

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی تغییرات شیمیایی خاک ناشی از آبیاری با پساب مغناطیسی شده در شرایط کشت برنج

مجتبی خوش روش^{۱*}، مسعود پورغلام آمیجی^۲، الهه کنعانی^۳، سید محمدجواد میرزایی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

افزایش جمعیت جهان فشار زیادی بر منابع طبیعی وارد کرده و امکان بهره‌برداری از آب و خاک باکیفیت برای کشاورزی را محدود ساخته است؛ موضوعی که پیامدهایی مانند تهدید تولید غذا و شکل‌گیری بحران‌های گسترده به دنبال دارد. وجود فلزات سنگین در محیط رویشی نیز کارکردهای طبیعی گیاه را مختل کرده و در نهایت روند رشد را کاهش می‌دهد. یکی از راهکارهای پیشنهادی بهبود وضعیت خاک، استفاده از آب دارای ویژگی‌های مغناطیسی است. آزمایش در سال ۱۴۰۴ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار و تیمارهای آب چاه، ترکیب‌های مختلف آب چاه و پساب به نسبت‌های ۲۵ به ۷۵، ۵۰ به ۵۰، ۷۵ به ۲۵ و آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب، در شرایط حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی اجرا شد. تأثیر پساب مغناطیسی شده بر ویژگی‌های شیمیایی خاک، از جمله هدایت الکتریکی، pH، مقادیر کلسیم، منیزیم و فلزات سنگین مانند سرب و کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقایسه میانگین پارامترهای شیمیایی خاک نشان داد که بین تیمارهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی اختلاف معنی‌داری وجود دارد؛ به طوری که آبیاری با آب مغناطیسی باعث کاهش هدایت الکتریکی، کلسیم، منیزیم، سرب و کادمیوم به ترتیب به میزان ۲۸/۴۲، ۳۲/۸۵، ۲۱/۹۲، ۳۳/۷۴ و ۴۵/۶۹ درصد در پروفیل خاک شد. نتایج این بررسی می‌تواند به بهبود تولید در مناطق دارای محدودیت منابع آبی کمک کند و در کنار آن، رویکردهایی برای استفاده مؤثرتر از آب‌های بازیافتی فراهم سازد.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، بازیافت آب، فلزات سنگین، کیفیت خاک، میدان مغناطیسی

مقدمه

کشاورزی داشته باشد. مغناطیسی کردن آب و پساب، یک روش نوین و اقتصادی است که می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی آب را تغییر دهد، جذب مواد مغذی توسط گیاهان را افزایش داده و به بهبود عملکرد گیاه کمک کند. این تکنیک در عین حال، پتانسیل کاهش اثرات منفی استفاده از پساب را نیز داراست. از طرف دیگر، برنج به عنوان یکی از محصولات اصلی غذایی جهان و مصرف‌کننده بزرگ آب، اهمیت زیادی در مدیریت منابع آبی دارد.

پساب‌ها و آب‌های برگشتی به دلیل کمبود منابع آبی به عنوان گزینه‌ای مهم برای آبیاری کشاورزی مطرح هستند. فاضلاب خانگی، به‌ویژه پس از تصفیه، به دلیل حجم بالا و کیفیت مناسب، اولویت بالاتری برای استفاده در کشاورزی دارد. افزایش جمعیت و توسعه شهری باعث افزایش نیاز به منابع آبی شده و مدیریت بهینه این منابع، به‌ویژه برای تأمین نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی، چالش برانگیزتر شده است. استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده می‌تواند فشار بر منابع آبی طبیعی را کاهش داده، هزینه‌های کشاورزی را کم کند و دسترسی به آب باکیفیت را برای مصارف دیگر تسهیل کند. با این حال، تجمع فلزات سنگین در خاک و ورود آن به زنجیره غذایی از مشکلات زیست‌محیطی استفاده از پساب‌هاست (Azari et al.,

با افزایش روزافزون جمعیت جهانی و تغییرات اقلیمی، کمبود منابع آبی به یکی از چالش‌های اصلی بخش کشاورزی تبدیل شده است. در بسیاری از مناطق، استفاده از منابع آب زیرزمینی به حداکثر رسیده و منابع سطحی نیز با کاهش کیفیت و حجم مواجه‌اند. یکی از راه‌حل‌های مطرح، استفاده از پساب تصفیه‌شده برای آبیاری است. اما استفاده از پساب به دلیل محتوای آلاینده‌های شیمیایی و زیستی، ممکن است اثرات منفی بر کیفیت خاک و عملکرد محصولات

۱- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت جام، خراسان رضوی، ایران

(*)- نویسنده مسئول: m.khoshravesh@sanru.ac.ir

DOI: [10.22034/ijdi.2026.578990.2677](https://doi.org/10.22034/ijdi.2026.578990.2677)

(2021; Zafarzadeh et al., 2021).

میدان‌های مغناطیسی یکی از فناوری‌های نوین برای بهبود کیفیت پساب‌ها هستند. این فناوری می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی آب را تغییر داده، جذب مواد مغذی را در گیاهان افزایش دهد و عملکرد محصولات کشاورزی را بهبود بخشد. آب مغناطیسی با کاهش کشش سطحی و افزایش حلالیت، نفوذپذیری بهتری در خاک داشته و به کاهش مصرف آب کمک می‌کند (Khoshravesh et al., 2018). همچنین، این فناوری به‌عنوان روشی زیستی و دوست‌دار محیط زیست می‌تواند در کاهش استفاده از منابع آبی طبیعی مؤثر باشد. با توجه به اثرات زیان‌بار فلزات سنگین و اهمیت مدیریت پایدار منابع آبی، استفاده از این فناوری راه‌حلی عملی و زیست‌محیطی به شمار می‌آید (Naser et al., 2009).

