



Effect of Different Concentrations of Chromium in Irrigation Water on Root and Growth of Sesame Cultivars

Ali Reza Tavakoli¹ | Reza Nosrati² | Matin Jami Moeini³

1. Corresponding Author, Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: ar.tavakoli@areeo.ac.ir
2. Miami Agricultural Jihad, Semnan Agriculture Jihad Organization, Miami, Iran. E-mail: nosrati20015@gmail.com
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran. E-mail: mat_jami@iaus.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 30 May 2022
Received in revised form:
11 October 2022
Accepted: 16 October 2022
Published online: 24 June 2023

Keywords:

Chromium uptake,
Growth indices,
Heavy metals,
Root length,
Water pollution.

ABSTRACT

Heavy metals such as chromium are considered important pollutants for the environment and agricultural products. Many of these metals are toxic even in very low concentrations and may disrupt the growth process of crops. This study aims at comparing the response of different sesame cultivars to irrigation with different levels of chromium contaminated water. The experiment is carried out as factorial in a randomized complete block design with three replications in Mayamey, Semnan Province, Iran. Experimental factors include irrigation with different levels of chromium-contaminated water in 5 levels (20%, 40%, 60%, 80%, and 100%) and three sesame cultivars (Dashtestan, Oltan and local). The results indicate that irrigation with chromium-contaminated water significantly reduce the plant height and root length ($p < 0.01$), but have no significant effect on leaflet number and shoot fresh weight. The highest decrease in plant height and root length are observed under irrigation with 100% chromium-contaminated water. There has been a significant difference between sesame cultivars in relation to the growth characteristics. So, the Oltan cultivar has had the highest plant height, leaflet number, root length, and water productivity index compared to other cultivars. According to the results, high levels of chromium in irrigation water significantly reduce the growth of different cultivars.

Cite this article: Tavakoli, A. R., Nosrati, R., & Jami Moeini, M. (2023). Effect of Different Concentrations of Chromium in Irrigation Water on Root and Growth of Sesame Cultivars. *Journal of Crops Improvement*, 25 (2), 349-367. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.308720.2717>





تأثیر غلظت‌های مختلف کروم در آب آبیاری بر ریشه و رشد ارقام کنجد

علیرضا توکلی^۱ | رضا نصرتی^۲ | متین جامی معینی^۳

۱. نویسنده مسئول، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: ar.tavakoli@areco.ac.ir
۲. جهاد کشاورزی میامی، سازمان جهاد کشاورزی استان سمنان، میامی، ایران. رایانامه: nosrati20015@gmail.com
۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران. رایانامه: mat_jami@iaus.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

فلزات سنگین مانند کروم از آلاینده‌های مهم برای محیط زیست و تولیدات کشاورزی به حساب می‌آیند، بسیاری از این فلزات حتی در غلظت‌های بسیار کم، سمی بوده و حتی فرایند رشدونمو محصولات را دچار اختلال می‌کند. به‌منظور بررسی واکنش ارقام مختلف کنجد به سطوح مختلف آب آبیاری آلوده به کروم، آزمایشی گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۵ در منطقه فرومد از توابع شهرستان میامی انجام شد. عوامل مورد مطالعه شامل آبیاری با سطوح ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد آب آلوده به کروم و سه رقم کنجد دشتستان، اولتان و محلی بودند. اثر سطوح مختلف آبیاری با آب آلوده به کروم بر ارتفاع بوته، طول ریشه، تعداد برگچه و وزن تر اندام هوایی بررسی شد و شاخص بهره‌وری آب ارقام کنجد تعیین شد. نتایج نشان داد که آبیاری با آب آلوده به کروم باعث کاهش معنی‌دار ($P < 0.01$) ارتفاع بوته و طول ریشه شد، اما تعداد برگچه و وزن تر اندام هوایی را تحت تأثیر قرار نداد. بیش‌ترین کاهش در ارتفاع بوته (۲۴/۰۱ درصد) و طول ریشه (۲۰/۰۷ درصد) در شرایط آبیاری با ۱۰۰ درصد آب آلوده به کروم مشاهده شد. تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین ارقام کنجد در رابطه با ویژگی‌های رشدی وجود داشت، به‌طوری‌که رقم اولتان، از ارتفاع بوته، تعداد برگچه و طول ریشه و بهره‌وری بیش‌تری نسبت به سایر ارقام برخوردار بود. با توجه به نتایج، سطوح بالای کروم در آب آبیاری، موجب کاهش قابل توجه رشد ارقام مختلف گیاه کنجد گردید.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳

کلیدواژه‌ها:

آلودگی آب،
جذب کروم،
شاخص‌های رشد،
طول ریشه،
فلزات سنگین.

