Accumulation and distribution of heavy metals in coriander plant (*Coriandrum sativum* L.) under the influence of irrigation with treated municipal wastewater

ABSTRACT

Iran, an arid and semi-arid region, is facing a decrease in renewable water resources, and the demand for water continues to increase. This has forced the decision makers to preserve high quality water resources for drinking purposes and less quality water resources (including reclaimed wastewaters) to be allocated for irrigation of agricultural lands. However, the accumulation of heavy metals in crops irrigated with reclaimed wastewater is still unclear. Therefore, the concentration of these metals in plants should be measured and monitored, regularly due to their risk of diseases. In this research, for the first time, the effects of irrigation with municipal reclaimed wastewater on the accumulation of heavy metals in the roots and aerial parts of coriander plant were investigated and compared to well water (control). Results showed that the concentrations of all investigated heavy metals in different parts of coriander plant irrigated with reclaimed wastewater was significantly higher than that in the control treatment. Fortunately, the concentrations of all these metals in all the plant tissues were lower than the permissible limits. The highest concentrations of copper and zinc (25 and 51 mg/kg, respectively) were observed in the aerial part of coriander. Therefore, in the current situation of the shortage of water resources in Kermanshah, reclaimed wastewater provides a unique and viable supply of water for the irrigation of large areas of coriander cultivation in such a way that it does not pose any threat to human health in terms of the accumulation of heavy metals in the plant.

Keywords: *Accumulation of heavy metals in plants, Kermanshah municipal wastewater treatment plant, Unconventional waters, Uptake, Water resources crisis*

ویرایش استاری نشده

انباشت و توزیع فلزات سنگین در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) تحت تاثیر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری

چکیده

ایران بعنوان یکی از مناطق خشک و نیمه خشک جهان با کاهش منابع آب تجدیدپذیر روبر است و همچنان حجم تقاضا برای دستیابی به آب در این کشور رو به افزایش می‌باشد. این مساله سبب شده است که تصمیم‌گیرندگان حوضه آب، منابع آب با کیفیت بهتر را برای مصارف شهری و شرب اختصاص داده و منابع آب با کیفیت نامطلوب‌تر (همچون فاضلاب تصفیه‌شده) را برای مصارفی همچون آبیاری اراضی کشاورزی اختصاص دهند. اما وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات آبیاری شده با پساب بویژه سبزیجات برگی نامشخص است و به‌دلیل خطر ورود این فلزات سمی به چرخه غذایی انسان ضروریست که پیوسته اندازه‌گیری و پایش شود. این پژوهش برای نخستین بار با هدف بررسی اثرات آبیاری با پساب تصفیه شده شهری در مقایسه با آب چاه (تیمار کنترل) بر تجمع فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی گیاه گشنیز انجام شد. نتایج نشان داد که غلظت همه فلزات سنگین مورد بررسی در اندام‌های گیاه گشنیز آبیاری شده با پساب تصفیه شده بصورت معنی‌داری بیشتر از تیمار آبیاری با آب چاه بود ولی غلظت این فلزات در تمام اندام‌های گیاه گشنیز پایین‌تر از استانداردهای توصیه شده برای سلامت محصولات کشاورزی ارزیابی گردید. بیشترین غلظت مس و روی (به ترتیب ۲۵ و ۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در اندام هوایی گشنیز در مقایسه با ریشه مشاهده شد. در شرایط کنونی کمبود منابع آب در کرمانشاه، پساب تصفیه شده شهری می‌تواند به عنوان یک منبع آب مطمئن و پایدار برای آبیاری اراضی وسیع کشت گشنیز مورد استفاده قرار گیرد بطوریکه تجمع فلزات سنگین در گیاه برای سلامت انسان خطرساز نباشد.

واژه‌های کلیدی: ***آبهای نامتعارف، بحران منابع آب، تجمع فلزات سنگین در گیاه، تصفیه خانه فاضلاب شهری کرمانشاه، جذب***

ویرایش اولیه نشده

مقدمه

در سالهای اخیر، رشد جمعیت، تغییرات آب و هوایی، سیستم‌های کشاورزی فشرده، شهرنشینی، افزایش گردشگری و محدودیت‌های جغرافیایی سبب کاهش منابع آب شده است (Ammeri et al., 2023). این مشکل در بسیاری از نقاط جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک در حال بدتر شدن است (Abbasi and Sepaskhah, 2022). بنابر این یک راهکار پایدار برای مقابله با چالش کاهش و کمبود منابع آب شیرین می‌تواند بهره‌برداری اصولی از منابع آب نامتعارف مانند فاضلاب تصفیه شده شهری برای مصارف آب غیر شرب همچون آبیاری گیاهان زراعی، سبزیجات، باغات و فضای سبز باشد (Mkhinini et al., 2020). از منظر استفاده مجدد از آب، امکان بازیابی آب از منابع مختلف و تصفیه و استفاده مجدد از آن برای اهداف مفید و احیای محیط زیست وجود دارد. این استراتژی می‌تواند منابع آب جایگزینی برای تامین آب مورد نیاز فراهم کرده و امنیت و پایداری آب را بهبود بخشد. منابع آب واجد شرایط برای استفاده مجدد عبارتند از فاضلاب شهری، فاضلاب صنعتی، آبهای شوری که توسط سیستم‌های مختلف آب شیرین کن نمک‌زدایی شده اند، استحصال آب باران و رواناب کشاورزی و منابع طبیعی (US EPA, 2022; Kristensen et al., 2018). لذا، در این رابطه یکی از راهکارها برای مقابله با چالش کمبود و کاهش منابع آب شیرین می‌تواند بهره‌برداری مؤثر از منابع آب غیرمتعارف همچون فاضلاب تصفیه شده شهری برای آبیاری گیاهان زراعی، باغات و فضای سبز باشد. تقریباً تخمین زده می شود که حدود ۲۰ میلیون هکتار از زمین های زراعی در سطح جهان با فاضلاب آبیاری می‌شود که تقریباً ۱۰ درصد از زمین‌های کشاورزی آبی دنیا را تشکیل می دهد (Goyal, 2016) که با توجه به روند صعودی کاهش منابع آب شیرین در بخش کشاورزی می‌توان پیش بینی کرد که در سال‌های آتی اقبال جهانی برای استفاده از فاضلاب تصفیه شده به عنوان یک راه حل پایدار برای جبران کمبود آب در بخش کشاورزی افزایش یابد (Ensink et al., 2002; Kiziloglu et al., 2008). کشورهای زیادی در سراسر جهان از فاضلاب شهری تصفیه شده بعنوان یک منبع آبیاری پایدار در کشاورزی استفاده می‌کنند. به ترتیب نزولی، مکزیک، مصر، چین، سوریه، اسپانیا، ایالات متحده آمریکا، فلسطین اشغالی، ایتالیا، عربستان صعودی، کویت، ایران، شیلی، اردن، امارات متحده عربی، ترکیه، آرژانتین، تونس، لیبی، قطر و قبرس بیست کشور اول دنیا هستند که بیشترین حجم فاضلاب را در کشاورزی برای آبیاری مورد استفاده قرار داده‌اند (Scheierling et al., 2010) که در این لیست ایران با حجم ۴۲۲ هزار متر مکعب در روز رتبه یازدهم را در جهان دارا می‌باشد (Jiménez and Asano, 2008). برخی از مزایای آبیاری اراضی کشاورزی با فاضلاب شهری تصفیه شده به شرح زیر است: حفظ منابع آب شیرین و با کیفیت موجود برای مصارف خانگی و شرب (Asano et al., 2007)، کاهش تقاضا برای منابع آب شیرین (Jiménez and Asano, 2008)، بالا بردن مواد مغذی خاک [فاضلاب تصفیه شده اغلب حاوی مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر است که می‌تواند نیاز به کودهای شیمیایی اضافی را کاهش دهد] (Piotrowska et al., 2006)، بهبود ساختار خاک از طریق اضافه کردن مواد آلی به خاک به مرور زمان (Qadir et al., 2010) و کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی [با استفاده از فاضلاب تصفیه شده برای آبیاری، اثرات زیست محیطی تخلیه فاضلاب به منابع آبی طبیعی کاهش می یابد. همچنین می‌تواند به جلوگیری از آلودگی رودخانه ها و دریاچه ها کمک کند] (Hashem and Qi, 2021). همچنین استفاده از فاضلاب تصفیه شده روشی موثر برای حفظ و بالابردن بهره‌وری کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد (Mishra et al., 2023). به طوری که سازمان ملل متحد به منظور دستیابی به اهداف توسعه پایدار تا سال ۲۰۳۰ برای اجرای استفاده از پساب تصفیه شده در سراسر جهان فشار آورده است (United Nations, 2015). در کنار مزایای ذکر شده فوق، استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده شهری برای آبیاری اراضی کشاورزی خطراتی نیز به همراه دارد. به عنوان مثال، استفاده از پساب تصفیه شده ممکن است منجر به افزایش شوری خاک و همچنین افزایش میکروارگانیسم‌های میکروبی و آلاینده‌ها در محیط خاک و گیاه شود (World Health Organization, 2006). همچنین، این آب می‌تواند حامل عوامل بیماری‌زا باشد که بر سلامت انسان تأثیر می‌گذارد و خطر ابتلا به بیماری‌های انگلی، ویروسی و باکتریایی را در مصرف‌کنندگان محصولات آبیاری شده با این آب را افزایش می‌دهد (Hashem and Qi, 2021). علاوه بر این، نگرانی‌هایی همچون حضور فلزات سنگین بالقوه سمی، میکروارگانیسم‌ها و میکروپلاستیک‌ها در فاضلاب بعنوان خطرات بالقوه برای سلامتی انسان و دام وجود دارد (Santos, 2020; Langaas, 2020). در این میان، فلزات سنگین به دلیل ماندگاری و سمی بودن می‌توانند در اندام‌های مختلف محصولات کشاورزی