مطالعات گلوئی و ساوچنک نشان داده است که در زمین‌هایی که با فاضلاب شهری آبیاری می‌شوند، غلظت کل املاح تا دو برابر افزایش می‌یابد. در این اراضی، تجمع فلزات سنگین به‌ویژه در عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک به‌طور قابل‌توجهی بیشتر شده و برخی عناصر مانند کادمیوم تا ۲۳ برابر مقادیر اولیه افزایش یافته‌اند (Golovaty and Savchenk, 2002). مگ و همکاران در پژوهشی پیرامون تأثیر آبیاری سطحی طولانی‌مدت در چین بیان کردند که غلظت فلزات سنگین در لایه‌های سطحی خاک به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از لایه‌های زیرین است (Meng et al., 2016). در مطالعه‌ای که حاتمیان و همکاران (۱۳۹۸) در شهرستان قدس انجام دادند، تأثیر آبیاری با فاضلاب بر تجمع فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که در تیمار ترکیبی شامل فاضلاب تصفیه‌نشده و آب چاه، غلظت کادمیوم و سرب به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از تیمار استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده بود. روسان و همکاران تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده را در دوره‌های زمانی دو، پنج و ده‌ساله بر تجمع عناصر مس، روی، آهن، منگنز، سرب و کادمیوم در خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متری بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای مس، سرب و کادمیوم اختلاف قابل‌توجهی بین تیمارهای مختلف وجود ندارد. با این حال، غلظت عناصر روی، آهن و منگنز با افزایش مدت‌زمان آبیاری افزایش یافته و بیشترین مقدار این عناصر در لایه‌های سطحی خاک مشاهده شد (Rusan et al., 2007). همچنین، خوش‌روش و همکاران (۱۴۰۰ الف) و خوش‌روش و کیانی (۱۳۹۴) گزارش کردند که آب مغناطیسی با افزایش قابلیت حلالیت، باعث شستشوی بهتر خاک و بهبود عملکرد گیاهان می‌شود.

خسروی و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های شهری بر غلظت فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی را بررسی کردند. مقایسه میانگین مقدار فلزهای سنگین خاک دو لایه ۲۰-۰ سانتی‌متری و ۴۰-۲۰ سانتی‌متری زمین‌های آبیاری‌شده با فاضلاب نشان داد که به‌جز دو فلز نیکل و کبالت، میانگین مقدار کل فلزهای

سنگین در خاک‌های سطحی بیشتر از خاک‌های عمقی‌تر است. آیلو و همکاران پساب تصفیه شده را در آبیاری قطره‌ای روی خصوصیات خاک بررسی کردند و نشان دادند که پساب باعث افزایش آلودگی میکروبی سطح خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی می‌شود (Aiello et al., 2007). چوپان و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی خصوصیات شیمیایی خاک تحت تأثیر آبیاری با پساب صنعتی تصفیه نشده نشان دادند که آبیاری با پساب در شرایط تنش آبی تا حدودی باعث بهبود شرایط شیمیایی خاک شد.

قرار دادن گیاهان در معرض میدان‌های مغناطیسی یا عبور دادن آب آبیاری از چنین میدان‌هایی، بسته به شدت امواج الکترومغناطیسی، می‌تواند روشی مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب و عملکرد محصول باشد (قدمی فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۹۵). خوش‌روش و پورغلام آمیجی (۱۴۰۲) اثر آبیاری با پساب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، بهره‌وری آب و جذب فلزات سنگین ذرت را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که 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.

ذکر این نکته نیز ضروری است که مناطق مختلفی از کشور وجود دارند که با کمبود منابع آب سالم دست‌وپنجه نرم می‌کنند و یا در مناطقی دسترسی به منابع آب شیرین و سالم برای کشاورزی وجود ندارد و پژوهش حاضر در تلاش است تا این مهم را بررسی کند که چگونه کاربرد این آب در امر تولید امکان‌پذیر است و می‌توان با کم‌ترین هزینه، بیشترین بهره را از منابع آب و خاک داشت. مطالعات مختلفی در خصوص استفاده از پساب در کشاورزی و پژوهش‌های اندکی در خصوص کشت برنج با پساب انجام شده و یا حضور میدان مغناطیسی انجام شده ولی تاکنون مطالعه‌ای در خصوص استفاده توانمند پساب و میدان مغناطیسی و تأثیر آن بر کیفیت خاک و عملکرد برنج در شرایط مشابه شالیزاری انجام نشده است. بنابراین، هدف از این پژوهش تأثیر آبیاری با پساب مغناطیسی‌شده بر خصوصیات شیمیایی خاک، عملکرد و اجزای عملکرد برنج می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۴ در مزرعه‌ای واقع در شهرستان بابلسر در استان مازندران انجام شد. بر اساس داده‌های بلندمدت و طبقه‌بندی اقلیمی دوماستن، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم مرطوب است. مطابق آمار ۳۰ ساله، میانگین بارندگی سالانه این منطقه ۸۹۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این پژوهش از لایسیمترهایی از جنس PVC با ابعاد ۶۰

نمونه برداری از خاک لایسیمترها جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی انجام شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ آورده شده است.

سانتی متر قطر و ۱۰۰ سانتی متر ارتفاع استفاده شد. خاک موردنظر از خاک مزرعه تهیه شده و به صورت لایه های ۱۰ سانتی متری در لایسیمترها قرار گرفت. پیش از آغاز آزمایش و اعمال تیمارها،

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Cd	Pb	Na	Mg	Ca	EC (dS/m)	pH	ρ_b (g/cm ³)	بافت	عمق (سانتی متر)
mg/kg			meq/l						
۰/۰۱۹	۰/۹۵	۱۷/۵	۱۱/۸	۹/۰	۱/۵	۷/۱	۱/۴۴	لوم	۳۰-۰
۰/۰۲۴	۰/۹۸	۱۷/۷	۱۲/۰	۹/۲	۱/۵	۷/۱	۱/۴۹	لوم	۶۰-۳۰
۰/۰۲۷	۱/۰۳	۱۸/۲	۱۲/۲	۹/۳	۱/۴	۷/۲	۱/۵۲	لوم	۹۰-۶۰

از واسنجی شدن دستگاه، با منحنی واسنجی سنجش عصاره خاک در طول موج ۲۱۴ نانومتر اندازه گیری شد (Guideline, 2009). تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد و نمودارها با کمک Excel رسم شدند. در ابتدا، تجزیه واریانس ساده برای صفات اندازه گیری شده انجام سپس میانگین صفات با استفاده از آزمون دانکن در سطوح احتمال یک و پنج درصد مقایسه شد.

