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

The Effect of Irrigation with Magnetically Effluent on Soil Chemical Properties, Water Productivity and Heavy Metals Uptake by Maize

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

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: Khoshravesh_m24@yahoo.com and M.khoshravesh@sanru.ac.ir
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Mpourgholam6@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 6, 2023

Revised: June. 26, 2023

Accepted: July. 12, 2023

Published online: Aug. 23, 2023

Keywords:
Food Security,
Improving Water Quality,
Magnetic Technology,
Mixing of Water and Effluent,
Water Resources.

ABSTRACT

This research was conducted to investigate the effects of using the treated magnetic effluent on chemical properties and heavy metals of soil, water productivity, and uptake of heavy metals by Maize plants. To conduct the research, a factorial experiment was conducted in the form of a randomized complete block design with three replications in two crop seasons (2021 and 2022) in Babolsar City. The treatments included irrigation with well water, irrigation with a mixture of 25% effluent and 75% well water, irrigation with a mixture of 50% effluent and 50% well water, irrigation with a mixture of 75% effluent and 25% well water, and irrigation with 100% effluent in conditions. All these were in the conditions of application of magnetic field and without magnetic field effect. The results showed that the effect of irrigation water and mixing of water and effluent on electrical conductivity, solutes, and heavy metals in the soil at different depths was significant at the probability level of 1%. On average, irrigation with magnetic water decreased electrical conductivity by 33.05%, lead by 37.45%, and cadmium by 65.28%. The results of maize water productivity showed that the effect of irrigation water and water and effluent mixing on biological, physical, wet forage, and dry forage productivity was significant and increased the values of biological, physical, wet forage, and dry forage productivity by 11.51, 10.92, 12.78, and 14.6%, respectively, compared to non-magnetic effluent. By using magnetic water, the concentration of lead, cadmium, zinc, and nickel metals in maize seeds decreased by 19.84%, 19.76%, 15.48%, and 23.01% respectively. The use of magnetic technology enables the optimal use of unusable water and increases the yield and water productivity of plants. Also, this technology can be effective in reducing the accumulation of heavy metals in the soil and maize plants using effluent.

Cite this article Khoshravesh, M., & Pourgholam-Amiji, M. (2023). The Effect of Irrigation with Magnetically Effluent on Soil Chemical Properties, Water Productivity and Heavy Metals Uptake by Maize. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (6), 877-893. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357365.669477

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357365.669477

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۶ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تأثیر آبیاری با پساب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، بهره‌وری آب و جذب فلزات سنگین ذرت

مجتبی خوش‌روش[1]✉ | مسعود پورغلام آمیجی[2]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زارعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، ایمیل: M.khoshravesh@sanru.ac.ir و Khoshravesh_m24@yahoo.com

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: Mpourgholam6@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۶/۱

واژه‌های کلیدی:
اختلاط آب و پساب،
امنیت غذایی،
بهبود کیفیت آب،
فن‌آوری مغناطیسی،
منابع آب.

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی اثرات استفاده از پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی و فلزات سنگین خاک و بهره‌وری آب و جذب فلزات سنگین گیاه ذرت انجام شده است. برای انجام پژوهش، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در دو فصل کشت (سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱) در شهرستان بابلسر انجام شده است. تیمارها شامل آبیاری با آب چاه، آبیاری با اختلاط ۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه، آبیاری با اختلاط ۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه، آبیاری با اختلاط ۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه و آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب در شرایط اعمال میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی بود. نتایج نشان داد که اثر آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر هدایت الکتریکی، املاح و فلزات سنگین خاک در عمق‌های مختلف در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۳/۰۵ درصدی هدایت الکتریکی، کاهش ۳۷/۴۵ درصدی سرب و کاهش ۶۵/۲۸ درصدی مقدار کادمیوم خاک شد. نتایج بهره‌وری آب ذرت نشان داد که اثر آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر بهره‌وری‌های بیولوژیکی، فیزیکی، علوفه تر و علوفه خشک معنی‌دار شد و مقادیر بهره‌وری‌های بیولوژیکی و فیزیکی، علوفه تر و خشک را به‌ترتیب ۱۱/۵۱، ۱۰/۹۲، ۱۲/۷۸ و ۱۴/۶ درصد نسبت به پساب غیرمغناطیسی افزایش داد. همچنین با استفاده از آب مغناطیسی غلظت فلزات سرب، کادمیوم، روی و نیکل در دانه گیاه ذرت به‌ترتیب ۱۹/۸۴، ۱۹/۷۶، ۱۵/۴۸ و ۲۳/۰۱ درصد کاهش یافت. استفاده از فناوری مغناطیسی، امکان بهره‌برداری بهینه از آب‌های غیرقابل استفاده را فراهم می‌کند و باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری گیاهان می‌شود. همچنین، این فناوری می‌تواند در کاهش تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه ذرت با استفاده از پساب‌ها مؤثر باشد.

استناد: خوش‌روش؛ مجتبی، پورغلام آمیجی؛ مسعود، (۱۴۰۲). تأثیر آبیاری با پساب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، بهره‌وری آب و جذب فلزات سنگین ذرت، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۶)، ۸۹۳-۸۷۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357365.669477

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357365.669477

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به غذا، توسعه کشاورزی امری ضروری و حیاتی است. با توجه به محدودیت منابع آبی، کشاورزی باید به صورت پایدار و با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی توسعه یابد. از این رو، مدیریت منابع آب در کشاورزی بسیار حائز اهمیت است و باید در تمامی مراحل تولید کشاورزی مدیریت شود. با توجه به محدودیت منابع آب برای توسعه کشاورزی، بایستی تمرکز زیادی بر استفاده بهینه از منابع آب موجود، از جمله آب‌های نامتعارف برای آبیاری شود (Pourgholam-Amiji *et al*., 2020; Hamza et al., 2021; Helmy et al., 2023; Khoshravesh & Pourgholam-Amiji, 2023).

تقریبا ۷۵ درصد از آب مورد مصرف در شهرها به عنوان فاضلاب دور ریخته می‌شود. این موضوع، اگر به درستی مدیریت نشود، می‌تواند پیامدهای نامطلوب و نگران‌کننده برای سلامت عمومی داشته باشد. همچنین، در بعضی مناطق، به علت شرایط جغرافیایی پهنه شهری، دفع سنتی فاضلاب به چاه‌های جذبی امکان‌پذیر نیست و یا ممکن است باعث افزایش سطح آب زیرزمینی و به شدت تهدید کننده زیرساخت‌های شهری شود. در نتیجه، جمع‌آوری، تصفیه و دفع بهداشتی فاضلاب از ضروریات توسعه شهری است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کمبود آب و نیاز به کود گیاهان باشد (Latosińska *et al*., 2021; Pourgholam-Amiji et al., 2022). در اکثر شهرها حجم فاضلاب تولیدی در روز قابل‌توجه است. با وجود زمین‌های حاصل‌خیز با پتانسیل تولید محصولات کشاورزی، استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌ها برای آبیاری مزارع جذاب است، اما ورود فلزات سنگین از طریق پساب به خاک، مشکلات زیست‌محیطی دارد. جمع‌آوری فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری شده با پساب باعث آلودگی خاک می‌شود و با جذب این فلزات توسط گیاهان، سمیت را در زنجیره غذایی ایجاد می‌کند (Zafarzadeh *et al*., 2021). در صورت استفاده از فناوری‌های مناسب، می‌توان برای کاهش تلفات آب و افزایش بهره‌وری در آبیاری، از آب‌های تلف شده استفاده کرد. همچنین با انجام فرآیندهای تصفیه آب نظیر اسمز معکوس و تصفیه با غشا، می‌توان آب‌های شور و لب شور را قابل استفاده برای آبیاری کرد. این روش‌ها همچنین می‌توانند کمک کننده در مدیریت بهینه منابع آب باشند. یکی از فن‌آوری‌های جدید، استفاده از آب مغناطیسی می‌باشد. آب مغناطیسی با ویژگی‌های مختلفی نسبت به آب معمولی دارای قابلیت نفوذ و حلالیت بیشتر، کشش سطحی کمتر و فعالیت بیشتر آنزیم‌ها، کلروفیل، رنگدانه، اسید نوکلئیک و قطبی شدن مولکول‌ها در سلول‌های زنده گیاهان است. همچنین، میدان مغناطیسی می‌تواند تأثیراتی مثبت بر سلول‌های گیاهی داشته باشد، از جمله افزایش انتقال یون‌ها از کانال‌های سلولی و تغییر در عملکرد آنزیم‌های انتقال‌دهنده یون‌ها از غشای سلولی را ایجاد کند (Rosensweig, 2002; Khoshravesh et al., 2018). این تغییرات به عوامل شدت میدان مغناطیسی، جهت میدان، مدت‌زمان قرار گرفتن در معرض میدان مغناطیسی، نرخ جریان محلول، کیفیت و اسیدیته آب بستگی دارد (Mostafazadeh-Fard et al., 2011; Pourgholam-Amiji & Khoshravesh, 2022). استفاده از آب مغناطیسی می‌تواند منجر به واکنش‌های متفاوت گیاهان در مقابل شدت‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی شود و باعث افزایش کمیت محصول و بهره‌وری آب گردد. به علاوه، اثر آب مغناطیسی بر روی رشد گیاهان می‌تواند به افزایش تولید رنگ دانه‌های فتوسنتزی و پروتئین‌ها ارتباط داشته باشد (Celik et al., 2008; Khoshravesh et al., 2023).

