

بررسی توانایی گیاه پالایی نی و وتیورگراس در تصفیه آب‌های آلوده به کادمیوم به منظور آبیاری گیاه کلزا

امیرحسین قادری^۱، مهدی ذاکری نیا^{۲*} و محمدرضا پهلوان‌راد^۳

چکیده

آلودگی فلزات سنگین از جمله مهم‌ترین خطرات زیست‌محیطی است که در همه جوامع بشری یافت می‌شود. از مهم‌ترین این آلودگی‌ها می‌توان آلودگی منابع آب و خاک، آلودگی زنجیره غذایی انسان و افزایش موارد ابتلا به سرطان را نام برد. روش‌های گوناگونی برای تصفیه آب‌های آلوده وجود دارد که در میان آن‌ها استفاده از توانایی گیاهان یا همان گیاه‌پالایی به دلیل سازگاری بیشتر با محیط راهکاری مناسب برای پالایش فلزات سنگین از محیط است. آلودگی به وسیله پساب‌های حاوی فلزات سنگین همچون سرب، نیکل و به‌ویژه کادمیوم در نواحی و شهرک‌های صنعتی استان گلستان گزارش شده و حتی استفاده از این پساب‌ها بدون انجام فرایندهای کاهش آلودگی رواج دارد. به این دلیل در این تحقیق برای ارزیابی، جلوگیری و اصلاح آسیب‌های استفاده از آب‌های آلوده به کادمیوم، آزمایشی با ۶ تیمار و ۳ تکرار در قالب فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با و بدون فرایند گیاه‌پالایی با هدف تأمین آب آبیاری گیاه کلزا انجام شد. برای گیاه‌پالایی از دو گیاه نی و وتیور استفاده شد. سامانه آبیاری مدنظر هم روش قطره‌ای انتخاب شد. زمان ماند ۱۰ روزه برای تصفیه آب آلوده به کادمیوم انتخاب و دور آبیاری نیز متناسب با آن در نظر گرفته شد. در طول انجام آزمایش و بعد از برداشت محصول کلزا، تغییرات غلظت کادمیوم در نمونه‌های آب، اجزای گیاه و خاک، اندازه‌گیری و با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.0 مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان کادمیوم تجمع‌یافته در دانه گیاه کلزا و اندام هوایی آن، در تیمارهای آبیاری شده با آب آلوده بعد از انجام فرایند گیاه‌پالایی توسط نی و وتیورگراس کاهش معنی‌داری در سطح ۱ درصد نسبت به تیمارهای بدون گیاه‌پالایی داشت. در انتهای فصل رشد، غلظت کادمیوم در خاکی که گیاه‌پالایی شده، توسط نی و وتیورگراس، در سطح احتمال ۱ درصد کمتر از غلظت کادمیوم در خاک تحت آبیاری بدون عمل گیاه‌پالایی بود.

واژه‌های کلیدی: آب‌های نامتعارف، خصوصیات عملکردی، زمان ماند

ارجاع: قادری ا. ذاکری نیا م. و پهلوان‌راد م. ۱۴۰۲. بررسی توانایی گیاه‌پالایی نی و وتیورگراس در تصفیه آب‌های آلوده به کادمیوم به منظور آبیاری گیاه کلزا. مجله پژوهش آب ایران. ۴۹: ۲۵-۳۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14173.2475>

۱- دانش‌آموخته گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

۳- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج، گرگان، ایران.

* نویسنده مسئول: mzakerinia@gau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مشکلات در استفاده از منابع آب و خاک، آلودگی آن‌ها به فلزات سنگین است. رایج‌ترین این آلودگی‌ها، آلودگی به‌وسیله فلزات سنگین کادمیوم، سرب، کروم، مس و نیکل است که از فعالیت‌های صنعتی همچون معدن‌کاوی، فلزکاری، ذوب آهن، کاربرد آفت‌کش‌ها، کودها و لجن فاضلاب برگرفته شده است (کاباتا پندیاس، ۲۰۰۱؛ آدریانو، ۲۰۰۱؛ انسلی، ۲۰۰۰). فلزات سنگین باعث ایجاد تغییر در فرایندهای فیزیولوژیکی در سطح سلول و مولکول می‌شوند و در نتیجه آن، باعث غیرفعال کردن آنزیم‌ها یا اختلال در عملکرد مولکول‌های مهم سوخت‌وساز می‌شوند (موسوی و ثقه الاسلامی، ۲۰۱۳). در بین عناصر سنگین، فلز سنگین کادمیوم یکی از عناصر سمی زیست‌محیطی است که به‌دلیل تحرک بالا در خاک و جذب بالا توسط گیاهان اثرات نامطلوبی بر گیاهان، (خاتمی‌پور و همکاران، ۲۰۱۱) و آسیب به سلامتی انسان (ورود از طریق آب، هوا و غذا به بدن)، مانند آسیب به کلیه و ریه، انواع سرطان، فشار خون بالا، کم‌خونی و... دارد (احمد پری و همکاران، ۲۰۲۰). در کشورهای اروپایی و آمریکایی در به‌کاربردن فاضلاب برای زراعت‌های غیرخوراکی، باید تصفیه‌های ثانویه و ضدعفونی صورت گیرد و در استفاده از مواد خوراکی به‌ویژه موادی که به‌صورت خام مصرف می‌شوند، باید تصفیه سوم انجام شود و پس از زلال‌سازی و ضدعفونی، قادر به استفاده از آن‌ها هستند، در کشورهای جهان سوم این استانداردها رعایت نشده و از فاضلاب به‌منظور آبیاری در سطح وسیع استفاده می‌شود که این مساله باعث بروز برخی از بیماری‌ها شده است. در ایران نیز استفاده از این آب‌ها بدون رعایت استانداردها صورت می‌گیرد. میزان استاندارد کادمیوم در آب فاضلاب‌ها ۰/۰۵ و در گیاهان ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر است (موسوی و همکاران، ۱۳۹۲). روش‌های گوناگونی مانند تثبیت خاک، خاک‌برداری، خاک‌ریزی، دفن خاک، اسیدشویی و شست‌وشوی خاک برای کاهش غلظت آلودگی فلزات سنگین پیشنهاد شده است؛ اما به‌کاربردن این فناوری‌ها هزینه‌بر و طاقت‌فرسا بوده و سبب خسارات به محیط‌زیست نیز می‌شود؛ بنابراین استفاده از روش‌های نوین، کم‌هزینه و کارا، برای کاهش عناصر سنگین ضروری است (جان و همکاران، ۲۰۰۹). گیاه‌پالایی به یک فناوری