نتایج و بحث

در پایان دوره آزمایش، مقدار هدایت الکتریکی و اسیدیته عمق های مختلف خاک در تیمارهای مختلف اندازه گیری شد. اطلاعات جدول ۲ نشان می دهد که نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب تغییرات معنی داری در سطح احتمال یک درصد بر میزان هدایت الکتریکی عمق های مختلف خاک ایجاد کرده اند؛ در حالی که همین تیمارها بر روی اسیدیته خاک اثر معنی داری نداشته اند. از سوی دیگر، داده های مربوط به مقایسه میانگین ها (جدول ۳) نشان می دهد که با پایین رفتن در عمق خاک، هدایت الکتریکی روندی صعودی به خود می گیرد. نکته قابل توجه آن است که بهره گیری از تیمار آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی، توانست افت معنی داری در میزان هدایت الکتریکی تمامی لایه های مورد بررسی خاک ایجاد نماید.

بر اساس داده های به دست آمده، آبیاری با آب مغناطیسی باعث شد که شوری خاک به طور متوسط ۲۱/۹۲ درصد کاهش یابد. این کاهش، که بیانگر کاهش شوری خاک است، به تغییرات ساختاری و فیزیکی آب تحت تأثیر میدان مغناطیسی نسبت داده می شود. علت اصلی این بهبود، تأثیر میدان مغناطیسی بر خواص فیزیکوشیمیایی آب است. آب مغناطیسی شده دارای کشش سطحی پایین تری نسبت به آب معمولی است که به آن اجازه می دهد تا راحت تر در خلل و فرج خاک، به ویژه خاک های با بافت ریز، نفوذ کند. هم زمان، افزایش فعالیت یونی و قابلیت انحلال در آب مغناطیسی، باعث می شود که یون های نمک که به ذرات خاک چسبیده اند، راحت تر جدا شده و وارد

این آزمایش به صورت فاکتوریل و بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار طراحی شد. تیمارها شامل آبیاری با آب چاه، ترکیباتی از آب چاه و پساب به نسبت های ۲۵ به ۵۰، ۵۰ به ۷۵ به ۲۵ و همچنین آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب، در دو حالت با میدان مغناطیسی و بدون آن بود. برای مغناطیس کردن آب، از عبور آن از میان آهن ربای دائمی با شدت میدان ۰/۳ تسلا استفاده شد. همچنین، ترکیب شیمیایی آب چاه و پساب پیش از آزمایش بررسی شد و کشت برنج در لایسیمتر انجام گرفت.

نیاز خالص آبیاری بر اساس داده های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک بابلسر که در نزدیکی زمین مورد نظر واقع شده است، بر اساس روابط مربوطه محاسبه شد. بر اساس میزان تلفات برآوردی از لایسیمترها که قبل از شروع آزمایش انجام گرفت، نیاز ناخالص اعمال و تحویل برنج شد. پساب مورد نظر از تصفیه خانه فاضلاب شهری بابلسر که نوع دو محسوب می شود، تهیه شد. سپس درون سطل های مخصوص ریخته و درب ظرف پلمپ شده 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 مصرف شد. با توجه به نزدیکی محل انجام آزمایش به تصفیه خانه، پساب به طور مداوم تهیه و در لحظه استفاده شد. شایان ذکر است که ذخیره سازی پساب انجام نشد و علت آن رخ دادن واکنش های مختلف با محیط و تغییر کیفیت پساب است. زمین مورد نظر نیز دارای برق کشاورزی بوده و لذا عمل مغناطیس کردن درست در محل انجام آزمایش اجرا شد.

در پایان دوره آزمایش و پس از اتمام آبیاری، نمونه هایی از خاک در سه عمق صفر تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۹۰ سانتی متر برداشت شد. تأثیر آب مغناطیسی و نسبت های مختلف اختلاط پساب بر ویژگی های شیمیایی خاک، از جمله هدایت الکتریکی، pH، مقادیر کلسیم، منیزیم و فلزات سنگین مانند سرب و کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر کلسیم و منیزیم از طریق جذب اتمی اندازه گیری شد. برای اندازه گیری سرب، پس از عصاره گیری نمونه های خاک (هضم با اسید نیتریک، اسید هیدروکلرید، آب اکسیژنه) توسط دستگاه OES-IC پس

فاز محلول شوند. مجموع این دو اثر نفوذ بهتر و قدرت حلالیت بیشتر باعث می شود که آب مغناطیسی در هر بار آبیاری، حجم بیشتری از املاح را از پروفیل خاک شسته و به لایه های زیرین منتقل نماید، که این امر مستقیماً به صورت کاهش در مقدار هدایت الکتریکی اندازه گیری می شود. نتایج این بخش از پژوهش با یافته های خوش روش و همکاران (۱۴۰۰ ب) مطابقت دارد. آنها اثر آبیاری با پساب تصفیه شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک در کشت درت را بررسی کردند و نشان دادند که مقدار هدایت الکتریکی عمق های مختلف خاک بین تمامی تیمارهای مختلف دارای اختلاف معنی داری شد و استفاده از آب مغناطیس باعث کاهش معنی دار هدایت الکتریکی خاک شد.