پیشینه پژوهش

استفاده از فاضلاب شهری برای آبیاری اراضی کشاورزی باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک می‌شود و می‌تواند منجر به افزایش معنی‌دار آن‌ها در گیاهان شود. در اراضی کشاورزی که با فاضلاب شهری آبیاری می‌شوند، میزان غلظت کل املاح تا دو برابر افزایش پیدا کرده و فلزات سنگین در عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک به طرز چشمگیری افزایش یافته‌اند. به علاوه، برخی عناصر مانند کادمیوم تا ۲۳ برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته‌اند (Sergey & Svetlana, 2002). در میان فلزات سنگین، کادمیوم خطرات زیادی داشته و به دلیل تحرک نسبتا زیاد در خاک، در غلظت‌های کم نیز سمی می‌باشد. وقتی کادمیوم وارد بدن می‌شود، در اندام‌های مختلف مانند کلیه، کبد، سیستم عصبی، سیستم تنفسی، سیستم گوارش و ماهیچه‌های قلب تجمع می‌یابد. در صورتی که مقدار کادمیوم از حد مجاز بیشتر شود، اثرات طولانی مدت آن باعث بروز بیماری‌های مختلف می‌شود. بر اساس مطالعات، این اثرات در کودکان شدت بیشتری دارد و می‌تواند باعث عوارض حادتری شود (Kabata-Pendias & Pendias, 2001; Khoshravesh et al., 2021a). فاضلاب حاوی عناصر غذایی مورد نیاز برای گیاهان است و استفاده از آن به کاهش مصرف کودهای شیمیایی منجر می‌شود. با این حال، مصرف این منابع آب باید با رعایت آثار منفی احتمالی در زمینه آلودگی محیط‌زیست، گیاهان و انسان انجام شود (Abedi-Koupai et al., 2013; Khoshravesh

et al., 2021b; Pourgholam-Amiji et al., 2022).

Wei *et al.* (2015) گزارش کردند که در دو نوع رژیم آبیاری با مصرف آب کم و زیاد، فلزات سنگین مانند کادمیوم و مس، رفتار متفاوتی دارند. در رژیم آبیاری با مصرف آب کم، فلزات به‌طور کمی حرکت کرده و بیشتر به صورت افقی در فاصله‌ای دور از نقاط آبیاری تجمع می‌یابند. اما در رژیم آبیاری با مصرف آب زیاد، فلزات به‌صورت عمودی حرکت کرده و در عمق‌های بیشتری تجمع پیدا می‌کنند. Rezapour *et al.* (2019) غلظت فلزات سنگین Zn، Cu، Cd، Pb و Ni در خاک آهکی آبیاری شده با فاضلاب تصفیه‌شده در پنج سطح مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان قابل توجهی از این فلزات در خاک‌های آبیاری شده وجود دارد. با این حال، میانگین غلظت فلزات در خاک به جز کادمیوم در حد مجاز بود.

جذب فلزات سنگین از خاک توسط گیاه به 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 بستگی دارد. مکانیسم‌های جذب برای یون‌های فلزی مختلف با یکدیگر متفاوت است. با این حال، یون‌هایی که با مکانیسم‌های مشابه به داخل ریشه جذب می‌شوند، ممکن است با هم رقابت کنند (Devkota & Schmidt, 2000). فلز نیکل به عنوان یک عنصر ضروری برای رشد گیاهان شناخته شده است، اما غلظت زیاد آن می‌تواند مسمومیت‌های گیاهی را ایجاد کند که شامل جلوگیری از فعالیت آنزیم‌ها، کاهش رشد گیاه و سوخت‌وساز نیتروژن می‌شود. علاوه بر این، حضور یون‌هایی مانند آهن و منگنز می‌تواند منجر به کاهش انتقال نیکل به قسمت‌های مختلف گیاه شود (Yusuf *et al.*, 2011). فلز روی در صورت غلظت زیاد در گیاه، باعث آسیب به ریشه، کاهش تعداد ریشه‌های جانبی و کاهش غلظت فلزات ضروری مانند آهن می‌شود. همچنین، غلظت بالای فلز ضروری آهن باعث سیاه شدن سریع، ناهنجاری و مرگ بافت سلولی می‌گردد (Millaleo *et al.*, 2010).

گیاه ذرت پتانسیل زیادی در جذب و خارج ساختن فلزات سنگین از خاک دارد و علاوه بر تولید زیست‌توده زیاد، به‌عنوان یک گیاه بیش اندوز فلزات سنگین نیز شناخته شده است (Park *et al.*, 2012). Rezapour *et al.* (2019) میزان غلظت فلزات سنگین در گندم زمستانه را در آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان قابل‌توجهی از فلزات سنگین در خاک و بخش‌های مختلف گندم وجود دارد. میانگین غلظت فلزات سنگین در دانه گندم در حد مجاز بود. توسلی و همکاران در پژوهشی مشخص کردند که عملکرد علوفه تر ذرت در تیمار آبیاری با پساب نسبت با آب معمولی، ۸/۲۵ درصد افزایش داشت (Tavassoli et al., 2010). عابدی کوپایی و همکاران تأثیر استفاده از پساب با غلظت فلزات سنگین ۵ و ۱۰ برابر نسبت به پساب معمولی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت فلزات سنگین در پساب، تولید زیست‌توده کل گیاه کاهش یافت و به طور خاص، غلظت زیاد فلزات سنگین باعث کاهش تولید گیاهی در برگ‌ها و ساقه‌ها می‌شود (Abedi-Koupai et al., 2001).

Rattan *et al.* (2005) نشان دادند که آبیاری با فاضلاب به مدت پنج سال، غلظت آهن موجود در خاک را افزایش داد و آبیاری به مدت ۱۰ سال، غلظت فلزات سنگین روی، آهن، نیکل و سرب نیز افزایش یافت. Mojiri & Aziz (2011) با استفاده از دو روش آبیاری، به 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 گیاه گندم بیشتر از اندام هوایی بود. Pruvot *et al.* (2006) نشان دادند که میزان تجمع فلزات سنگین به نوع فلز، شرایط خاک و گونه گیاهی بستگی دارد اما به طور کلی، تجمع در اندام هوایی، به‌ویژه برگ و ساقه، بیشتر از سایر اندام‌ها بود و در دانه بسیار کمتر از برگ و ساقه مشاهده شد.

با کاهش منابع آبی، استفاده از آب‌های نامتعارف مانند پساب شهری در مناطقی که آب با کیفیت مناسب در دسترس نیست، می‌تواند باعث کاهش فشار بر منابع آب شود و همچنین هزینه‌های تولید را کاهش دهد. به علاوه، پساب می‌تواند به عنوان یک منبع آب برای گیاهان عمل کند و نیاز غذایی گیاه را تأمین کند. در این راستا، فن‌آوری آب مغناطیسی برای افزایش عملکرد محصولات و غلظت عناصر مفید موجود در آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، آب مغناطیسی می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای کاهش فلزات سنگین در خاک و در نهایت حفظ کیفیت محصولات گیاهی باشد. با وجود منبع پساب در شهرستان بابلسر و کشت گیاه ذرت در این منطقه، استفاده از پساب‌ها ضروری است. تاکنون پژوهش‌هایی درباره تأثیر آب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک و همچنین عملکرد گیاهان انجام شده، اما بررسی تأثیر پساب مغناطیسی بر تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه ذرت و بهره‌وری گیاه ذرت تاکنون انجام نشده است. به همین دلیل، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پساب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، عملکرد و اجزای عملکرد، بهره‌وری آب و جذب فلزات سنگین در دانه گیاه ذرت انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در مزرعه واقع در روستای آرمیچ‌کلای شهرستان بابلسر انجام شد. این مزرعه در مختصات ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول جغرافیایی شرقی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریاهای آزاد برابر ۲۱- متر است. بر اساس آمار درازمدت ۳۰ ساله، میانگین بارندگی سالانه در منطقه ۸۹۱ میلی‌متر است. همچنین میانگین دمای هوای سالانه نیز برابر با ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد است (Pourgholam-Amiji *et al*., 2021).