آبیاری‌شده با پساب خانگی انباشته شوند و خطراتی جدی برای سلامت انسان و محیط زیست به وجود آورند (Hasan et al., 2015; Ghosh et al., 2012). ورود فلزات سنگین به درون گیاه عمدتا از طریق ریشه صورت می‌گیرد و این فلزات بسته به نوع فلز سنگین می‌توانند در آوندهای گیاهی حرکت کرده و به دیگر اندام‌های گیاه همچون اندام هوایی و بخش های خوراکی مثل میوه و دانه منتقل شوند (Younis et al., 2016). با بالا رفتن تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی احتمال کاهش جذب مواد مغذی ضروری در گیاه بالا می‌رود که در نهایت این مساله می‌تواند منجر به کاهش کیفیت محصول شود (Khan et al., 2016). با این حال نرخ تجمع فلزات سنگین در گیاهان بستگی به نوع گیاه، واریته، غلظت این فلزات در آب آبیاری و خاک دارد.

عموما فاضلاب آلوده به عناصر کمیابی مانند روی، مس، آهن، کادمیم، منگنز، بر، کبالت، سرب و آرسنیک می باشد که تعداد زیادی از این عناصر برای رشد گیاه غیر ضرری هستند (Muchuweti et al., 2006). فلزات سنگین در فاضلاب می تواند از منابع مختلفی از قبیل فاضلاب خانگی که در بردارنده مواد شوینده، بقایای ناشی از خوردگی سیستم‌های لوله کشی فرسوده و محصولات آرایشی و بهداشتی هستند نشات بگیرند. همچنین، رواناب ناشی از بارش‌های جوی که در مسیر خود از منابع آلوده به فلزات سنگین مثل جاده‌ها، پشت بام‌ها و سایر سطوح غیرقابل نفوذ عبور نموده‌اند حاوی فلزات سنگین هستند. تخلیه صنعتی پساب کارخانجات و شهرک‌های صنعتی، فعالیت‌های کشاورزی همچون استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها که مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین در ترکیبات خود دارند، هوازدگی سنگ‌ها و فعالیت‌های آتشفشانی منابع آلوده‌کننده دیگر فاضلاب به فلزات سنگین هستند (Aftab et al., 2023).

پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی بر روی استفاده از پساب تصفیه شده برای آبیاری اراضی زیر کشت محصولات کشاورزی انجام شده است. در این مطالعات از پساب تصفیه شده برای بهبود رشد گیاه، حفظ خاک و کیفیت محصول استفاده شده است. پژوهشگرانی تجمع دو فلز سنگین کادمیوم و سرب را در چندین محصول کشاورزی آبیاری شده با پساب مورد ارزیابی قرار دادند (Hamoud et al., 2024). نتایج پژوهش آنها نشان داد که در بین گیاهان آبیاری شده با پساب، بیشترین غلظت کادمیوم و سرب در گیاه ذرت مشاهده شد. همچنین، این مطالعه نشان داد که پیاز بالاترین خطر را برای سلامتی انسان از نظر تجمع فلزات سنگین دارد و یونجه به دلیل آلودگی کادمیوم و سرب بیشترین خطر را برای حیوانات دارد. Alhashimi et al. (2024) تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه نشده را بر هویج مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آنان نشان داد که علیرغم افزایش عملکرد ناشی از آبیاری با پساب، ریشه‌های هویج آبیاری شده با فاضلاب به طور قابل‌توجهی دارای کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، کبالت (Co) و سرب (Pb) بیشتر از مقادیر استاندارد ایمن است. Ingole et al. (2024) تأثیر آبیاری با آب فاضلاب را بر میزان مواد مغذی، تجمع فلزات سنگین و عملکرد نخود در مناطق حاشیه شهری ناحیه ناگپور هندوستان مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عملکرد نخود در گیاه نخود آبیاری شده با آب فاضلاب بیشتر از نخود آبیاری شده با آب چاه است. همچنین در تیمار آبیاری با فاضلاب غلظت فلزات سنگین کادمیوم، کروم، سرب و کبالت در دانه نخود بیشتر از تیمار آبیاری با آب چاه بود.