بیشترین مقدار شوری خاک در عمق ۹۰-۶۰ سانتی متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب به مقدار ۴/۶۲ دسی زیمنس بر

متر و کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری شده با آب چاه به مقدار ۱/۹۲ دسی زیمنس بر متر بود. این امر نشان دهنده دینامیک حرکت آب و املاح در خاک است. آب آبیاری، املاح را از لایه های سطحی شسته و به سمت پایین می راند (طبق جبهه رطوبتی). با رسیدن آب به انتهای منطقه فعالیت ریشه، بخش عمده ای از رطوبت از طریق فرایند تبخیر و تعرق از پروفیل خاک خارج می شود، اما نمک ها که قابلیت تبخیر ندارند، در همان عمق پایین رسوب کرده و انباشته می شوند. داده های حاصل از مقایسه میانگین ها ثابت کرد که فاکتور مغناطیسی کردن آب، نقش تعیین کننده و معنی داری در تغییر اسیدیتته خاک ایفا نمی کند. از سوی دیگر، در بررسی اثر اختلاط منابع آبی، مشخص شد که جایگزینی آب چاه با پساب تنها در صورتی موجب ایجاد اختلاف معنی دار در سطح اسیدیتته خاک می شود که غلظت پساب در ترکیب آبیاری از مرز ۷۵ درصد عبور کند (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس تاثیر فاکتورهای مختلف بر هدایت الکتریکی و اسیدیتته عمق های 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		
۲۶/۸۸ ^{ns}	۲۷/۰۳ ^{ns}	۲۶/۵۴ ^{ns}	۱۶/۰۸ ^{**}	۱۳/۷۳ ^{**}	۱۰/۴۸ ^{**}	۱	نوع آبیاری
۲۸/۲۱ ^{ns}	۲۷/۸۴ ^{ns}	۲۷/۱۳ ^{ns}	۲۹/۷۵ ^{**}	۲۵/۱۹ ^{**}	۲۱/۳۶ ^{**}	۴	اختلاط آب و پساب
۱/۷۸ ^{ns}	۱/۴۳ ^{ns}	۱/۰۳ ^{ns}	۸/۵۵ ^{**}	۷/۱۲ ^{**}	۶/۸۹ ^{**}	۴	نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب
۰/۷۰۱	۰/۶۳۸	۰/۶۴۹	۰/۵۳۲	۰/۴۹۶	۰/۴۵۰	۲۰	خطا

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

جدول ۳- مقایسه میانگین های مقدار هدایت الکتریکی و اسیدیتته عمق های 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	
						نوع آبیاری
						مغناطیسی
						غیر مغناطیسی
						اختلاط آب و پساب
						آب چاه
۷/۳۲ a	۷/۲۵ a	۷/۲۱ a	۲/۹۴ b	۲/۵۱ b	۲/۲۸ b	۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه
۷/۳۳ a	۷/۲۷ a	۷/۲۴ a	۳/۵۱ a	۳/۲۸ a	۳/۱۲ a	۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه
۷/۲۶ b	۷/۲۳ b	۷/۲۱ a	۲/۱۵ e	۲/۰۲ e	۱/۹۲ e	۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه
۷/۲۷ b	۷/۲۴ b	۷/۲۱ a	۲/۶۵ d	۲/۴۸ d	۲/۲۸ d	۱۰۰ درصد پساب
۷/۳۳ b	۷/۲۵ b	۷/۲۲ a	۳/۱۹ c	۲/۹۰ c	۲/۵۹ c	
۷/۳۷ a	۷/۲۹ a	۷/۲۳ a	۳/۵۱ b	۳/۲۸ b	۳/۰۹ b	
۷/۴۰ a	۷/۲۹ a	۷/۲۵ a	۴/۶۲ a	۳/۸۳ a	۳/۶۳ a	

میانگین ها با آزمون Duncan در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده اند.

برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی دار نمی باشد.

(جدول ۵). همچنین مشاهده شد که در تمام لایه های عمقی، مقدار کلسیم و منیزیم در تیمار آبیاری با آب مغناطیسی کمتر از تیمار آبیاری با آب غیرمغناطیسی بوده و این تفاوت در سطح آماری معنی دار ارزیابی شد.

مقدار کلسیم و منیزیم خاک در تمامی عمق ها در تیمار آب مغناطیسی کمتر از تیمار آب غیر مغناطیسی شد و این اختلاف

نتایج تجزیه واریانس ارایه شده در جدول ۴ نشان می دهد که اثر نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر کلسیم و منیزیم خاک در تمامی عمق ها در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد؛ همچنین اثر متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب نیز بر کلسیم و منیزیم خاک معنی دار شد. بررسی میانگین مقادیر کلسیم و منیزیم خاک نشان داد که با افزایش عمق، میزان این دو عنصر در خاک بیشتر می شود

شوری خاک می شود. به گفته این پژوهشگران، افزایش حدود ۷/۵ درصدی رطوبت خاک در پی آبیاری با آب مغناطیسی، فرایند شست و شوی نمک های موجود در خاک را تسهیل کرده و کاهش شوری را به دنبال داشته است. در تیمارهای با درصد اختلاط بیشتر پساب، مقدار کلسیم و منیزیم در عمق های خاک افزایش یافت که به دلیل مقادیر بیشتر این عناصر در پساب مورد استفاده بود. بیشترین مقدار کلسیم و منیزیم به ترتیب برابر ۱۵/۶۸ و ۱۷/۲۲ میلی اکوالان بر لیتر مشاهده شد که مربوط به عمق ۹۰-۶۰ سانتی متری خاک در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری با پساب بود (Mostafazadeh-Fard et al., 2012). یزدانی و همکاران نیز بیان کردند که افزایش آبیاری با پساب فاضلاب، مقادیر یون های سدیم و نیترات و نیکل را افزایش می دهد (Yazdani et al., 2014).