خصوصیات خاک و معرفی لایسیمتر

لایسیمترهای مورد استفاده در این پژوهش از جنس PVC با قطر و ارتفاع به‌ترتیب ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر بودند. لوله‌هایی با قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر از جنس PVC برای خروج آب اضافی از لایسیمترها استفاده شد. برروی لوله‌ها سوراخ‌هایی به قطر دو میلی‌متر و در فاصله ۲/۵ سانتی‌متر از هم در ۴ ردیف در فاصله ۵۰ سانتی‌متر از ابتدای لوله قرار داده شدند تا به عنوان زهکش عمل کنند. برای جلوگیری از نفوذ ذرات خاک به داخل لوله‌های زهکش، یک صافی از جنس ژئوتکستایل در اطراف لوله زهکش قرار داده شد. صافی ژئوتکستایل پس از دوخت به لوله زهکش، به دور آن کشیده شد تا از ورود ذرات خاک به درون لوله جلوگیری شود. لوله‌های زهکشی به صورت افقی در فاصله پنج سانتی‌متری از کف لایسیمتر قرار داشتند. سر مسدود آن‌ها در داخل لایسیمتر و سر باز آن‌ها، خارج از لایسیمتر قرار گرفت. اتصال لوله به بدنه لایسیمتر از داخل و بیرون آب‌بندی شد تا از نشت آب جلوگیری شود. بعد از آماده‌سازی خاک زراعی مورد نظر، پر کردن لایسیمترها با خاک انجام شد که به صورت مرحله‌ای صورت گرفت. در ابتدا، خاک به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در داخل لایسیمتر ریخته شد و پس از تسطیح، لایه بعدی خاک اضافه شد. با رسیدن به میانه لایسیمترها، برای نشست و تحکیم خاک، مقداری آب به آن اضافه شد و پر کردن لایسیمتر با خاک ادامه یافت. پس از پر شدن لایه های خالی تا ارتفاع پنج سانتی‌متر پایین‌تر از لبه فوقانی لایسیمترها، با اضافه کردن آب و نشست خاک، فضای خالی باقیمانده پر شد. قبل از آغاز آزمایش و اعمال تیمارهای لازم، نمونه‌برداری از خاک در لایسیمترها انجام و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفتند که در جدول (۱) ذکر شده‌اند.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک لایسیمترها

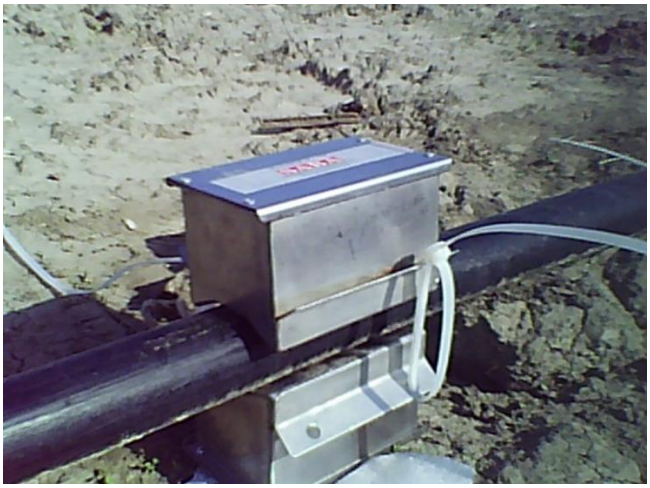
عمق	ذرات تشکیل‌دهنده خاک (٪)			بافت خاک	ρ_b (g/cm^3)	pH	EC (dS/m)	Ca	Mg	Na	Pb	Cd
(سانتی‌متر)	رس	سیلت	شن					meq/l			mg/kg	
۳۰-۰	۱۹/۶۹	۴۵/۰۴	۳۵/۲۷	لوم	۱/۵۰	۷/۵	۱/۹۱	۹/۴	۱۲/۳	۱۷/۷	۱/۰۰	۰/۰۲۰
۶۰-۳۰	۱۹/۳۴	۴۵/۱۶	۳۵/۵۰	لوم	۱/۵۳	۷/۴	۱/۹۳	۹/۶	۱۲/۱	۱۷/۷	۱/۰۲	۰/۰۲۳
۹۰-۶۰	۱۹/۵۵	۴۵/۳۹	۳۵/۰۶	لوم	۱/۵۹	۷/۷	۱/۹۲	۹/۷	۱۲/۱	۱۸/۲	۱/۰۳	۰/۰۲۷

اعمال تیمار

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شده است. در این طرح، تیمارها شامل پنج حالت مختلف آبیاری با نسبت‌های مختلف پساب و آب چاه و در دو شرایط با اعمال (I_1) و بدون اعمال (I_2) میدان مغنطیسی بوده‌اند که به شرح زیر می‌باشد:

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).

مغناطیس نمودن آب آبیاری با عبور آب از میان یک آهن‌ربای دائمی با شدت میدان مغناطیسی ۰/۳ تسلا ایجاد شد. روش کار بدین صورت بود که در تیمارهای آب مغناطیسی‌شده، دستگاه ایجاد میدان مغناطیسی بر روی خط لوله نصب شد و آبی که برای آبیاری این تیمارها در نظر گرفته می‌شد، از این مجرا عبور می‌کرد. آب عبوری دبی ۱/۶ لیتر در ساعت داشته و دستگاه مورد نظر از شرکت صبا پارسیان تهیه شد. در نتیجه آب و پساب عبوری از داخل لوله، مغناطیس شدند. خصوصیات شیمیایی آب چاه و پساب مورد استفاده در آزمایش در جدول (۲) قابل مشاهده است. گیاه ذرت رقم SC 704 در لایسیمتر کشت شد.



شکل ۱- نحوه مغناطیس‌کردن آب و پساب در مزرعه

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب و پساب مورد استفاده در مزرعه

منبع آب	EC (dS/m)	pH	Ca	Mg	Na	Pb	Cd
			meq/l			µg/l	
آب چاه	۰/۵۹	۷/۳	۲/۹۵	۲/۱۴	۱/۶۷	۱/۰۲	۰/۰۱
پساب	۱/۱۴	۷/۷	۴/۴۰	۴۱/۶۱	۱۲/۲۰	۱۳/۱۸	۰/۰۲۶

آب آبیاری

برای آبیاری ذرت، از روش قطره‌ای نواری استفاده شده و میزان و دور آبیاری با توجه به نیاز گیاه انجام شد. دبی روزنه‌ها ۱/۶ لیتر در ساعت و فاصله بین آن‌ها ۲۰ سانتی‌متر بوده است. دبی با استفاده از کنتور حجمی و زمان آبیاری محاسبه شد. ابتدا پساب تصفیه‌شده تهیه شد و سپس در سطل‌های مخصوصی ریخته و درب ظرف پلمپ شد تا با هوای بیرون واکنش ندهد. در ادامه پساب به محل آزمایش منتقل شد و با درصدهای مختلف اختلاط با آب چاه برای آبیاری گیاه استفاده شد. بعد از رشد حدود یک ماهه گیاه ذرت (پنج تا شش برگه)، تیمارها اعمال شدند. راندمان ۹۵ درصد و سطح سایه‌انداز با استافده از تصویربرداری تعیین شد. میزان آبیاری در هر تیمار با استفاده از کنتور حجمی اندازه‌گیری شد و محاسبات آن به شرح زیر است (علیزاده، ۱۳۸۹):

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

$$d_n = Td \times F$$ رابطه ۲)

$$d_g = \frac{d_n}{E}$$ رابطه ۳)

$$V = dg \times A$$ رابطه ۴)

در روابط فوق: ET_C تبخیر و تعرق گیاه ذرت (میلی‌متر در روز)، Td حداکثر تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز)، Pd سطح سایه‌انداز (درصد)، F دور آبیاری (روز)، dn عمق خالص آبی در هر دور آبیاری (میلی‌متر)، dg عمق ناخالص آبی در هر دور آبیاری (میلی‌متر)، V حجم آب‌داده شده به تیمار (مترمکعب) و A مساحت کرت (مترمربع). در پایان دوره آزمایش عملکرد دانه در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای

در پایان دوره آزمایش، از عمق‌های ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری شد تا تأثیر آب مغناطیسی و درصد اختلاط‌های مختلف آب و پساب بر خصوصیات شیمیایی خاک شامل اسیدیته، هدایت الکتریکی، کلسیم، سدیم و میزان فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک مورد بررسی قرار گرفت. برای سنجش عملکرد ذرت پس از دوره رشد و رسیدگی فیزیولوژیکی، از هر واحد آزمایشی که شامل چندین بوته ذرت بود، نمونه‌برداری انجام شد. سپس عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه و شاخص برداشت محاسبه شد. برای اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک، بوته‌های مربوط به تمامی تکرارهای هر تیمار کف بر و با استفاده از ترازو وزن شدند. شاخص برداشت با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد.

$$H_i = \frac{Y}{Y_b} \times 100$$ رابطه ۵)

که در آن H_i شاخص برداشت (درصد) و Y، Y_b به ترتیب عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک است.

