در ۴ ردیف در ۵۰ سانتی‌متر از طول لوله به‌عنوان زهکش در نظر گرفته شد. به‌منظور جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون لوله‌های زهکش، از صافی ژئوتکستایل در اطراف لوله زهکش استفاده شد. این صافی پس از دوخت به‌صورت پوششی هم‌قطر با لوله، به دور آن کشیده شد. لوله‌های زهکشی به‌طور افقی در پنج سانتی‌متری کف لایسیمتر قرار گرفتند؛ به‌طوری‌که سر مسدود آن‌ها در داخل لایسیمتر و سر باز آن‌ها، خارج از لایسیمتر قرار می‌گرفت. محل اتصال لوله با بدنه لایسیمتر از داخل و بیرون آب‌بندی شد (Liaghat *et al*., 2021; Khoshravesh *et al*., 2021a; Pourgholam-Amiji *et al*., 2022).

خاک مورد استفاده برای پرکردن لایسیمترها از باغی در مجاورت اراضی زراعی منطقه تهیه شد. ضمن اینکه قبلا هیچ گونه فاضلابی در آن استفاده نشده بود. پر کردن لایسیمترها با استفاده از خاک مزرعه در چند مرحله انجام شد. خاک به‌صورت لایه‌ای به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در لایسیمترها ریخته شد و پس از تسطیح، لایه بعدی اضافه شده بود. با رسیدن ارتفاع خاک به میانه لایسیمترها، جهت نشست و تحکیم، مقداری آب به خاک اضافه شد و اضافه کردن خاک تا پر شدن لایسیمتر ادامه یافت. سپس مجدداً با افزودن آب و پس از نشست، فضای خالی باقی‌مانده تا ارتفاع پنج سانتی‌متر پایین‌تر از لبه فوقانی لایسیمترها، از خاک پر شد. برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، ابتدا آبیاری سنگین انجام شد و قبل از شروع آزمایش و اعمال تیمارها، نمونه‌برداری از خاک لایسیمترها انجام شد (Liaghat *et al*., 2021; Khoshravesh *et al*., 2021b; Pourgholam-Amiji *et al*., 2022). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک لایسیمترها

عمق (سانتی‌متر)	ذرات تشکیل‌دهنده خاک (٪)			بافت خاک	چگالی ظاهری ρ_b (g/cm^3)	اسید یته pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	سرب Pb	کادمیوم Cd	روی Zn	نیکل Ni
	رس	سیلت	شن					mg/kg			
۳۰-۰	۱۹/۶۹	۴۵/۰۴	۳۵/۲۷	لوم	۱/۴۸	۷/۴	۱/۸	۱/۰۱	۰/۰۲۲	۲/۱۷	۰/۰۰۶
۶۰-۳۰	۱۹/۳۴	۴۵/۱۶	۳۵/۵۰	لوم	۱/۵۰	۷/۳	۱/۹	۱/۰۰	۰/۰۲۲	۲/۳۱	۰/۰۰۵
۹۰-۶۰	۱۹/۵۵	۴۵/۳۹	۳۵/۰۶	لوم	۱/۵۵	۷/۵	۱/۸	۱/۰۲	۰/۰۲۵	۲/۱۹	۰/۰۰۷

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل آبیاری با آب چاه (W_1)، آبیاری با اختلاط ۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه (W_2)، آبیاری با اختلاط ۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه (W_3)، آبیاری با اختلاط ۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه (W_4)، آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب (W_5) در شرایط اعمال میدان مغناطیسی (I_1) و بدون میدان مغناطیسی (I_2) بود. مغناطیس نمودن آب آبیاری با عبور آب از میان یک آهن‌ربای دائمی با شدت میدان مغناطیسی ۰/۳ تسلا انجام شد. علت انتخاب این شدت، تأثیرگذاری مناسب آن بود که در پژوهش‌های قبلی مشاهده شد (Mostafazadeh-Fard *et al*., 2011; Heidarpour *et al*., 2016). برای انجام آزمایش حاضر و با توجه به تعداد تیمارها و تکرارها، مجموعاً ۳۰ عدد لایسیمتر مورد نیاز بود. خصوصیات شیمیایی آب چاه و پساب مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی آب و پساب مورد استفاده

نوع منبع	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	اسیدیته pH	کلسیم Ca	منیزیم Mg	سدیم Na	سرب Pb	کادمیوم Cd	روی Zn	نیکل Ni
			meq/l			µg/l			
آب چاه	۰/۵۷	۷/۲	۲/۹۲	۲/۱۱	۱/۶۲	۱/۰۲	۰/۰۱	۲/۱۸	۰/۰۰۵
پساب	۱/۱۱	۷/۹	۴/۳۵	۴۱/۵۷	۱۲/۱۷	۱۳/۱۵	۰/۰۲۵	۲۴/۳۵	۰/۲۲