استناد: توکلی، علیرضا؛ نصرتی، رضا و جامی معینی، متین (۱۴۰۲). تأثیر غلظت‌های مختلف کروم در آب آبیاری بر ریشه و رشد ارقام کنجد. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۵(۲): ۳۴۹-۳۶۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.308720.2717>



۱. مقدمه

آلودگی خاک‌ها و محیط‌های آبی با فلزات سنگین یک مشکل جدی و در حال گسترش است. تجمع فلزات سنگین در خاک، آب و در پی آن در گیاه، علاوه بر آلودگی محیط زیست، می‌تواند خطرات جبران‌ناپذیری را بر سلامت انسان وارد کند (شکرزاده و همکاران، ۱۳۹۱). کروم یک فلز سنگین طبیعی و هفدهمین عنصر فراوان در گوشته زمین است (Bhalerao & Sharma, 2015). در طبیعت، کروم در خاک غالب بوده و در سنگ‌ها به مقدار کم وجود دارد (Srivastava *et al.*, 2021). کروم یکی از فلزات سنگین است که در گروه عناصر ضروری برای گیاهان قرار ندارد (Abdul, 2011)، در عین حال، ضرورت وجود کروم در تغذیه جانوران و تأثیر آن بر سلامت انسان، اهمیت گیاهان را به‌عنوان انتقال‌دهنده‌های این فلز نشان می‌دهد. کروم یک جزء مهم در تعادل رژیم غذایی انسان و جانوران است و کمبود آن موجب بروز اختلال در متابولیسم گلوکز و چربی‌ها و بروز علائم دیابت و بیماری‌های قلبی-عروقی می‌شود (آذرشب و سبحان اردکانی، ۱۳۹۵).

منبع اصلی کروم (با علامت اختصاری Cr)، سنگ کرومیت است که معادن مهم این سنگ در کشورهای زیمبابوه، روسیه، نیوزلند، ترکیه، ایران، آلبانی، فنلاند، ماداگاسکار و فیلیپین وجود دارد (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۴). اگرچه کروم به مقدار کم در گیاهان و حیوانات و برای سوخت‌وساز کامل قند در بدن انسان موردنیاز بوده و سبب افزایش رشد گیاهان می‌شود، اما در غلظت‌های بالاتر به‌عنوان یک آلاینده اصلی برای محیط زیست عمل کرده و برای گیاهان به‌شدت سمی است (پیروز و همکاران، ۱۳۹۱). منابع کرومیت و هم‌چنین فعالیت‌های مختلف انسانی سبب انتشار کروم در خاک، هوا و آب شده و در نهایت منجر به توسعه آلودگی کروم در سطح جهان می‌شوند (World Health Organization, 2020; Joshi *et al.*, 2019).

حدود مجاز کروم برای سلامت انسان طبق استانداردها و توصیه‌های بهداشتی آب آشامیدنی آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (Environmental Protection Agency, 2006)، حداکثر ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر، طبق دستورالعمل کیفیت آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی (World Health Organization, 2011) معادل ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر و طبق استاندارد ملی ایران (استاندارد ملی ایران، ۱۳۸۸) برابر ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. با جذب کروم و انباشت آن در اندام گیاهی، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم وارد زنجیره غذایی انسان و حیوانات می‌شود. اگرچه برخی از فلزات برای رشد بیولوژیکی انسان و جانوران لازم و ضروری هستند، ولی غلظت‌های بالاتر از حد آستانه آن‌ها برای حیات انسان بسیار خطرآفرین خواهد بود. اگر غلظت کروم در بدن به ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر از وزن بدن انسان برسد، می‌تواند سبب مرگ شود (Schneider *et al.*, 2007).

۲. پیشینه پژوهش

اثرات سمی کروم بر رشدونمو گیاه و ایجاد ناهنجاری‌ها در مراحل جوانه‌زنی، رشد ریشه، ساقه و برگ مشاهده می‌شود (Shanker *et al.*, 2005). دامنه سمیت کروم برای گیاهان زراعی از ۰/۵ تا ۵ میلی‌گرم بر لیتر و ۵ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک است (Panda & Choudhury, 2005). برخی از گونه‌های گیاهی در برابر میزان مشخصی از فلزات سنگین در خاک مقاوم بوده، توانایی جذب و تثبیت آن‌ها را در بافت‌های درونی خود دارند. از طرفی در برخی از گیاهان آثار مسمومیت چندان بارز نیست، اما میزان محتوی فلزی موجود در گیاه، سلامت انسان و یا دام‌هایی که از آن تغذیه می‌کنند را به خطر می‌اندازند (Chatterjee & Chatterjee, 2000).

کروم برای جذب، سازوکار ویژه‌ای ندارد. بنابراین، جذب این فلز سنگین از راه اشغال ناقل‌های عناصر ضروری گیاه انجام می‌شود. تأثیر سمی کروم بر گیاه و همین‌طور جذب، انتقال و انباشتگی آن در ابتدا وابسته به گونه فلزی آن است، هم‌چنین کروم با آهن و فسفر نیز بر سر اتصال به ناقل‌ها رقابت دارد (نقیبی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

در مطالعات انجام‌شده در گیاهان مختلف مشخص شده است که بین جذب فلزات توسط گیاهان و غلظت فلزات در محیط رابطه وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که نوع بخش گیاهی (ریشه، ساقه و یا برگ) در گونه‌های گیاهی مختلف در ظرفیت جذب کروم مؤثر می‌باشد. از بین این بخش‌ها در ذرت، ریشه‌ها بیش‌ترین مقدار جذب را دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که کروم به سهولت به بخش هوایی منتقل نمی‌شود که با نتایج به‌دست‌آمده در جعفری (ذاکر و همکاران، ۱۳۸۴) مطابقت دارد.

