

The Effect of Irrigation with Magnetically Treated Effluent on Chemical Properties and Soil Heavy Metals

MOJTABA KHOSHRAVESH^{1*}, SEYEDEH MAHSA HOSSEINI¹, MASOUD POURGHOLAM-AMIJI²

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: June. 9, 2021- Revised: June. June. 25, 2021- Accepted: July. 10, 2021)

ABSTRACT

Increase in population and limitation of food resources, leads to decline accessing to agricultural water and soil resources and faced human beings with the great challenge of food security and regional and international crises. Disorders in the plant due to heavy metal toxicity in plants may eventually reduce plant growth. One of the methods that can be applied to remediate the soil is using of magnetic water. In this study, the effect of using magnetically treated effluent on the chemical properties and traceability of soil heavy metals was investigated. For this purpose, a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications in 2020 at Babolsar city. Treatments include: irrigation with well water (W₁), irrigation with mixing 25% of effluent and 75% of well water (W₂), irrigation with the mixing of 50% of effluent and 50% of well water (W₃), irrigation with mixing of 75% of effluent and 25% of water Well (W₄), irrigation with 100% effluent (W₅) under magnetic field (I₁) and without magnetic field (I₂). The results showed that the effect of irrigation type and water and effluent mixing on electrical conductivity, solutes, and heavy metals in the soil at different depths was significant at 1% probability level. On average, irrigation with magnetic water reduced electrical conductivity by 30.43%, lead by 35.25%, and cadmium by 56.11% in the soil profile. In treatments with higher effluent mixing percentages, the number of solutes increased in different soil depths, which was due to higher amounts of elements, especially heavy metals in the effluent. Therefore, by using magnetic technology to reduce the solutes and heavy metals in the soil, provided the conditions for better cultivation in terms of reducing the toxicity of plants due to less absorption of heavy metals.

Keywords: Soil Remediation, Lead, Cadmium, Water and Effluent Mixing, Magnetic Field.

اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی و فلزات سنگین خاک

مجتبی خوش‌روش^{۱*}، سیده مهسا حسینی^۱، مسعود پورغلام آمیجی^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زارعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۴/۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۴/۱۹)

چکیده

با توجه با افزایش روزافزون جمعیت و محدودیت منابع غذایی، سهم دسترسی به منابع آب و خاک مطلوب کشاورزی رو به کاهش بوده و بشر را با چالش بزرگ امنیت غذایی و بحران‌های منطقه‌ای و بین‌المللی روبه‌رو کرده است. سمیت فلزات سنگین در گیاهان سبب بروز اختلالاتی در گیاه شده که در نهایت ممکن است سبب کاهش رشد گیاه گردد. یکی از روش‌هایی که می‌توان برای اصلاح خاک استفاده نمود، کاربرد آب مغناطیسی است. در این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی و ردیابی فلزات سنگین خاک پرداخته شد. بدین منظور، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۹ در شهرستان بابلسر انجام شد. تیمارها شامل آبیاری با آب چاه (W₁)، آبیاری با اختلاط ۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه (W₂)، آبیاری با اختلاط ۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه (W₃)، آبیاری با اختلاط ۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه (W₄)، آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب (W₅) در شرایط اعمال میدان مغناطیسی (I₁) و بدون میدان مغناطیسی (I₂) بود. نتایج نشان داد که اثر نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر هدایت الکتریکی، املاح و فلزات سنگین خاک در عمق‌های مختلف در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۰/۴۳ درصدی هدایت الکتریکی، کاهش ۳۵/۲۵ درصدی سرب و کاهش ۵۶/۱۱ درصدی مدار کادمیوم در پروفیل خاک شد. در تیمارهای با درصد اختلاط بیشتر پساب، مقدار املاح در عمق‌های مختلف خاک افزایش یافت که به دلیل مقادیر بیشتر عناصر به ویژه فلزات سنگین موجود در پساب مورد استفاده بود. بنابراین با استفاده از فن‌آوری مغناطیسی می‌توان برای کاهش املاح و فلزات سنگین خاک، شرایط را برای کشت بهتر از لحاظ کاهش سمیت گیاهان به جذب فلزات سنگین مهیا نمود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، سرب، کادمیوم، اختلاط آب و پساب، میدان مغناطیسی.

مقدمه

می‌شود. از بین منابع مختلف پساب‌ها و منابع برگشتی، فاضلاب‌های خانگی به خاطر حجم زیاد و کیفیت مناسب‌تر، بعد از طی مراحل تصفیه برای مصارف کشاورزی از اولویت بیشتری برخوردار می‌باشد (Ataee *et al.*, 2021; Khoshravesh *et al.*, 2021). با توجه به این‌که تولید فاضلاب کمتر تحت تأثیر خشکسالی می‌باشد، بنابراین می‌توان پساب تصفیه‌شده را به‌عنوان یک منبع آبی پایدار، حتی در مواقع خشکسالی به‌حساب آورد. تقریباً در اغلب کشورهای در حال توسعه، گزینه دیگری جز استفاده از پساب در آبیاری وجود ندارد. به‌طوری‌که حتی ممکن است جهت تأمین مواد مغذی در خاک و همچنین ارزان‌تر بودن آب مصرفی، از پساب رقیق نشده در آبیاری نیز استفاده کنند (Alloway, 2001; Rahimi & Ebrahimi, 2021).

استفاده از پساب‌ها می‌تواند روی خاک، محصولات کشاورزی و آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی اثرگذار باشد.

به‌دلیل افزایش نیاز روزانه انسان به غذا، کشاورزی باید از نظر تولید با منابع آب موجود توسعه یابد. در این راستا کشت آبی به توجه بیشتری نیاز دارد، زیرا میزان تولید بیشتر در واحد سطح با کشت آبی به‌دست می‌آید. منابع آب جدید برای چنین توسعه‌ای محدود است. به‌دلیل محدودیت منابع آب، تاکید بسیار زیادی بر استفاده موثرتر از منابع آب حاضر و استفاده از آب‌های تلف شده و آب‌های شور و لب‌شور برای آبیاری می‌شود (Liaghat *et al.*, 2018; Willer, & Lernoud, 2019). لذا برای داشتن یک کشاورزی موفق، لازم است که با اعمال مدیریت‌های صحیح از این آب‌ها به نحو مطلوب استفاده کرد (Pourgholam-Amiji *et al.*, 2021).

مصارف کشاورزی با توجه به حجم زیاد مورد نیاز، به‌عنوان یکی از مصارف اصلی پساب‌ها و آب‌های برگشتی محسوب

2001). همچنین کادمیوم ممکن است موجب ضایعات کلیوی، افزایش فشار خون، جهش‌زایی و سرطان‌زایی شود. سرب از جمله فلزات سنگین خطرناک در محیط‌زیست محسوب می‌شود که از طریق منابع مختلف وارد محیط‌زیست می‌شود. سرب باعث ایجاد بیماری کم خونی می‌شود. علائم و انواع اثرات سرب بسته به میزان آن ممکن است به صورت خستگی شدید، ناراحتی شکمی، کم خونی، اختلال در تنفس سلولی، اثر بر سیستم اعصاب و یا به حالت کما ظاهر شوند (Karimi, 2013). اگرچه بدن انسان به عناصری از قبیل 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 (Liu et al., 2020). به هر حال، وجود عناصر غذایی موجود در فاضلاب سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی می‌شود اما آثار منفی احتمالی این منابع آب در آلودگی محیط‌زیست، گیاه و انسان باید در نظر گرفته شود (Abedi-Koupai et al., 2013; Izadpanah & Sarrafzadeh, 2020). نوع سامانه آبیاری و روش بکارگیری در توزیع این منابع آب نامتعارف و مدیریت آبیاری نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Ahmed & Slima, 2018).