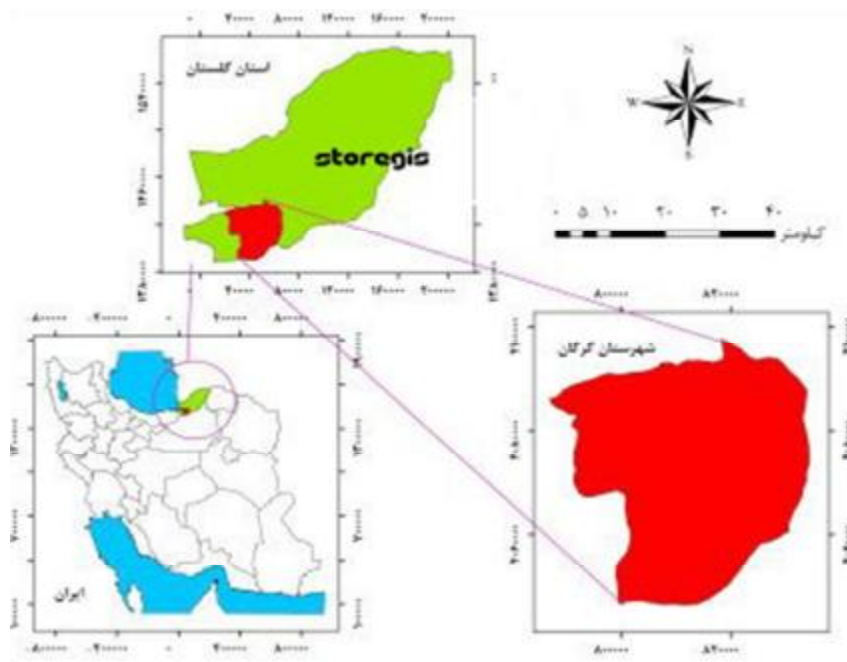
مؤثر و مقرون‌به‌صرفه تبدیل شده است که برای استخراج یا حذف فلزات غیرفعال و آلاینده‌های فلزی از خاک آلوده استفاده می‌شود. گیاه‌پالایی استفاده از گیاهان برای پاکسازی آلودگی از خاک، رسوبات و آب است. این فناوری سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه است (احمد پری و همکاران، ۲۰۱۸). از این فناوری برای کاهش عناصر سنگین و آلودگی‌های مختلف استفاده شده است؛ برای مثال، در تحقیق رضازاده نیکی امامی و همکاران (۱۳۹۴)، از گیاه جعفری برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کادمیوم استفاده شد. در این مطالعه، آزمایشی در قالب بلوک‌های تصادفی با شش تیمار در نظر گرفته شد که پس از دوران رشد، گیاه از خاک برداشته و غلظت کادمیوم در گیاه و خاک اندازه‌گیری شد. نتایج حاکی از توانایی زیاد ریشه و اندام‌های هوایی گیاه جعفری در جذب کادمیوم از خاک‌های آلوده بود و با توجه به دوره کوتاه رشد این گیاه و مقدار جذب زیاد در ریشه و اندام‌های هوایی، می‌توان از جعفری به‌عنوان گیاه پیش‌انباشته‌گر نام برد. ترانگ و همکاران (۲۰۰۸) طی آزمایشی برای بررسی کاهش آلودگی‌ها توسط گیاه وتیورگراس، به این نتیجه دست یافتند که این گیاه، سختی کل آب را به میزان ۶۰ درصد و ففات، نیترات و کلراید را به ترتیب ۹۰، ۹۴ و ۲۰ درصد کاهش داده است. منصوریان و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سیانید با استفاده از گیاه وتیورگراس پرداختند. طی این پژوهش که روی پساب‌های معدن طلا انجام شد، هفت تیمار با غلظت‌های مختلف سیانید در نظر گرفته و پس از دو ماه انجام فرایند گیاه‌پالایی دوباره میزان سیانید در خاک ریشه و همچنین برگ‌های گیاه مورد نظر اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد میزان سیانید در برگ‌ها افزایش و میزان سیانید موجود در خاک کاهش معنی‌داری داشته است. محمدزاده و همکاران (۱۳۹۷) تحقیقی به‌منظور بررسی تجمع فلزات سنگین (سرب، نیکل و کادمیوم) در رسوبات رودخانه کارون و گیاه نی انجام دادند که نتایج این تحقیق نشان داد گیاه نی توانایی زیادی برای انتقال فلزات سنگین به اندام‌های خود داشته است و می‌توان از این گیاه برای تجمع عناصر سنگین استفاده کرد. احسان و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی با بررسی اثر سطوح کادمیوم بر گیاه کلزا بیان کردند کادمیوم باعث کاهش طول ساقه و ریشه،