براساس عملکردهای مختلف گیاه ذرت در تمامی تیمارها، میزان بهره‌وری فیزیکی، بیولوژیکی، علوفه خشک و علوفه تر محاسبه شد. برای محاسبه بهره‌وری گیاه ذرت از رابطه (۶) استفاده شد.

$$WP = \frac{Y}{I}$$ رابطه ۶)

که در رابطه فوق WP بهره‌وری آب آبیاری (kg/m^3)، Y عملکرد (kg) و I حجم آب آبیاری (m^3) است.

همچنین، از همه تیمارها و تکرارها نمونه‌برداری شد و غلظت نیکل، کروم، سرب و کادمیوم در بوته و دانه گیاه ذرت اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در عصاره‌ها، از دستگاه جذب اتمی استفاده شد.

تحلیل داده

برای تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) استفاده و مقایسه میانگین‌ها با روش آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

خصوصیات شیمیایی و فلزات سنگین خاک

براساس نتایج تجزیه و تحلیل واریانس در جدول (۳)، اثر آب آبیاری (مغناطیسی و غیر مغناطیسی) و اختلاط آب و پساب بر هدایت الکتریکی عمق‌های مختلف خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی بر اسیدیته خاک اثر معنی‌دار نداشت. اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار شد ولی بر اسیدیته خاک اثر معنی‌دار نبود. در تیمار آب مغناطیسی، هدایت الکتریکی تمامی عمق‌های خاک کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی بود و این اختلاف معنی‌دار بود. به طور میانگین، مشخص شد که آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۳/۰۵ درصدی در مقدار هدایت الکتریکی پروفیل خاک شده است. علت این است که مولکول‌های آب که تحت تاثیر پیوند هیدروژنی و نیروی واندروالس با یون‌ها درگیر بودند آزاد شده، آب روان‌تر و خاصیت ترشوندگی آن بیشتر شده و قطرات آب به‌سهولت به‌ذرات کلوییدی و میکرونی خاک چسبیده و در نتیجه بر ظرفیت نگهداری آب در خاک اضافه شده و از تنش شوری و خشکی پیشگیری می‌شود. نتایج این پژوهش با یافته‌های Mohamed (2013) مطابقت دارد. وی نشان داد که آب مغناطیسی باعث کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک پس از برداشت محصول شد.

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر عوامل مختلف بر هدایت الکتریکی و اسیدیته عمق‌های مختلف خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	EC			pH		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
بلوک	۲	۰/۰۳۰**	۰/۰۳۳**	۰/۰۳۶**	۰/۰۳۴**	۰/۰۳۹**	۰/۰۴۴**
آب آبیاری	۱	۱۳/۱۴**	۱۵/۲۱**	۱۶/۴۵**	۳۹/۶۰^{ns}	۴۰/۵۵^{ns}	۴۱/۰۸^{ns}
اختلاط آب و پساب	۴	۲۰/۰۳**	۲۳/۵۹**	۲۷/۹۴**	۳۹/۹۸^{ns}	۴۰/۰۸^{ns}	۴۰/۳۲^{ns}
آب آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۶/۸۷**	۷/۳۲**	۸/۱۹**	۱/۳۴^{ns}	۱/۵۹^{ns}	۱/۶۷^{ns}
خطا	۱۸	۰/۴۰۶	۰/۴۳۷	۰/۴۶۶	۰/۷۴۱	۰/۷۸۳	۰/۷۹۸
ضریب تغییرات	–	۷/۳۷	۶/۴۴	۶/۲۱	۲/۴۵	۱/۹۶	۱/۷۴

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

هدایت الکتریکی خاک در عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری در تیمار آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب به مقدار ۴/۴۲ دسی‌زیمنس بر متر دارای بیشترین مقدار و در تیمار آبیاری با آب چاه به مقدار ۱/۹۶ دسی‌زیمنس بر متر دارای کمترین مقدار بود. افزایش میزان هدایت الکتریکی خاک در تیمارهایی که با درصد بیشتری از پساب آبیاری شده بودند، به دلیل افزایش هدایت الکتریکی پساب و افزایش غلظت املاح خاک در این تیمارها بود (جدول ۴). در تحقیقی که توسط مصطفی‌زاده فرد و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد، تأثیر آب مغناطیسی بر میزان املاح خاک در آبیاری قطره‌ای در عمق‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از آب مغناطیسی منجر به کاهش میزان شوری خاک در مقایسه با آب غیر مغناطیسی شد. همچنین آن‌ها بیان کردند که افزایش ۷/۵ درصدی رطوبت خاک در تیمار آب مغناطیسی،

باعث شستشوی املاح خاک شده است.

جدول ٤- مقایسه میانگین‌های مقدار هدایت الکتریکی و اسیدیته عمق‌های مختلف خاک

تیمار آزمایشی	EC (dS/m)			pH		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
آب آبیاری						
مغناطیسی	۲/۲۰ b	۲/۳۵ b	۲/۷۰ b	۷/۳۱ a	۷/۳۶ a	۷/۵۲ a
غیر مغناطیسی	۳/۳۸ a	۳/۶۱ a	۳/۸۰ a	۷/۳۸ a	۷/۴۲ a	۷/۵۷ a
اختلاط آب و پساب						
آب چاه	۱/۹۶ e	۲/۰۵ e	۲/۲۳ e	۷/۳۱ a	۷/۳۳ b	۷/۳۶ d
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۲/۴۲ d	۲/۶۱ d	۲/۷۷ d	۷/۳۳ a	۷/۳۵ b	۷/۴۲ cd
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۲/۶۹ c	۲/۹۶ c	۳/۱۴ c	۷/۳۴ a	۷/۴۲ a	۷/۴۷ c
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۳/۰۹ b	۳/۳۸ b	۳/۶۹ b	۷/۳۶ a	۷/۴۳ a	۷/۶۰ b
۱۰۰ درصد پساب	۳/۷۹ a	۳/۹۰ a	۴/۴۲ a	۷/۳۸ a	۷/۴۲ a	۷/۸۷ a

میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ٥ درصد مقایسه شده‌اند. برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نمی‌باشد.

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس در جدول (٥) نشان می‌دهد که آب آبیاری و اختلاط آب و پساب در عمق‌های مختلف خاک اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر کلسیم و سدیم داشته‌اند. همچنین، اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر کلسیم و سدیم خاک نیز معنی‌دار بود. مقادیر کلسیم و سدیم خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی بود و این تفاوت نیز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش مقادیر کلسیم و سدیم خاک در پروفیل خاک شد. در واقع، مقدار کلسیم و سدیم کاهش یافته در تیمار آب مغناطیسی نسبت به تیمار آب غیرمغناطیسی به‌ترتیب ۳۶/۹۲ و ۲۱/۹۷ درصد بود (جدول ۶). علت این است که با آب مغناطیسی، نسبت آراگونیت به کلسیت افزایش می‌یابد. رسوب آراگونیت نوعی از رسوب کربنات کلسیم است که در آب قابل حمل‌تر است و سبب خروج بیشتر کربنات کلسیم از خاک می‌شود. نتایج این پژوهش با یافته‌های Mostafazadeh-Fard *et al.* (2012) مطابقت دارد. آن‌ها مشاهده کردند که مقدار کلسیم و سدیم در تیمار آب مغناطیسی در مقایسه با آب غیر مغناطیسی به‌ترتیب ۳۵/۲ و ۳۳/۶ درصد کاهش داشت. در تیمارهای با درصد اختلاط بیشتر پساب، مقادیر کلسیم و سدیم در تمامی عمق‌ها افزایش یافت که به دلیل مقادیر بیشتر این عناصر در پساب آبیاری بود. Saliha (2005) با بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، پتانسیل بالای آب مغناطیسی را عامل شستوشوی نمک‌های خاک و افزایش نفوذپذیری خاک معرفی کردند و نشان دادند که مقادیر اسیدیته، هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم در محلول خاک در تیمار آب مغناطیسی کاهش یافت.