بر اساس مطالعه انجام شده توسط Bedbabis et al. (2015) استفاده از آب بازیافتی سبب افزایش مقدار مواد آلی، مواد درشت مغذی، املاح و فلزات سنگینی مثل منگنز، روی و آهن در خاک شده است. مطالعه انباشت کروم، مس، آهن، منگنز، نیکل، روی، کبالت و سرب در سبزیجات خوراکی مانند گوجه فرنگی، پیاز و بادمجان سیر نشان داد که تجمع این فلزات در سبزیجات آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده به طور معنی داری بیش از تیمار آبیاری با آب چاه است که در بسیاری از موارد مقدار این فلزات در گیاه بالاتر از حد بیشینه مجاز ارائه شده توسط سازمان بهداشت جهانی و فائو بود (Reynolds et al., 2009). فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) انباشت برخی از فلزات سنگین را در اندام‌های مختلف گیاهان جو، ذرت، بامیه و جعفری که با استفاده از فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه آبیاری می‌شد مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که اثر آبیاری با پساب تصفیه شده بر انباشت فلزات سنگین منگنز، مس، روی، آهن و کادمیم در تمام اندام‌های محصولات مورد بررسی به صورت معنی داری بیشتر از تیمار کنترل (شاهد) آبیاری با آب چاه بود تا جاییکه غلظت برخی از فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی بالاتر از حدود مجاز

ویرایش نشده

استانداردهای توصیه شده توسط نهادهای مرتبط قرار داشت. همچنین میزان انباشت بیشتر این فلزات سنگین در ریشه بیش از اندام‌های دیگر گزارش شد. (Khan et al .2023(اثرات آبیاری با منابع مختلف فاضلاب را بر انباشت فلزات سنگین در گریپ فروت و نارنگی پاکستانی و خطرات احتمالی ناشی از مصرف این میوه ها را برای انسان مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش غلظت کادمیوم، سرب، نیکل و کروم در قسمت‌های خوراکی میوه‌های گریپ فروت و نارنگی پاکستانی آبیاری شده با آب فاضلاب، آب چاه و آب کانال سنجش شد. غلظت همه فلزات مورد بررسی در میوه‌های نارنگی پاکستانی و گریپ فروت آبیاری شده با فاضلاب در مقایسه با نمونه‌های آبیاری شده با آب چاه و آب کانال بیشتر بودند. شاخص خطر سلامتی برای همه فلزات در محدوده‌های نرمال بود که نشان‌دهنده عدم وجود خطر فوری برای سلامتی انسان است. نتایج ارزیابی مقادیر تجمع فلزات سنگین در گیاهان علوفه‌ای آبیاری شده با فاضلاب در جنوب شهر تهران روشن کرد که مقدار فلزات سنگین انباشت شده در گیاه ذرت آبیاری شده با فاضلاب ۱/۵ برابر مقدار فلزات سنگین انباشت شده در گیاه ذرت آبیاری شده با آب چاه است. به غیر از روی و منگنز تجمع سایر فلزات سنگین در گیاه ذرت بیش از حد استاندارد مجاز و در دانه و بلال ذرت مقادیر نیکل، کروم، سرب و روی کمتر از حد مجاز و منگنز و کادمیم بیشتر از حد مجاز گزارش شد (یارقلی، ۱۳۸۷). Angelova et al. (2004) و Jinadasa et al. (1997)، در پژوهش‌های خود برای مقایسه مقدار فلزات سنگین تجمع یافته در گونه¬ها و واریته¬های مختلف گیاهی تحت شرایط مشابه زیست محیطی نتیجه گرفتند که توانایی گیاهان در جذب و تجمع فلزات سنگین متفاوت است و این تفاوت بین اندامهای مختلف گیاهان نیز وجود دارد.

در پژوهش کنونی برای اولین بار در جهان، تجمع فلزات سنگین شامل عناصر کادمیوم، مس، روی، آهن و منگنز در اندام¬های مختلف (ریشه و اندام هوایی) گیاه گشنیز (که در محدوده مورد بررسی به صورت گسترده کشت می‌شود) تحت آبیاری با تیمار پساب تصفیه شده شهری در مقایسه با تیمار آب چاه به عنوان تیمار کنترل (شاهد) در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار بررسی شده است که نتایج آن پس از مقایسه با استانداردهای تغذیه‌ای و پژوهش‌های گذشته در مدیریت صحیح استفاده از پساب تصفیه شده شهری برای آبیاری گیاه گشنیز و برای حفظ سلامتی انسان و دام بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند فقدان موجود در پژوهش‌های پیشین را در این مقوله پر نماید.

روش‌شناسی پژوهش

مشخصات منطقه مورد بررسی و تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهر کرمانشاه

این مطالعه در شهر کرمانشاه با ارتفاع متوسط ۱۲۹۱ متر از سطح دریا که دارای اقلیم نیمه خشک – سرد (بر اساس تقسیم‌بندی آمبرژه) می‌باشد انجام شد. میانگین دما و بارش سالانه این شهر به ترتیب ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد و ۴۴۴ میلی‌متر است. تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهر کرمانشاه با مساحتی در حدود ۷۸ هکتار در جنوب غربی شهر واقع شده است. تصفیه‌خانه مذکور با ظرفیت دبی روزانه ۶۰ هزار مترمکعب فاضلاب جمعیت ۴۰۰ هزار نفر را جمع‌آوری می‌کند. در این تصفیه‌خانه فرآیند تصفیه به شیوه لجن فعال از نوع متعارف می‌باشد که شامل مراحل تصفیه‌های مقدماتی، اولیه و ثانویه و در نهایت گندزدایی پساب است.

این مطالعه در شرایط واقعی انجام پذیرفته و اراضی تحت کشت گشنیز هر یک به مساحتی نزدیک به ۵ هکتار، در پایین‌دست تصفیه‌خانه واقع شده بودند. در این میان اراضی تحت آبیاری با پساب تصفیه شده در یک سوی رودخانه قره‌سو واقع شده بود که نزدیک به ۲۰ سال همیشه با پساب خروجی تصفیه‌خانه به روش سطحی آبیاری و اراضی شاهد که در ست در سوی دیگر رودخانه قره‌سو و روبروی اراضی تحت آبیاری با پساب تصفیه شده واقع گردیده نیز از سالیان دور همیشه از آب چاه برای آبیاری آنها استفاده شده بود. روش آبیاری برای هر دو تیمار بصورت آبیاری غرقابی به روش کرتی صورت گرفت. جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک اراضی مورد مطالعه و جدول ۲ غلظت فلزات سنگین موجود در آب (پساب تصفیه شده و آب چاه) و خاک و مقایسه آنها با استانداردهای معتبر بین المللی را ارائه می‌کند. استانداردهای بین المللی ارائه شده در جدول ۲ توسط سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO)، سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) در رابطه با کیفیت

مجاز پساب از لحاظ غلظت فلزات سنگین برای آبیاری ارائه شده است. موقعیت تصفیه خانه شهر کرمانشاه و تیمارهای آبیاری مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱. موقعیت تصفیه خانه و تیمارهای مورد نظر در این پژوهش.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک اراضی مورد مطالعه.

تیمار آبیاری	لایه خاک، cm	ρ_b, g cm^{-3}	Ks, mm h^{-1}	η, %	کلاس بافت خاک
پساب تصفیه شده	۰ – ۳۰	۱/۶۴	۳۸/۰۲	۳۵/۸۳	SL
	۳۰ – ۶۰	۱/۵۸	۳۴/۱۸	۲۷/۱۱	SCL
	۶۰ – ۹۰	۱/۷۲	۳۶/۰۶	۳۳/۱۹	SL
آب چاه	۰ – ۳۰	۱/۷۰	۱۸/۱۹	۳۷/۰۰	SL
	۳۰ – ۶۰	۱/۸۰	۲۷/۱۶	۲۹/۹۰	SL
	۶۰ – ۹۰	۱/۶۹	۲۰/۶۰	۲۵/۷۳	SL

SL و SCL به ترتیب لوم شنی (Sandy loam) و لوم رسی شنی (Sandy clay loam)

η تخلخل خاک

b_ρ جرم مخصوص ظاهری

Ks هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

شناسایی شده

جدول ۲. غلظت فلزات مختلف در تیمارهای آب و خاک بکار رفته برای آبیاری و مقایسه با حدود بالایی استانداردهای معتبر.