منابع آبی نامتعارف نظیر پساب‌هایی که احتمالاً آلوده به فلزات سنگین است، سوق داده است. همچنین در سال‌های اخیر به دلیل کمبود منابع آبی و تسهیلات بلاعوض دولتی، بسیاری از کشاورزان از سامانه‌های قطره‌ای برای آبیاری مزارع خود استفاده می‌کنند؛ بنابراین در این تحقیق امکان انجام گیاه‌پالایی با گیاه نی و وتیورگراس روی آب‌های آلوده به فلزات سنگین کادمیوم برای آبیاری گیاه کلزا در سامانه آبیاری قطره‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تحت سامانه قطره‌ای انجام شد. این منطقه از نظر مشخصات آب‌وهوایی دوما‌رتن دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای است (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۴). تابستان‌های آن نسبتاً مرطوب و گرم و زمستان‌های آن نسبتاً ملایم است (شکل ۱).

سطح و تعداد برگ، کاهش زیست توده گیاه و همچنین کاهش کلروفیل و میزان فتوسنتز می‌شود. با بررسی آلودگی پساب‌های موجود در استان گلستان مشخص شد که آلودگی فلزات سنگین عمدتاً در پایین‌دست شهرک‌های صنعتی و معادن شایع است. به‌طور خاص، کادمیوم در پساب کارخانه‌های تولید رنگ مشاهده می‌شود. برای حذف یا تصفیه این پساب‌ها، استفاده از روش‌های مبتنی بر تکنولوژی اگرچه ممکن است روش مناسبی برای کاهش این آلودگی‌ها باشد؛ اما به دلیل هزینه بالا، نیاز به نیروی متخصص یا مشکلاتی چون تحریم‌ها، امکان اجرای کامل و بهینه آن‌ها وجود ندارد؛ بنابراین می‌بایست از روش‌های ارزان‌قیمت‌تری همچون استفاده از توانایی گیاهان در کاهش غلظت عناصر سنگین یا همان گیاه‌پالایی استفاده کرد. از طرفی دیگر، استان گلستان قطب تولید محصول کلزا به‌عنوان دانه روغنی است که با توجه به طول دوره کشت کوتاه‌تر آن در بین محصولات کشت پاییزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ اما وضعیت خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم و محدودتر شدن منابع آبی، کشاورزان را به سمت استفاده از



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

کشت شد. آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با ۶ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. برای ایجاد فشار مناسب و پایدار برای قطره‌چکان‌ها و جلوگیری از هزینه زیاد برای

گیاه کلزا مشابه با شرایط منطقه در اوایل آذر ۱۳۹۸ (۷ ماه)، در ۱۸ گلدان با قطر و ارتفاع ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر که با حدود ۳۰ کیلوگرم خاک سیلتی لوم رسی پر شده بود،

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد نظر

عمق (cm)	بافت خاک	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)
۱۰۰۰	سیلتی لومی رسی	۳۵
۲۰-۱۰	سیلتی لومی رسی	۳۵
۳۰-۲۰	سیلتی لومی رسی	۳۵

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک مورد نظر

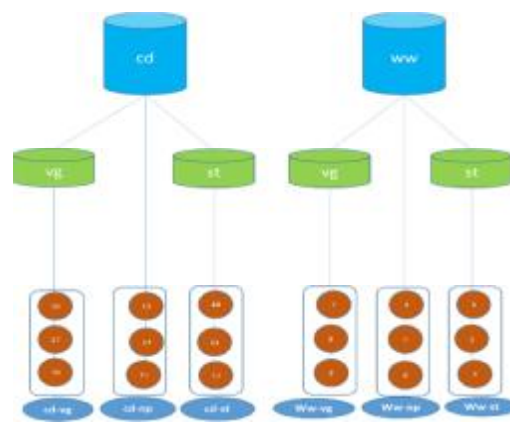
EC (dS/m)	pH
۰/۶۷۳	۷/۷

خرید پمپ‌های جداگانه برای سامانه آبیاری، از تکنیک ارتفاع ثقلی استفاده شد. به این منظور مخازن آب در ارتفاع ۱۱ متری روی بام ساختمان گروه مهندسی آب نصب شد، مخازن گیاه‌پالایی نیز در یک متر پایین‌تر چیده شد. سپس با لوله‌های آبیاری قطره‌ای ۱۶ میلی‌متر، به محل گلدان‌ها در محوطه گروه، متصل شد (ارتفاع آب اعمال‌شده روی قطره‌چکان‌ها به صورت استاندارد برابر با ۱۰ متر لحاظ شد) (شکل ۲). مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد نظر در جدول‌های ۱ و ۲ و جدول آنالیز فیزیکی و شیمیایی آب مورد نظر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی آب مورد نظر