سرنوشت فلزات سنگین و کمپلکس‌های فلزی تخلیه شده به خاک‌ها و آب‌ها با توجه به شرایط محیطی خاک و آب بسیار متفاوت می‌باشند. عوامل تاثیرگذار زیادی بر جذب فلزات موثر می‌باشند به طوری که به جز نوع و مقدار کلونیدهای خاک، عوامل کنترل‌کننده‌ای نظیر pH، غلظت یونی محلول، غلظت کاتیونی فلز، حضور کاتیون‌های فلزی رقابت‌کننده و وجود لیگاندهای آلی و معدنی در آن نقش دارند (Alloway, 2001). (Dehghani et al., 2012) به بررسی اثرات پساب تصفیه‌شده شهری بر برخی خصوصیات شیمیایی خاک پرداختند. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار شامل تیمار شاهد (آب چاه)، پساب ورودی به تصفیه‌خانه، پساب نیمه تصفیه‌شده، پساب خروجی از تصفیه‌خانه و تیمار کود شیمیایی (نیتروژن و فسفر) و سه نوع بافت خاک (شنی، لومی و رسی) با سه تکرار انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد کلیه تیمارهای فاضلاب و تیمار کودی اعمال شده در هر سه نوع بافت خاک، pH بالاتری نسبت به تیمار شاهد دارا بودند. استفاده از تیمارهای پساب و تیمار کودی باعث افزایش شوری خاک، نیتروژن خاک، کاتیون‌های تبادل و کاتیون‌های محلول خاک به جز منیزیم محلول شد. همچنین استفاده از پساب‌ها باعث افزایش معنی‌دار کادمیوم و نیکل خاک شد ولی بر میزان سرب خاک تاثیری نداشت که می‌توان دلیل آن را ناچیز بودن مقدار سرب موجود در پساب‌های اعمال شده بیان کرد.

تاثیر پساب‌ها روی خاک شامل ایجاد تغییرات در حاصلخیزی و شوری خاک، فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی می‌باشد و در محصولات کشاورزی از نظر کمیت و کیفیت محصول مورد توجه است. استفاده از فاضلاب‌های تصفیه‌شده در کشاورزی مزایای زیادی دارد که می‌توان به کاهش فشار بر منابع آب، کاهش هزینه‌های آب و کود کشاورزی، افزایش محصولات کشاورزی، کاهش آلودگی محیط‌زیست، تقویت منابع آب و دسترسی به منابع آب با کیفیت بالاتر جهت مصارف شرب و بهداشت را نام برد (Abedi-Koupai et al., 2013; Samadi, 2016; Liaghat et al., 2021). آلودگی محیط‌زیست به فلزات سنگین به‌عنوان یک مشکل جهانی در حال گسترش، مطرح می‌باشد. فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و آثار زیان‌بار فیزیولوژیک بر جانداران، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت ویژه‌ای در آلودگی محیط‌زیست دارند (Abedi-Koupai et al., 2015; Khoshraresh et al., 2016). در پژوهش‌های زیادی مشخص شده که لجن فاضلاب به عنوان کود، یکی از منابع ورود فلزات سنگین به محیط آب و خاک به‌حساب می‌آید (Kashif et al., 2009).

کاربرد فاضلاب شهری در اراضی کشاورزی، باعث افزایش فلزات سنگین در خاک شده و میزان آن‌ها در گیاه نیز به طور چشمگیری افزایش می‌یابد (Khoshraresh et al., 2016; Ataee et al., 2021). در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری، میزان غلظت کل املاح تا دو برابر افزایش یافته و تا عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک، مقدار فلزات سنگین افزایش عمده‌ای یافته و برخی عناصر مانند کادمیوم تا ۲۳ برابر افزایش نشان داده است (Sergey & Svetlana, 2002). در میان فلزات سنگین، کادمیوم به دلیل تحرک نسبتاً زیاد در خاک و پتانسیل سمیت برای جانداران در غلظت‌های کم، دارای خطرات ویژه‌ای است. کادمیوم، فلز سنگین غیرضروری است که هیچ‌گونه مصرف متابولیک ندارد و اگرچه به طور طبیعی در غلظت‌های کم در خاک تجمع می‌یابد، ولی مقادیر زیاد آن در برخی از خاک‌ها گزارش شده است (Arora et al., 2008). از آنجایی که نیمه‌عمر بیولوژیک این فلز در بدن انسان بین ۱ تا ۳۰ سال می‌باشد و این‌که در بدن قابل تبدیل به ترکیبات دیگر نیست، لازم است تا آنجا که ممکن است مقدار ورود این عنصر به زنجیره غذایی کاهش داده شود (Naser et al., 2009).

زمانی که کادمیوم وارد بدن می‌شود، در کلیه و کبد، اندام‌های تولید مثل، سیستم‌های عصبی، تنفسی، گوارش و ماهیچه‌های قلب تجمع یافته و هنگامی که مقدار آن از حد معینی تجاوز کند، به واسطه اثر درازمدت، عوارض ناشی از آن به‌صورت بیماری‌های گوناگون نمایان می‌شود. این اثرها در کودکان از شدت بیشتر و عوارض حادث‌تری برخوردار است (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

در پژوهشی Wei et al. (2015) در چین گزارش کردند که در دو رژیم آبیاری مصرف آب کم و مصرف آب زیاد، در رژیم مصرف آب کم، کادمیوم و مس حرکت کمی داشته و دیگر فلزات به طور افقی حرکت کرده (مانند آبیاری زیرزمینی) و در فاصله‌های دور از قطره‌چکان تجمع می‌یابند ولی در رژیم آبیاری با مصرف آب زیاد، حرکت تمامی فلزات به صورت عمودی بوده و در عمق‌های بیشتر تجمع پیدا می‌کنند. Meng et al. (2016) درباره میزان فلزات سنگین در خاک در آبیاری سطحی طولانی مدت در چین گزارش کردند که غلظت فلزات در لایه سطحی، بسیار بیشتر از لایه زیرین است. Arfaeinia et al. (2016) غلظت و ارزیابی خطر فلزات سنگین موجود در محصولات کشاورزی ناشی از آبیاری با آب آلوده با پساب شهری در مزارع مختلف بوشهر را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که میزان آلودگی به فلزات سنگین در خاک و محصولات کشاورزی آبیاری شده با آب آلوده به پساب شهری و صنعتی بالاتر از مقداری بود که با آب زیرزمینی آبیاری شدند. غلظت فلزات سنگین در خاک مزارعی که با آب رودخانه آبیاری می‌شدند، به طور چشمگیری بالاتر از آب زیرزمینی مشاهده گردید ($P < 0.05$). نتایج همچنین نشان داد که در مزارع آبیاری شده با آب زیرزمینی، بالاترین میزان ضریب خطر هدف (THQ) در اسفناج بوده است که مقدار 0.1150 برای روی، $1/2846$ برای کادمیوم، 0.2030 برای مس و $1/9141$ برای سرب گزارش شد.