پساب مورد نظر از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهرستان بابلسر (بخش شرقی) تهیه شد. فرایند تصفیه در این تصفیه‌خانه از نوع لجن فعال بوده و پساب مورد نظر از خروجی نهایی تهیه شد. سپس درون سطل‌های مخصوص ریخته و درب ظرف پلمپ شد تا واکنشی با هوای بیرون رخ ندهد. در نهایت بعد از انتقال پساب مورد نظر به محل آزمایش، درصدهای مختلف اختلاط پساب با آب چاه به‌منظور آبیاری گیاه استفاده شد. در این آزمایش، آبیاری لایسیمترها به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی شد. بخش اول از تاریخ کشت (ابتدای تیرماه

۱۳۹۹) شروع شد و تا زمانی که ریشه گیاه برای استحصال آب از پروفیل خاک به حد کافی رشد کرده باشد، ادامه یافت. نوع سیستم همان قطره‌ای بود. بخش دوم، از انتهای بخش اول تا روز برداشت (اوایل آبان ۱۳۹۹) بود. اعمال تیمارها از ابتدای بخش دوم شروع شد زیرا از قبل از این مرحله، گیاه رشد کافی نداشته و به هر تنش محیطی و مدیریتی حساس است. بنابراین سعی شد که ابتدا شرایط گیاه پایدار شده و سپس اعمال تیمار صورت گیرد. در هر لایسیمتر، نهایتاً ۱۰ عدد بوته ذرت به رشد نهایی رسید. عملیات زراعی نیز طبق عرف منطقه انجام شد.

روش آبیاری مورد استفاده، قطره‌ای بوده و میزان آب آبیاری و دور آبیاری بر اساس نیاز گیاه انجام شد. دبی خروجی‌ها ۱/۶ لیتر در ساعت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر بوده و با توجه به نوع سیستم آبیاری قطره‌ای و کیفیت آب (شاخص اشباع لانژلیر)، به آبشویی نیازی نبود. اعمال تیمار در آبیاری قطره‌ای پس از پنج–شش برگه شدن (حدود یک ماه پس از کاشت) انجام گرفت. با توجه به درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD) ۵۰ درصد، دور آبیاری ۳ روز و در نظر گرفتن راندمان ۹۰ درصد، نیاز آبیاری مشخص شد و جمعاً ۲۸ آبیاری اعمال شد. مقادیر آبیاری در هر تیمار توسط کنتور حجمی اعمال شد که محاسبات آن به‌صورت زیر می‌باشد (Sohrabi & Paydar, 2016):

رابطه ۱) $$Td = ETc \times [0.15 + 0.85\,Pd]$$

رابطه ۲) $$d_n = Td \times F$$

رابطه ۳) $$d_g = \frac{d_n}{E}$$

رابطه ۴) $$V = dg \times A$$

که در آن ET_C تبخیر و تعرق گیاه ذرت (میلی‌متر در روز)، Td حداکثر تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز)، Pd سطح سایه‌انداز (برحسب درصد)، F دور آبیاری (روز)، dn عمق خالص آبی در هر دور آبیاری (میلی‌متر)، dg عمق ناخالص آبی در هر دور آبیاری (با توجه به راندمان ۹۰ درصد آبیاری قطره‌ای برحسب میلی‌متر)، V حجم آب‌داده شده به تیمار (مترمکعب) و A مساحت کرت (برحسب مترمربع) (Sohrabi & Paydar, 2016; Mohammadkhani *et al*., 2020). در پایان دوره آزمایش، از تمامی تیمارها و تکرارها نمونه‌گیری صورت گرفت و عناصر سرب، کادمیوم، نیکل و کروم در بوته و دانه گیاه ذرت اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقدار فلزات در نمونه‌های مورد نظر، از روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS[1]) استفاده شد. تکنیک AAS برای تعیین مقادیر بسیار ناچیز غلظت فلزات (در حد ppm)، ppm)، در نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Abedi-Koupai *et al*., 2013; Pourgholam-Amiji *et al*., 2020b; Liaghat *et al*., 2021). در پایان داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه 9.4) تحلیل استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

غلظت فلزات سنگین اندام هوایی ذرت

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر غلظت فلزات سنگین اندام هوایی گیاه ذرت در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس ارائه‌شده در جدول (۳)، اثر نوع آبیاری بر غلظت فلزات سرب، کادمیوم، روی و نیکل در اندام هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال ۱ درصد و اثر اختلاط آب و پساب بر غلظت فلزات سنگین در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد؛ اثر متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر غلظت فلزات سرب، کادمیوم، روی و نیکل در اندام هوایی گیاه ذرت معنی‌دار نشد.

جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر فاکتورهای مختلف بر غلظت فلزات سنگین اندام هوایی ذرت

منبع تغییرات	درجه آزادی	سرب (µg/l)	کادمیوم (µg/l)	روی (µg/l)	نیکل (µg/l)
بلوک	۲	۲۲/۳۴**	۹/۳۲**	۳۶/۱۹**	۱۹/۰۱**
نوع آبیاری	۱	۳۵۰/۰۷**	۲۰۳/۰۸**	۴۷۲/۰۶**	۲۴۵/۲۸**
اختلاط آب و پساب	۴	۳۰/۰۸*	۱۸/۴۶*	۴۸/۱۱*	۲۵/۱۸*
نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۲۳/۴۱^{ns}	۹/۶۲^{ns}	۲۲/۸۶^{ns}	۱۴/۲۴^{ns}
خطا	۱۸	۶/۱۲	۴/۰۴	۶/۷۳	۴/۵۷

*، ** و ^{ns} به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

1- Atomic Absorption Spectroscopy

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی نشان می‌دهد که غلظت تمامی فلزات سنگین در تیمارهای مغناطیسی کمتر از غیرمغناطیسی است و این اختلاف در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۴). با اعمال میدان مغناطیسی غلظت فلزات سرب، کادمیوم، روی و نیکل در اندام هوایی گیاه به‌ترتیب ۱۷/۸۴، ۱۵/۹، ۱۴/۲۲ و ۱۳/۹۲ درصد نسبت به تیمار غیرمغناطیسی کاهش داشت. همان‌طور که مشخص است، بیشترین و کمترین اثر میدان مغناطیسی مربوط به فلزات سرب و نیکل می‌باشد. کمتر بودن مقدار فلزات سنگین موجود در اندام هوایی گیاه در تیمار مغناطیسی نسبت به تیمار غیرمغناطیسی به دلیل آبشویی املاح و فلزات سنگین پساب مغناطیسی شده است. Khoshravesh *et al.* (2021b) در پژوهشی که بر روی اثر آبیاری با پساب مغناطیسی بر خصوصیا شیمیایی و فلزات سنگین خاک انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مقدار سرب و کادمیوم خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف معنی‌دار بود. به‌طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۵/۲۵ درصدی مقدار سرب و کاهش ۵۶/۱۱ درصدی مقدار کادمیوم در پروفیل خاک شد.

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای اختلاط آب و پساب نشان می‌دهد که بین تمامی تیمارهای اختلاط، اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد. حداکثر مقدار غلظت مربوط به عنصر روی و برابر ۹۳/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۳/۹۴ برابر افزایش داشت. افزایش مواد آلی خاک توسط پساب باعث افزایش جذب سرب، کادمیوم، روی و نیکل توسط گیاه شده است. نتایج این بخش از پژوهش با یافته‌های Ahmad *et al.* (2011) مطابقت دارد. آن‌ها در پژوهشی که گیاه کلزا با پساب شهری در پاکستان آبیاری شد، دریافتند که افزایش درصد پساب در آب آبیاری موجب افزایش مقدار عناصر کروم، کادمیوم و سرب در اندام هوایی کلزا می‌شود. سرب در کلزا بین ۱/۵۲–۰/۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم تجمع یافت، که در حد مجاز بود. Khoshravesh *et al.* (2021b) نیز نشان دادند که با افزایش مقدار پساب مورد استفاده در آبیاری، غلظت فلزات سنگین خاک افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش غلظت فلزات سنگین خاک باعث جذب بیشتر در اندام هوایی گیاه شده است. Fatahi Kiasari *et al.* (2010) گزارش کردند که ذرت می‌تواند نسبت به گیاهانی مانند آفتاب‌گردان و پنبه مقادیر بیشتری سرب در اندام هوایی انباشت نماید. Rezaenejad & Afyuni (2001) نیز در بررسی اثر مواد آلی بر جذب عناصر به‌وسیله ذرت بیان کردند که کودهای آلی باعث افزایش معنی‌دار جذب روی، مس و آهن خاک شد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

کمترین غلظت جذب فلزات سنگین در اندام هوایی گیاه مربوط به کادمیوم می‌باشد که در تیمار ۱۰۰ درصد پساب بیشترین مقدار را داشت و نسبت به تیمار شاهد ۶/۰۸ برابر بود (جدول ۴). در پژوهشی Marchiol *et al.* (2004) با بررسی گیاه‌پالایی خاک آلوده به فلزات سنگین با استفاده از کلزا و تربچه گزارش کردند کـه غلظت نیکل در اندام هوایی تربچه بیشتر از کلزا بود. فاکتور انتقال برای روی و کادمیوم، بیشتر از سرب و کروم بوده و بـرای مـس و نیکـل، در حد متوسط بود.