عنصر	غلظت در آب ($mg\ l^{-1}$)							غلظت در خاک[۶] ($mg\ kg^{-1}$)					
	قبل از اولین آبیاری		بعد از آخرین آبیاری		EPA[۳]	WHO[۲]	FAO[۱]	قبل از اولین آبیاری		بعد از آخرین آبیاری		EU[۴]	WHO
	پساب	چاه	پساب	چاه				پساب	چاه	پساب	چاه		
مس (Cu)	۰/۰۳	۰/۰	۰/۱۱	۰/۰	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۴۱/۶	۲۱/۱	۳۹/۷	۲۵/۷	۱۴۰	۱۰۰
آهن (Fe)	۱۵/۷	۱/۳۲	۳۶/۲	۱/۰۶	۵	۵	۵	۳۱۲۴	۲۰۴۱	۲۹۴۴	۲۵۵۵	NA[۵]	-
روی (Zn)	۱/۲۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۷	۱	۲	۲	۲۳۳	۱۷۹	۲۳۷	۱۵۹	۳۰۰	۳۰۰
کادمیم (Cd)	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۱/۸۵	۰/۶۷	۱/۷۹	۱/۶۰	۳	۴
منگنز (Mn)	۲/۱	۰/۰۰	۱۱/۱	۰/۰۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۹۴۲	۷۵۳	۹۹۶	۷۰۵	NA	NA

[۱] استاندارد ارائه شده توسط سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO).

[۲] استاندارد ارائه شده توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO).

[۳] استاندارد ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA).

[۴] مجله رسمی اتحادیه اروپا (EU).

[۵]. محدودیتی ندارد (NA)

[۶]. میانگین غلظت در عمق ۰-۹۰ سانتیمتری خاک

برداشت و آماده سازی نمونه های گیاهی گشنیز برای سنجش غلظت فلزات سنگین

در زمان برداشت گیاه گشنیز (۴۵ تا ۶۰ روز پس از کاشت که طول بوته‌ها به ۲۰ تا ۳۰ سانتی متر رسیده است)، تعدادی بوته کامل (ریشه و اندام هوایی) بصورت تصادفی از قسمت‌های مختلف هر مزرعه (هر تیمار آبیاری) در سه تکرار انتخاب و برداشت شد. برای زدودن آلاینده‌های احتمالی موجود در آب و خاکی که در تماس با گیاه بود، ریشه و اندام هوایی هر گیاه با "آب مقطر سه بار تقطیر" شستشو داده شد. پس از شستشو، نمونه‌های گیاهی در مجاورت هوای آزاد خشک شد و سپس قسمت‌های مختلف گیاه، اعم از ریشه و اندام هوایی خرد و آسیاب شد و برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین آماده گردید (Batarseh et al., 2011).

هضم نمونه‌های گیاهی و سنجش غلظت فلزات سنگین در آنها

برای هضم نمونه‌های گیاهی از هر نمونه آسیاب شده مقدار ۲ گرم از آن‌را داخل بالون ته گرد ریخته و سپس به آن به ترتیب ۴ میلی‌لیتر اسید پرکلریک غلیظ، ۲ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ و ۲۰ میلی‌لیتراسید نیتریک غلیظ اضافه شد و سپس محلول را جوشانده تا حجم کل آن کم گردد. در مرحله بعد به آن ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه کرده تا رسوبات آن حل شود و دوباره حرارت داده شد تاحجم کل کم شود. سپس محلول با استفاده از کاغذ صافی واتمن صاف شد و حجم آن با آب مقطر به ۲۵۰ میلی لیتر رسانیده شد (Batarseh et al., 2011). در نهایت از دستگاه جذب اتمی مدل Spectra AA 220 (ساخت کارخانه VARIAN کشور استرالیا) برای سنجش غلظت هر فلز سنگین در هر نمونه استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری

طرح آزمایشی در سه تکرار در قالب یک طرح کاملاً تصادفی (CRD) با دو تیمارآبیاری با پساب تصفیه شده و آبیاری با آب چاه (به عنوان تیمار کنترل) انجام شد. غلظت های سنجش شده ابتدا از نظر نرمال بودن (داده‌ها نرمال بودند) بررسی شد و سپس با استفاده از نرم افزار آماری Minitab 16.2.4 تجزیه و تحلیل شد. آزمون مقایسات میانگین در سطوح احتمالی ۱ و ۵ درصد به روش توکی انجام شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج تحلیل آماری غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه گشنیز

ویرایش اولیه نشده

جدول ۳ خلاصـــه‌ای از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) را برای تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر غلظت فلزات ســـنگین مس، آهن، روی، کادمیوم، و منگنز در اندام‌های مختلف گیاه گشنیز (ریشه و اندام هوایی) به تصویر کشیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اثر تیمار کیفیت آب آبیاری (پساب و آب چاه) بر روی غلظت همه فلزات سنگین در گیاه گشنیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین این جدول نشان می دهد که غلظت فلزات سنگین مس و روی، منگنز و کادمیوم در اندام های مختلف این گیاه به صـــورت معنی داری با یکدیگر متفاوت بوده اســـت. علاوه بر این، اثر متقابل این دو عامل (تیمار کیفیت آب و اندام گیاهی) بر غلظت فلزات سنگین کادمیوم و منگنز معنی دار شد. لازم به ذکر است که در مقایسات میانگین و تحلیل‌های آماری برای فلزات سنگینی که برهمکنش کیفیت آب آبیاری و اندام گیاهی معنی‌دار شده است صرفا برهمکنش، بدون توجه به اثرات اصلی، مورد بررسی قرار گرفت . ولی اگر برای فلز سنگینی برهمکنش کیفیت آب آبیاری و اندام گیاهی معنی‌دار نشد، آنگاه اثرات اصلی مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۳. خلاصه جدول آنالیز واریانس (ANOVA) برای غلظت فلزات سنگین در اندام مختلف گشنیز تحت تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری.

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات اصلاح شده (Adj. MS)				
		مس	آهن	روی	کادمیوم	منگنز
تکرار	۲	۸/۲۷	۳۱۲	۱۴/۲	۰/۰۰۰۰۶	۲۰
نوع آب آبیاری	۱	۱۴۴۷**	۲۱۵۲۵۸**	۹۳۱۰**	۰/۰۰۱**	۹۹۹۹**
اندام گیاهی	۱	۲۱۷/۱*	۸۸۷۸	۴۳۱/۵**	۰/۰۰۱**	۶۰۷۵**
آب* اندام گیاهی	۱	۲۹/۵۸	۳۲۲۸	۴/۸	۰/۰۰۱*	۷۹۳/۸**
خطا	۶	۳۰/۱۶	۲۲۳۹	۱۷/۴	۰/۰۰۰	۴۷/۹

*و **به‌ترتیب نشان دهنده تفاوت معنی دار از نظر آماری در سطح ۵ درصد و ۱ درصد به روش توکی است.