در مطالعه‌ای Hatamian et al. (2020) اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت فلزات سرب و کادمیوم در خاک را در شهرستان قدس مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که غلظت‌های کادمیوم و سرب در تیمار ترکیبی فاضلاب تصفیه نشده و آب چاه بیشتر از تیمار فاضلاب تصفیه شده بود. Rezapour et al. (2019)، میزان تجمع فلزات سنگین در خاک آهکی آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده را بررسی و غلظت‌های Zn، Cu، Cd، Pb و Ni در خاک سطحی در پنج سطح آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده در مقایسه با آب آبیاری شده آب شیرین (شاهد) را اندازه‌گیری کردند. نتایج پژوهش، وجود میزان قابل توجهی از فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری شده را نشان داد. میانگین غلظت این فلزات (به جز Cd) در خاک در حد مجاز بود. آبیاری با فاضلاب تصفیه شده منجر به افزایش قابل توجهی از غلظت فلزات سنگین در خاک نسبت به تیمار شاهد شد که به- ترتیب $Pb > Cu > Ni > Cd$ بودند. Khosravi et al. (2020) تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های شهری بر غلظت فلزات سنگین در خاک‌های سطحی جنوب شهر هرسین کرمانشاه را در ۱۵ ایستگاه مختلف در عمق‌های ۰-۲۰ و ۴۰-۲۰ سانتی‌متر را بررسی کردند.

نتایج نشان داد که به جز دو فلز نیکل و کبالت، میانگین مقدار کل فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی بیش‌تر از خاک‌های عمقی بود. همچنین مقایسه آماری نشان داد که مقدار کل فلزهای سنگین، روی و سرب در دو عمق خاک زمین‌های آبیاری شده با فاضلاب، دارای اختلاف معنی‌دار است. بنابراین یکی از عمده‌ترین راه‌های ورود عناصر سنگین به اراضی کشاورزی، آبیاری با پساب صنعتی می‌باشد. آبیاری با پساب صنعتی موجب افزایش مقدار سرب، نیکل، کادمیوم و کروم در خاک می‌شود که توسط پژوهشگران مختلفی گزارش شد اما در شرایطی که آبیاری زیرزمینی استفاده شود، شرایط فرق داشته و عمق تجمع فلزات سنگین خارج از محدوده توسعه ریشه می‌باشد.

در پژوهشی با محوریت اثر آب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، Heidarpour et al. (2016) هدایت الکتریکی خاک را در فاصله‌های افقی و عمودی از قطره‌چکان‌ها با استفاده از دو تیمار آب مغناطیسی و غیرمغناطیسی و سه سطح شوری $20/57$ ، 5 و 10 دسی‌زیمنس بر متر بررسی کردند. نتایج نشان داد که بین مقدار هدایت الکتریکی خاک ابتدا و انتهای فصل، اختلاف معنی‌داری وجود داشت. آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش مقدار هدایت الکتریکی خاک به میزان ۳۱ درصد نسبت به آبیاری معمولی شده بود. Mostafazadeh-Fard et al. (2012) اثر آب مغناطیسی بر املاح خاک را در عمق‌های مختلف در آبیاری قطره‌ای بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مقدار شوری خاک در اثر استفاده از آب مغناطیسی در مقایسه با آب غیرمغناطیسی، کاهش داشته است. آن‌ها گزارش کردند که افزایش $7/5$ درصدی مقدار رطوبت خاک در اثر آب مغناطیسی، باعث آبشویی میزان املاح خاک شد.

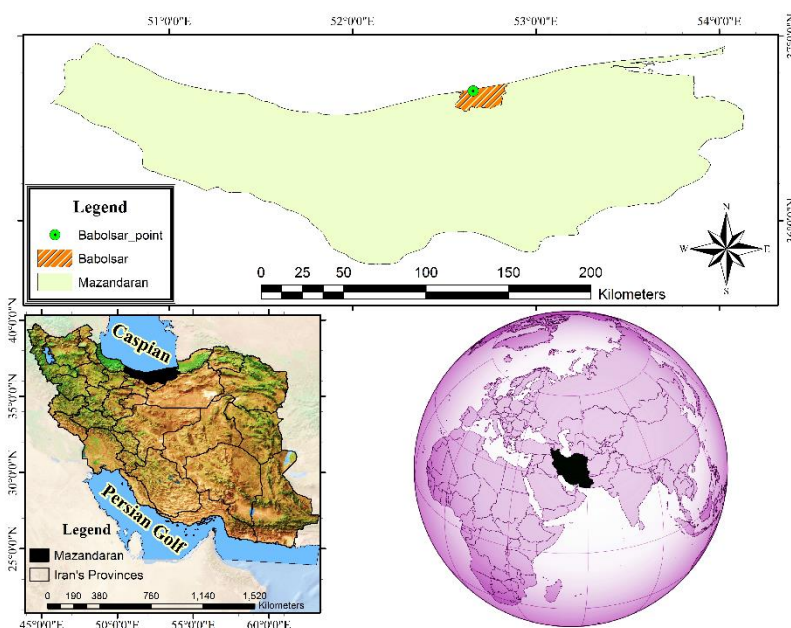
به طور کلی یافتن راه‌های سریع‌تر و ارزان‌تر برای اصلاح این آب‌ها بسیار با اهمیت است و به همین دلیل استفاده از فناوری‌های نوین از جمله فناوری‌های مغناطیسی و کاربرد روش‌های زیستی می‌تواند بسیار مفید باشد. آب مغناطیسی نسبت به آب معمولی، کشش سطحی کمتر و قابلیت نفوذ و حلالیت بیشتری داشته و افزایش فعالیت آنزیم‌ها، پروتئین‌ها، کلروفیل، رنگدانه، اسید نوکلئیک و قطبی شدن مولکول‌ها در سلول‌های زنده گیاهان را به دنبال دارد (Karimi, 2013; Khoshravesh et al., 2021). میدان مغناطیسی سبب افزایش انتقال یون‌ها از کانال‌های سلولی، تشکیل رادیکال‌های آزاد در سلول، تغییرات غلظت هورمون‌ها، تغییرات عملکرد آنزیم‌های انتقال‌دهنده یون‌ها از غشای سلولی، تغییر در سنتز و انتقال DNA و کارکرد انتقال یون کلسیم می‌شود (Rosensweig, 2002). همان‌طور که در فوق اشاره شد، تاکنون پژوهش‌هایی در مورد اثر آب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی

جغرافیایی (°E) در ارتفاع ۲۱- متر از سطح دریاهای آزاد و ۷ متر بالاتر از دریای کاسپین انجام شد. طبق داده‌های درازمدت و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن، منطقه دارای آب و هوای مرطوب می‌باشد. مطابق آمار درازمدت ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، متوسط بارندگی سالانه منطقه ۸۹۱ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد است (Pourgholam-Amiji *et al.*, 2021). شکل (۱) نیز موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

خاک انجام شده ولی در مورد اثر پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک انجام نشده است. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده مغناطیسی با دو روش آبیاری قطره‌ای بر خصوصیات شیمیایی خاک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۹ در مزرعه‌ای در روستای آرمیج کلای شهرستان بابلسر (استان مازندران) با مختصات ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه عرض جغرافیایی (°N) و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل انجام آزمایش بر روی نقشه ایران