HCO ₃	CO ₃	Na	K	Mg	Ca	EC	pH	تکرار	نوع آب
(mg/lit)	(mg/lit)	(mg/lit)	(mg/lit)	(mg/lit)	(mg/lit)	(dS/m)	-	-	واحد
۴۵/۷۵	۳۰	۱/۶	۲/۳۲	۵۳/۶۸	۴۷/۲۹	۰/۸	۷/۶	۱	آب چاه
۳۰/۵	۱۵/۰۳	۱/۴۷	۲/۴۳	۶۹/۰۳	۴۱/۶۸	۰/۸۴	۷/۴	۲	
۳۰/۵	۱۵/۰۲	۱/۶۷	۲/۵۴	۶۸/۵۶	۴۴/۰۹	۰/۷۸	۷/۲۱	۳	

آق‌قلا در شمال شهرستان گرگان، امکان برداشت منظم و مکرر مستقیم پساب خروجی فراهم نشد و از طرفی به دلیل متغیربودن و پایدارنبودن میزان غلظت فلزات سنگین در آب‌های نمونه‌برداری شده از آنجا، امکان انجام آزمایش و بررسی دقیق توانایی گیاهان‌پالایی نبود، در این تحقیق آب آلوده با غلظت مشابه متوسط شرایط شهرک صنعتی در شرایط آزمایشگاهی تهیه شد تا با کنترل دقیق میزان آلودگی به کادمیوم، توانایی گیاه نی و وتیورگراس در کاهش غلظت کادمیوم در آب‌های آلوده به این ماده بررسی شود. با توجه به میزان استاندارد سازمان خاک آمریکا (۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر) و حد آستانه تحمل گیاهان نی، وتیورگراس و کلزا، با استفاده از محلول استاندارد کادمیوم، آب آلوده با غلظت کادمیوم ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر (۱۰ برابر استاندارد) تهیه شد. قرائت میزان فلزات سنگین در نمونه‌های آب، بدون هیچ واسطه توسط دستگاه جذب اتمی انجام گرفت (داوری و همکاران، ۱۳۸۹). برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در خاک، از عصاره‌گیری دی اتیلن پنتا استیک اسید به همراه کلرید اسید و تری اتانول آمین استفاده شد. سپس غلظت فلزات سنگین به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (داوری و همکاران، ۱۳۸۹). برای اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی و



شکل ۲- شمایی از نحوه چیدمان گلدان‌ها در آزمایش

برای آبیاری کلزا، روی هر گلدان یک عدد قطره‌چکان نتایفم با دبی ۴ لیتر در ساعت نصب شد. تیمارهای ۶گانه عبارت بودند از: ۱- آبیاری با آب چاه و بدون گیاه‌پالایی (ww-np)، ۲- آبیاری با آب چاه و گیاه‌پالایی توسط وتیورگراس (ww-vg)، ۳- آبیاری با آب چاه و گیاه‌پالایی توسط نی (ww-st)، ۴- آبیاری با آب آلوده به فلز سنگین کادمیوم و بدون گیاه‌پالایی (cd-np)، ۵- آبیاری با آب‌های آلوده به فلز سنگین کادمیوم و گیاه‌پالایی توسط نی (cd-st) و ۶- آبیاری با آب‌های آلوده به کادمیوم و گیاه‌پالایی توسط وتیورگراس (cd-vg) بودند. از آنجا که با وجود مکاتبات انجام‌شده با مجموعه مدیریت شهرک صنعتی

مد نظر بود، این زمان‌ها انتخاب شدند. همچنین پس از اتمام دوره رشد و رسیدگی بذر، گیاهان کلزا از خاک جدا شدند و پس از آن صفات عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کلزا از جمله وزن هزار دانه، تعداد غلاف، تعداد خورجین، عمق ریشه و قطر ساقه و درصد روغن اندازه‌گیری و تأثیر آبیاری با آب آلوده در آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS 9.0 انجام و برای مقایسه میانگین اثرات متقابل از آزمون دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد استفاده شد.

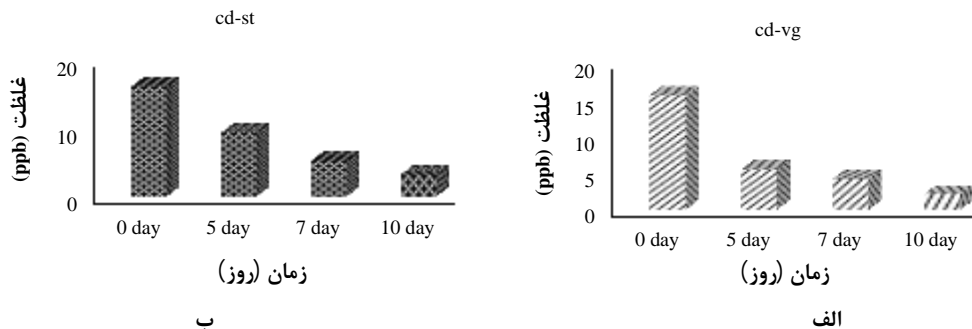
نتایج و بحث

بررسی زمان‌ماندهای مختلف آب آلوده به کادمیوم

در مخزن‌های گیاه‌پالایی

شکل ۳، روند تغییرات غلظت کادمیوم در آب آلوده را در شرایط گیاه‌پالایی با استفاده از گیاه وتیورگراس و نی در زمان‌های ماند متفاوت ۰، ۵، ۷ و ۱۰ روز نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در شکل ۳، نشان‌دهنده کاهش غلظت کادمیوم در آب تحت تأثیر گیاه‌پالایی با گیاهان وتیورگراس و نی است.