جدول ٥- تجزیه واریانس تأثیر عوامل مختلف بر کلسیم و سدیم عمق‌های مختلف خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	Ca			Na		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
بلوک	۲	۰/۰۶۶**	۰/۰۶۹**	۰/۰۷۴**	۰/۰۶۹**	۰/۰۷۲**	۰/۰۷۷**
آب آبیاری	۱	۶۵/۹۱**	۷۴/۴۸**	۷۶/۷۷**	۸۸/۹۹**	۹۰/۱۲**	۹۲/۷۸**
اختلاط آب و پساب	۴	۷۸/۹۰**	۸۶/۴۴**	۹۰/۳۰**	۹۵/۰۳**	۹۸/۰۰**	۹۹/۸۵**
آب آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۶/۹۳**	۹/۰۲**	۹/۹۸**	۱۱/۰۵**	۱۱/۸۹**	۱۲/۷۳**
خطا	۱۸	۰/۴۸۸	۰/۵۴۲	۰/۵۹۸	۰/۷۱۰	۰/۷۵۸	۰/۸۳۵
ضریب تغییرات	–	۹/۹۰	۹/۵۹	۹/۳۲	۱۷/۶۸	۱۸/۱۱	۱۵/۰۲

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

بیشترین مقدار کلسیم برابر ۱۶/۸۹ میلی اکی‌والان بر لیتر در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب مشاهده شد. بیشترین مقدار سدیم برابر ۲۳/۸۱ میلی اکی‌والان بر لیتر در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب مشاهده شد. با استفاده از پساب برای آبیاری گیاهان ذرت، مقادیر کلسیم و سدیم در خاک‌های آبیاری شده با این پساب افزایش می‌یابد؛ زیرا مقادیر بیشتری از این عناصر در پساب نسبت به آب چاه وجود دارد که برای آبیاری استفاده می‌شود.

جدول ٦- مقایسه میانگین‌های مقدار کلسیم و سدیم عمق‌های مختلف خاک

تیمار آزمایشی	Ca (meq/l)			Na (meq/l)		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
آب آبیاری						
مغناطیسی	۹/۴۰ b	۱۰/۰۹ b	۱۰/۵۵ b	۱۷/۷۵ b	۱۷/۳۸ b	۱۷/۴۰ b
غیر مغناطیسی	۱۵/۴۹ a	۱۵/۸۲ a	۱۶/۳۱ a	۲۲/۳۴ a	۲۲/۴۵ a	۲۲/۵۳ a
اختلاط آب و پساب						
آب چاه	۹/۴۰ d	۹/۴۷ d	۹/۶۴ e	۱۷/۰۶ d	۱۷/۱۲ d	۱۷/۱۵ c
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۱۰/۰۱ d	۱۱/۲۵ c	۱۱/۴۳ d	۱۹/۰۱ c	۱۹/۴۴ c	۱۹/۴۲ b
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۱۲/۳۰ c	۱۱/۹۹ c	۱۳/۲۹ c	۱۹/۳۹ c	۲۰/۰۹ bc	۱۹/۹۰ b
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۱۴/۵۸ b	۱۵/۷۳ b	۱۵/۹۰ b	۲۰/۹۵ b	۲۱/۹۸ a	۲۱/۳۶ a
۱۰۰ درصد پساب	۱۵/۹۳ a	۱۶/۳۳ a	۱۶/۸۹ a	۲۳/۸۱ a	۲۰/۸۶ b	۲۲/۰۰ a

میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده‌اند. برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نمی‌باشد.

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس تأثیر عوامل مختلف بر فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمق‌های مختلف خاک نشان می‌دهد اثر آب آبیاری و اختلاط آب و پساب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۷). همچنین، اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر سرب و کادمیوم خاک نیز دارای اختلاف معنی‌داری است. متوسط غلظت سرب پروفیل خاک در قبل کشت و بعد از برداشت محصول به‌ترتیب برابر ۱/۰۲ و ۲/۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک می‌باشد (جدول ۸). این در حالی است که مقدار عنصر سرب که از طریق آب چاه و پساب تصفیه‌شده به خاک وارد می‌شد به‌ترتیب برابر ۱/۰۲ و ۱۳/۱۸ میکروگرم در لیتر بود (جدول ۲). با توجه به معیارهای تعیین شده توسط سازمان بهداشت جهانی برای خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، خاکی که حاوی فلز سرب با غلظت کمتر از ۳۶ میلی‌گرم در هر کیلوگرم باشد، در رده خاک‌های با آلودگی کم قرار می‌گیرد (Bull *et al.*, 2020) که برای مزرعه مورد آزمایش نیز صادق است. استفاده از پساب آبیاری، باعث افزایش میزان تجمع عنصر سرب در لایه‌های زیرین خاک شده است. با توجه به خطرات سمی بودن فلز سنگین سرب برای انسان، استفاده از پساب برای آبیاری خاک، به‌منظور کاهش تجمع این فلز سمی در لایه‌های زیرین خاک، نیازمند اعمال محدودیت و مدیریت مناسب است. همچنین با استفاده از روش آبیاری تناوبی با استفاده از آب چاه و پساب، می‌توان از تجمع سرب در نیمرخ خاک جلوگیری کرده و این امکان را فراهم کرد که بدون نیاز به آبشویی مکرر، به مدت طولانی‌تری از این خاک برای کشاورزی استفاده شود.

جدول ۷- تجزیه واریانس تأثیر عوامل مختلف بر فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمق‌های مختلف خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	سرب			کادمیوم		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
بلوک	۲	۰/۰۲۲**	۰/۰۲۹**	۰/۰۳۵**	۰/۰۰۶۲**	۰/۰۰۶۵**	۰/۰۰۷۸**
آب آبیاری	۱	۱۳/۲۸**	۱۳/۷۱**	۱۵/۱۸**	۰/۹۵**	۱/۰۲**	۱/۳۹**
اختلاط آب و پساب	۴	۲۰/۲۲**	۲۱/۱۳**	۲۱/۸۸**	۱/۸۳**	۱/۹۶**	۲/۴۴**
آب آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۴/۵۸**	۴/۴۳**	۵/۱۹**	۰/۵۲**	۰/۵۹**	۰/۷۴**
خطا	۱۸	۰/۶۱	۰/۰۶۹	۰/۰۶۶	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۷۸
ضریب تغییرات	–	۹/۷۱	۹/۳۸	۸/۴۶	۸/۴۹	۷/۸۷	۷/۶۰

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

مقادیر سرب و کادمیوم خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی بود و این تفاوت نیز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش مقادیر سرب و کادمیوم خاک در پروفیل خاک شد. به طور کلی، مقدار غلظت سرب و کادمیوم کاهش یافته در تیمار آب مغناطیسی نسبت به تیمار آب غیرمغناطیسی به‌ترتیب ۳۷/۴۵ و ۶۵/۲۸ درصد بود (جدول ۸). با مغناطیس شدن آب، زاویه تماس به‌علت افزایش اثر قطبی و تغییرات در توزیع و خوشه‌بندی ساخت ذرات آب، کاهش می‌یابد. کاهش زاویه تماس آب مغناطیسی موجب افزایش مواد هیدروفی و کاهش نیروی کشش سطحی آن نسبت به آب چاه می‌شود و بنابراین هیدروفوبیت آن کاهش می‌یابد که در نتیجه باعث افزایش حلالیت آن می‌شود.

بیشترین مقدار سرب برابر ۴/۶۴ میلی‌گرم در کیلوگرم در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب مشاهده شد. بیشترین مقدار کادمیوم نیز برابر ۰/۰۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب مشاهده شد. میزان غلظت کادمیوم در آب چاه و پساب تصفیه‌شده به‌ترتیب برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۲۶ میکروگرم بر لیتر بود. در تمامی تیمارها و عمق‌های خاک، آبیاری با درصد اختلاط‌های مختلف پساب، باعث افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم خاک شد (جدول ۸).

آبیاری با پساب شهری باعث افزایش آلودگی خاک به فلزات سنگین، از جمله کادمیوم می‌شود، اما به دلیل تحرک کمتر این عنصر سنگین، در طول زمان در عمق‌های زیرین خاک تجمع پیدا می‌کند. همانند سرب، در شرایط استفاده از کادمیوم نیز آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش وجود کادمیوم در تمامی عمق‌های خاک می‌شود. علت این مساله به خاصیت میدان مغناطیسی بر می‌گردد. همچنین، باید توجه داشت که آب مغناطیسی نسبت به آب غیر مغناطیسی، کشش سطحی کمتر و قابلیت نفوذ و حلالیت بیشتری دارد و این نیز مزید بر علت است.