اضافی از لایسیمترها، لوله‌هایی از جنس PVC به قطر ۵ سانتی-متر و طول ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. روی لوله‌ها سوراخ‌هایی به قطر دو میلی‌متر و به فاصله ۲/۵ سانتی‌متر در ۴ ردیف در ۵۰ سانتی‌متر از طول لوله به عنوان زهکش در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون لوله‌های زهکش، از صافی ژئوتکستایل در اطراف لوله زهکش استفاده شد. این صافی پس از دوخت به صورت پوششی هم‌قطر با لوله، به دور آن کشیده شد. لوله‌های زهکشی به طور افقی در پنج سانتی‌متری کف لوله قرار گرفتند. به طوری که 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. شکل (۲) شماتیکی از تیمارهای مورد آزمایش و جانمایی لایسیمترها را نشان می‌دهد.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل آبیاری با آب چاه (W₁)، آبیاری با اختلاط ۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه (W₂)، آبیاری با اختلاط ۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه (W₃)، آبیاری با اختلاط ۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه (W₄)، آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب (W₅) در شرایط اعمال میدان مغناطیسی (I₁) و بدون میدان مغناطیسی (I₂) بود. مغناطیس نمودن آب آبیاری با عبور آب از میان یک آهن‌ربای دائمی با شدت میدان مغناطیسی ۰/۳ تسلا ایجاد شد. خصوصیات شیمیایی آب چاه و پساب مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

لایسیمترهای مورد استفاده از جنس PVC با قطر ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر بودند. تعداد کل لایسیمترها بر اساس تیمار و تکرار برابر ۳۰ عدد بود. برای خارج کردن آب

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی آب و پساب مورد استفاده

Cd	Pb	Na	Mg	Ca	pH	EC (dS/m)	نوع منبع
۰/۰۱	۱/۰۲	۱/۶۲	۲/۱۱	۲/۹۲	۷/۲	۰/۵۷	آب چاه
۰/۰۲۵	۱۳/۱۵	۱۲/۱۷	۴۱/۵۷	۴/۳۵	۷/۹	۱/۱۱	پساب



شکل ۲- جانمایی لایسیمترها به صورت شماتیک

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 باقی مانده تا ارتفاع پنج سانتی متر پایین تر از لبه فوقانی لایسیمترها، از خاک پر شد. برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از شروع آزمایش و اعمال تیمارها، نمونه برداری از خاک لایسیمترها انجام شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۲) آورده شده است.

همان طور که بیان شد، برای انجام آزمایش حاضر و با توجه به تعداد تیمارها و تکرارها، مجموعاً ۳۰ عدد لایسیمتر سطلی مورد نیاز بود. پس از تهیه خاک زراعی مورد نظر (خاک مزرعه)، پر کردن لایسیمترها با خاک مربوطه در چند مرحله انجام شد. خاک به صورت لایه‌ای به ارتفاع ۱۰ سانتی متر 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

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک لایسیمترها

Cd	Pb	Na	Mg	Ca	EC (dS/m)	pH	ρ_b (g/cm ³)	بافت خاک	ذرات تشکیل دهنده خاک (%)			عمق (سانتی متر)
									شن	سیلت	رس	
۰/۰۲۲	۱/۰۱	۱۷/۹	۱۲/۱	۹/۲	۱/۸	۷/۴	۱/۴۸	لوم	۳۵/۲۷	۴۵/۰۴	۱۹/۶۹	۳۰-۰
۰/۰۲۲	۱/۰۰	۱۷/۸	۱۱/۹	۹/۵	۱/۹	۷/۳	۱/۵۰	لوم	۳۵/۵۰	۴۵/۱۶	۱۹/۳۴	۶۰-۳۰
۰/۰۲۵	۱/۰۲	۱۸/۰	۱۲/۰	۹/۵	۱/۸	۷/۵	۱/۵۵	لوم	۳۵/۰۶	۴۵/۳۹	۱۹/۵۵	۹۰-۶۰

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، با درصدهای مختلف اختلاط با آب چاه که در متن مقاله توضیح داده شد، مورد مصرف قرار گرفت. در پایان دوره آزمایش و پس از اتمام آبیاری‌ها، نمونه‌گیری خاک از عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی متری انجام شد و اثر آب مغناطیسی و درصد اختلاط‌های مختلف پساب بر برخی خصوصیات شیمیایی خاک شامل، هدایت الکتریکی، اسیدیته، کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر و ردیابی فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری مقدار فلزات در نمونه‌های مورد نظر، از روش طیف‌سنجی جذب اتمی

در این آزمایش، آبیاری لایسیمترها به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی شد. بخش اول از تاریخ کشت بود تا زمانی که ریشه گیاه برای استحصال آب از پروفیل خاک، به حد کافی رشد کرده باشد (ابتدای تیرماه ۱۳۹۹) و بخش دوم، از انتهای بخش اول تا روز برداشت بود (از ابتدای تیر تا اوایل آبان ۱۳۹۹). روش آبیاری مورد استفاده، قطره‌ای بوده و میزان آب آبیاری و دور آبیاری بر اساس نیاز گیاه هدف (ذرت) انجام شد. با توجه به نوع سیستم آبیاری قطره‌ای، به آبشویی نیاز نبود. لازم به ذکر است که محصول کشت شده ذرت بود که نتایج آن در این مقاله ارائه نشده و جز اهداف پژوهش حاضر نمی‌باشد. پساب مورد نظر از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری که نوع دو محسوب می‌شود، تهیه شد. سپس

و اختلاط آب و پساب بر اسیدیته خاک معنی‌دار نشد. مقدار هدایت الکتریکی خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف معنی‌دار بود. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۰/۴۳ درصدی مقدار هدایت الکتریکی پروفیل خاک شد. کاهش هدایت الکتریکی خاک در تیمار آب مغناطیسی به علت حذف مواد محلول به‌وسیله آبشویی با آب مغناطیسی در مقایسه با آب غیرمغناطیسی می‌باشد (Heidarpour et al., 2016; Pourgholam-Amiji et al., 2020; Khoshravesh et al., 2021). در مطالعه‌های Khoshravesh & Kiani (2015) اثر شوری‌های مختلف آب آبیاری را در شرایط اعمال میدان مغناطیسی و غیرمغناطیسی بر هدایت الکتریکی عمق‌های مختلف خاک بررسی کردند و نشان دادند که مقدار هدایت الکتریکی عمق‌های مختلف خاک بین تمامی تیمارهای شوری آب آبیاری دارای اختلاف معنی‌داری شد و استفاده از آب مغناطیسی باعث کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی در عمق‌های مختلف خاک شد. Mohamed (2013) نشان داد که استفاده از مغناطیس با آب شور، اثر قابل توجهی بر خاک و گیاه گوجه فرنگی داشت. وی مشاهده کرد که استفاده از آب مغناطیسی اثر معنی‌داری در کاهش هدایت الکتریکی خاک پس از برداشت محصول داشت.