برای تفکیک هرچه بهتر، از قسمت‌های مختلف گیاهان به‌طور مجزا نمونه‌برداری صورت پذیرفت. بدین‌منظور از دانه و اندام هوایی گیاه کلزا به صورت مجزا نمونه تهیه شد. سپس آن‌ها را با استفاده از دستگاه میکسر به حالت پودر در آورده از پودر تهیه‌شده خاکستر تهیه و با انحلال آن‌ها در محلول HCl^{2n} (دو نرمال) از آن برای اندازه‌گیری میزان کادمیوم توسط دستگاه جذب اتمی استفاده شد (داوری و همکاران، ۱۳۸۹). برای قرائت میزان غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های به‌دست‌آمده اعم از خاک، گیاه و آب پس از آماده‌سازی نمونه‌ها از دستگاه‌هایی با دقت بالا به نام دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی مدل GBC-932AA و با دقت بخش در میلیارد (میکروگرم بر لیتر) استفاده شد. در این تحقیق تأثیر زمان‌ماندهای متفاوت (۰، ۵، ۷ و ۱۰ روز) آب آلوده در مخزن گیاه‌پالایی نی و وتیور بر میزان کادمیوم آب آلوده نیز بررسی شد. انتخاب این زمان‌های ماند آب، به دلیل این است که در منطقه مورد نظر دور آبیاری کلزا به صورت ۱۰ روز است و چون بررسی روند کاهش غلظت آلودگی در زمان ماندهای مختلف (کمتر از ۱۰ روز) نیز



شکل ۳- نمودار تغییرات غلظت کادمیوم در گیاه‌پالایی با وتیورگراس (الف) و نمودار تغییرات غلظت کادمیوم در گیاه‌پالایی با نی (ب)

پارامترهای اندازه‌گیری شده کلزا تحت تأثیر آب

آبیاری و کادمیوم

نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل کیفیت آب (شامل با و بدون کادمیوم) بر پارامترهای اندازه‌گیری شده گیاه کلزا در جدول ۴ نشان داده شده است.

مطابق با جدول ۴، اثرات متقابل روی ارتفاع کلزا، تعداد غلاف، قطر ساقه، عمق ریشه و وزن هزاردانه در سطح ۱ درصد معنی‌دار نیست. با توجه به اینکه گیاه کلزا جزو گیاهانی که امکان توانایی گیاه‌پالایی را دارا هستند، محسوب می‌شود، می‌توان به این نتیجه رسید که توانایی

در این تحقیق به بررسی زمان ماندهای مختلف آب آلوده در مخزن گیاه‌پالایی پرداخته شد و زمان ماند ۱۰ روزه برای گیاه‌پالایی نی و وتیور برای آب آلوده به کادمیوم انتخاب شد. در استان گلستان، به دلیل رطوبت بالای هوا و بارندگی متناوب، دور آبیاری مورد نظر برای آبیاری کلزا مشابه زمان ماند آب در مجاورت ریشه همان ۱۰ روز در نظر گرفته شد. طی این مدت، کاهش غلظت کادمیوم در دو منبع گیاه‌پالایی نی و وتیورگراس به ترتیب به میزان ۸۰ و ۸۷ درصد ثبت شد که با نتایج رضازاده نیکی امامی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت داشت.

حاضر مبنی بر تأثیر آبیاری با آب آلوده به کادمیوم بر درصد روغن دانه‌های کلزا متناسب است.

نتایج غلظت کادمیوم در دانه، اندام هوایی کلزا و خاک

نتایج نشان دهنده کاهش محسوس غلظت کادمیوم در دانه، اندام هوایی و خاک، به میزان قابل‌توجهی شد که به تفصیل در ذیل به آن‌ها اشاره شده است (جدول ۵، ۶ و ۷).

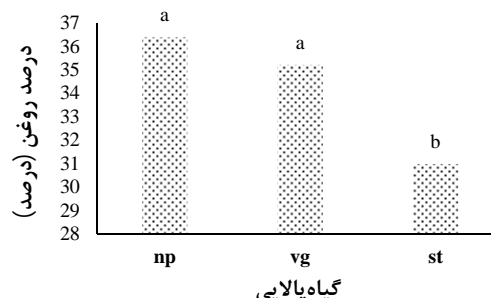
غلظت کادمیوم در دانه کلزا

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر متقابل منبع آب و گیاه‌پالایی بر غلظت کادمیوم در دانه کلزا در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که مقدار غلظت کادمیوم در دانه کلزا به‌وسیله آب آبیاری با چاه و گیاه‌پالایی (بدون گیاه، با وتیورگراس و نی) صفر بوده است؛ اما مقدار غلظت کادمیوم در دانه کلزا با آب آبیاری آلوده به کادمیوم و بدون گیاه به‌عنوان شاهد در این قسمت نسبت به وتیورگراس و نی به‌ترتیب ۵۰/۶۶ و ۲۹/۹۶ درصد کاهش یافته است. مطالعات انجام‌شده توسط سالاکینکوپ و هانشال (۲۰۱۴) نشان‌دهنده غلظت زیاد فلزات سنگین در گیاهان آبیاری‌شده با پساب خانگی است که این غلظت به‌ترتیب در ریشه، ساقه و دانه گندم تجمع یافته و این نتایج با چگونگی تجمع غلظت کادمیوم در کلزا همسو بوده است؛ زیرا نتایج آزمایشات حاکی از تجمع بالای کادمیوم در اندام هوایی نسبت به دانه است.