معنی دار بود. به طور میانگین، استفاده از آب مغناطیسی برای آبیاری موجب شد میزان کلسیم در پروفیل خاک به میزان ۳۲/۸۵ درصد و مقدار منیزیم به میزان ۲۸/۴۲ درصد کاهش یابد. کمتر بودن کلسیم و منیزیم در تیمار آب مغناطیسی نسبت به آب غیرمغناطیسی به دلیل ساختار خوشه ای آب، تغییر در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و افزایش نفوذپذیری یا کاهش کشش سطحی آب مغناطیسی می باشد. یافته های این مطالعه با نتایج تحقیق امین دین و قائمی (۱۳۹۱) سازگار است. در آن پژوهش گزارش شد که در تیمارهای آبیاری شده با آب چاه، میزان کلسیم خاک کمتر از تیمارهای آبیاری شده با پساب بوده است. مصطفی زاده فرد و همکاران در پژوهشی که بر آبیاری قطره ای انجام دادند، تأثیر آب مغناطیسی را بر میزان املاح در لایه های مختلف خاک مورد ارزیابی قرار دادند. یافته های آنان نشان داد که استفاده از آب مغناطیسی نسبت به آب معمولی موجب کاهش

جدول ۴- تجزیه واریانس تاثیر فاکتورهای مختلف بر کلسیم و منیزیم عمق های مختلف خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	Ca			Mg		
		60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm
نوع آبیاری	۱	۶۱/۹۴**	۶۶/۱۸**	۷۴/۱۶**	۷۵/۹۱**	۷۸/۰۸**	
اختلاط آب و پساب	۴	۷۷/۱۲**	۸۰/۴۶**	۷۷/۰۲**	۸۱/۵۷**	۸۴/۱۹**	
نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۸/۰۳**	۸/۲۱**	۷/۰۲**	۷/۳۹**	۸/۵۸**	
خطا	۲۰	۰/۴۷۰	۰/۵۰۶	۰/۶۰۱	۰/۶۳۲	۰/۷۱۹	

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

جدول ۵- مقایسه میانگین کلسیم و منیزیم عمق های مختلف خاک

تیمار آزمایشی	Ca (meq/l)			Mg (meq/l)		
	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm
نوع آبیاری						
مغناطیسی	۹/۱۲ b	۹/۶۶ b	۱۰/۳۸ b	۱۲/۰۱ b	۱۲/۰۳ b	۱۲/۱۰ b
غیر مغناطیسی	۱۴/۰۳ a	۱۴/۴۹ a	۱۴/۹۱ a	۱۶/۷۴ a	۱۶/۷۹ a	۱۶/۹۶ a
اختلاط آب و پساب						
آب چاه	۹/۱۰ e	۹/۱۶ e	۹/۴۸ e	۱۱/۶۶ e	۱۱/۷۲ e	۱۱/۷۵ e
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۹/۶۷ d	۹/۸۷ d	۱۰/۲۶ d	۱۲/۹۳ d	۱۳/۰۶ d	۱۳/۱۵ d
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۱۱/۰۴ c	۱۱/۹۳ c	۱۲/۷۴ c	۱۴/۲۹ c	۱۴/۴۳ c	۱۴/۴۸ c
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه	۱۳/۴۵ b	۱۴/۳۳ b	۱۵/۰۶ b	۱۵/۸۵ b	۱۶/۰۱ b	۱۶/۰۵ b
۱۰۰ درصد پساب	۱۴/۶۱ a	۱۵/۰۸ a	۱۵/۶۸ a	۱۷/۱۴ a	۱۶/۸۳ a	۱۷/۲۲ a

میانگین ها با آزمون Duncan در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده اند.

برای هر تیمار آزمایشی تفاوت هر دو میانگین با حداقل یک حرف مشترک معنی دار نمی باشد.

میانگین غلظت سرب در خاک در آغاز فصل آزمایش نزدیک به ۰/۹۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود، در حالی که در پایان فصل این مقدار به ۲/۵ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش یافت (جدول ۷). این تغییر نشان می دهد که در طول دوره آبیاری، بخشی از سرب ورودی از طریق منابع آبی در خاک تجمع پیدا کرده است. مقدار سرب موجود در آب

بر اساس نتایج تحلیل واریانس در جدول ۶، نوع آبیاری و میزان اختلاط آب با پساب در همه عمق های خاک بر غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم تأثیر معنی داری در سطح احتمال یک درصد داشت. افزون بر این، اثر متقابل نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب نیز بر مقادیر سرب و کادمیوم خاک به طور معنی دار اثر گذار بوده است.

شده است. این نتایج نشان می‌دهد که حرکت سرب در خاک محدود بوده اما در صورت تداوم ورود آن، خطر تجمع در لایه‌های مختلف خاک و تهدید کیفیت خاک و گیاه جدی است.

نتایج بررسی‌ها نشان داد که در تمام لایه‌های خاک، میزان سرب در تیمار آبیاری با آب مغناطیسی به‌طور قابل‌توجهی کمتر از خاکی بود که با آب غیرمغناطیسی آبیاری شده است. این اختلاف از نظر آماری نیز معنی‌دار بوده و بیانگر آن است که مغناطیسی کردن آب می‌تواند نقش مهمی در کاهش تحرک یا ورود سرب به نیمرخ خاک داشته باشد. به‌طور میانگین، استفاده از آب مغناطیسی موجب شد که غلظت سرب در پروفیل خاک حدود ۳۳/۷۴ درصد کاهش یابد؛ این میزان کاهش، از منظر مدیریت آلودگی فلزات سنگین، قابل توجه و کاربردی است.