(AAS^۱) استفاده شد. تکنیک AAS برای تعیین مقادیر بسیار ناچیز غلظت فلزات (در حد ppm)، در نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نحوه تهیه نمونه خاک برای قرائت توسط دستگاه جذب اتمی بدین صورت بود که به دو گرم از نمونه خاک، ۱۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک چهار نرمال اضافه و در حمام آب گرم، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از گذشت ۱۲ ساعت، نمونه صاف گردید. اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در عصاره به دست آمده توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد (Liaghat et al., 2021; Pourgholam-Amiji et al., 2020; Abedi-Koupai et al., 2013). در نهایت برای تحلیل آماری داده‌ها، از آخرین نسخه نرم‌افزار SAS (نسخه 9.4) استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

مقدار هدایت الکتریکی و اسیدیته عمق‌های مختلف خاک در پایان دوره آزمایش و برای تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج تجزیه واریانس ارایه شده در جدول (۳)، اثر نوع آبیاری (مغناطیسی و غیرمغناطیسی) و اختلاط آب و پساب بر هدایت الکتریکی خاک در عمق‌های مختلف در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب نیز بر هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار شد. اثر نوع آبیاری

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

pH			EC			درجه آزادی	منبع تغییرات
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm		
۰/۰۴۳**	۰/۰۴۱**	۰/۰۳۶**	۰/۰۳۴**	۰/۰۲۹**	۰/۰۲۷**	۲	بلوک
۳۹/۴۴ ^{ns}	۴۰/۱۸ ^{ns}	۳۹/۰۵ ^{ns}	۱۵/۸۹**	۱۴/۹۶**	۱۲/۷۲**	۱	نوع آبیاری
۴۰/۱۶ ^{ns}	۳۹/۹۹ ^{ns}	۳۹/۸۰ ^{ns}	۲۸/۴۱**	۲۲/۴۵**	۱۹/۰۸**	۴	اختلاط آب و پساب
۱/۴۳ ^{ns}	۱/۷۴ ^{ns}	۱/۱۹ ^{ns}	۸/۰۱**	۶/۹۶**	۶/۱۴**	۴	نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب
۰/۸۳۱	۰/۷۵۶	۰/۷۷۰	۰/۴۵۰	۰/۴۵۸	۰/۴۳۲	۱۸	خطا
۱/۶۵	۱/۸۷	۲/۳۲	۶/۱۲	۶/۳۲	۷/۵۴	-	ضریب تغییرات

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

بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در عمق ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب به مقدار ۴/۳۳ دسی‌زیمنس بر متر و کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری شده با آب چاه به مقدار ۱/۹۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. بالاتر بودن مقدار هدایت الکتریکی خاک در تیمارهایی که با درصد بیشتر پساب آبیاری شدند، ناشی از بالاتر بودن هدایت الکتریکی پساب و بالا رفتن غلظت املاح خاک در این تیمارها بود (جدول ۴). Kaboosi (2017) نشان داد که آبیاری میان‌مدت با فاضلاب تصفیه‌شده (به مدت ۷ سال) باعث افزایش شوری خاک می‌شود.

Mostafazadeh-Fard et al. (2012) اثر آب مغناطیسی بر املاح خاک را در عمق‌های مختلف در آبیاری قطره‌ای بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مقدار شوری خاک در اثر استفاده از آب مغناطیسی در مقایسه با آب غیرمغناطیسی، کاهش داشته است. آن‌ها بیان کردند که افزایش ۷/۵ درصدی مقدار رطوبت خاک در اثر آب مغناطیسی، باعث آبشویی میزان املاح خاک شده است. نتایج تجزیه واریانس جدول (۵) نشان می‌دهد که اثر نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر کلسیم و منیزیم خاک در عمق‌های مختلف در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین اثر

پروفیل خاک شد (جدول ۶). Saliha (2005) پژوهشی بر روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در شرایط اعمال میدان مغناطیسی انجام داد و نشان داد که مقادیر EC، pH و CaCO_3 در محلول خاک در تیمار آب مغناطیسی کاهش معنی‌داری داشت. وی پتانسیل بالای آب مغناطیسی در شست‌وشوی نمک-های خاک را در افزایش نفوذپذیری خاک موثر دانست.

متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب نیز بر کلسیم و منیزیم خاک معنی‌دار شد. مقدار کلسیم و منیزیم خاک در تمامی عمق‌ها (۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۴۰ سانتی‌متر) در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف معنی‌دار بود. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۵/۹۲ درصدی مقدار کلسیم و کاهش ۳۰/۷۷ درصدی مقدار منیزیم در

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های مقدار هدایت الکتریکی و اسیدیته عمق‌های مختلف خاک

pH			EC (dS/m)			تیمار آزمایشی
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	
۷/۵۱ a	۷/۳۸ a	۷/۳۲ a	۲/۷۱ b	۲/۳۸ b	۲/۲۲ b	نوع آبیاری
۷/۵۲ a	۷/۴۰ a	۷/۳۵ a	۳/۶۸ a	۳/۵۲ a	۳/۳۱ a	مغناطیسی
						غیرمغناطیسی
						اختلاط آب و پساب
۷/۳۵ b	۷/۳۳ b	۷/۳۲ a	۲/۲۱ e	۲/۰۶ e	۱/۹۸ e	آب چاه
۷/۳۹ b	۷/۳۴ b	۷/۳۲ a	۲/۷۱ d	۲/۵۶ d	۲/۳۹ d	۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه
۷/۴۴ ab	۷/۳۹ a	۷/۳۳ a	۳/۱۱ c	۲/۸۹ c	۲/۶۴ c	۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه
۷/۶۲ a	۷/۴۱ a	۷/۳۴ a	۳/۶۱ b	۳/۲۵ b	۳/۰۳ b	۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه
۷/۷۷ a	۷/۴۸ a	۷/۳۶ a	۴/۳۳ a	۳/۹۹ a	۳/۷۸ a	۱۰۰ درصد پساب

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.

جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر فاکتورهای مختلف بر کلسیم و منیزیم عمق‌های مختلف خاک

Mg			Ca			درجه آزادی	منبع تغییرات
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm		
۰/۰۵۷**	۰/۰۵۲**	۰/۰۵۰**	۰/۰۵۸**	۰/۰۵۶**	۰/۰۵۱**	۲	بلوک
۸۵/۵۳**	۸۱/۱۴**	۷۹/۰۸**	۷۵/۰۸**	۷۱/۳۳**	۶۷/۲۴**	۱	نوع آبیاری
۸۹/۸۴**	۸۹/۱۲**	۸۵/۴۹**	۸۶/۲۲**	۸۴/۰۸**	۷۹/۳۱**	۴	اختلاط آب و پساب
۹/۲۱**	۷/۵۰**	۷/۱۹**	۹/۰۸**	۸/۷۷**	۷/۰۹**	۴	نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب
۰/۷۵۵	۰/۶۷۴	۰/۶۶۰	۰/۵۴۹	۰/۵۱۱	۰/۵۰۱	۱۸	خطا
۸/۰۱	۸/۲۵	۹/۵۴	۹/۰۲	۹/۱۹	۱۰/۲۸	-	ضریب تغییرات