جدول ٤. مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین اندام هوایی ذرت

تیمار آزمایشی	سرب (µg/l)	کادمیوم (µg/l)	روی (µg/l)	نیکل (µg/l)
نوع آبیاری				
مغناطیسی	۱۱/۲۱ b	۰/۳۷ b	۵۰/۳۰ b	۳/۰۹ b
غیرمغناطیسی	۱۳/۲۱ a	۰/۴۴ a	۵۸/۶۴ a	۳/۵۹ a
اختلاط آب و پساب				
آب چاه	۳/۷۵ e	۰/۱۲ e	۱۸/۸۶ e	۱/۰۷ e
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۶/۵۶ d	۰/۲۳ d	۳۵/۱۲ d	۱/۸۶ d
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۱۱/۱۹ c	۰/۳۸ c	۵۳/۴۰ c	۳/۲۵ c
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۱۷/۰۲ b	۰/۵۷ b	۷۱/۷۸ b	۴/۵۶ b
۱۰۰ درصد پساب	۲۲/۵۳ a	۰/۷۳ a	۹۳/۱۹ a	۵/۹۶ a

میانگین‌ها با آزمون Duncan در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده‌اند.

برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نمی‌باشد.

غلظت فلزات سنگین دانه ذرت

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر غلظت فلزات سنگین دانه ذرت در جدول (۵) ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول (۵)، اثر نوع آبیاری و همچنین اثر اختلاط آب و پساب بر غلظت سرب، کادمیوم، روی و نیکل در دانه ذرت در سطح احتمال

۱ درصد معنی‌دار شد؛ اثر متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر غلظت سرب، کادمیوم، روی و نیکل در دانه ذرت معنی‌دار نشد.

جدول ۵. تجزیه واریانس تأثیر فاکتورهای مختلف بر غلظت فلزات سنگین دانه ذرت

منبع تغییرات	درجه آزادی	سرب (µg/l)	کادمیوم (µg/l)	روی (µg/l)	نیکل (µg/l)
بلوک	۲	۲۶/۰۹**	۱۸/۰۹**	۳۱/۳۶**	۱۵/۷۹**
نوع آبیاری	۱	۳۷۸/۱۸**	۳۴۱/۲۲**	۴۲۵/۰۸**	۲۰۱/۳۶**
اختلاط آب و پساب	۴	۳۲/۵۱**	۲۷/۷۴**	۳۹/۴۳**	۲۲/۶۵**
نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۲۰/۲۴^{ns}	۱۵/۰۳^{ns}	۱۳/۲۹^{ns}	۱۰/۹۷^{ns}
خطا	۱۸	۵/۹۸	۴/۶۹	۳/۱۷	۳/۸۰

*، ** و ^{ns} به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

بر اساس جدول (۶)، نتایج مقایسه میانگین تیمارهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی نشان می‌دهد که غلظت سرب، کادمیوم، روی و نیکل در تیمارهای مغناطیسی کمتر از غیرمغناطیسی است و این اختلاف در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. با اعمال میدان مغناطیسی غلظت فلزات سرب، کادمیوم، روی و نیکل در دانه گیاه به‌ترتیب ۱۳/۹۷، ۱۴/۵۲، ۱۲/۹۵ و ۱۳/۷۱ درصد نسبت به تیمار غیرمغناطیسی کاهش داشت. بیشترین و کمترین اثر میدان مغناطیسی مربوط به فلزات کادمیوم و روی می‌باشد. آب مغناطیسی با کاهش املاح موجود در خاک باعث جذب کمتر عناصر در دانه گیاه می‌شود. در پژوهشی Mostafazadeh-Fard *et al.* (2012) اثر آب مغناطیسی بر املاح و رطوبت خاک در عمق‌های مختلف را بررسی و گزارش نمودند که شوری خاک در تیمار آب مغناطیسی در مقایسه با آب غیرمغناطیسی، کاهش داشت. آن‌ها بیان کردند که افزایش ۷/۵ درصدی مقدار رطوبت خاک در تیمار آب مغناطیسی، باعث آبشویی میزان املاح خاک شد. در شرایط مغناطیسی، مولکول‌های آب تحت تأثیر پیوندهای هیدروژنی و نیروهای واندروالس قرار گرفتند و از آنجایی که در واکنش با یون‌ها بودند، آزاد شدند و آب را منسجم‌تر کردند. بنابراین مولکول‌های آب به راحتی به ذرات خاک چسبیده و به اعماق پایین خاک حرکت نکردند و مولکول‌های آب به راحتی به داخل منافذ و خلل و فرج خاک نفوذ کرده و از حرکت به اعماق پایین خاک جلوگیری می‌کنند. Khoshravesh & Kiani (2015) شوری‌های مختلف آب آبیاری در شرایط اعمال میدان مغناطیسی را بر هدایت الکتریکی عمق‌های مختلف خاک بررسی و گزارش کردند که استفاده از آب مغناطیسی باعث کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی در عمق‌های مختلف خاک شد و این اثر در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. کاهش هدایت الکتریکی خاک در تیمار آب مغناطیسی به علت حذف مواد محلول به وسیله آبشویی با آب مغناطیسی در مقایسه با آب غیرمغناطیسی می‌باشد.