غلظت کادمیوم در اندام هوایی کلزا

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که اثر متقابل منبع آب و گیاه‌پالایی بر غلظت کادمیوم در اندام هوایی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است. جدول ۶ نشان می‌دهد که مقدار غلظت کادمیوم در اندام هوایی کلزا به‌وسیله آب آبیاری با چاه و گیاه‌پالایی (بدون گیاه، با وتیورگراس و نی) صفر بوده است؛ اما مقدار غلظت کادمیوم در اندام هوایی کلزا با آب آبیاری آلوده به کادمیوم و بدون گیاه به‌عنوان شاهد در این قسمت نسبت به وتیورگراس و نی به‌ترتیب ۴۴/۴۶ و ۲۴/۷۸ درصد کاهش یافته است.

گیاه کلزا در این زمینه باعث معنی‌دارنشدن تغییرات پارامترهای گیاهی از جمله ارتفاع گیاه، تعداد شاخه، تعداد غلاف، عمق ریشه، وزن هزار دانه، قطر ساقه و ریشه و وزن زیست‌توده شده است و با افزایش بیشتر غلظت عناصر سنگین در آب، امکان کاهش عملکرد گیاه کلزا وجود دارد. نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر گیاه‌پالایی بر درصد روغن در سطح یک درصد معنی‌دار شده است درحالی‌که اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نبوده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که درصد روغن دانه کلزا تحت تأثیر تیمار وتیورگراس و تیمار نی نسبت به تیمار شاهد (بدون گیاه) به‌ترتیب ۳/۲۶ و ۱۴/۸۸ درصد کاهش یافته است. کمترین تیمار مربوط به آب آلوده به کادمیوم تحت تأثیر گیاه‌پالایی با نی (st) در درصد روغن دانه گیاه کلزا و از نظر میزان درصد روغن نامناسب‌ترین تیمار بود، چون با تیمارهای ذکرشده اختلاف معنی‌داری داشت.



شکل ۴- اثر گیاه‌پالایی بر درصد روغن در سطح ۱ درصد

در پژوهش صورت‌گرفته توسط فولر (۱۹۷۹) گزارش شد که شرایط محیطی، تأثیر قابل‌توجهی بر درصد روغن دارد. این نتیجه مطابق با پژوهش حاضر مبنی بر تأثیر شرایط محیط بر درصد روغن است. در پژوهشی دیگر رشد و عملکرد گیاه تابع ظرفیت ژنتیکی آن و عوامل محیطی از جمله دما، رطوبت، تابش انرژی، ساختمان و تخلخل خاک، واکنش خاک، عوامل زیستی و نوع آب آبیاری بر درصد روغن تأثیرگذار بود (کوچکی و خواجه‌حسینی، ۱۳۸۷) که متناسب با نتایج گرفته شده برای اثر پارامترها و متغیرهای گوناگون بر میزان درصد روغن کلزا است. در مطالعه انجام‌گرفته توسط مظفری و پوردرویشی (۱۳۹۰) برای بررسی تأثیر استفاده از آب‌های شور بر درصد و عملکرد روغن گلرنگ، نتایج نشان از تأثیر معنی‌دار میزان شوری آب بر درصد روغن داشت که با نتایج پژوهش

و نی) صفر بوده است؛ اما مقدار غلظت کادمیوم در خاک با آب آبیاری آلوده به کادمیوم و بدون گیاه به عنوان شاهد در این قسمت نسبت به وتیورگراس و نی به ترتیب ۳۵/۹۵ و ۴۱/۸۶ درصد کاهش یافته است.

افزایش غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی و دانه کلزا ناشی از افزایش فلزات سنگین در خاک است (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲). با افزایش غلظت کادمیوم، به دلیل سهولت حرکت کادمیوم در گیاه میزان تجمع فلزات سنگین در اندام هوایی و دانه افزایش یافته است (یادگاری، ۲۰۱۵؛ مستاکاس و همکاران، ۲۰۱۱). افزایش غلظت کادمیوم در گیاهان منجر به کاهش و کندی رشد در آن‌ها می‌شود (سکارا و همکاران، ۲۰۰۵؛ ماسکارا، ۲۰۰۸). این افزایش غلظت در گیاهان از افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک نشأت می‌گیرد و بین افزایش فلزات سنگین در خاک و افزایش غلظت در گیاهان، همبستگی وجود دارد (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲؛ هوشمندفر و مرقب، ۲۰۱۱).

مورازا و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که میزان تجمع فلزات سنگین در گیاهان آبیاری شده با آب‌های نامتعارف در پاکستان، در اندام هوایی گیاه و سپس در دانه زیاد است که با نتایج این پژوهش در خصوص بیشتر بودن غلظت و تجمع کادمیوم در اندام هوایی در مقایسه با دانه‌های کلزا سازگار است. نتایج حاصل از تحقیق شهابی‌فر (۱۳۸۹) روی گیاهان گندم، جو و ذرت نشان داد که میزان عناصر سنگین در آن‌ها به دلیل حرکت کند عناصر سنگین از ریشه به اندام هوایی ناچیز است. این نتیجه مخالف نتایج به دست آمده در این تحقیق مبنی بر تجمع بالاتر از حد استاندارد کادمیوم در اندام هوایی و دانه کلزا است.