غلظت بالا از هر نوع فلز چه ضروری و چه غیرضروری منجر به سمیت زیستی می‌شود. وجود مقادیر سمی فلزات سنگین در محیط زیست گیاهان باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیک شده و می‌تواند موجب کاهش توان رشد گیاه و در حالت شدیدتر باعث از بین رفتن گیاه شود. گیاهان حساس در چنین شرایطی آسیب دیده و از بین می‌روند، درحالی‌که گیاهان مقاوم هم‌چنان به رشد و تولیدمثل خود ادامه می‌دهند (Seregin & Ivaniov, 2001).

در ارزیابی غلظت‌های مختلف کروم بر ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه ریحان، نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کروم، ویژگی‌های مورفولوژیکی به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش یافتند. تجمع کروم در بستر کشت مانع رسیدن عناصر مورد نیاز برای رشد، به اندام‌های مختلف و در نتیجه جلوگیری از رشد طبیعی گیاه شد (تشکری‌زاده و سعیدنژاد، ۱۳۹۶). نتایج حاصل از بررسی میزان فلزات سنگین (کروم، کادمیوم و سرب) در آب آبیاری و برنج رقم طارم مزارع شهرهای مرکزی استان مازندران نشان داد که در نمونه‌های آب مناطق تحت مطالعه، غلظت فلز کادمیوم بالاتر از استاندارد و سایر فلزات، پایین‌تر از استاندارد بود. در نمونه‌های برنج، فلز کادمیوم و سرب در منطقه جویبار بالاتر و در سایر مناطق پایین‌تر از استاندارد گزارش گردیده و غلظت فلز کروم در تمامی مناطق، کم‌تر از استاندارد بود (شکرزاده و همکاران، ۱۳۹۱). در پژوهشی که با هدف بررسی غلظت سرب و کروم در برگ گیاهان جعفری و شاهی در خاک آبیاری‌شده با آب آلوده انجام شد، گزارش گردید که با افزایش مقدار کروم و سرب در آب آبیاری، مقدار کروم کل در بخش هوایی گیاهان افزایش یافت (نجابی و همکاران، ۱۳۹۶). ارزیابی تأثیرپذیری ارتفاع بوته و شاخص سبزی‌نگی برگ علف هرز سلمه‌تره از آلودگی خاک با عناصر کروم و کادمیوم نشان داد که آلودگی کادمیوم با غلظت ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و آلودگی کروم با غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، علاوه بر کاهش شاخص سبزی‌نگی برگ، باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته گیاه سلمه‌تره گردید (محمودی و همکاران، ۱۳۹۴).

ذکر این نکته بسیار ضروری هست که صرف وجود کروم در خاک، نمی‌تواند عامل اصلی در محدودیت رشد گیاه باشد، بلکه وضعیت شیمیایی و فیزیکی خاک، توانایی گیاه در جذب و مهیابودن دیگر شرایط مثل تبخیر و تعرق عادی گیاه، وجود آب قابل‌دسترس کافی و برخی ویژگی‌های ذاتی گیاه در میزان جذب مؤثر است.

کنجد با نام علمی *Sesamum indicum* گیاهی است از خانواده Pedaliacea که یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در کشورهای توسعه‌یافته محسوب می‌شود. دانه کنجد به‌علت محتوای زیاد و کیفیت عالی روغن، یکی از منابع مهم تأمین روغن محسوب می‌شود. هم‌چنین به‌علت معطربودن دانه‌ها، کاربرد زیادی در صنایع نان و شیرینی به‌عنوان طعم‌دهنده دارند (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۹).

با توجه به وجود معادن منحصربه‌فرد کرومیت در شمال فرومد و آلودگی آب و خاک کشاورزی منطقه به فلز سنگین کروم، و از آنجایی که کنجد یکی از محصولات زراعی مرسوم در دهستان فرومد شهرستان میامی در استان سمنان می‌باشد، در این پژوهش، اثر غلظت‌های مختلف کروم بر وضعیت رشدی ارقام کنجد (به‌عنوان مطالعه موردی) موردبررسی قرار گرفت.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش به‌منظور بررسی اثر سطوح مختلف غلظت کروم کل بر ارقام کنجد، در سال ۱۳۹۵ در منطقه فرومد مرکز

جهاد کشاورزی فرومد، از توابع شهرستان میامی استان سمنان انجام شد. این منطقه با مشخصات جغرافیایی ۵۶ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی در شمال شرقی استان سمنان واقع شده است. این روستای تاریخی در ۱۸۰ کیلومتری شرق شاهرود در دامنه ارتفاعات منبدر در ارتفاع ۱۲۳۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. میانگین بارش بلندمدت سال زراعی منطقه، ۱۳۰/۹ میلی‌متر است، میزان بارش در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ شهرستان میامی برابر ۱۴۳/۵ میلی‌متر بوده که بعد از شه‌میرزاد و شاهرود در استان سمنان در رتبه سوم قرار داشت. متوسط دمای میامی در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ برابر ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد بوده که بیش از میانگین بلندمدت آن (۱۵/۵) درجه سانتی‌گراد) است. میانگین پتانسیل تبخیر بلندمدت میامی برابر ۱۹۲۲ میلی‌متر است.