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای اختلاط آب و پساب نشان می‌دهد که بین تمامی تیمارهای اختلاط، اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد (جدول ۶). جذب تمامی عناصر در دانه ذرت در تیمار ۱۰۰ درصد پساب بیشترین مقدار را داشت. با افزایش درصد پساب مورد استفاده در آبیاری، عملکرد بیولوژیک و دانه افزایش یافته و در نتیجه جذب فلزات سنگین نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد. حداکثر مقدار غلظت مربوط به عنصر روی و برابر ۷۴/۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۴/۹۳ برابر افزایش داشت. کمترین غلظت جذب فلزات سنگین در دانه ذرت مربوط به عنصر نیکل می‌باشد که در تیمار ۱۰۰ درصد پساب بیشترین مقدار را داشت و نسبت به تیمار شاهد ۵/۶۴ برابر بود. جذب فلزات سنگین در اندام هوایی و دانه گیاه ذرت نشان داد که مقدار غلظت سرب و کادمیوم در دانه بیشتر از اندام هوایی بوده است، ولی غلظت عناصر روی و نیکل در اندام هوایی گیاه بیشتر از دانه شد. نتایج این بخش از پژوهش با یافته‌های Alizadeh *et al.* (2009) مطابقت دارد.

حداکثر مقدار مجاز سرب در گیاه برای مصرف انسان برابر ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (Alloway, 1990) که بر اساس نتایج جدول‌های (۴) و (۶)، در تمامی تیمارهای اختلاط آب و پساب، بیشتر از حد مجاز می‌باشد. مقدار سرب در گیاه آلوده برابر ۳۰۰–۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. مقدار مجاز کادمیوم در گیاه برای مصرف انسان برابر ۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد که در این صورت خاک‌ها نباید بیش از ۲–۱/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم عنصر کادمیوم را دارا باشند که این مقدار در خاک‌های ماسه‌ای کمتر است (Torabian & Mahjori, 2002). غلظت کادمیوم در خاک مورد مطالعه کمتر از این مقدار بود و غلظت آن در گیاه بیشتر از حد مجاز می‌باشد. میزان کادمیوم در گیاه آلوده برابر ۳۰–۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. حضور کادمیوم باعث کاهش سرعت رشد، تبخیر و تعرق و جذب یون توسط گیاه شده و با کاهش جذب آب و غلظت سایر یون‌ها، مانع انجام فعالیت ریشه می‌شود به‌طوری‌که این عنصر باعث کاهش فعالیت هورمون سیتوکنین

شده که تأثیر زیادی در تکثیر سلول و رشد گیاه دارد (Fathi *et al.*, 2017).

جدول ٦. مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین دانه ذرت

تیمار آزمایشی	سرب (µg/l)	کادمیوم (µg/l)	روی (µg/l)	نیکل (µg/l)
نوع آبیاری				
مغناطیسی	۲۴/۸۷ b	۴/۱۸ b	۴۱/۲۰ b	۱/۹۵ b
غیرمغناطیسی	۲۸/۹۱ a	۴/۸۹ a	۴۷/۳۳ a	۲/۲۶ a
اختلاط آب و پساب				
آب چاه	۹/۱۶ e	۱/۰۵ e	۱۵/۰۵ e	۰/۶۴ e
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۲۱/۵۲ d	۲/۸۷ d	۲۸/۶۳ d	۱/۳۹ d
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۲۷/۳۹ c	۴/۵۸ c	۴۳/۷۲ c	۲/۰۵ c
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۳۴/۰۸ b	۶/۲۱ b	۵۹/۶۰ b	۲/۸۳ b
۱۰۰ درصد پساب	۴۲/۳۰ a	۷/۹۷ a	۷۴/۳۲ a	۳/۶۱ a

میانگین‌ها با آزمون Duncan در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده‌اند.

برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نمی‌باشد.