غلظت کادمیوم در خاک

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر متقابل منبع آب و گیاه پالایی بر غلظت کادمیوم در خاک در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است. جدول ۷ نشان می‌دهد که مقدار غلظت کادمیوم در خاک به وسیله آب آبیاری با چاه و گیاه پالایی (بدون گیاه، با وتیورگراس

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده گیاه کلزا

منبع آبیاری	درجه آزادی	ارتفاع کلزا	تعداد غلاف	قطر ساقه	عمق ریشه	وزن هزاردانه	درصد روغن	غلظت کادمیوم در دانه کلزا	غلظت کادمیوم در اندام هوایی کلزا	غلظت کادمیوم در خاک
منبع آب	1	8/81 ^{ns}	0/0009 ^{ns}	0/0033 ^{ns}	0/055 ^{ns}	0/0117 ^{ns}	13/27 ^{ns}	659928/16 ^{**}	738749/29 ^{**}	1497/64 ^{**}
گیاه پالایی	2	24/62 ^{ns}	89/92 ^{ns}	0/00028 ^{ns}	6/14 ^{ns}	15/57 ^{ns}	48/68 ^{**}	26691/09 ^{**}	20665/75 ^{**}	46/85 ^{**}
گیاه پالایی × منبع آب	2	18/38 ^{ns}	11/39 ^{ns}	0/0027 ^{ns}	5/092 ^{ns}	2/60 ^{ns}	1/84 ^{ns}	26691/09 ^{**}	20665/75 ^{**}	46/85 ^{**}
ضریب تغییرات (درصد)		5/22	14/43	10/48	12/38	12/90	6/39	13/66	22/99	21/30

جدول ۵- تأثیر توأمان گیاه پالایی و منبع آب بر غلظت

گیاه پالایی* منبع آب	غلظت کادمیوم در دانه کلزا (ppm)
cd-np	۵۲۳/۶۸ ^a
cd-vg	۲۵۸/۳۷ ^b
cd-st	۳۶۶/۷۹ ^c
معنی‌داری	۰/۰۳۸

جدول ۶- تأثیر توأمان گیاه پالایی و منبع آب در غلظت

گیاه پالایی* منبع آب	غلظت کادمیوم در اندام هوایی کلزا (ppm)
cd-np	۵۲۶/۷۸ ^a
cd-vg	۲۹۲/۵۴ ^b
cd-st	۳۹۶/۲۱ ^c
معنی‌داری	۰/۰۳۸

جدول ۷- تأثیر گیاه‌پالایی و منبع آب در غلظت کادمیوم در خاک

گیاه‌پالایی* منبع آب	غلظت کادمیوم در دانه کلزا (ppm)
cd-np	۲۴/۶۴ ^a
cd-vg	۱۵/۷۸ ^b
cd-st	۱۴/۳ ^b
معنی‌داری	۰/۰۳۸

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق حاکی از کاهش معنی‌دار کادمیوم در خاک، دانه و اندام هوایی کلزا در تیمارهای گیاه‌پالایی شده توسط وتیورگراس و نی است. افزایش غلظت کادمیوم در محیط گیاه کلزا سبب کاهش غلظت کادمیوم از آب شد؛ البته این بدان معنا نیست که آب خروجی از مخزن گیاه‌پالایی عاری از کادمیوم است. نتایج انتخاب زمان ماند ۱۰ روزه حاکی از آن بود که غلظت کادمیوم تحت گیاه‌پالایی با وتیورگراس، کمتر از نی و شاهد بود. نتایج کلی به‌دست‌آمده در این پژوهش بیانگر توانایی گیاهان نی و وتیورگراس در کاهش غلظت کادمیوم از محیط است که این امر باعث بهبود کیفیت آب شده، به‌نحوی که امکان استفاده مجدد از آن در بخش کشاورزی به‌وجود می‌آید.

پیشنهادها

- برای فرایند گیاه‌پالایی غلظت‌های گوناگون و گیاهان متنوع در استفاده شود و تغییرات غلظت عنصر مدنظر در فرایند گیاه‌پالایی در دوره‌های زمانی طولانی‌تری اندازه‌گیری و پایش شود.