آزمایش از نوع گلدانی بود که به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در هر تیمار اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل آبیاری با سطوح ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد آب آلوده به کروم و سه رقم کنجد دشتستان (V1)، اولتان (V2) و شاهد محلی (V3) بودند. با توجه به آلودگی آب آبیاری منطقه آزمایش به کروم، آبیاری با آب آلوده به کروم به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. سطوح مختلف آب آلوده به کروم استفاده شده برای آبیاری تیمارها به شرح زیر بوده است:

Cr100: نمونه آب مصرفی تماماً از آب آلوده فرومد (۱۲۳/۵ میکروگرم بر لیتر) (شاهد)

Cr80: نمونه آب مصرفی ۸۰ درصد از آب آلوده فرومد + ۲۰ درصد آب عاری از کروم

Cr60: نمونه آب مصرفی ۶۰ درصد از آب آلوده فرومد + ۴۰ درصد آب عاری از کروم

Cr40: نمونه آب مصرفی ۴۰ درصد از آب آلوده فرومد + ۶۰ درصد آب عاری از کروم

Cr20: نمونه آب مصرفی ۲۰ درصد از آب آلوده فرومد + ۸۰ درصد آب عاری از کروم

آب عاری از کروم از شاهرود تهیه شده و به مخزنی در محل اجرای پژوهش منتقل و هنگام آبیاری، براساس درصد اختلاط، آماده و مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس اثر سطوح مختلف غلظت‌های کروم بر پارامترهای رشدی ارقام کنجد تعیین شد. ارقام مورد مطالعه کنجد از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کشور تهیه گردند. نتیجه آنالیز آب آلوده به کروم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. آنالیز آب برای تعیین آلودگی آن به کروم

EC _w	Ca + Mg	Cl	HCO ₃	Na	SO ₄	Cr	SAR
(دسی‌زیمنس بر متر)		(میلی‌اکی‌والانت بر لیتر)				(میلی‌گرم در کیلوگرم)	
۸۹۰	۲/۷	۱/۶	۲/۹	۵/۵	۴/۵	۹۴/۰	۴/۷

جهت انجام آزمایش از گلدان‌های پلی‌اتیلنی با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده گردید. گلدان‌ها از یک نمونه خاک مشخص که ویژگی‌های آن اندازه‌گیری شده، به میزان یکسان (به وزن تقریباً ۱۰ کیلوگرم) پر شدند. در هر گلدان ۴-۵ بذر کاشته شد و در مرحله دو برگی شدن، در هر گلدان تنها دو بوته باقی ماند و بقیه بوته‌ها حذف شدند. مراقبت‌های زراعی برای تمام تیمارها به‌طور یکنواخت انجام شد و مبارزه با علف‌های هرز و کاربرد کود شیمیایی نیز مطابق با عرف منطقه صورت پذیرفت. پس از حذف بوته‌های اضافی، سطح گلدان با یک لایه نازک ماسه پوشانده شد تا تبخیر آب به حداقل برسد. تاریخ کاشت، تاریخ جوانه‌زنی، دو برگی، چهار برگی، شش برگی، هشت برگی و ادامه فاز رویشی برای هر یک از تیمارها و ارقام یادداشت شد. آبیاری‌ها براساس نیاز گیاهان و وضعیت رطوبتی خاک گلدان‌ها، هر ۳-۴ روز صورت گرفت و هر نوبت نیز ۲۰۰ سی‌سی آب برای هر گلدان به‌کار گرفته شد.

به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، نمونه‌ای از خاکی که برای پر کردن گلدان‌ها استفاده شد، به آزمایشگاه منتقل و مورد آزمایش قرار گرفت. خلاصه نتایج خاک مورد آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است. نمونه خاک مورد نظر که برای

شرایط گلدانی مورد استفاده قرار گرفت، دارای کروم بیش از حد مجاز بود (۲۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم). غلظت عنصر کروم کل در نمونه آب آبیاری با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل Perkin Elmer 5100 ساخت کشور آمریکا سال ۱۹۹۳) در آزمایشگاه تخصصی و مرجع مؤسسه تحقیقات خاک و آب وزارت جهاد کشاورزی تعیین شد. حد آستانه کروم در خاک‌های کشاورزی برابر ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (Ministry of the Environment, Finland, 2007; Tóth *et al.*, 2016) است. میزان مصرف کود NPK براساس نظر کارشناس تغذیه شهرستان و فرمول عمومی کود توصیه‌شده برای کنجد یعنی به‌ترتیب ۱۷۰-۱۰۰-۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (به‌ترتیب از منابع فسفات آمونیم، اوره و سولفات پتاسیم) تأمین و مصرف شد.