جدول ۴ مقایسه میانگین را برای غلظت فلزات سنگین کادمیم و منگنز در اندام های مورد مطالعه گیاه گشنیز تحت تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری (برهمکنش تیمار آبیاری و تیمار اندام گیاهی) ارائه می‌دهد. نتایج نشانگر آن است که بیشترین مقدار کادمیوم در تیمار پساب تصفیه شده و در ریشه گیاه گشنیز (۰/۰۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده که به صورت معنی داری بالاتر از مقادیر کادمیوم اندازه‌گیری‌شده در اندام هوایی تیمار پساب و اندام‌های مختلف گیاه گشنیز آبیاری شده با آب چاه می‌باشد. این نتیجه با نتایج (Khawla et al ،2019) .(Ingole et al ،2024(و فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت داشت. (Khawla et al .2019(نیز بیشترین غلظت کادمیوم را در ریشه گیاه ذرت آبیاری شده با پساب گزارش نمودند. و فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیشترین میزان غلظت کادمیوم را برای جو، ذرت، بامیه و جعفری در اندام ریشه این گیاهان گزارش نمودند. اما بیشترین مقدار منگنز در اندام هوایی گیاه گشنیز (۱۱۱/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد که به صورت معنی‌داری بالاتر از مقادیر منگنز اندازه گیری شده در ریشه گیاه گشنیز بود (جدول ۴). این نتیجه نیز با نتایج فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) همراستا بود. در پژوهش آنها نیز بیشترین میزان غلظت منگنز برای ذرت و جعفری در اندام هوایی این گیاهان گزارش شده است.

جدول ۵ مقایسه میانگین¬های غلظت فلزات سنگین مس و روی را در گیاه گشنیز (اثرات اصلی) نشان می‌دهد. بر اساس این جدول در اثر آبیاری گیاه گشنیز با پساب تصفیه شده، غلظت فلزات سنگین مس و روی در این گیاه به صورت معنی داری بیشتر از تیمار شاهد (استفاده از آب چاه برای آبیاری) بود (۳۱/۹۱ و ۷۲/۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای مس و روی در تیمار پساب و ۹/۹۵ و ۱۷/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای تیمار آب چاه). این نتیجه دور از انتظار نبوده و یک دلیل آن می‌تواند بیشتر بودن غلظت این فلزات در پساب استفاده شده برای آبیاری اراضی کشت گشنیز از غلظت فلزات مذکور در آب چاه استفاده شده برای آبیاری بود (جدول ۲). علاوه بر این، بالاتر بودن غلظت این دو فلز سنگین در تیمار آبیاری با پساب می‌تواند به سبب اثر تجمعی آبیاری‌های پیاپی با پساب در بالابردن تجمعی غلظت این فلزات در خاک یا به سبب مصرف بیش از اندازه کودهای شیمیایی فسفاته و ازته که تقریبا همگی در ساختار خود حاوی این نوع فلزات سنگین هستند باشد (Tang et al., 2022) که در نهایت سبب افزایش و تجمع تدریجی این فلزات در خاک و در نتیجه در دسترس قرار گرفتن این فلزات برای جذب توسط ریشه گیاه و در نهایت تجمع آنها در اندام‌های مختلف (ریشه و اندام هوایی) گیاهی گیاه گشنیز باشد. لذا، اگر غلظت این فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی از حدود مجاز استاندارد ارائه شده توسط سازمان‌ها و نهادهای مرتبط با سلامت و بهداشت غذایی تجاوز نماید، در صورت مصرف پیوسته

ویرایش اندازی نشده

این سبزی برگی توسط انسان می‌تواند برای سلامتی خطر ساز شود. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) بر روی ذرت، جو، بامیه و جعفری، نتایج Khan et al (2023. بر روی نارنگی پاکستانی و گریپ فروت و نتایج Ingole et al. (2024 بر روی نخود مطابقت داشت که در هر سه پژوهش ذکر شده غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در تیمارهای آبیاری با پساب تصفیه شده بیشتر از تیمارهای آبیاری با آب چاه گزارش شده است.

همچنین اثر اصلی اندام گیاهی بر تجمع فلزات سنگین مس و روی در گیاه گشنیز معنی‌دار شد به طوری‌که بیشترین غلظت مس و روی در اندام هوایی گیاه گشنیز در مقایسه با ریشه مشاهده شد (جدول ۵). این نتیجه نیز با نتایج Khawla et al (2019. و فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) همراستا بود. Khawla et al (2019. نیز بیشترین مقدار غلظت مس را در برگ‌های ذرت (در مقایسه با ریشه و ساقه) اندازه‌گیری نمودند. فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیشترین میزان غلظت منگنز را برای ذرت و جعفری در اندام هوایی این گیاهان گزارش کردند.

جدول ۶ مقایسه میانگین¬های غلظت آهن را در گیاه گشنیز در تیمارهای مختلف آبیاری (اثر اصلی) نشان می‌دهد. با توجه به این جدول بیشترین غلظت آهن (۳۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار آبیاری با پساب تصفیه شده مشاهده شد که ۳/۷ برابر غلظت آهن اندازه‌گیری شده گیاه گشنیز تحت تیمار آبیاری با آب چاه بود (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم). دلیل این اختلاف در آن است که غلظت آهن در پساب استفاده‌شده برای آبیاری اراضی کشت گشنیز بسیار بیشتر از غلظت آهن در آب چاه استفاده شده برای آبیاری بود (جدول ۲). این نتیجه با نتایج Khawla et al (2019.، فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) و Khan et al (2023. همراستا بود. Khawla et al (2019. گزارش کردند که غلظت آهن در همه اندام‌های گیاه ذرت (ریشه، ساقه و برگ) آبیاری شده با پساب به صورت معنی داری بیشتر از غلظت آهن در اندام‌های ذرت آبیاری شده با آب شیرین است. فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیشترین میزان غلظت آهن در گیاه را برای جو، بامیه، ذرت و جعفری در تیمار آبیاری با پساب تصفیه شده در مقایسه با تیمار آبیاری با آب چاه گزارش کردند. Khan et al. (2023) نیز بیشترین غلظت کادمیوم، سرب، نیکل و کروم را در گریپ فروت و نارنگی پاکستانی آبیاری شده با فاضلاب در مقایسه با نمونه‌های آبیاری شده با آب چاه و آب کانال گزارش کردند.

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین کادمیم و منگنز در اندام های مورد مطالعه گیاه گشنیز تحت تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری (برهم کنش تیمار آبیاری و تیمار اندام گیاهی).

تیمار آبیاری	اندام گیاهی	کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	منگنز ($mg\ kg^{-1}$)
پساب تصفیه شده	ریشه	۰/۰۳۹^{a}	۵۰/۴۰^{B}
	اندام هوایی	۰/۰۰۶^{b}	۱۱۱/۷^{A}
آب چاه	ریشه	۰/۰۰۹^{b}	۸/۹۳^{C}
	اندام هوایی	۰/۰۰۲^{b}	۳۷/۶۷^{B}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک باشند با هم اختلاف معنی‌داری ندارند ($P < ۰/۰۵$).

جدول ۵. مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین مس و روی در گیاه گشنیز (اثرات اصلی).

تیمار		مس ($mg\ kg^{-1}$)	روی ($mg\ kg^{-1}$)
آبیاری	پساب تصفیه شده	۳۱/۹۱^{A}	۷۲/۹۴^{A}
	آب چاه	۹/۹۵^{B}	۱۷/۲۳^{B}
اندام گیاهی	ریشه	۱۶/۶۸^{b}	۳۹/۰۹^{b}
	اندام هوایی	۲۵/۱۸^{a}	۵۱/۰۸^{a}

حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار میانگین‌ها در سطح ۵ درصد است (در هر ستون در هر بخش).