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های مقدار فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمق‌های مختلف خاک

تیمار آزمایشی	Pb (mg/kg)			cd (mg/kg)		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
آب آبیاری						
مغناطیسی	۲/۲۱ b	۲/۲۳ b	۲/۲۶ b	۰/۰۲۱ b	۰/۰۲۰ b	۰/۰۲۱ b
غیر مغناطیسی	۳/۵۴ a	۳/۴۹ a	۳/۶۶ a	۰/۰۴۹ a	۰/۰۵۷ a	۰/۰۷۲ a
اختلاط آب و پساب						
آب چاه	۱/۸۰ d	۱/۸۴ d	۱/۸۴ d	۰/۰۱۹ b	۰/۰۲۰ b	۰/۰۲۲ c
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۲/۱۱ cd	۲/۰۵ d	۲/۰۹ d	۰/۰۲۳ b	۰/۰۲۵ b	۰/۰۳۱ c
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۲/۵۱ c	۲/۷۱ c	۲/۷۳ c	۰/۰۳۴ ab	۰/۰۳۶ ab	۰/۰۴۴ b
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۳/۳۹ b	۳/۵۱ b	۳/۵۰ b	۰/۰۴۶ a	۰/۰۵۰ a	۰/۰۶۶ a
۱۰۰ درصد پساب	۴/۵۶ a	۴/۱۹ a	۴/۶۴ a	۰/۰۵۳ a	۰/۰۶۱ a	۰/۰۶۹ a

میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده‌اند. برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نمی‌باشد.

عملکرد و بهره‌وری آب ذرت

عملکرد بیولوژیک

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد بیولوژیک نشان می‌دهد که اثر آب آبیاری و اختلاط آب و پساب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۹). اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر عملکرد بیولوژیک دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد شد. با توجه به جدول (۱۰)، بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک برابر ۴۴/۶۸ تن در هکتار در تیماری با ۱۰۰ درصد پساب به‌دست آمده است. این تیمار نسبت به تیمار شاهد افزایش ۳۰/۱۴ درصد داشته است. با توجه به اینکه بیشترین اجزای عملکرد زیست‌توده در تیمار ۱۰۰ درصد پساب به‌دست آمده بود و با توجه به اینکه عملکرد بیولوژیک شامل همه این اجزاست، عملکرد بیولوژیک در تیمار ۱۰۰ درصد پساب و تیمارهای دیگر کاملاً متفاوت بوده و به خوبی با این واقعیت سازگار است. نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای اختلاط آب و پساب بر عملکرد بیولوژیک نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین تمامی تیمارها وجود دارد.

جدول ۹- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر عملکرد ذرت

منبع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	عملکرد دانه	شاخص
بلوک	۲	۴/۹۸**	۰/۴۹**	۱۳/۳۲**
آب آبیاری	۱	۱۴/۲۱**	۳/۳۷**	۲۱۱/۰۹^{ns}
اختلاط آب و پساب	۴	۶/۵۵**	۰/۸۹**	۱۶/۵۱*
آب آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۶/۹۸**	۰/۸۹*	۲۰/۳۲^{ns}
خطا	۱۸	۱/۸۸	۰/۲۵	۴/۰۱
ضریب تغییرات	–	۸/۷۶	۸/۰۵	۸/۶۹

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

جدول ۱۰- مقایسه میانگین‌های مقدار عملکرد ذرت

تیمار آزمایشی	عملکرد بیولوژیک (Ton/ha)	عملکرد دانه (Ton/ha)	شاخص برداشت (%)
آب آبیاری			
مغناطیسی	۴۱/۶۸ [a]	۲۳/۷۲ [a]	۵۶/۹۳ [a]
غیرمغناطیسی	۳۷/۴۹ [b]	۲۱/۴۸ [b]	۵۷/۲۹ [a]
اختلاط آب و پساب			
آب چاه	۳۴/۳۳ [e]	۱۹/۷۳ [d]	۵۷/۴۷ [d]
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۳۷/۲۵ [d]	۲۰/۳۶ [d]	۵۴/۶۵ [d]
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۳۹/۷۶ [c]	۲۲/۶۰ [c]	۵۶/۸۴ [c]
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۴۱/۹۰ [b]	۲۴/۲۹ [b]	۵۷/۹۷ [b]
۱۰۰ درصد پساب	۴۴/۶۸ [a]	۲۶/۰۲ [a]	۵۸/۲۳ [a]

میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده‌اند. برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نیست.

عملکرد دانه

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد دانه نشان می‌دهد که اثر آب آبیاری و اختلاط آب و پساب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۹). اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر عملکرد دانه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد شد. بیشترین میزان عملکرد دانه برابر ۲۶/۰۲ تن در هکتار در تیماری با ۱۰۰ درصد پساب به‌دست آمده است. این تیمار نسبت به تیمار شاهد افزایش ۳۱/۸۸ درصد داشته است (جدول ۱۰). مقایسه میانگین نتایج عملکرد دانه نشان داد که آبیاری با پساب، باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شد؛ عملکرد دانه در تیمارهای مغناطیسی ۱۰/۴۲ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایشی معنی‌دار داشت. علت این است که عبور آب از میدان مغناطیس، سبب شکسته شدن پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی بین مولکول‌های آب شده و در نتیجه کشش سطحی آب کاهش یافته و حلالیت آب افزایش یافته و املاح معدنی مورد نیاز گیاه در آب به خوبی حل شده و باعث افزایش کمیت محصول می‌شود. استفاده از میدان مغناطیسی می‌تواند باعث افزایش رطوبت در خاک و کاهش شوری پروفیل خاک شود. با توجه به تأثیر این موارد، در نهایت می‌تواند باعث افزایش کمیت محصول شود (Hamza et al., 2021).

شاخص برداشت

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس تأثیر عوامل مختلف بر شاخص برداشت نشان می‌دهد که اثر آب آبیاری معنی‌دار نشد ولی اثر اختلاط آب و پساب در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۹). اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر شاخص برداشت معنی‌دار نشد. بیشترین میزان شاخص برداشت برابر ۵۸/۲۳ درصد در تیماری با ۱۰۰ درصد پساب به‌دست آمده است. این تیمار نسبت به تیمار شاهد افزایش ۱/۳۲ درصد داشت (جدول ۱۰). تیمارهایی با بیشترین درصد پساب، با تولید زیست‌توده بیشتر، عملکرد دانه بیشتری را نسبت به سایر تیمارها داشتند که این امر باعث اختلاف در شاخص برداشت شده است. این اختلاف می‌تواند به دلیل تسهیم بیشتر مواد فتوسنتزی به دانه در این تیمارها باشد.

بهره‌وری آب ذرت

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس تأثیر عوامل مختلف بر بهره‌وری‌های مختلف ذرت نشان می‌دهد که اثر آب آبیاری و اختلاط آب و پساب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱۱). اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر بهره‌وری‌های مختلف ذرت معنی‌دار نشد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بهره‌وری بیولوژیکی و بهره‌وری فیزیکی در تیمارهای اختلاط آب و پساب، تمامی تیمارها با یکدیگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند. استفاده از پساب در کشت ذرت، باعث افزایش وزن پوشش سبز گیاه شده است و این افزایش وزن در تیمار ۱۰۰ درصد پساب بیشتر از تیمارهای دیگر با درصدهای مختلف اختلاط آب و پساب مشاهده شده است. بیشترین مقادیر بهره‌وری بیولوژیکی و بهره‌وری فیزیکی به‌ترتیب برابر ۳/۶۶ و ۲/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب در تیماری با ۱۰۰ درصد پساب به‌دست آمده است. این تیمار نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب افزایش ۳۲/۱۳ و ۲۸/۴۸ درصد داشت (جدول ۱۲).

جدول ۱۱- تجزیه واریانس تأثیر عوامل مختلف بر بهره‌وری محصول ذرت

منبع تغییرات	درجه آزادی	بهره‌وری بیولوژیکی	بهره‌وری فیزیکی	بهره‌وری علوفه تر	بهره‌وری علوفه خشک
بلوک	۲	۳/۱۱**	۲/۰۸**	۱/۱۵**	۰/۹۸**
آب آبیاری	۱	۱۲/۰۳**	۷/۹۴**	۳/۹۶**	۱/۶۸**
اختلاط آب و پساب	۴	۵/۱۲**	۲/۹۷**	۱/۵۹**	۰/۷۷*
آب آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۵/۳۳^{ns}	۲/۷۴^{ns}	۰/۹۵^{ns}	۰/۴۲^{ns}
خطا	۱۸	۱/۸۷	۱/۱۲	۰/۴۵	۰/۱۰

*، ** و ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم وجود اختلاف معنی‌دار.