جدول ۲. آنالیز نمونه خاک منطقه فرود

محل نمونه‌برداری	بافت	T.N.V (درصد)	OC (درصد)	OM (درصد)	pH	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	K (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	N (درصد)	P (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
منطقه فرود	لومی	۱۱/۹	۱/۵۴	۲/۶۵	۸/۱	۱/۹۴	۱۳۳	۰/۱۴	۲/۸۴

۱.۳. ویژگی‌های مورد ارزیابی و اندازه‌گیری‌ها

به‌منظور بررسی خصوصیات رشدی گیاه کنجد، در انتهای فاز رویشی، هر دو بوته باقیمانده در هر گلدان به‌طور کامل و همراه با ریشه از خاک خارج شده و جهت اندازه‌گیری ارتفاع بوته، تعداد برگچه و وزن تر اندام هوایی به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه، ریشه‌ها از اندام هوایی جدا گردید. تعداد برگچه‌ها در هر بوته شمارش و ارتفاع بوته و وزن تر اندام هوایی به‌ترتیب با استفاده از خط‌کش و ترازوی دقیق آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۱ گرم (مدل ED623S-CW ساخت شرکت سارتریوس آلمان) تعیین شد. زمان آبیاری و حجم آب کاربردی در هر مرحله و برای تیمارهای مختلف یادداشت گردید. ریشه‌ها پس از شست‌وشو، توزین شدند. طول ریشه نیز با خط‌کش برای هر یک از تیمارها، اندازه‌گیری شد. با توجه به وزن تر شاخسارها و حجم کل آب کاربردی، شاخص بهره‌وری آب (ارزش تولید به‌ازای واحد مصرف آب) نیز تعیین گردید (عباسی و همکاران، ۱۳۹۶).

نحوه محاسبه شاخص بهره‌وری آب به‌طور عمومی به شرح رابطه ۱ است:

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{میزان عملکرد، ارزش اقتصادی تولید یا میزان کالری} = \frac{\text{بهره‌وری آب}}{\text{حجم کل آب کاربردی}}$$

از محصول کنجد (برگ و دانه کنجد) نمونه‌هایی تهیه و پس از آسیاب‌کردن، غلظت عنصر کروم کل در نمونه‌های گیاهی نیز با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل Perkin Elmer 5100) در آزمایشگاه تخصصی و مرجع مؤسسه تحقیقات خاک و آب وزارت جهاد کشاورزی تعیین شد.

۲.۳. تجزیه و تحلیل آماری

پس از جمع‌آوری و انجام آزمون نرمال‌بودن داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری Mstat-C انجام شد و جداول و نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای Word و Excel (نسخه ۲۰۰۳-۲۰۰۷) ترسیم شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن^۱ در سطح آماری پنج درصد انجام شد.

1. Duncan's multiple range test

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. جذب کروم توسط کنجد

غلظت عنصر کروم در نمونه‌های گیاهی کنجد آبیاری شده با ۱۰۰ درصد آب آلوده به کروم، در جدول ۳ نشان داده شده است. از آنجایی که حداکثر میزان مجاز کروم در محصولات علوفه‌ای (خوراک دام) ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۵۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم) و در محصولات با خوراک انسانی ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۲۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم) است (Akenga et al., 2016)، بر این اساس، تخم کنجد دارای غلظتی فراتر از مصارف انسانی بوده و مصرف آن‌ها توصیه نمی‌گردد. البته اگرچه برگ کنجد دارای مصارف انسانی نیست، اما از آنجایی که به مصرف دام می‌رسد و یا در مزرعه به خاک اضافه می‌شود، قرارگیری آن در زنجیره تولید، در درازمدت، سبب بروز تبعات منفی خواهد شد.

جدول ۳. آنالیز برگ و دانه گیاه کنجد برای تعیین وضعیت آلودگی به کروم

ردیف	نمونه گیاهی	میزان کروم کل (میکروگرم بر کیلوگرم)
۱	برگ کنجد	۲۷۰۸
۲	دانه کنجد	۲۱۱۳
۳	برگ کنجد	۳۰۵۷

مطالعه اثر فلزات سنگین بر گیاهان از یک طرف برای شناسایی گیاهان مقاوم و استفاده از آن‌ها در فناوری پاکسازی خاک‌های آلوده و از سوی دیگر، به منظور تضمین سلامت انسان ضروری به نظر می‌رسد (پیروز و همکاران، ۱۳۹۱). در پژوهشی که به منظور بررسی میزان فلزات سنگین (کروم، کادمیوم و سرب) در آب آبیاری و برنج رقم طارم مزارع شهرهای مرکزی استان مازندران انجام شد، نتایج نشان داد که در نمونه‌های آب مناطق تحت مطالعه، غلظت فلز کادمیوم بالاتر از استاندارد و سایر فلزات، پایین‌تر از استاندارد بود. در نمونه‌های برنج، فلز کادمیوم و سرب در منطقه جویبار بالاتر و در سایر مناطق پایین‌تر از استاندارد گزارش شد. غلظت فلز کروم، در تمامی مناطق تحت مطالعه، کم‌تر از استاندارد بود (شکرزاده و همکاران، ۱۳۹۱). با بررسی غلظت سرب و کروم در برگ گیاهان جعفری و شاهی در خاک آبیاری شده با آب آلوده، گزارش گردید که با افزایش مقدار کروم و سرب در آب آبیاری، مقدار کروم کل در بخش هوایی گیاهان افزایش یافت (نجایی و همکاران، ۱۳۹۶).

۴.۲. ارزیابی شاخص‌های رشدی

نتیجه تجزیه واریانس صفات مورد بررسی به شرح جدول ۴ می‌باشد. میانگین صفات ارقام کنجد و نیز اثرات غلظت‌های مختلف کروم در آب آبیاری بر ویژگی‌های رشدی کنجد در جدول‌های ۵ و ۶ آمده است.