حد مجاز عنصر روی در گیاه برای مصرف انسان برابر با ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد که بر اساس غلظت اندام هوایی و دانه که در این پژوهش حاصل شده است، در حد مجاز می‌باشد. میزان روی در گیاهان آلوده ۴۰۰–۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (Alloway, 1990) که بر اساس نتایج پژوهش حاضر، درصد استفاده بیشتر از ۲۵ درصد از پساب برای گیاه ذرت باعث آلودگی گیاه ذرت به عنصر روی می‌شود. مقدار متوسط نیکل که روزانه از طریق تغذیه وارد بدن انسان می‌شود برابر ۵۰۰–۴۰۰ میکروگرم می‌باشد. میزان نیکل در گیاه آلوده برابر ۱۰۰–۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. که بر اساس مقادیر موجود در جدول‌های (۴) و (۶)، مشخص است که غلظت عنصر نیکل در حد مجاز می‌باشد. به‌طورکلی نتایج نشان داد که برخلاف غلظت کم فلزات سنگین در پساب، مقادیر این عناصر در اندام هوایی و دانه گیاه بیشتر شده و غلظت برخی عناصر از حد مجاز آن در گیاه برای مصرف انسان نیز فراتر رفته است. خاک‌های دارای غلظت زیاد فلزات سنگین و اسیدیته کم، بیشترین خطر را برای انسان دارند. تا زمانی که اسیدیته کاهش نیابد، خطر انحلال و تحرک زیاد فلزات سنگین و جذب توسط گیاه کم می‌باشد. بنابراین بایستی مخاطرات زیست‌محیطی استفاده از پساب برای آبیاری گیاهان را مدنظر داشت.

نتیجه‌گیری

رشد روزافزون جمعیت به همراه گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی جهت تأمین غذا و همچنین خشک‌سالی‌های پی‌درپی در سال‌های اخیر، موجب شده است که منابع موجود آب شیرین سطحی به اوج بهره‌برداری برسد و فشار بیش از حد به منابع آب به‌ویژه منابع آب زیرزمینی وارد آید. بنابراین اجرای تدابیری به‌منظور توسعه و بهره‌برداری صحیح و به جا از منابع آب نامتعارف مانند استفاده از زهاب‌های کشاورزی و پساب‌های صنعتی، شهری و روستایی به‌ویژه در بخش کشاورزی می‌تواند تا حدودی به رفع مشکلات مربوط به کمبود منابع آبی کمک نماید؛ به‌طوری‌که با بهره‌برداری از فاضلاب تصفیه‌شده می‌توان آب‌های با کیفیت بهتر را در موارد با اهمیت‌تری به کار برد. در پژوهش حاضر، اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر جذب فلزات سنگین توسط گیاه ذرت در قالب پژوهشی لایسیمتری و در یک دوره زراعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آبیاری با درصد اختلاط‌های مختلف آب و پساب در شرایط اجرای این پژوهش و اعمال میدان مغناطیسی، باعث کاهش معنی‌دار غلظت فلزات سنگین جذب‌شده در گیاه و محصول ذرت شد. استفاده از پساب نیز باعث افزایش سرب، کادمیوم، روی و نیکل شد که بیشترین مقدار در تیمار ۱۰۰ درصد پساب مشاهده شد. جذب فلزات سنگین به وسیله گیاه به مقدار زیاد باعث آلودگی زنجیره غذایی انسان و دام می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abedi-Koupai, J., Khoshravesh, M., & Zanganeh, M. E. (2013). Distribution of moisture and salinity under deficit irrigation and irrigation water salinity in an alternative trickle irrigation system of tape. *Water Science and Technology: Water Supply*, *13*(2), 394-402.

Ahmad, K., Ejaz, A., Azam, M., Khan, Z. I., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., ... & Valeem, E. E. (2011). Lead,

cadmium and chromium contents of canola irrigated with sewage water. *Pak J Bot*, *43*(2), 1403-1410.

Alizadeh, M., Fathi, F., & Torabian, A. (2009). A Survey of Heavy Metals Accumulation in Foraging Plants Irrigated by Sewage in South of Tehran, Case study: Maize & Alfalfa. *Journal of Environmental Studies, 34*(48), 137-148. (In Persian)

Alloway, B. J. (1990). Heavy Metals in Soils. *John Wiley and Sons Inc*., New York, PP. 20-27.

Amouei, A., Cherati, A., & Naghipour, D. (2018). Heavy metals contamination and risk assessment of surface soils of Babol in northern Iran. *Health Scope*, *7*(1), e62423.

Amusan, A. A., Ige, D. V., & Olawale, R. (2005). Characteristics of soils and crops' uptake of metals in municipal waste dump sites in Nigeria. *Journal of Human Ecology*, *17*(3), 167-171.

Behbahaninia, A., Azadi, A., & Sadeghian, S. (2010). Effect of wastewater irrigation on the accumulation of heavy metals in some vegetables in Roodehen region. *Crop Research, 2*(2), 165-173. (In Persian)

Beigi Harchegani, H., & Banitalebi, G. (2013). The Effect of Twenty-Three Years of Surface Irrigation with Treated Municipality Wastewater on Soil Loadings, Transfer to Wheat and Corn Grains, and Related Health Risks of Some Heavy Metals. *Journal of Water and Soil*, *27*(3), 570-580. (In Persian)

Biryukov, A. S., Gavrikov, V. F., Nikiforova, L. O., & Shcheglov, V. A. (2005). New physical methods of disinfection of water. *Journal of Russian Laser Research*, *26*(1), 13-25.