منابع

۳. رضازاده نیکی‌امامی ن. نصرآبادی م. و الماسی ض. ۱۳۹۴. ارزیابی توان بیش‌اندوزی گیاه جعفری برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کادمیوم. دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی. ترکیه (استانبول).
۴. شهابی فرج. ۱۳۸۹. بررسی اثرات کاربرد فاضلاب‌های صنعتی در اراضی تحت کشت و گیاهان منطقه قزوین. سمینار ملی: جایگاه آب‌های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب - کاربردها در کشاورزی و فضای سبز. ۱-۷.
۵. کوچکی ع. و خواجه حسینی م. ۱۳۸۷. زراعت نوین. مشهد: انتشارات جهاد دانشگاهی. ۷۰۴ ص.
۶. محمدزاده ژ. محمدی روزبهانی م. و بابایی نژاد ت. ۱۳۹۷. تجمع فلزات سنگین در گیاه نی (*Phragmites australis*) و رسوبات رودخانه کارون (محدوده شهر اهواز). نشریه علمی اکوبیولوژی تالاب (تالاب). ۱۰(۱): ۵۵-۶۴.
۷. مظفری ح. و حسن‌پوردرویشی ح. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر استفاده از آبیاری با آب شور بر درصد و عملکرد روغن ارقام گلرنگ مجله زراعت و اصلاح نباتات. ۱(۹): ۴۹-۶۱.
۸. منصوریان ع. وزیری آ. زمانی م. ر. و حیدریان نایینی ف. ۱۳۹۶. بررسی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سیانید با استفاده از گیاه وتیوربا زیزانیاوایدس *Zizanioides Vetiveria*. فصلنامه سلامت و محیط‌زیست. ۳(۱۰): ۴۱۱-۴۲۰.
۹. موسوی ع. امزاده‌ای م. ر. و صمدی بروجنی ح. ۱۳۹۲. چالش‌های کاربرد آب نامتعارف در کشاورزی. اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی. انجمن آبیاری و زهکشی ایران. دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان.
10. Adriano D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Springer-Verlag, New York.
11. Ahmadpari H. Dehghani T. Gerdini M. S. Sofia S. and Yazdi A. 2020. Removal of cadmium from aqueous solutions by eggshell as low-cost adsorbent. Journal of Advanced Pharmacy Education & Research| Jan-Mar. 10(4): 120-126.
12. Ahmadpari H. Sedigh M. Mohamadi F. 2018. Use of phytoremediation technology

۱. بذرافشان م. مفتاح هلقی م. قربانی خ. و قهرمان ن. ۱۳۹۴. مطالعه تطبیقی پهنه‌های اقلیمی استان گلستان تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۲(۵): ۱۸۷-۲۰۲.
۲. داوری م. همایی م. و خداوردی‌لو ح. ۱۳۸۹. مدل‌سازی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به آلاننده‌های نیکل و کادمیوم با استفاده از توابع ماکروسکپیک کاهش تعرق. مجله علوم آب و خاک. ۱۴(۵۲): ۸۵-۷۵.

- marigold (*Calendula officinalis* L.). Australian Journal of Crop Science. 5(3): 277-282.
24. Muraza G. Usman M. and Ahmad H. R. 2015. Monitoring and management of wastewater for safer crop production. Global Journal on Advances Pure and Applied Sciences. 5: 78-85.
 25. Salakinkop S. R. and Hunshal C. S. 2014. Domestic sewage irrigation on dynamics of nutrients and heavy metals in soil and wheat Archive of SID (*Triticum aestivum* L.) production. Recycling of Organic Waste Agriculture. 3(3): 1-11.
 26. Sekara A. Poniedzialek M. Ciura J. and Jedrszczyk E. 2005. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: implications for phytoremediation. Polish Journal of Environmental Studies. 14(4): 509-516.
 27. Truong P. Tran T. V. and Pinnars E. 2008. Vetiver System Applications: A Technical Reference Manual. The Vetiver Network International. February.
 28. Yadegari M. 2015. Foliar application of micronutrients on essential oils of borago, thyme and marigold. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 15(4): 946 -964.
 - as a management option for soils contaminated with heavy metal ions, 5th International Conference on Recent Innovations in Chemistry and Chemical Engineering, Tehran, Nikan High Education institute.
 13. Ehsan S. Ali S. Noureen S. Mahmood K. Farid M. Ishaque W. and Rizwan M. 2014. Citric acid assisted phytoremediation of cadmium by *Brassica napus* L. Ecotoxicology and environmental safety. 106: 164-172.
 14. Ensley B. D. 2000. Rationale for use of phytoremediation. PP. 3-11. In: Raskin I. Ensley B. D. (Eds.), Phytoremediation of Toxic Metals using Plants to Clean up the Environment. John Wiley & Sons Inc., New York).
 15. Fowler J. M. 1979. The interface of forestry and agriculture as nonpoint sources of suspended sediment. A national modeling approach (Doctoral dissertation, Iowa State University of Science and Technology.
 16. Houshmandfar A. and Moraghebi F. 2011. Effect of mixed cadmium, copper, nickel and zinc on seed germination and seedling growth of safflower. African Journal of Agricultural Research. 6(5): 1182 -1187.
 17. Jan A. T. Murtaza, I. Ali A. and Rizwanul Haq Q. M. 2009. Mercury pollution: an emerging problem and potential bacterial remediation strategies. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 25: 1529-1537.
 18. Kabata-Pendias A. 2001. Trace Elements in the Soil and Plants. CRC Press, Boca Raton.
 19. Karimi R. Chorom M. and Safe A. 2012. Potential of *Vicia faba* and *Brassica arvensis* for phytoextraction of soil contaminated with cadmium, lead and nickel. African Journal of Agricultural Research. 7(22): 3293-3301.
 20. Khatamipour M. Piri E. Esmaeilian Y. and Tavassoli A. 2011. Toxic effect of cadmium on germination, seedling growth and proline content of Milk thistle (*Silybum marianum*). Scholars Research Library Annals Biology Research. 2(5): 527 -532
 21. Mauskar J. M. 2008. Cadmium, an environment toxicant, central pollution control board, ministry of environment and forests, Govt of India, Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi - 110032.
 22. Moosavi S. G. and Saghatoleslami M. J. 2013. Phytoremediation: a review. Advance Agriculture Biology. 1: 5-11.
 23. Moustakas N. K. Akoumianaki Ioannidou A. and Barouchas P. E. 2011. the effects of cadmium and zinc in interactions on the concentration of cadmium and zinc in pot