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آب آلوده به کروم بر ویژگی‌های رشدی ارقام کنجد

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		ارتفاع بوته	تعداد برگچه	طول ریشه
رقم	۲	۱۹۷/۴۸**	۲۴/۲۲**	۶۰/۹۴**
سطح کروم	۴	۱۰/۸۶**	۷/۸۸ns	۲۴/۲۸**
رقم × کروم	۸	۱/۰۲ns	۰/۲۵ ns	۰/۵۷ ns
خطای آزمایش	۳۰	۳/۵۸	۳/۴۴	۳/۸۳
ضریب تغییرات (%)		۱۰/۲۴	۱۸/۶۸	۱۰/۶۰
				وزن تر اندام هوایی
				۱/۵۶ ns
				۱/۲۴ ns
				۰/۰۶۴ ns
				۰/۹۲
				۱۹/۸۰

ns و ** : غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۵. میانگین اثرات ارقام کنجد بر ویژگی‌های رشدی

ارقام کنجد	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	تعداد برگچه	طول ریشه (سانتی‌متر)	وزن تر گیاه (گرم)
V1	۱۵/۶b	۹/۳b	۱۶/۶c	۴/۶a
V2	۲۲/۶a	۱۱/۴a	۲۰/۶a	۵/۰a
V3	۱۷/۱b	۹/۲b	۱۸/۲b	۵/۰a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

جدول ۶. میانگین اثرات غلظت‌های مختلف کروم در آب آبیاری بر ویژگی‌های رشدی ارقام کنجد

غلظت‌های مختلف کروم در آب آبیاری	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	تعداد برگچه	طول ریشه (سانتی‌متر)	وزن تر گیاه (گرم)
Cr 20	۲۱/۳a	۱۱/۱a	۲۰/۷a	۵/۳a
Cr 40	۱۹/۷ab	۱۰/۷ab	۱۹/۳ab	۵/۱a
Cr 60	۱۸/۵bc	۹/۸ab	۱۸/۳bc	۴/۹a
Cr 80	۱۶/۸cd	۹/۲ab	۱۷/۳c	۴/۶a
Cr 100	۱۶/۲d	۸/۹b	۱۶/۶c	۴/۴a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

۴.۲.۱. ارتفاع بوته

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، رقم و غلظت‌های مختلف کروم در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر ارتفاع بوته داشتند، اما اثر متقابل این دو فاکتور بر ارتفاع گیاه کنجد معنی‌دار نبود (جدول ۴). مقایسه میانگین داده‌ها حاکی از آن است که از نظر صفت ارتفاع بوته، بالاترین ارتفاع با میانگین ۲۲/۶ سانتی‌متر در رقم اولتان به‌دست آمد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با سایر ارقام نشان داد. ارقام محلی و دشتستان به‌ترتیب با ۱۷/۱ و ۱۵/۷ سانتی‌متر ارتفاع، در رتبه‌های بعدی قرار گرفته و تفاوت آماری معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۵).

نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش، نشان داد که بین ارقام مورد مطالعه به لحاظ ارتفاع بوته تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد وجود دارد که این اختلاف نشان‌دهنده وجود تنوع کافی در رقم‌های مورد مطالعه در رابطه با این صفت می‌باشد. رقم اولتان بیش‌ترین ارتفاع بوته را به خود اختصاص داد (جدول ۵)، که دلیل آن احتمالاً مربوط به اختلاف ژنتیکی ارقام در ارتفاع ساقه می‌باشد.

ارزیابی صفات مورفولوژیک به‌عنوان معیارهای انتخاب سریع و آسان، برای دستیابی به ژنوتیپ‌های متحمل به تنش بسیار مهم هستند، زیرا این صفات همبستگی بالایی با عملکرد ژنوتیپ‌ها نشان می‌دهند (رهنا و همکاران، ۱۳۹۶). طی مطالعه بر روی ارقام مختلف کنجد (اولتان، هندی ۱۴، کرج ۱، یلووایت و IS) گزارش شد که ارتفاع بوته در بین ارقام مورد مطالعه متفاوت است. بیش‌ترین ارتفاع بوته مربوط به رقم‌های کرج ۱ و اولتان و کم‌ترین مقدار آن مربوط به رقم‌های یلووایت، هندی ۱۴ و IS بود (اصغری و همکاران، ۱۳۹۱).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد ارتفاع گیاه کنجد متأثر از غلظت‌های مختلف کروم بود، به‌طوری‌که همراه با افزایش غلظت آب آلوده به کروم، کاهش خطی ارتفاع بوته کنجد مشاهده گردید. بیش‌ترین ارتفاع بوته با طول ۲۱/۳ سانتی‌متر در گیاهان تیمار شده با ۲۰ درصد کروم مشاهده شد، که البته با افزایش غلظت کروم از ۲۰ به ۴۰ درصد، ارتفاع بوته با کاهش ۷/۶ درصدی مواجه گردید و به ۱۹/۷ سانتی‌متر رسید که این کاهش معنی‌دار نبود. گیاهان تیمار شده با ۱۰۰ درصد آب آلوده به کروم با ارتفاع ۱۶/۲ سانتی‌متر، کم‌ترین ارتفاع بوته را به خود اختصاص دادند، که ارتفاع بوته در آن‌ها با گیاهان تیمار شده با ۸۰ درصد کروم (۱۶/۸ سانتی‌متر) از نظر آماری اختلافی نشان نداد (جدول ۶). همان‌گونه که مشاهده گردید، افزایش غلظت کروم کاهش ارتفاع بوته را در گیاه کنجد به همراه داشت (جدول ۶).