Cimboláková, I., Uher, I., Laktičová, K. V., Vargová, M., Kimáková, T., & Papajová, I. (2020). Heavy metals and the environment. *Environ. Factors Affect. Hum. Heal*, *10*.

Dehvari, M., & Babaei, A. (2022). Analysis of heavy metals and PAHs in the waste resulting from hookah consumption: Ahvaz City, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-8.

Devkota, B., & Schmidt, G. H. (2000). Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. *Agriculture, ecosystems & environment*, *78*(1), 85-91.

Fatahi Kiasari, E., Fotovvat, A., Astaraei, A., & Haghnia G. (2010). Lead Phytoextraction from Soil by Corn, Sunflower, and Cotton Applying EDTA and Sulfuric Acid. *Journal of Water and Soil Science, 14*(51), 57-69. (In Persian)

Fathi, E., Parsinejad, M., Mirzaei, F., & Motesharezadeh, B. (2017). Effects of salinity and soil contaminated with sewage on cadmium uptake by corn. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *48*(2), 359-368. (In Persian)

Ghadami Firouzabadi., Khoshravesh, M., Shirazi, P., & Zareabyaneh, H. (2016). Effect of Irrigation with Magnetized Water on the Yield and Biomass of Soybean var. DPX under Water Deficit and Salinity Stress. *Journal of Water Research in Agriculture*, *30*(1), 131-143. (In Persian)

Heidarpour, M., Khoshravesh, M., & Moshaveri, Y. (2016). Effect of magnetized saline water on soil and water amendment in trickle irrigation. *Journal of Water and Soil Conservation*, *23*(2), 179-193. (In Persian)

Karimi, B., Abdi, Ch., Fathi Tilko., & Gavilian, H. (2016). Effect of Irrigation with Treated Urban Wastewater on Heavy Metals Accumulation and Distribution in Soil Profile under Corn and Tomato. *Journal of Water Research in Agriculture*, *30*(1), 89-101. (In Persian)

Khatun, S., Ali, M. B., Hahn, E. J., & Paek, K. Y. (2008). Copper toxicity in Withania somnifera: growth and antioxidant enzymes responses of in vitro grown plants. *Environmental and experimental botany*, *64*(3), 279-285.

Khoshravesh, M., & Kiani, A. (2015). The Effect of Magnetized Saline Water on Infiltration and Electrical Conductivity in Different Soil Textures. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *9*(4), 646-654. (In Persian)

Khoshravesh, M., Divband, L., Motamedi, F., & Reihany, G. (2016). The effects of cadmium on the adsorption of Cr (VI) by nano clay (Cloisite®Na+). *Journal of Water and Soil Conservation*, *23*(3), 241-256. (In Persian)

Khoshravesh, M., Erfanian, F., & Pourgholam-Amiji, M. (2021a). The Effect of Irrigation with Treated Magnetic Effluent on Yield and Yield Components of Maize. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 115-128. (In Persian)

Khoshravesh, M., Hosseini, S., & Pourgholam-Amiji, M. (2021b). The Effect of Irrigation with Magnetically Treated Effluent on Chemical Properties and Soil Heavy Metals. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(8), 2191-2203. (In Persian)

Khoshravesh, M., Mirzaei, S. M. J., Shirazi, P., & Norooz Valashedi, R. (2018). Evaluation of dripper clogging using magnetic water in drip irrigation. *Applied Water Science*, *8*(3), 1-8.

Latosińska, J., Kowalik, R., & Gawdzik, J. (2021). Risk assessment of soil contamination with heavy metals from municipal sewage sludge. *Applied Sciences*, *11*(2), 548.

Liaghat, A., Oveysi, M., Ebrahimian, H., Pourgholam-Amiji, M., & Saleh, M. (2021). Effect of Using Lead-Contaminated Water by Surface Irrigation and Subirrigation on Silage Maize Yield and Uptake. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15*(1), 1-16. (In Persian)

Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P., & Zerbi, G. (2004). Phytoextraction of heavy metals by canola (Brassica napus) and radish (Raphanus sativus) grown on multicontaminated soil. *Environmental Pollution*, *132*(1), 21-27.

Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L., & Alberdi, M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of soil science and plant nutrition*, *10*(4), 470-481.

Mohammadkhani, A., Pourgholam-Amiji, M., Sohrabi, T., & Liaghat, A. (2020). The Effect of Different Levels of Water Stress in Two Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems on Yield and Water Productivity of Maize. *Water and Irrigation Management*, *10*(2), 247-264. (In Persian)

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. *Romanian Agricultural Research*, *28*, 217-222.