در بین لایه‌های مختلف خاک، بیشترین مقدار سرب اندازه‌گیری شده برابر با ۳/۳۲ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک گزارش شد که این مقدار مربوط به عمق‌های پایین‌تر و در تیماری بود که ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه تنها با پساب تأمین شده بود. چنین الگویی نشان می‌دهد که ورود مداوم پساب به خاک، به‌ویژه در آبیاری کامل با آن، موجب تجمع سرب در لایه‌های عمیق‌تر می‌شود و احتمال انتقال این فلز سنگین به آب‌های زیرزمینی را نیز افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، مطالعه حاکی از آن است که مغناطیسی کردن آب می‌تواند تا حدی از میزان تجمع سرب در خاک بکاهد و این فناوری در کنار مدیریت صحیح استفاده از پساب، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کمکی برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در سیستم‌های آبیاری مطرح شود. بررسی ویژگی‌های دو منبع آبی نشان داد که غلظت کادمیوم در آب چاه برابر ۰/۰۱ میکروگرم در لیتر و در پساب تصفیه‌شده حدود ۰/۰۲۱ میکروگرم در لیتر بوده است؛ یعنی مقدار کادمیوم موجود در پساب تقریباً دو برابر آب چاه است. همین اختلاف اولیه باعث شده که با افزایش سهم پساب در ترکیب آبیاری، غلظت کادمیوم در هر سه عمق خاک نیز بیشتر شود. نتایج آماری (جدول ۷) تأیید می‌کند که این افزایش معنی‌دار بوده و کاربرد پساب، حتی در درصدهای اختلاط پایین، روند تجمع این فلز سنگین را تشدید می‌کند. نتایج چن و همکاران (۲۰۰۹) نیز با این یافته‌ها سازگار است؛ آنها گزارش کردند که آبیاری با پساب شهری منجر به بالا رفتن شاخص آلودگی مجموعه‌ای از فلزات سنگین مانند مس، روی، نیکل، سرب و کادمیوم می‌شود.

مقایسه تیمارهای آبیاری با آب مغناطیسی و غیرمغناطیسی نشان داد که مغناطیسی کردن آب به‌طور قابل توجهی سبب کاهش غلظت کادمیوم در تمام لایه‌های خاک شده است. این کاهش در سطح آماری نیز معنی‌دار بوده است. در مجموع، استفاده از آب مغناطیسی توانست میزان کادمیوم موجود در نیمرخ خاک را حدود ۴۵/۶۹ درصد کاهش دهد. بیشترین مقدار کادمیوم اندازه‌گیری شده، برابر ۰/۰۴۵

چاه برابر یک میکروگرم بر لیتر و در پساب تصفیه‌شده ۱۲/۸۴ میکروگرم بر لیتر بوده است؛ بنابراین پساب نسبت به آب چاه سهم بیشتری در ورود سرب به خاک داشته است و انتظار می‌رود افزایش غلظت خاک بیشتر متأثر از مصرف پساب باشد. لیو و همکاران نمونه‌های خاک آبیاری شده با فاضلاب را جهت ارزیابی فلزات سنگین خاک جمع‌آوری کردند و نشان دادند که روند تجمعی فلزات سنگین در زمان آبیاری محصول برنج در مقایسه با مقدار موجود در زمین‌های دیگر در چین و متوسط جهانی افزایش یافت (Liu et al., 2005).

در مقایسه با معیارهای اعلام‌شده توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2019)، خاک‌هایی که مقدار سرب آنها ۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم یا کمتر باشد، در رده خاک‌های با آلودگی کم طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به این استاندارد، اعداد به‌دست‌آمده در این پژوهش فاصله زیادی با حد آستانه آلودگی دارند و حتی مقدار نهایی اندازه‌گیری شده نیز چندین برابر کمتر از حد بحرانی است. با توجه به مقادیر ثبت‌شده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از آب‌هایی با غلظت مشابه سرب موجود در این پژوهش، حتی در صورت به‌کارگیری پساب تصفیه‌شده، خطری برای آلودگی سرب در خاک ایجاد نمی‌کند. به عبارت دیگر، روند تغییرات نشان می‌دهد که انباشت سرب در خاک بسیار آهسته بوده و امکان بهره‌گیری از این منابع آبی برای آبیاری بدون ایجاد نگرانی از نظر آلودگی سرب وجود دارد، به شرط آن که نظارت دوره‌ای و مدیریت صحیح آبیاری رعایت شود.

جدول ۷ به‌روشنی بیان می‌کند که کاربرد پساب در آبیاری، موجب افزایش غلظت تجمعی سرب در لایه‌های عمیق‌تر خاک شده است. از آنجا که سرب یکی از عناصر سنگین بسیار سمی برای انسان به شمار می‌رود و می‌تواند از طریق چرخه خاک-گیاه-انسان وارد بدن شده و سلامت را تهدید کند، استفاده کنترل‌نشده از این نوع پساب می‌تواند پیامدهای جدی زیست‌محیطی و بهداشتی داشته باشد. بنابراین، اعمال محدودیت در بهره‌گیری از پساب برای آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق در مدیریت آن ضرورت پیدا می‌کند.

یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش ریسک، به‌کارگیری الگوی آبیاری تناوبی با آب چاه و پساب است. این روش می‌تواند از انباشته شدن تدریجی سرب در نیمرخ خاک جلوگیری کرده و زمان لازم برای آیشویی را به تعویق بیندازد؛ در نتیجه خاک برای مدت طولانی‌تری قادر به تولید محصول خواهد بود.