بهره‌وری بیولوژیکی و بهره‌وری فیزیکی در تیمارهای مغناطیسی به‌ترتیب ۱۱/۵۱ و ۱۰/۹۲ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایشی معنی‌دار داشت. در اثر مغناطیسی شدن آب و با تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی آن و کوچک‌تر شدن مولکول‌های آب منجر به افزایش توانایی جذب آن توسط گیاه شده در نتیجه کارآیی مصرف آب نیز افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش با یافته‌های El Sayed (2014) مطابقت دارد. وی نشان داد که استفاده از آب مغناطیسی، سطح برگ لوبیای چشم‌بلبلی و باقلا افزایش می‌یابد که می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری بیولوژیکی گیاه شود. با تأثیر میدان مغناطیسی، خواص فیزیکی و شیمیایی آب تغییر می‌کند و مولکول‌های آب کوچکتر می‌شوند که منجر به افزایش توانایی جذب آب توسط گیاه می‌شود و در نتیجه بهره‌وری آب نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱۲- مقایسه میانگین‌های بهره‌وری محصول ذرت

تیمار آزمایشی	بهره‌وری بیولوژیکی (kg/m^3)	بهره‌وری فیزیکی (kg/m^3)	بهره‌وری علوفه تر (kg/m^3)	بهره‌وری علوفه خشک (kg/m^3)
آب آبیاری				
مغناطیسی	۳/۳۹ a	۱/۹۳ a	۱/۵۰ a	۱/۰۲ a
غیرمغناطیسی	۳/۰۴ b	۱/۷۴ b	۱/۳۳ b	۰/۸۹ b
اختلاط آب و پساب				
آب چاه	۲/۷۷ e	۱/۶۰ d	۱/۱۷ d	۰/۷۹ e
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۳/۰۳ d	۱/۶۹ c	۱/۳۴ c	۰/۸۶ d
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۳/۲۱ c	۱/۸۶ b	۱/۳۷ c	۰/۹۳ c
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۳/۴۰ b	۲/۰۱ a	۱/۴۹ b	۱/۰۵ b
۱۰۰ درصد پساب	۳/۶۶ a	۲/۰۲ a	۱/۷۰ a	۱/۱۴ a

میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده‌اند. برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نمی‌باشد.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بهره‌وری علوفه تر و علوفه خشک در تیمارهای اختلاط آب و پساب، تقریبا تمامی تیمارها با یکدیگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند. بیشترین مقادیر بهره‌وری علوفه تر و علوفه خشک به‌ترتیب برابر ۱/۷ و ۱/۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب در تیماری با ۱۰۰ درصد پساب به‌دست آمده است. این تیمار نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب افزایش ۴۵/۲۳ و ۴۴/۳ درصد داشت (جدول ۱۲). دلیل افزایش بهره‌وری علوفه تر در کشت با استفاده از پساب نسبت به کشت شاهد این است که پساب عناصر غذایی موردنیاز گیاه را فراهم می‌کند و رشد و توسعه گیاه بهبود یافته و بهره‌وری آن در تولید علوفه افزایش می‌یابد. بهره‌وری علوفه تر و علوفه خشک در تیمارهای مغناطیسی به‌ترتیب ۱۲/۷۸ و ۱۴/۶ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایشی معنی‌دار داشت. علت این است که آب مغناطیسی باعث افزایش قدرت حل‌کنندگی آب شده و در نتیجه فتوسنتز و رشد بذرهای آبیاری شده با آب مغناطیسی به دلیل جذب مواد غذایی بیشتر از خاک، افزایش می‌یابد. با افزایش فتوسنتز، ماده غذایی بیشتری در گیاه تولید می‌شود که این امر تجمع ماده خشک گیاه را افزایش خواهد داد.

جذب فلزات سنگین ذرت

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس تأثیر عوامل مختلف بر غلظت سرب، کادمیوم، روی و نیکل در دانه ذرت نشان می‌دهد که اثر آب آبیاری و اختلاط آب و پساب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی اثر متقابل آب آبیاری و اختلاط آب و پساب بر غلظت فلزات سنگین دانه

ذرت معنی‌دار نشد (جدول ۱۳).

جدول ۱۳- تجزیه واریانس تأثیر عوامل مختلف بر غلظت فلزات سنگین دانه ذرت

منبع تغییرات	درجه آزادی	سرب	کادمیوم	روی	نیکل
بلوک	۲	۲۴/۸۷**	۲۰/۴۵**	۳۶/۰۸**	۱۴/۹۳**
آب آبیاری	۱	۳۹۱/۲۰**	۳۵۲/۱۴**	۴۰۲/۳۶**	۱۹۱/۴۴**
اختلاط آب و پساب	۴	۳۰/۸۵**	۳۱/۰۶**	۴۲/۵۵**	۲۶/۹۷**
آب آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۲۲/۱۱^{ns}	۱۶/۸۹^{ns}	۱۵/۴۴^{ns}	۸/۷۴^{ns}
خطا	۱۸	۶/۱۹	۴/۳۰	۴/۲۸	۳/۰۹

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

بر اساس نتایج مقایسه میانگین، غلظت سرب، کادمیوم، روی و نیکل در تیمارهای اختلاط آب و پساب، تمامی تیمارها با یکدیگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند (جدول ۱۴). در تیماری که ۱۰۰ درصد از آبیاری با پساب انجام شد، میزان جذب تمامی عناصر در دانه گیاه ذرت بیشترین مقدار را داشت. با افزایش درصد استفاده از پساب در آبیاری، عملکرد و رشد گیاه بیشتر شد و در نتیجه میزان جذب فلزات سنگین نیز افزایش یافت. بیشترین غلظت روی در دانه گیاه ذرت در تیمار ۱۰۰ درصد پساب به دست آمد و نسبت به تیمار شاهد ۴/۹۳ برابر افزایش داشت. کمترین غلظت جذب فلزات سنگین مربوط به عنصر نیکل بود که در تیمار ۱۰۰ درصد پساب بیشترین مقدار را داشت و نسبت به تیمار شاهد ۵/۶۴ برابر افزایش داشت. غلظت فلزات سنگین سرب، کادمیوم، روی و نیکل در تیمارهای مغناطیسی کمتر از غیرمغناطیسی شد و این اختلاف در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار می‌باشد. با استفاده از آب مغناطیسی غلظت فلزات سرب، کادمیوم، روی و نیکل در دانه گیاه به‌ترتیب ۱۹/۸۴، ۱۹/۷۶، ۱۵/۴۸ و ۲۳/۰۱ درصد نسبت به تیمار غیرمغناطیسی کاهش یافت. بیشترین و کمترین اثر میدان مغناطیسی مربوط به کادمیوم و روی بود. کمتر بودن مقدار فلزات سنگین ذرت در تیمار آب مغناطیسی نسبت به تیمار آب غیر مغناطیسی به‌دلیل آبشویی املاح و فلزات سنگین در پساب مغناطیسی می‌باشد.

جدول ١٤- مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین دانه ذرت

تیمار آزمایشی	سرب	کادمیوم	روی	نیکل
آب آبیاری				
مغناطیسی	۲۴/۱۱ b	۴/۰۲ b	۴۰/۵۵ b	۱/۸۴ b
غیرمغناطیسی	۳۰/۰۸ a	۵/۰۱ a	۴۷/۹۸ a	۲/۳۹ a
اختلاط آب و پساب				
آب چاه	۹/۱۹ e	۱/۰۴ e	۱۵/۱۰ e	۰/۶۶ d
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۲۱/۵۹ d	۲/۸۵ d	۲۸/۷۰ d	۱/۴۳ c
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۲۷/۴۳ c	۴/۶۹ c	۴۴/۰۱ c	۲/۲۸ b
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۳۴/۲۹ b	۶/۴۰ b	۶۰/۲۶ b	۲/۹۹ a
۱۰۰ درصد پساب	۴۲/۹۷ a	۷/۵۹ a	۷۳/۳۴ a	۳/۲۱ 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 مجاز سرب، کادمیوم و روی در گیاه برای مصرف انسان به‌ترتیب برابر ۵، ۰/۱ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (Alloway, 1990) که بر اساس نتایج این پژوهش مقدار سرب در تمامی تیمارها بیشتر از حد مجاز می‌باشد. میزان غلظت نیکل در گیاه آلوده برابر ۱۰۰-۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است که بر اساس جدول (۱۴) در حد مجاز قرار دارد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر فلزات سنگین در دانه‌های گیاه افزایش یافته‌اند و برخی از عناصر حتی از حد مجاز نیز فراتر رفته‌اند.