Mostafazadeh-Fard, B., Khoshravesh, M., Mousavi, S. F., & Kiani, A. R. (2012). Effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *138*(12), 1075-1081.

Mostafazadeh-Fard, B., Khoshravesh, M., Mousavi, S. F., & Kiani, A. R. (2011). Effects of magnetized water on soil sulphate ions in trickle irrigation. In *2nd International conference on environmental engineering and applications. IACSIT Press, Singapore* (Vol. 17).

Muchuweti, M., Birkett, J. W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M. D., & Lester, J. N. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *112*(1), 41-48.

Park, J., Kim, J. Y., & Kim, K. W. (2012). Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals using Brassica napus. *Geosystem Engineering*, *15*(1), 10-18.

Parsafar, N., & Marofi, S. (2013). Investigation of Transfer Coefficients of Cd, Zn, Cu and Pb from Soil to Potato under Wastewater Reuse. *Journal of Water and Soil Science*, *17*(66), 199-209. (In Persian)

Pourgholam-Amiji, M., Ansari Ghojghar, M., Khoshravesh, M., & Liaghat, A. (2020a). Trends of Soil Salinity Changes and Its Relation to Climate Variables. *Water Management in Agriculture*, *6*(2), 77-90. (In Persian)

Pourgholam-Amiji, M., Khoshravesh, M., Divband Hafshejani, L., & Ghadami Firouzabadi, A. (2022). The Effect of Irrigation with Treated Magnetic Effluent on Water Productivity of Maize. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *16*(1), 243-253.

Pourgholam-Amiji, M., Khoshravesh, M., Waqas, M. M., & Mirzaei, S. M. J. (2020b). Study of Combined Magnetized Water and Salinity on Soil Permeability in North of Iran. *Big Data in Agriculture (BDA)*, *2*(2), 69-73.

Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Khoshravesh, M., & Azamathulla, H. M. (2021). Improving rice water productivity using alternative irrigation (case study: north of Iran). *Water Supply*, *21*(3), 1216-1227.

Pruvot, C., Douay, F., Hervé, F., & Waterlot, C. (2006). Heavy metals in soil, crops and grass as a source of human exposure in the former mining areas (6 pp). *Journal of soils and sediments*, *6*(4), 215-220.

Rattan, R. K., Datta, S. P., Chhonkar, P. K., Suribabu, K., & Singh, A. K. (2005). Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agriculture, ecosystems & environment*, *109*(3-4), 310-322.

Razanov, S. F., Tkachuk, O. P., Bakhmat, O. M., & Razanova, A. M. (2020). Reducing danger of heavy metals accumulation in winter wheat grain which is grown after leguminous perennial precursor. *Ukrainian Journal of Ecology*, *10*(1), 254-260.

Rezaenejad, Y., & Afyuni, M. (2001). Effect of Organic Matter on Soil Chemical Properties and Corn Yield and Elemental Uptake. *Journal of Water and Soil Science*, *4*(4), 19-29. (In Persian)

Rezapour, S., Atashpaz, B., Moghaddam, S. S., & Damalas, C. A. (2019). Heavy metal bioavailability and accumulation in winter wheat (Triticum aestivum L.) irrigated with treated wastewater in calcareous soils. *Science of the Total Environment*, *656*, 261-269.

Rusan, M. J. M., Hinnawi, S., & Rousan, L. (2007). Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, *215*(1-3), 143-152.

Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment international*, *31*(5), 739-753.

Smith, C. J., Hopmans, P., & Cook, F. J. (1996). Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia. *Environmental pollution*, *94*(3), 317-323.

Sohrabi, T., & Paydar, Z. (2016). *Principles of Irrigation Systems Design*. University of Tehran Press, first edition, 410 pp. (In Persian)

Torabian, A., & Mahjori, m. (2002). Heavy metals uptake by vegetable crops irrigated with wastewater in south Tehran. *Journal of Water and Soil Science*, *16*(2), 188-196. (In Persian)

Yusuf, M., Fariduddin, Q., Hayat, S., & Ahmad, A. (2011). Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *86*(1), 1-17.

Zafarzadeh, A., Taghani, J. M., Toomaj, M. A., Ramavandi, B., Bonyadi, Z., & Sillanpää, M. (2021). Assessment of the health risk and geo-accumulation of toxic metals in agricultural soil and wheat, northern Iran. *Environmental monitoring and assessment*, *193*(11), 1-10.

Zhao, G., Mu, Y., Wang, Y., & Wang, L. (2022). Magnetization and oxidation of irrigation water to improve winter wheat (Triticum aestivum L.) production and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, *259*, 107254.

Zoqi M. J., & Doosti M. R. (2020). Study of Heavy Metal Accumulation in Plants Irrigated with Well Water and Wastewater from Birjand Wastewater Plant. *Journal of Environmental Health Engineering, 7*(2), 135-151. (In Persian)