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

اثر متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب نیز بر سدیم و کلر خاک معنی‌دار شد. مقدار سدیم و کلر خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف معنی‌دار بود. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۲۲/۴۹ درصدی مقدار سدیم و کاهش ۲۶/۴۸ درصدی مقدار کلر در پروفیل خاک شد (جدول ۸). Mostafazadeh-Fard *et al.* (2012) اثر آب مغناطیسی بر املاح خاک را در عمق‌های مختلف در آبیاری قطره‌ای بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مقدار سدیم و کلر در تیمار آب مغناطیسی در مقایسه با آب غیرمغناطیسی به ترتیب ۳۳/۶ درصد و ۳۲/۵ درصد کاهش داشت. در تیمارهای با درصد اختلاط بیشتر پساب، مقدار سدیم و کلر در عمق‌های خاک افزایش یافت که به دلیل مقادیر بیشتر این عناصر در پساب مورد استفاده بود. بیشترین مقدار

بیشترین مقدار کلسیم و منیزیم به ترتیب برابر ۱۷/۳۹ و ۱۷/۸۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر مشاهده شد که مربوط به عمق ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب بود. افزایش مقدار کلسیم در خاک‌های آبیاری شده با پساب در مقایسه با آب چاه، به دلیل بالاتر بودن میزان این عنصر در کلسیم پساب (۴/۳۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر) در مقایسه با آب معمولی (۲/۹۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر) می‌باشد. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش Amindin (2012) همخوانی دارد. وی نشان داد تیمارهایی که با آب چاه نسبت به پساب آبیاری شدند، مقدار کلسیم موجود در خاک کمتر بود.

نتایج تجزیه واریانس ارایه شده در جدول (۷) نشان می‌دهد که اثر نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر سدیم و کلر خاک در تمامی عمق‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین

سدیم و کلر به ترتیب برابر ۲۱/۹۵ و ۱۶/۷۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر مشاهده شد که مربوط به عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب بود.

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های مقدار کلسیم و منیزیم عمق‌های مختلف خاک

Mg (meq/l)			Ca (meq/l)			تیمار آزمایشی
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	
نوع آبیاری						
مغناطیسی						
۱۲/۵۰ b	۱۲/۴۹ b	۱۲/۴۴ b	۱۰/۷۱ b	۱۰/۰۸ b	۹/۴۱ b	
غیرمغناطیسی						
۱۸/۱۲ a	۱۷/۹۹ a	۱۷/۹۶ a	۱۶/۲۳ a	۱۵/۷۴ a	۱۵/۴۵ a	
اختلاط آب و پساب						
آب چاه						
۱۲/۵۹ e	۱۲/۶۴ e	۱۲/۵۸ e	۹/۶۱ e	۹/۴۹ e	۹/۴۲ d	
۱۳/۹۸ d	۱۳/۹۵ d	۱۳/۸۸ d	۱۱/۱۲ d	۱۰/۵۹ d	۹/۹۵ d	۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه
۱۵/۳۰ c	۱۵/۰۵ c	۱۴/۹۷ c	۱۳/۵۸ c	۱۲/۸۱ c	۱۲/۲۸ c	۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه
۱۶/۸۰ b	۱۶/۷۱ b	۱۶/۶۱ b	۱۵/۶۵ b	۱۵/۰۸ b	۱۴/۷۸ b	۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه
۱۷/۸۸ a	۱۷/۸۵ a	۱۷/۹۶ a	۱۷/۳۹ a	۱۶/۵۸ a	۱۶/۲۲ a	۱۰۰ درصد پساب

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.

جدول ۷- تجزیه واریانس تأثیر فاکتورهای مختلف بر سدیم و کلر عمق‌های مختلف خاک

Cl			Na			درجه آزادی	منبع تغییرات
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm		
۰/۰۶۵**	۰/۰۵۷**	۰/۰۵۴**	۰/۰۷۶**	۰/۰۶۹**	۰/۰۶۸**	۲	بلوک
۸۴/۸۷**	۸۲/۲۵**	۸۰/۱۱**	۹۲/۰۱**	۸۹/۸۵**	۸۹/۱۶**	۱	نوع آبیاری
۹۰/۱۴**	۸۶/۰۲**	۸۳/۴۶**	۹۹/۰۳**	۹۷/۱۹**	۹۵/۴۴**	۴	اختلاط آب و پساب
۸/۶۹**	۷/۱۸**	۶/۹۸**	۱۲/۱۹**	۱۱/۸۷**	۱۱/۲۱**	۴	نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب
۰/۷۰۱	۰/۶۲۹	۰/۶۰۵	۰/۷۹۲	۰/۷۴۵	۰/۷۳۶	۱۸	خطا
۱۲/۱۱	۱۷/۲۱	۱۶/۱۳	۱۵/۹۶	۱۷/۰۱	۱۸/۱۷	-	ضریب تغییرات

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

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های مقدار سدیم و کلر عمق‌های مختلف خاک

Cl (meq/l)			Na (meq/l)			تیمار آزمایشی
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	
نوع آبیاری						
مغناطیسی						
۱۲/۶۳ b	۱۲/۶۳ b	۱۲/۵۹ b	۱۷/۴۳ b	۱۷/۳۹ b	۱۷/۸۰ b	
غیرمغناطیسی						
۱۷/۲۶ a	۱۷/۱۵ a	۱۷/۰۸ a	۲۲/۳۶ a	۲۲/۳۲ a	۲۲/۱۹ a	
اختلاط آب و پساب						
آب چاه						
۱۲/۳۷ d	۱۲/۵۴ d	۱۲/۴۷ e	۱۷/۲۱ c	۱۷/۱۷ c	۱۷/۱۴ c	
۱۳/۸۵ c	۱۳/۸۳ c	۱۳/۷۵ d	۱۹/۰۸ b	۱۸/۹۹ b	۱۸/۸۹ b	۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه
۱۵/۰۰ b	۱۴/۹۵ b	۱۴/۹۶ c	۱۹/۴۵ b	۱۹/۴۶ b	۱۹/۳۲ b	۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه
۱۶/۷۲ a	۱۶/۵۱ a	۱۶/۷۰ a	۲۱/۷۸ a	۲۱/۷۹ a	۲۱/۴۴ a	۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه
۱۶/۷۸ a	۱۶/۶۲ a	۱۶/۲۹ b	۲۱/۹۵ a	۲۱/۸۶ a	۲۱/۴۴ a	۱۰۰ درصد پساب

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.

میانگین ورود عنصر سرب از طریق آب چاه و پساب تصفیه‌شده به خاک نیز به ترتیب ۱/۰۲ و ۱۳/۱۵ میکروگرم در لیتر بود (جدول ۲). بر اساس استاندارد سازمان جهانی بهداشت که برای خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توصیه شده است، خاکی که به مقدار ۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و یا کم‌تر دارای فلز سرب باشد، در دسته خاک‌های با آلودگی کم قرار می‌گیرد (Bull et al., 2020). جدول (۱۰) نشان می‌دهد که استفاده از پساب باعث شده

نتایج تجزیه واریانس ارایه شده در جدول (۹) نشان می‌دهد که اثر نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر فلزات سنگین سرب و کادمیوم خاک در تمامی عمق‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد؛ همچنین اثر متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب نیز بر سرب و کادمیوم خاک معنی‌دار شد. میانگین مقدار سرب خاک در ابتدا و انتهای فصل آزمایش به ترتیب برابر ۱/۰۱ و ۲/۸۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک می‌باشد (جدول ۱۰). همچنین

مقدار تجمع عنصر سرب در لایه‌های تحتانی خاک افزایش یابد. باتوجه به سمیت فلز سنگین سرب برای انسان و خطرات ناشی از آن، محدودیت استفاده از این پساب به منظور آبیاری و مدیریت در استفاده از آن را الزامی می‌نماید. به عبارتی می‌توان با روش آبیاری تناوبی آب چاه و پساب، از تجمع این فلز سمی در نیمرخ خاک جلوگیری نمود و مدت زمان بیشتری بدون نیاز به آبشویی می‌توان از این خاک برای کشاورزی استفاده کرد (Amindin, 2012). همچنین Liaghat *et al.* (2021) نشان دادند که در مورد حرکت سرب در خاک در جریان رو به پایین تیمار آبیاری سطحی با فلز سرب، حدوداً ۶۵ درصد فلز سرب در لایه ۱۰ سانتی‌متری ابتدایی خاک تثبیت شده و ۲۵ درصد در لایه ۱۰ سانتی‌متری دوم خاک نفوذ کرد و ۱۰ درصد باقیمانده از سرب تزریق شده در آبیاری سطحی، احتمالاً به صورت تلفات بود.