نتیجه‌گیری

استفاده از آب‌های نامتعارف به‌ویژه پساب به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های اصلی برای رفع تنگناهای کمبود آب برای افزایش سطح زیر کشت

و تأمین غذا در کشورهای در حال توسعه مطرح است. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در حوزه محیطزیست، افزایش تدریجی غلظت فلزات سنگین خاک و در نتیجه آلوده شدن خاک تحت کشت گیاهان مختلف به این فلزات می‌باشد. استفاده از آب مغناطیسی باعث کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی، کلسیم، سدیم، سرب و کادمیوم خاک در عمق‌های مختلف شده است. آبیاری با پساب مغناطیسی باعث افزایش عملکرد ذرت شده است. همچنین آبیاری با درصد اختلاط‌های مختلف آب چاه و پساب در شرایط میدان مغناطیسی، باعث افزایش تمامی شاخص‌های بهره‌وری ذرت شد و این افزایش معنی‌دار بود. آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پساب در آبیاری ذرت با انواع مختلف آب و پساب و در شرایط اعمال میدان مغناطیسی، می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی غلظت فلزات سنگین در دانه گیاه ذرت شود. فناوری مغناطیسی باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب ذرت می‌شود و مدیریت آبیاری ذرت با استفاده از این فناوری، می‌تواند در استفاده مؤثرتر و اقتصادی‌تر از منابع آب محدود، مفید باشد. مدت اثر و مغناطیس ماندن آب، بر حسب نوع سازنده آن متفاوت بوده و بین ۴۸ تا ۱۲۰ ساعت متغیر است و باعث تاثیر بر رطوبت خاک و سایر عوامل و در نهایت عملکرد محصول می‌شود. بایستی توجه نمود در شرایطی که کیفیت آب پایین باشد، شدت‌های معمولی میدان مغناطیسی خیلی اثر گذار نیست. به نظر می‌رسد درصورتی که دستگاهی آب را به آب مغناطیسی تبدیل می‌کند، درصورتی که کیفیت اولیه آب از آب معمولی انحراف زیادی داشته باشد، اثرات آن بارزتر است.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بابت تأمین هزینه‌های طرح پژوهشی با کد قرارداد ۱۰-۱۴۰۱-۰۲ کمال تشکر را دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abedi-Koupai, J., Afyuni, M., Mostafazadeh, B., & Bagheri, M. R. (2001, September). Influence of treated wastewater and irrigation systems on soil physical properties in Isfahan province. In *ICID International workshop on waste water reuse management. Sep* (pp. 19-20).

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.

Alizadeh, A. (2010). *Drip irrigation (principles and operations)*. Emam Reza Press. 494 pp.

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

Bull, F. C., Al-Ansari, S. S., Biddle, S., Borodulin, K., Buman, M. P., Cardon, G. ... & Willumsen, J. F. (2020). World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. *British journal of sports medicine*, *54*(24), 1451-1462.

Celik, Ö., Atak, Ç., & Rzakulieva, A. (2008). Stimulation of rapid regeneration by a magnetic field in Paulownia node cultures. *Journal of Central European Agriculture*, *9*(2), 297-304.

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.

El Sayed, H. E. S. A. (2014). Impact of magnetic water irrigation for improve the growth, chemical composition and yield production of broad bean (Vicia faba L.) plant. *American journal of experimental agriculture*, *4*(4), 476.

Hamza, A. H., Shreif, M., El-Azeim, A., Mohamad, M., & Mohamed, W. A. (2021). Impacts of Magnetic Field Treatment on Water Quality for Irrigation, Soil Properties and Maize Yield. *Journal of Modern Research*, *3*(1), 51-61.

Helmy, A. M., Niel, E. M., Shaban, K. A., & Ramadan, M. F. (2023). Magnetic Treatment of Irrigation Water and Seeds and Its Effect on the Productivity and Quality of Wheat (Triticum aestivium L.) Grown in Saline Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1-18.

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. Third Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 413 p.

Khoshravesh, M., & Pourgholam-Amiji, M. (2023). Effect of Water Stress on Strawberry Yield and Yield Components using Magnetized Water. *Journal of Water Research in Agriculture*, *36*(4), 441-453.

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.

Khoshravesh, M., Hosseini, S. M., & 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.

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.

Khoshravesh, M., Pourgholam-Amiji, M., & Emami Ghara, F. (2023). The Effect of Magnetized Saline Water on Yield and Yield Components of Strawberry (Fragaria ananassa cv. Silva). *Water and Soil, 37*(2), 203-217.

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

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.

Mohamed, A. I. (2013). Effects of magnetized low quality water on some soil properties and plant growth. *International Journal of Research in Chemistry and Environment, 3*(2), 140-147.

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).

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.

Pourgholam-Amiji, M., & Khoshravesh, M. (2022). The Effect of Irrigation with Magnetically Treated Effluent on Uptake of Some Heavy Metals in Maize Cultivation. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 53*(5), 1079-1091.

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. (2020). 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.

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.

Rosensweig, R. E. (2002). Heating magnetic fluid with alternating magnetic field. *Journal of magnetism and magnetic materials, 252*, 370-374.

Saliha, B. B. (2005). Bioefficacy testing of GMX online magnetic water conditioner in grapes var. muscat. *Tamil Nadu agricultural university. Project Completion Project*.

Sergey, G., & Svetlana, S. (2002). Heavy metals as contaminants of agricultural lands of Belarus. In *17. World congress of soil science, Bangkok (Thailand), 14-21 Aug 2002*.

Tavassoli, A., Ghanbari, A., Amiri, E., & Paygozar, Y. (2010). Effect of municipal wastewater with manure and fertilizer on yield and quality characteristics of forage in corn. *African Journal of Biotechnology, 9*(17), 2515-2520.

Wei, Z., Paredes, P., Liu, Y., Chi, W. W., & Pereira, L. S. (2015). Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agricultural Water Management*, *147*, 43-53.

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.

The Effect of Irrigation with Magnetically Effluent on Soil Chemical Properties, Water Productivity and Heavy Metals Uptake by Maize

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

The crisis of food security and the reduction of access to water and soil resources for agriculture is a serious and big challenge, that their effects are significant on different societies. In this situation, to face the challenge of food security and preserve water and soil resources, it is necessary to plan and manage water and soil resources in the best possible way. The reuse of treated effluent, which is increasing in the country, can reduce the pressure on water resources. However, it should be noted that the effluent usually contains contaminated, chemical, and microbial substances that may be unsuitable for some applications. Magnetic water is one of the methods used to improve the quality of water and soil. In this method, water is influenced by a magnetic field. This process causes changes in the physical and chemical properties of water and can improve water quality.

Materials and Methods:

This research was conducted to investigate the effects of using the treated magnetic effluent on chemical properties and heavy metals of soil, water productivity, and uptake of heavy metals by Maize plants. To conduct the research, a factorial experiment was conducted in the form of a randomized complete block design with three replications in two crop seasons (2021 and 2022) in Babolsar City. The treatments included irrigation with well water, irrigation with a mixture of 25% effluent and 75% well water, irrigation with a mixture of 50% effluent and 50% well water, irrigation with a mixture of 75% effluent and 25% well water, and irrigation with 100% effluent in conditions. All these were in the conditions of application of magnetic field and without magnetic field effect.

Results and Discussion:

The results showed that the effect of irrigation water and mixing of water and effluent on electrical conductivity, solutes, and heavy metals in the soil at different depths was significant at the probability level of 1%. On average, irrigation with magnetic water decreased electrical conductivity by 33.05%, lead by 37.45%, and cadmium by 65.28%. The results of maize water productivity showed that the effect of irrigation water and water and effluent mixing on biological, physical, wet forage, and dry forage productivity was significant and increased the values of biological, physical, wet forage, and dry forage productivity by 11.51, 10.92, 12.78, and 14.6%, respectively, compared to non-magnetic effluent. By using magnetic water, the concentration of lead, cadmium, zinc, and nickel metals in maize seeds decreased by 19.84%, 19.76%, 15.48%, and 23.01% respectively.

Conclusion:

The use of magnetic technology enables the optimal use of unusable water and increases the yield and water productivity of plants. Also, this technology can be effective in reducing the accumulation of heavy metals in the soil and maize plants using effluent.

Keywords: Food Security, Improving Water Quality, Magnetic Technology, Mixing of Water and Effluent, Water Resources.