کاهش ارتفاع بوته در اثر کروم، ممکن است به‌طور عمده مربوط به کاهش رشد ریشه و در نتیجه کاهش انتقال آب و مواد مغذی به قسمت‌های فوقانی گیاه باشد. علاوه بر این، انتقال کروم به قسمت‌های هوایی گیاه می‌تواند بر متابولیسم سلولی ساقه اثر مستقیم گذاشته و موجب کاهش ارتفاع گیاه گردد.

۲.۲.۴. تعداد برگچه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که از نظر تعداد برگچه در گیاه کنجد، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد، بین رقم‌های مورد مطالعه وجود داشت ($P < 0.01$). اما اثر غلظت‌های مختلف کروم و اثر متقابل آن با رقم در صفت مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۴). براساس نتایج مقایسه میانگین، رقم اولتان با ۱۱/۴ برگچه بیش‌ترین تعداد این صفت را به خود اختصاص داد. هم‌چنین، ارقام دشتستان و محلی با ۹/۲ تعداد برگچه در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۵). نتایج حاکی از این است که بیش‌ترین تعداد برگچه به رقم اولتان اختصاص داشت (جدول ۵). یک رابطه مثبت بین ارتفاع بوته با تعداد برگچه مشاهده می‌شود، به‌نظر می‌رسد افزایش ارتفاع بوته باعث افزایش تعداد برگچه در بوته می‌شود. از سوی دیگر می‌توان گفت هرچه گیاه از عوامل محیطی به شکل مناسب‌تری استفاده کند، رشد رویشی بیش‌تری خواهد داشت و به‌دنبال آن ارتفاع و تعداد برگ‌های آن نیز زیادتر خواهد بود.

با بررسی خصوصیات فیزیولوژیکی چهار رقم کنجد (ناز تک‌شاخه، یکتا، ورامین و اولتان)، اظهار داشتند که رقم‌های مورد مطالعه در صفت تعداد برگ، اختلاف معنی‌داری نشان دادند، به‌طوری‌که رقم ناز تک‌شاخه با ۲ بالاترین و رقم ورامین با ۱/۵ کم‌ترین تعداد شاخه را داشتند (مهرابی و احسان‌زاده، ۱۳۹۱)، ضمن این‌که (Orhue & Uzu, 2010) نیز گزارش کردند که سمیت کروم باعث کاهش توده گیاهی، سطح برگ و تعداد برگ‌ها در کدو تنبل شده است.

۲.۲.۴. طول ریشه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش مشخص گردید که رقم و غلظت‌های مختلف کروم در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌دار بر صفت طول ریشه گیاه کنجد نشان داد ($P < 0.01$)، اما اثر متقابل این دو بر صفت طول ریشه معنی‌دار نشد (جدول ۴). به‌طوری‌که مقایسه میانگین نشان داد، در بین ارقام مورد مطالعه رقم اولتان از بیش‌ترین طول ریشه (۲۰/۱ سانتی‌متر) نسبت به سایر ارقام برخوردار بود و بعد از آن رقم محلی و دشتستان به‌ترتیب دارای ۱۸/۲ و ۱۶/۶ سانتی‌متر طول ریشه بودند که اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان دادند (جدول ۵).

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش نشان می‌دهد که رقم اولتان در ارتفاع بوته، تعداد برگچه و طول ریشه نسبت به دو رقم دیگر برتری داشت که این امر می‌تواند با رشد بیش‌تر اندام‌های رویشی در این رقم و در نتیجه افزایش ظرفیت فتوسنتزی و انتقال مواد به ریشه و ساقه مرتبط بوده که موجب افزایش طول ریشه و ساقه می‌شود (جدول ۵). ریشه به‌عنوان یک اندام رویشی مهم، تأمین آب و مواد معدنی لازم رشدونمو گیاه را برعهده دارد. ریشه‌ها از آنجایی‌که در درون خاک قرار دارند، قابل رویت نبوده و این امر سبب شده است تا با وجود نقش حیاتی ریشه، در بسیاری از موارد به حساب نیایند (Eric & Robert, 2007).

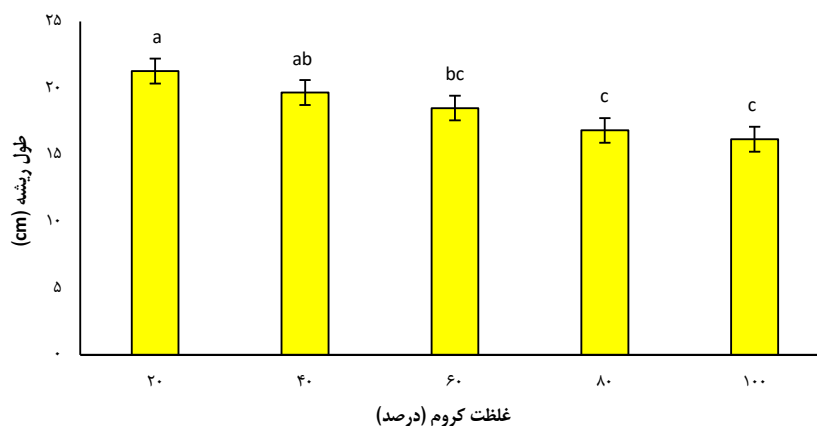
از سوی دیگر، طول ریشه را می‌توان پرکاربردترین ویژگی ریشه دانست، چرا که طول ریشه به‌عنوان شاخصی برای توانایی گیاهان جهت جذب آب از لایه‌های عمیق‌تر خاک و نفوذپذیری بهتر ریشه‌ها در خاک محسوب می‌شود. طول ریشه تحت تأثیر پارامترهایی مانند غلظت مواد مغذی، نوع رقم و شرایط رشد گیاه قرار می‌گیرد (رهنما و همکاران، ۱۳۹۶).