جدول ۹- تجزیه واریانس تأثیر فاکتورهای مختلف بر فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمق‌های مختلف خاک

cd			Pb			درجه آزادی	منبع تغییرات
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm		
۰/۰۰۷۱**	۰/۰۰۵۸**	۰/۰۰۵۴**	۰/۰۳۳**	۰/۰۲۶**	۰/۰۲۱**	۲	بلوک
۰/۹۷**	۰/۸۹**	۰/۸۶**	۱۳/۱۸**	۱۳/۰۷**	۱۲/۷۲**	۱	نوع آبیاری
۱/۹۱**	۱/۷۸**	۱/۷۴**	۱۹/۵۰**	۱۹/۴۹**	۱۹/۰۸**	۴	اختلاط آب و پساب
۰/۳۹**	۰/۳۷**	۰/۳۱**	۴/۴۱**	۴/۰۸**	۴/۳۹**	۴	نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب
۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۴۸	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳	۰/۰۵۸	۱۸	خطا
۷/۳۳	۷/۵۰	۸/۱۲	۹/۱۲	۹/۷۱	۱۰/۴۵	-	ضریب تغییرات

*، ** و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال پنج درصد، معنی داری در سطح احتمال یک درصد و عدم وجود اختلاف معنی دار.

جدول ۱۰- مقایسه میانگین‌های مقدار فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمق‌های مختلف خاک

cd (mg/kg)			Pb (mg/kg)			تیمار آزمایشی
60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	
۰/۰۲۴ b	۰/۰۲۲ b	۰/۰۲۲ b	۲/۲۷ b	۲/۲۷ b	۲/۲۵ b	نوع آبیاری
۰/۰۵۹ a	۰/۰۵۱ a	۰/۰۴۶ a	۳/۵۸ a	۳/۴۲ a	۳/۴۹ a	مغناطیسی
۰/۰۲۰ c	۰/۰۲۰ b	۰/۰۲۰ b	۱/۸۹ d	۱/۸۷ d	۱/۸۷ d	غیرمغناطیسی
۰/۰۲۸ c	۰/۰۲۴ b	۰/۰۲۳ b	۲/۱۰ d	۲/۰۲ d	۱/۹۹ d	اختلاط آب و پساب
۰/۰۳۹ b	۰/۰۳۳ ab	۰/۰۳۰ ab	۲/۶۹ c	۲/۶۷ c	۲/۴۹ c	آب چاه
۰/۰۵۷ a	۰/۰۴۷ a	۰/۰۴۵ a	۳/۴۲ b	۳/۴۵ b	۳/۳۱ b	۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه
۰/۰۶۳ a	۰/۰۵۸ a	۰/۰۵۲ a	۴/۵۲ a	۴/۲۱ a	۴/۶۹ a	۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه
						۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه
						۱۰۰ درصد پساب

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

مقدار سرب خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف معنی دار بود. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۵/۲۵ درصدی مقدار سرب در پروفیل خاک شد. بیشترین مقدار سرب برابر ۴/۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که مربوط به لایه سطحی خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب بود. میزان کادمیوم در دو منبع آب چاه و پساب تصفیه شده به ترتیب برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۲۵ میکروگرم بر لیتر بود. در هر سه عمق آبیاری با درصد اختلاط‌های مختلف پساب، باعث افزایش تجمع کادمیوم در خاک شد و این اختلاف از لحاظ آماری معنی دار بود (جداول ۱۰). علت این امر می‌تواند بخاطر بالاتر بودن این عنصر در پساب تصفیه شده نسبت به آب چاه باشد. Chen *et al.* (2010) نشان دادند که آبیاری با پساب شهری منجر به افزایش شاخص انباشت آلودگی روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل در خاک شده است. همچنین بیان کردند که عناصر سنگین از جمله کادمیوم و سرب به دلیل تحرک کم، به مرور زمان در خاک انباشته می‌شوند. مقدار کادمیوم خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف معنی دار بود. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۵۶/۱۱ درصدی مقدار کادمیوم در پروفیل خاک شد. بیشترین مقدار کادمیوم برابر ۰/۰۶۳ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که مربوط به لایه تحتانی خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب بود. درست است که آبیاری با پساب شهری منجر به افزایش شاخص انباشت آلودگی فلزات سنگین در خاک می

مقدار سرب خاک در تمامی عمق‌ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف معنی دار بود. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۵/۲۵ درصدی مقدار سرب در پروفیل خاک شد. بیشترین مقدار سرب برابر ۴/۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که مربوط به لایه سطحی خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب بود. میزان کادمیوم در دو منبع آب چاه و پساب تصفیه شده به ترتیب برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۲۵ میکروگرم بر لیتر بود. در هر سه عمق آبیاری با درصد اختلاط‌های مختلف پساب، باعث افزایش تجمع کادمیوم در خاک شد و این اختلاف از لحاظ آماری معنی دار بود (جداول ۱۰). علت این امر می‌تواند بخاطر بالاتر بودن این عنصر در پساب تصفیه شده نسبت به آب چاه باشد. Chen *et al.*