جدول ۶. مقایسه میانگین‌های غلظت آهن در گیاه گشنیز در تیمارهای مختلف آبیاری (اثرات اصلی).

تیمار آبیاری	آهن ($mg\ kg^{-1}$)
پساب تصفیه شده	۳۶۷/۹^{A}
آب چاه	۱۰۰/۰^{B}

حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است.

بررسی انباشت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی گیاه گشنیز در مقایسه با استانداردهای موجود

مقایسه نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر (جداول ۴، ۵ و ۶) با حدود بالایی مجاز در استانداردهای ارائه شده (جدول ۷) نشان می‌دهد که آبیاری گیاه گشنیز با پساب تصفیه شده فاضلاب شهری شهر کرمانشاه سبب بالاتر رفتن غلظت هیچ یک از فلزات سنگین مس، آهن، کادمیوم و منگنز از حدود مجاز در گیاه گشنیز نشده است. فقط غلظت روی در بافت‌های گیاه گشنیز (۷۲/۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمی بالاتر از حد مجاز استاندارد EU (2006) تشخیص داده شد (جدول ۷). این درحالی است که عمدتا خاک‌های ایران با کمبود روی مواجه هستند (Hasheminasab et al., 2023) و لذا این موضوع زیاد نگران کننده نیست.

در مقایسه نتایج پژوهش کنونی با نتایج پژوهش قمرنیا و همکاران (۱۴۰۳) که بر روی تاثیر آبیاری با پساب تصفیه شده بر انباشت فلزات سنگین در اندام‌های گیاه باقلا انجام شد، آنها نیز نشان دادند که تجمع تمام فلزات سنگین در اندامهای گیاه باقلا تحت تیمار آبیاری با پساب تصفیه شده بصورت معنی‌داری بیشتر از تیمار آبیاری با آب چاه بود. همچنین غلظت مس و منگنز در اندام‌های مختلف باقلا پایینتر از حدود مجاز بود که نتایج آنان از این لحاظ با نتایج پژوهش کنونی همراستا است. ولیکن آن پژوهشگران، غلظت کادمیوم و روی را در دانه باقلا بالاتر از استانداردهای توصیه شده برای سلامت تغذیه‌ای محصولات کشاورزی بدست آوردند. همچنین، غلظت آهن و کادمیوم در ریشه (اندام غیر خوراکی) گیاه باقلا بالاتر از حدود استاندارد بدست آمد که این تفاوت‌ها در نتایج می‌تواند به سبب متفاوت بودن عملکرد فیزیولوژیکی دو گیاه باقلا و گشنیز در جذب و تجمع فلزات سنگین باشد.

جدول ۷. حدود بالایی مجاز غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی.

استاندارد	مس ($mg\ kg^{-1}$)	آهن ($mg\ kg^{-1}$)	روی ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	منگنز ($mg\ kg^{-1}$)
FAO/WHO (2007)	۴۰	۴۵۰	۶۰ – ۱۰۰	۰/۲	۵۰۰
FAO/WHO (2001)	۷۳	NL	۱۰۰	۰/۱	NL
EU (2006)	۴۰	۴۲۵	۶۰	۰/۰۵ – ۰/۲	NL
SEPA (2005)	۲۰	NL	۱۰۰	۰/۲	NL

FAO/WHO کمیته مشترک سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد و سازمان بهداشت جهانی.

EU مجله رسمی اتحادیه اروپا.

SEPA اداره حفاظت از محیط زیست ایالتی چین.

NL محدودیتی ندارد (Non limited).

نتیجه‌گیری

کاهش منابع آب تجدید شونده در مناطق خشک و نیمه¬خشک جهان که ایران از آن مستثنی نیست از یک سو و افزایش حجم تقا ضا برای د ستیابی به آب باکیفیت از سویی دیگر موجب شده ا ست که منابع آب با کیفیت مطلوب‌تر برای م صارف شهری و آ شامیدن حفظ شده و منابع آب با کیفیت نامنا سب‌تر همچون فا ضلاب ت صفیه شده برای م صارفی از قبیل آبیاری مح صولات ک شاورزی و ف ضای سبز و همچنین صنعت ا ستفاده شود. ولی در صورت ا ستفاده از پ ساب ت صفیه شده برای آبیاری ارا ضی کشاورزی همچنان وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام های مختلف گیاه برای بسیاری از محصولات زراعی، باغی و سبزیجات بویژه سبزیجات برگی نامشخص و مبهم است و به دلیل بیم ورود اینگونه فلزات به چرخه غذایی انسان بایستی بصورت منطقه‌ای، دائما غلظت این فلزات در پساب، خاک و اندام‌های گیاهی سنجش و پایش شود. از این رو در این پژوهش اثرات آبیاری با پساب تصفیه شده شهری در مقایسه با آب چاه به عنوان تیمار شاهد بر انباشت فلزات سنگین مس، آهن، روی، کادمیوم و منگنز در ریشه و اندام هوایی گیاه گشنیز مورد بررسی قرار گرفت.

ویرایشی نشده

در مطالعه حا ضر، نتایج نشان داد که تجمع همه فلزات سنگین در اندام‌های گیاه گشنیز آبیاری شده با پساب تصفیه شده بصورت معنی داری بیشتر از تیمار شاهد آبیاری با آب چاه بود ولی خوشبختانه به غیر از فلز روی، غلظت دیگر فلزات سنگین در همه اندام های گیاهی گیاه گشنیز پایین تر از استانداردهای توصیه‌شده برای سلامت تغذیه‌ای محصولات کشاورزی قرار داشت. این درحالی است که عموما خاک‌های ایران با کمبود روی مواجه است. لذا این فلز نیز نمی‌تواند خطری فوری برای سلامت انسان ایجاد نماید. با این وجود می بایستی کماکان اندازه گیری‌های فلزات سنگین در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها، اراضی آبیاری شده با پساب و همچنین در بافت‌های مختلف گیاهی بصورت دوره‌ای و مکرر ادامه داشته باشد تا از بروز خطرات زیست محیطی، بهداشتی و تغذیه‌ای برای انسان و دام جلوگیری شود.

همچنین اثر اصلی اندام گیاهی بر تجمع فلزات سنگین مس و روی در گیاه گشنیز معنی دار شد به طوری که بیشترین غلظت مس و روی در اندام هوایی گیاه گشنیز در مقایسه با ریشه مشاهده گردید. بیشترین غلظت آهن در تیمار آبیاری با پساب تصفیه شده مشاهده شد که ۳/۷ برابر غلظت آهن اندازه‌گیری شده گیاه گشنیز تحت تیمار آبیاری با آب چاه بود. به طور کلی در شرایط کنونی کمبود و بحران منابع آب در استان کرمانشاه، پساب تصفیه شده شهری تصفیه‌خانه شهر کرمانشاه می‌تواند به عنوان یک منبع آب مطمئن و پایدار برای آبیاری اراضی وسیع کشت گشنیز بدون ایجاد تهدیدی برای سلامت تغذیه‌ای انسان از نظر سمیت فلزات سنگین (در صورت مصرف این گیاه)، مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

فرمانی‌فرد، میلاد، قمرنیا، هوشنگ، پیرصاحب، مقداد، و فتاحی، نظیر (۱۳۹۵). مطالعه تجمع فلزات سنگین در محصولات مختلف تحت تاثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه. *مدیریت آب و آبیاری*، ۶(۲)، ۳۶۵-۳۴۷. https://sid.ir/paper/240087/fa

قمرنیا، هوشنگ؛ عباسی، محمد رسول؛ فرمانی فرد، میلاد (۱۴۰۳). اثرات آبیاری با پساب تصفیه شده فاضلاب شهری کرمانشاه بر غلظت و توزیع فلزات سنگین در گیاه باقلا. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۴(۱)، ۱-۱۸. https://doi.org/10.22126/ATWE.2024.10069.1070

یارقلی، بهمن (۱۳۸۷). بررسی میزان جذب کادمیم از محیط ریشه و میزان تجمع آن در اندام محصولات زراعی. *رساله دکتری*. تهران: دانشگاه تهران.