بر اساس یافته‌های لیاقت و همکاران (۱۴۰۰)، رفتار سرب در خاک تحت شرایط آبیاری سطحی نیز نشان داد که حدود ۶۵ درصد از فلز تزریق‌شده در لایه‌ی نخست خاک (عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری) تثبیت می‌شود. همچنین نزدیک به ۲۵ درصد به لایه دوم (۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) نفوذ کرده و بخش اندکی، در حدود ۱۰ درصد، احتمالاً به شکل تلفات ناشی از فرایندهای سطحی مانند تبخیر از سیستم خارج

است؛ عواملی مانند pH، درصد رس، مقدار مواد آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی نقش اساسی دارند. هر چه pH و مقدار مواد آلی یا کربنات‌ها بیشتر باشد، عناصر سنگین تمایل کمتری به جابه‌جایی دارند و بیشتر در خاک تثبیت می‌شوند. به همین دلیل، خاک‌های اسیدی نسبت به خاک‌های خنثی یا قلیایی ظرفیت بسیار کمتری برای نگهداری و جذب کادمیوم دارند و این فلز در آنها با سهولت بیشتری حرکت کرده و خطر آلودگی را افزایش می‌دهد.

میلی گرم در هر کیلوگرم خاک بود که در لایه‌های عمیق تحت تیمار آبیاری کامل با پساب مشاهده شد. این یافته نشان می‌دهد که ورود پیوسته پساب به خاک می‌تواند موجب حرکت تدریجی کادمیوم از سطح به عمق شود و احتمال آلودگی منابع آب زیرزمینی را نیز افزایش دهد.

در تحلیل رفتار کادمیوم در خاک باید توجه داشت که جابه‌جایی و تحرک فلزات سنگین تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

جدول ۶- تجزیه واریانس تاثیر فاکتورهای مختلف بر فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمق‌های مختلف خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	Pb			cd		
		60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm
نوع آبیاری	۱	۱۱/۵۰**	۱۰/۹۶**	۱۰/۴۵**	۱/۲۳**	۱/۰۸**	۰/۹۸**
اختلاط آب و پساب	۴	۲۲/۹۸**	۲۲/۸۹**	۲۲/۴۳**	۳/۵۵**	۳/۰۷**	۲/۸۹**
نوع آبیاری × اختلاط آب و پساب	۴	۶/۳۲**	۵/۹۶**	۵/۸۰**	۰/۶۱**	۰/۵۳**	۰/۵۰**
خطا	۲۰	۰/۰۸۸	۰/۰۸۱	۰/۰۷۳	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۷

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

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های مقدار فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمق‌های مختلف خاک

تیمار آزمایشی	Pb (mg/kg)			cd (mg/kg)		
	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm	60-90 cm	30-60 cm	0-30 cm
نوع آبیاری	۱/۹۸b	۱/۹۷b	۲/۰۲b	۰/۰۲۲b	۰/۰۲۱b	۰/۰۲۰b
مغناطیسی	۳/۰۲a	۲/۸۹a	۳/۱۰a	۰/۰۴۳a	۰/۰۳۸a	۰/۰۳۵a
غیر مغناطیسی	۱/۸۲d	۱/۸۰c	۱/۸۶d	۰/۰۲۰c	۰/۰۱۸c	۰/۰۱۸c
اختلاط آب و پساب	۱/۹۸c	۱/۸۸c	۲/۰۵d	۰/۰۲۳c	۰/۰۲۱c	۰/۰۲۰c
آب چاه	۲/۲۵b	۲/۱۲b	۲/۳۹c	۰/۰۳۴b	۰/۰۲۹b	۰/۰۲۷b
۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه	۳/۱۴a	۳/۰۸a	۳/۱۸b	۰/۰۴۰ab	۰/۰۳۷a	۰/۰۳۴a
۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه	۳/۳۱a	۳/۲۷a	۳/۳۲a	۰/۰۴۵a	۰/۰۴۲a	۰/۰۳۸a
۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه						
۱۰۰ درصد پساب						

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.

نتیجه‌گیری

به‌ویژه سرب و کادمیوم در پروفیل خاک ایفا می‌کند. این موضوع از نظر پایداری خاک و سلامت محصولات زراعی اهمیت ویژه‌ای دارد. از سوی دیگر، مقایسه تیمارهای مختلف نشان داد که کاربرد پساب بدون اعمال میدان مغناطیسی، اگرچه می‌تواند بخشی از نیاز آبی را جبران کند، اما احتمال تجمع فلزات سنگین در خاک را افزایش داده و در درازمدت ممکن است کیفیت خاک کشاورزی را تهدید کند. بنابراین استفاده ترکیبی از پساب و فناوری مغناطیسی کردن آب، رویکردی پایدارتر و کم‌خطرتر برای تولید محصولات زراعی معرفی می‌شود.

این پژوهش در راستای کشاورزی پایدار و توسعه روش‌های نوین آبیاری انجام شد. به طور کلی آبیاری تحت تاثیر میدان مغناطیسی باعث کاهش ۲۲ تا ۴۵ درصدی املاح شیمیایی و فلزات سنگین خاک شد. نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری پساب تصفیه‌شده در آبیاری، در صورت مدیریت صحیح و استفاده هم‌زمان از آب مغناطیسی، می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد برای مقابله با محدودیت منابع آب در مناطق کم‌آب مورد استفاده قرار گیرد. حضور میدان مغناطیسی سبب بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری شده و در نهایت نقش مؤثری در کاهش املاح و تجمع فلزات سنگین

سیاسگزارى

نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بابت تأمین هزینه‌های طرح پژوهشی با کد قرارداد ۱۴۰۳-۱۰-۰۲ کمال تشکر را دارند.