از چالش‌های اساسی در محیط‌زیست، افزایش تدریجی غلظت فلزات سنگین در خاک و به تبع آن آلوده شدن خاک زیر کشت گیاهان مختلف به این فلزات می‌باشد. این پژوهش با هدف اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی و فلزات سنگین خاک، در شرایط اختلاط‌های مختلف آب و پساب و در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی انجام شد. نتایج نشان داد که آبیاری با درصد اختلاط‌های مختلف آب چاه و پساب در شرایط میدان مغناطیسی، اثر متفاوتی بر خصوصیات شیمیایی و فلزات سنگین خاک داشت. استفاده از آب مغناطیسی باعث کاهش معنی‌دار املاح و فلزات سنگین خاک در عمق‌های مختلف شده است. به طور متوسط، آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش ۳۰/۴۳ درصدی هدایت الکتریکی، کاهش ۳۵/۹۲ درصدی مقدار کلسیم، کاهش ۳۰/۷۷ درصدی مقدار منیزیم، کاهش ۲۲/۴۹ درصدی مقدار سدیم، کاهش ۲۶/۴۸ درصدی مقدار کلر، کاهش ۳۵/۲۵ درصدی سرب و کاهش ۵۶/۱۱ درصدی مقدار کادمیوم در پروفیل خاک شد. بنابراین توصیه می‌شود در زمین‌هایی که به‌طور مداوم از پساب به‌منظور آبیاری استفاده می‌شود، با توجه به نوع محصول و آستانه تحمل آن به شوری، می‌توان جهت کنترل شوری از فناوری آب مغناطیسی استفاده کرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abedi-Koupai, J., Khoshrovesh, 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.
- Abedi-Koupai, J., Matin, N., & Javahery Tehrani, M. (2015). Uptake of cadmium by cress, lettuce and tomato in Cd-contaminated soil, *Journal of Soil and Plant Interactions*, 6(21), 41-53. (In Farsi)
- Ahmed, D. A., & Slima, D. F. (2018). Heavy metal accumulation by *Corchorus olitorius* L. irrigated with wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14996-15005.
- Alloway, B. J. (2001). Heavy metal in soil. New York: John Wiley and sons. Inc; 2001. P.20-28.
- Amindin, A. (2012). Use of treated municipal wastewater in drip irrigation and its effect on physical, chemical and biological properties of soil. Master Thesis in Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Shiraz University. (In Farsi)
- Arfaeina, H., Ranjbar Vakilabadi, D., Seifi, M., Asadgol, Z., & Hashemi, S. E. (2016). Study of Concentrations and Risk Assessment of Heavy Metals Resulting From the Consumption of Agriculture Product in Different Farms of Dayyer City, Bushehr. *Iranian South Medical Journal*, 19(5), 839-854. (In Farsi)
- Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., & Mittal, N. (2008). Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food chemistry*, 111(4), 811-815.
- Ataee, A., Ebrahimi, N., Asadi, H., & Gorji, M. (2021). Organic Pollutants of Sewage Sludge, Fate in Soil and their Analytical Methods. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 577-595. (In Farsi)
- 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.
- Chen, Z. F., Zhao, Y., Zhu, Y., Yang, X., Qiao, J., Tian, Q., & Zhang, Q. (2010). Health risks of heavy metals in sewage-irrigated soils and edible seeds in Langfang of Hebei province, China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(2), 314-320.
- Dehghani, R., Forghani, A., & Ashrafzadeh, A. (2012). *The effect of irrigation with wastewater of Anzali water treatment plant on some chemical properties of soil and corn plant*. Master Thesis in

شود اما عناصر سنگین از جمله کادمیوم به دلیل تحرک کم، به مرور زمان در عمق‌های زیرین خاک انباشته می‌شود که نظر دیگر محققان هم همین بوده است. با این حال همانند فلز سرب، در شرایط استفاده از فلز کادمیوم نیز آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش وجود کادمیوم در تمامی عمق‌های خاک شد. این به ذات میدان مغناطیسی بر می‌گردد و از اهداف مطالعه حاضر هم بود (بررسی تأثیر استفاده از پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک). همچنین باید گفت که آب مغناطیسی نسبت به آب معمولی، کشش سطحی کمتر و قابلیت نفوذ و حلالیت بیشتری داشته و شاید دلیل رخداد حاضر، همین موضوع بوده باشد. مقدار عناصر سنگین جابه‌جا شده در محیط خاک تابعی از pH، میزان رس، مواد آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی است و با افزایش pH، کربنات و مواد آلی خاک، تحرک عناصر سنگین کاهش می‌یابد. بنابراین خاک‌های اسیدی توانایی خیلی کمی نسبت به خاک‌های خنثی در جذب و نگهداری کادمیوم از خود نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

استفاده مجدد از پساب به عنوان یکی از راه‌های اصلی رفع تنگناهای کمبود آب، جهت افزایش سطح زیر کشت و تأمین غذا در کشورهای در حال توسعه مطرح می‌باشد. در حال حاضر یکی

- Soil Fertility and Chemistry, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan. (In Farsi)
- Hatamian, L., Rafati, M., & Farsad, F. (2020). Effect of irrigation with wastewater on lead and cadmium accumulations in the soils and plants of wheat and barley. *Water and Irrigation Management*, 9(2), 321-332.
- 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 Farsi)
- Izadpanah, M., & Sarrafzadeh, M. (2020). Investigating the Potential of Swimming Pools Sullage Reuse for Landscape Irrigation, Case Study: Tehran city. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 31(1), 99-110. (In Farsi)
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. Third Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 413 p.
- Kaboosi, K. (2017). The assessment of treated wastewater quality and the effects of mid-term irrigation on soil physical and chemical properties (case study: Bandargaz-treated wastewater). *Applied Water Science*, 7(5), 2385-2396.
- Karimi, M. (2013). Investigation of the effect of air pollution caused by Zanjan lead and zinc factory on the amount of lead in the blood of residents, plants and soil of the region. Master Thesis, Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences. (In Farsi)
- Kashif, S. R., Akram, M., Yaseen, M., & Ali, S. (2009). Studies on heavy metals status and their uptake by vegetables in adjoining areas of Hudhara drain in Lahore. *Soil Environ*, 28(1), 7-12.
- 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 Farsi)
- 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 Farsi)
- Khoshravesh, M., Erfanian, F., Pourgholam-Amiji, M. (2021). The Effect of Irrigation with Treated Magnetic Effluent on Yield and Yield Components of Maize. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 115-128. (In Farsi)
- Khosravi, Y., Zamani, A., Pari Zanganeh, A., & Nouri, F. (2020). Study of the Effect of Irrigation with Urban Wastewater on the Concentration of Heavy Metals in Surface Soils of the Southern Parts of Harsin, Kermanshah. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(6), 1550-1564. (In Farsi)
- 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 Farsi)
- Liaghat, A., Pourgholam-Amiji, M., & Mashhoury Nejad, P. (2018). The Effect of Surface and Subsurface Irrigation with Saline Water and Mulch on Corn Yield, Water Productivity and Solute Distribution in the Soil. *Water and Soil*, 32(4), 661-674. (In Farsi)
- Liu, J., Xue, J., Yuan, D., Wei, X., & Su, H. (2020). Surfactant Washing to Remove Heavy Metal Pollution in Soil: A Review. *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*, 13(1), 3-16.
- Meng, W., Wang, Z., Hu, B., Wang, Z., Li, H., & Goodman, R. C. (2016). Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: A case study assessment. *Agricultural Water Management*, 171, 153-161.
- 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.
- 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.
- Naser, H. M., Shil, N. C., Mahmud, N. U., Rashid, M. H., & Hossain, K. M. (2009). Lead, cadmium and nickel contents of vegetables grown in industrially polluted and non-polluted areas of Bangladesh. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 34(4), 545-554.
- 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.
- Rahimi, G., & Ebrahimi, E. (2021). The Impact of Organic and Inorganic Amendments on Removal of Heavy Metals in Soils Polluted with Sewage Sludge. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3071-3085. (In Farsi)
- 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*.
- Samadi, M. (2016). *Application investigation of electromagnetism on dripper clogging in*

- irrigation with agricultural effluent*. Master Thesis in Irrigation and Drainage, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. (In Farsi)
- 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*.
- 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.
- Willer, H., & Lernoud, J. (2019). *The world of organic agriculture. Statistics and emerging trends 2019* (pp. 1-336). Research Institute of Organic Agriculture FiBL and IFOAM Organics International.