REFERENCES

Abbasi, M. R., & Sepaskhah, A. R. (2022). Evaluation of saffron yield affected by intercropping with winter wheat, soil fertilizers and irrigation regimes in a semi-arid region. *International Journal of Plant Production*, 16(3), 511-529. https://doi.org/10.1007/s42106-022-00194-4

Aftab, K., Iqbal, S., Khan, M. R., Busquets, R., Noreen, R., Ahmad, N., ... & Ouladsmane, M. (2023). Wastewater-irrigated vegetables are a significant source of heavy metal contaminants: toxicity and health risks. Molecules, 28(3), 1371. https://doi.org/10.3390/molecules28031371

Alhashimi, A., Abdelkareem, A., Amin, M. A., Nowwar, A. I., Fouda, A., Ismail, M. A., ... & Said, H. A. (2024). Eco-friendly approach to decrease the harmful effects of untreated wastewater on growth, yield, biochemical constituents, and heavy metal contents of carrot (*Daucus carota* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16. https://doi.org/10.1007/s11356-024-31869-2

Ammeri, R. W., Hidri, Y., Souid, F., Simeone, G. D. R., Hajjaji, F., Moussa, M., ... & Eturki, S. (2023). Improvement of degraded agricultural soil in an arid zone following short-and long-term treated municipal wastewater application: a case study of Gabes perimeter, Tunisia. *Applied Soil Ecology*, 182, 104685. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104685

Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., & Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Ind. Crops. Prod., 19(3), 197–205. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001

Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water reuse: Issues, technologies, and applications*. United States of America: McGraw-Hill Professional Publishing.

Batarseh, M. I., Rawajfeh, A., Ioannis, K. K., & Prodromos, K. H. (2011). Treated municipal wastewater irrigation impact on olive trees (Olea Europaea L.) at Al-Tafilah, Jordan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 217, 185-196.

https://www.academia.edu/6357678/Treated_Municipal_Wastewater_Irrigation_Impact_on_Olive_Trees_Olea_Europaea_L_at_Al_Tafilah_Jordan
Bedbabis, S., Trigui, D., Ahmed, C. B., Clodoveo, M. L., Camposeo, S., Vivaldi, G. A., & Rouina, B. B. (2015). Long-terms effects of irrigation with treated municipal wastewater on soil, yield and olive oil quality. Agricultural Water Management, 160, 14-21. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.023
Ensink, J. H., Van Der Hoek, W., Matsuno, Y., Munir, S., & Aslam, M. R. (2002). Use of untreated wastewater in peri-urban agriculture in Pakistan: Risks and opportunities (Vol. 64). IWMI. https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub064/Report64.pdf
EU, (2006). Commission regulation (EC) No. 1881/2006, setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of the European Union, 364: 5-24.
FAO/WHO, (2001). Codex Alimentarius Commission, Food additives and contaminants. Geneva: Joint FAO/WHO Food Standards Program.
FAO/WHO, (2007). Joint FAO/WHO, Food Standard Programme Codex Alimentarius Commission, 13th Session. Report of the Thirty Eight Session of the Codex Committee on Food Hygiene. Houston, TX, USA.
Farmanifard, M., Ghamarnia, H., Pir-saheb, M. & Fattahi, N. (2015). Study of the accumulation of heavy metals in different crops under the influence of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater. *Journal of Water and irrigation management*, 6(2), 347-365. (In Persian). https://sid.ir/paper/240087/fa
Ghamarnia, H., Abbasi, M. R., & Farmanifard, M. (2024). Effects of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater on the content and distribution of heavy metals in faba bean plant (Vicia faba L.). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 1-18. (In Persian) https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10069.1070
Ghosh, A. K., Bhatt, M. A., & Agrawal, H. P. (2012). Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India. Environmental monitoring and assessment, 184, 1025-1036. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2018-6
Goyal, M. R. (Ed.). (2016). Wastewater management for irrigation: principles and practices. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18967
Hamoud, Y. A., Shaghaleh, H., Zia-ur-Rehman, M., Rizwan, M., Umair, M., Usman, M., ... & Alghanem, S. S. M. (2024). Cadmium and lead accumulation in important food crops due to wastewater irrigation: Pollution index and health risks assessment. *Heliyon*, 10(3), e24712. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24712
Hasan, H., Battikhi, A., & Qrunfleh, M. (2015). Impacts of treated wastewater reuse on some soil properties and production of Gladiolus communis. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 11(4). https://archives.ju.edu.jo/index.php/jjas/article/view/11040
Hashem, M. S., & Qi, X. (2021). Treated wastewater irrigation—A review. *Water*, 13(11), 1527. https://doi.org/10.3390/w13111527
Hasheminasab, K. S., Shahbazi, K., Marzi, M., Zare, A., Yeganeh, M., Bazargan, K., & Kharazmi, R. (2023). A study on wheat grain zinc, iron, copper, and manganese concentrations and their relationship with grain yield in major wheat production areas of Iran. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100913. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100913
Ingole, M. N., Babhulkar, V. P., & Mairan, N. R. (2024). Impact of sewage water irrigation on nutrient contents, heavy metal accumulation and yield of chickpea in peri urban areas of Nagpur district. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 9(1): 48-50. https://www.mathsjournal.com/pdf/2024/vol9issue1S/PartA/S-9-1-9-189.pdf
Jimenez, B., & Asano, T. (2008). Water reclamation and reuse around the world. *Water Reuse: an international survey of current practice, issues and needs*, 14, 3-26. https://doi.org/10.2166/9781780401881
Jinadasa, K.B.P.N., Milham, P.J., Hawkins, C.A., Cornish, P.S., Williams, P.A. & Kaldor, C.J. (1997). Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia. J. Environ. Qual., 26(4), 924–933. https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600040002x
Khan, A., Khan, S., Alam, M., Khan, M. A., Aamir, M., Qamar, Z., ... & Perveen, S. (2016). Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macro-and micro-nutrients. Chemosphere, 146, 121-128. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.014

Khan, Z. I., Haider, R., Ahmad, K., Alrefaei, A. F., Mehmood, N., Memona, H., ... & Ugulu, I. (2023). The Effects of Irrigation with Diverse Wastewater sources on Heavy Metal Accumulation in Kinnow and Grapefruit samples and Health Risks from Consumption. *Water*, 15(19), 3480. https://doi.org/10.3390/w15193480

Khawla, K., Besma, K., Enrique, M., & Mohamed, H. (2019). Accumulation of trace elements by corn (*Zea mays*) under irrigation with treated wastewater using different irrigation methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 530-537. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.025

Kiziloglu, F.M., Turan M., Sahin U., Kuslu Y. & Dursun A. 2008. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (Brassica olerecea L. var. botrytis) and red cabbage (Brassica olerecea L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. Agricultural Water Management, 95:716 -724. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.008

Kristensen, P., Whalley, C., Zal, F. N. N., & Christiansen, T. (2018). European waters assessment of status and pressures 2018. EEA Report, (7/2018). https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water

Langaas, S. Microplastics (MP) in Sewage Sludge and Agriculture. ISSN 1977-8449 Available online: https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-meeting-sludge-2018/ESPP-4-12-2018-Langaas.pdf (accessed on 8 November 2020).