منابع

- Azari, A., Nabizadeh, R., Mahvi, A. H. and Nasser, S. 2021. Magnetic multi-walled carbon nanotubes-loaded alginate for treatment of industrial dye manufacturing effluent: adsorption modelling and process optimisation by central composite face-central design. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 1-21.
- Aiello, R., Cirelli, G. L. and Consoli, S. 2007. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy). *Agricultural Water Management*. 93(1-2): 65-72.
- Chen, Z. F., Zhao, Y., Zhu, Y., Yang, X., Qiao, J., Tian, Q. and Zhang, Q. 2009. Health risks of heavy metals in sewage-irrigated soils and edible seeds in Langfang of Hebei province, China. *Journal of Science Food Agriculture*. 90: 314-320.
- Golovaty, S. and Savchenko, S. 2002. Heavy metals as contaminants of agricultural lands of Belarus. 17th World Congress Soil Sci. Bangkok, Thailand. August 14-21.
- Guideline booklet ICP-OES. Germany. 2009. Spectro Arcos EOP ICP-OES. Analysis Systems for Environmental Applications.
- Khoshroavesh, M., Mirzaei, S. M. J., Shirazi, P. and Norooz Valashedi, R. 2018. Evaluation of dripper clogging using magnetic water in drip irrigation. *Applied Water Science*. 8(3): 1-8.
- Liu, W.-h., Zhao, J.-z., Ouyang, Z.-y., Söderlund, L. and Liu, G.-h. 2005. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China. *Environment International*. 31: 805-812.
- Meng, W., Wang, Z., Hu, B., Wang, Z., Li, H. and 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.
- Naser, H. M., Shil, N. C., Mahmud, N. U., Rashid, M. H. and 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.
- Rusan, M. J. M., Hinnawi, S. and Rousan, L. 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*. 215(1-3): 143-152.
- Yazdani, V., Ghahrwman, B., Davari, K. and Fazeli, E. 2014. Effect of wastewater on physical and chemical properties of soil. *Environmental Science and Technology*. 16: 473-485.
- امین‌دین، ا. و قائمی، ع. ا. ۱۳۹۱. استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شهری در آبیاری قطره‌ای و تأثیر آن بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
- چوپان، ی.، امامی، س. و حسام، م. ۱۳۹۸. بررسی خصوصیات شیمیایی خاک تحت تأثیر آبیاری با پساب صنعتی تصفیه نشده (مطالعه موردی: تربت حیدریه). آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۱۳): ۶۷۶-۶۶۷.
- حاتمیان، ل.، رفعتی، م. و فرساد، ف. ۱۳۹۸. اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت فلزات سرب و کادمیوم در خاک و دانه‌های گندم و جو. مدیریت آب و آبیاری. ۲(۹): ۳۳۲-۳۲۱.
- خسروی، ی.، زمانی، ع.، پری زنگنه، ع. و نوری، ف. ۱۳۹۸. مطالعه تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های شهری بر فلزات سنگین در خاک‌های سطحی جنوب شهر هرسین، کرمانشاه. آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۱۳): ۱۵۶۴-۱۵۵۰.
- خوش‌روش، م. و کیانی، ع. ر. ۱۳۹۴. اثر آب شور مغناطیسی شده بر نفوذپذیری و هدایت الکتریکی بافت‌های مختلف خاک. آبیاری و زهکشی ایران. ۹(۴): ۶۵۴-۶۴۶.
- خوش‌روش، م.، حسینی، س. م. و پورغلام‌آمیجی، م. ۱۴۰۰ الف. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی و فلزات سنگین خاک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۸): ۲۲۰۳-۲۱۹۱.
- خوش‌روش، م.، عرفانیان، ف. و پورغلام‌آمیجی، م. ۱۴۰۰ ب. اثر آبیاری با پساب مغناطیسی تصفیه شده بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت. مدیریت آب در کشاورزی. ۱۸(۱): ۱۲۸-۱۱۵.
- خوش‌روش، م. و پورغلام‌آمیجی، م. ۱۴۰۲. تأثیر آبیاری با پساب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، بهره‌وری آب و جذب فلزات سنگین ذرت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۴(۶): ۸۹۳-۸۷۷.
- قدیمی فیروزآبادی، ع.، خوش‌روش، م.، شیرازی، پ. و زارع ایبانه، ح. ۱۳۹۵. اثر آبیاری مغناطیسی بر عملکرد دانه و بیوماس گیاه سویا

northern Iran. Environmental monitoring and assessment. 193(11): 1-10.

Zafarzadeh, A., Taghani, J. M., Toomaj, M. A., Ramavandi, B., Bonyadi, Z. and Sillanpää, M. 2021. Assessment of the health risk and geo-accumulation of toxic metals in agricultural soil and wheat,

Assessment of Soil Chemical Changes Induced by Irrigation with Magnetized Wastewater under Rice Cultivation Conditions

M. Khoshnavesh^{1*}, M. Pourgholam-Amiji², E. Kanani³, S. M. J. Mirzaei⁴

Recived: Apr.16, 2026

Accepted: May.05, 2026

Abstract

The rapid growth of the global population has placed considerable pressure on natural resources and has limited the availability of high-quality water and soil for agricultural production. This situation poses serious challenges to food security and may lead to regional and global crises. In addition, the presence of heavy metals in the plant growth environment disrupts normal physiological processes and ultimately reduces plant growth. One of the proposed approaches for improving soil conditions is the use of magnetically treated water. The experiment was conducted in 2025 as a factorial arrangement in a randomized complete block design with three replications. The treatments included well water, various combinations of well water and wastewater at ratios of 25:75, 50:50, 75:25 and irrigation with 100% wastewater, under both the presence and absence of magnetic field. The effect of magnetized wastewater irrigation on soil chemical properties, including electrical conductivity (EC), pH, calcium, magnesium, and heavy metals such as lead and cadmium, was evaluated. The results of mean comparisons of soil chemical parameters indicated significant differences between magnetic and non-magnetic treatments. Irrigation with magnetized water reduced electrical conductivity, calcium, magnesium, lead, and cadmium in the soil profile by 21.92%, 32.85%, 28.42%, 33.74%, and 45.69%, respectively. The findings of this study can contribute to improving agricultural production in regions facing water scarcity and provide effective strategies for the utilization of reclaimed water resources.

Keywords: Food Security, Heavy Metals, Magnetic Field, Soil Quality, Water Reuse

1- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2- Ph.D. Graduated, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Ph.D. Graduated, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
4- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Torbat-e Jam, Khorasan Razavi, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.khoshnavesh@sanru.ac.ir)