Mishra, S., Kumar, R., & Kumar, M. (2023). Use of Treated Sewage or wastewater as an Irrigation Water for Agricultural Purposes-Environmental, Health, and Economic Impacts. *Total Environment Research Themes*, 100051. https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100051

Mkhinini, M., Boughattas, I., Alphonse, V., Livet, A., Giusti-Miller, S., Bannı, M., & Bousserrhıne, N. (2020). Heavy metal accumulation and changes in soil enzymes activities and bacterial functional diversity under long-term treated wastewater irrigation in East Central region of Tunisia (Monastir governorate). *Agricultural Water Management*, 235, 106150. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106150

Muchuweti, M., Birkett, J. W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M. D., & Lester, J. N. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. Agriculture, ecosystems & environment, 112(1), 41-48. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.028

Piotrowska, A., Iamarino, G., Rao, M.A. & Gianfreda L. (2006). Short-term effects of olive mill waste water (OMW) on chemical and biochemical properties of semi-arid Mediterranean soil. Soil Biology and Biochemistry, 38: 600-610. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.012

Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural water management*, 97(4), 561-568. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009

Santos, A.F.; Santos, C.P.; Matos, A.M.; Cardoso, O.; Quina, M.J. (2020). Effect of Thermal Drying and Chemical Treatments with Wastes on Microbiological Contamination Indicators in Sewage Sludge. *Microorganisms*, 8(3), 376. https://doi.org/10.3390/microorganisms8030376

Scheierling, S. M., Bartone, C., Mara, D. D., & Drechsel, P. (2010). Improving wastewater use in agriculture: An emerging priority. *World Bank Policy Research Working Paper*, (5412). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1673052

SEPA, (2005). The limits of pollutants in food. China: State Environmental Protection Administration. GB2762-2005.

Tang, G., Zhang, X., Qi, L., Li, L., Guo, J., Zhong, H., ... & Huang, J. (2022). Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Increases the Uptake of Soil Heavy Metal Pollutants by Plant Community. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 109(6), 1059-1066. https://doi.org/10.1007/s00128-022-03628-x

United Nations (2015). General Assembly Resolution 70/1: Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. *UN Doc A/RES/ 70/1 (September 25, 2015)*.

https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2022/0808/Documents/Shailendra%20Kumar%20Mishra%20.pdf
US EPA. Basic Information about Water Reuse. Available online: https://www.epa.gov/waterreuse/basic-information-about-water-reuse (accessed on 12 September 2022).
WHO. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. *WHO Policy and Regulatory Aspects*, 1. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=WHO+Guidelines+for+the+Safe+Use+of+Wasterwater+Excreta+and+Greywater&author=WHO&publication_year=2006
World Health Organization. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wasterwater excreta and greywater* (Vol. 1). World Health Organization. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=uJJ3UIPGtFIC&oi=fnd&pg=PR9&ots=wS4l_Ygf6h&sig=C8_Xy8egbkuVcQLBXnRqUJD0hfQ#v=onepage&q&f=false
Yargholi, B. (2007). Investigating the amount of cadmium absorption from the root environment and its accumulation in the different parts of the crops. *Doctoral Dissertation.*Tehran: University of Tehran. (In Persian).
Younis, U., Malik, S. A., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Shah, M. H. R., ... & Ahmad, N. (2016). Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (Spinacia oleracea) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes. Environmental Science and Pollution Research, 23, 21385-21394. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7344-3

ویراستاری نشده

Accumulation and distribution of heavy metals in coriander plant (*Coriandrum sativum* L.) under the influence of irrigation with treated municipal wastewater

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Iran, as one of the arid and semi-arid regions of the world, is facing a drastic decrease in renewable water resources, and the demand for high-quality water in this country is expected to increase. This has forced the decision makers to preserve better quality water resources for urban and drinking purposes and less quality water resources (such as reclaimed wastewater) to be allocated for purposes such as irrigation of crops, vegetables and green spaces. In the meantime, the accumulation of heavy metals within different tissues of the crops and vegetables (especially leafy ones) irrigated with reclaimed wastewater, is still unclear. Therefore, the concentration of these metals in the plants should be measured and monitored, regularly due to their risk of entering the human food cycle and bringing about diseases. Hence, in this study, the effects of irrigation with treated municipal wastewater on the accumulation of heavy metals in the roots and aerial parts of the coriander plant (*Coriandrum sativum* L.) were investigated and compared with that in coriander irrigated with well water (control treatment).

Materials and Methods

This research was conducted in Kermanshah city with a semi-arid-cold climate. Kermanshah municipal wastewater treatment plant is located in the southwest of the city with an area of 78 hectares. This treatment plant collects wastewater from a population of 400,000 people, so its daily discharge capacity is 60,000 cubic meters. The treatment process in this wastewater treatment plant is a conventional activated sludge method. In this research, the fields under coriander cultivation were located at the downstream of the treatment plant, each with an area of nearly 5 hectares. The lands under irrigation with treated wastewater were always irrigated with the effluents of the treatment for nearly 20 years, and the control treatments, were also irrigated with well water for many years. At the time of harvesting, a number of whole coriander plants (roots and aerial parts) from different parts of each treatment were randomly harvested in three replicates. The different parts of each plant were washed to eliminate possible pollutants. Then, the drying process of the plant samples was carried out. Finally, different parts of each plant, including aerial parts and roots were crushed and ground. Plant samples were digested using the method described by Batarse et al. (2011). An atomic absorption device (Spectra AA 220 model) was used to measure the concentration of heavy metals in samples. The experimental design was carried out in three replications in a completely randomized design (CRD) arrangement with two irrigation treatments including irrigation with reclaimed wastewater and irrigation with well water. Data were analyzed using Minitab 16.2.4. The mean comparison test was performed at 1 and 5% of probability levels using Tukey's method.

Results and discussion

The results showed that the concentration of all investigated heavy metals in different parts (roots and aerial parts) of coriander plant irrigated with reclaimed wastewater was significantly higher than that of the control treatment (irrigated with well water). However, fortunately, the concentration of all these metals within all the plant parts of the coriander plant was evaluated to be lower than the permissible levels for heavy metals in vegetables. Therefore, in the current situation of the shortage of water resources in Kermanshah province, reclaimed wastewater provides a unique and viable supply of water for the irrigation of vast areas of coriander cultivation in such a way that it does not pose any threat to human health in terms of the accumulation of heavy metals in the plant.

Conclusions

Understanding the accumulation of heavy metals in plant tissues is critical to address environmental and food safety concerns. By comparing the concentration of heavy metals in plant tissues with permissible levels, potential risks can be identified and strategies can be developed to minimize the impact of heavy metals pollution. This research is important and necessary to maintain the health of the ecosystem and human beings in the face of increasing demand for the use of non-conventional water in arid and semi-arid regions due to successive droughts and water resources crises. In this research, the concentrations of heavy metals in plant tissues were found to be non-hazardous to human health. However, regularly measurement of heavy metals in the effluent and within the plant tissues should not be stopped.

Keywords: *Accumulation of heavy metals in plants, Kermanshah municipal wastewater treatment plant, Unconventional waters, Uptake, Water resources crisis.*