تنوع ژنتیکی برای صفات ریشه در میان گونه‌های زراعی مختلف و میان ارقام همان‌گونه به‌طور وسیعی گزارش شده است. این تنوع رشد می‌تواند در بهبود عملکرد محصولات زراعی از طریق رشد ریشه در رقم مطلوب صورت پذیرد. در بسیاری از گونه‌های گیاهی، تنوع ژنتیکی در عمق ریشه و توزیع طولی ریشه با تغییر در میزان رطوبت قابل‌دسترس خاک گزارش شده است (Wasson *et al.*, 2012).

Karunathilaka (2002) سیستم ریشه ارقام کنجد را بررسی کرده و گزارش نمود که عمق توسعه ریشه ارقام چندشاخه مانند اولتان نسبت به تک‌شاخه بیش‌تر است. با بررسی خصوصیات مورفولوژیکی ریشه چند رقم کنجد (پاناما، هندی ۱۴، مغان ۱۷، یلووایت، IS، ورامین ۳۷، چینی، ناز چندشاخه، کرج ۱ و اولتان) نشان داده شد که بیش‌ترین طول ریشه مربوط به رقم‌های کرج ۱، اولتان، ناز چندشاخه و IS و کم‌ترین آن مربوط به رقم‌های پاناما، هندی ۱۴ و یلووایت بود (درگاهی و همکاران، ۱۳۹۱).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطوح مختلف کروم طول ریشه گیاه کنجد در تمامی تیمارها به‌طور خطی کاهش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین طول ریشه (۲۰/۷۲ سانتی‌متر) در ۲۰ درصد غلظت کروم به‌دست آمد و بین غلظت ۲۰ و ۴۰ درصد کروم از لحاظ آماری اختلاف وجود نداشت. بیش‌ترین کاهش طول ریشه در غلظت ۱۰۰ و ۸۰ درصد کروم به‌دست آمد که به‌ترتیب سبب کاهش ۲۰/۰۷ و ۱۶/۳۶ درصدی طول ریشه نسبت به تیمار ۲۰ درصد غلظت کروم گردید (جدول ۶ و شکل ۱).

نتایج حاکی از آن است که کروم در غلظت‌های ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد باعث کاهش معنی‌دار رشد طولی ریشه شد، به‌نظر می‌رسد از میان فلزات سنگین، کروم بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش طول ریشه دارد. این امر به‌دلیل تجمع فلزات سنگین (کروم شش ظرفیتی) در ریشه است.



شکل ۱. اثر غلظت‌های مختلف کروم بر طول ریشه گیاه کنجد

۴.۲.۴. وزن تر اندام هوایی

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، اثر رقم، غلظت‌های مختلف کروم و اثر متقابل این دو فاکتور بر وزن تر اندام هوایی گیاه کنجد معنی‌دار نشد (جدول ۴). افزایش غلظت کروم در محیط موجب کاهش وزن اندام هوایی گیاه کنجد گردید. براساس نتایج مقایسات میانگین، بالاترین مقدار این صفت (۵/۳ گرم) در گیاهان تیمار شده با غلظت ۲۰ درصد کروم و کم‌ترین آن (۴/۴ گرم) در گیاهان تیمار شده با غلظت ۱۰۰ درصد کروم مشاهده شد. می‌توان اظهار داشت که گیاه در ابتدا با تجمع کروم

در ریشه مانع ایجاد سمیت و اثر آن بر رشد اندام هوایی گیاه می‌شود، اما غلظت‌های بالای آلودگی به کروم (۸۰ و ۱۰۰ درصد) در توانایی گیاه اختلال ایجاد نموده و موجب کاهش قابل توجه وزن اندام هوایی در گیاه کنجد می‌شود.

۳.۴. ارزیابی شاخص‌ها به ازای هر واحد آب مصرفی

نتیجه تجزیه واریانس صفات موردبررسی به ازای هر واحد آب مصرفی به شرح جدول ۷ می‌باشد.

جدول ۷. تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آب آلوده به کروم بر شاخص بهره‌وری آب ارقام کنجد

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		ارتفاع بوته	تعداد برگچه	طول ریشه
رقم	۲	۳۴/۶۹ ^{**}	۴/۳۳ ^{**}	۱۰/۶۳ ^{**}
کروم	۴	۶/۶۴ ^{**}	۱/۳۷ ns	۴/۲۱ ^{**}
رقم × کروم	۸	۰/۱۶ ns	۰/۰۵ ns	۰/۱۱ ns
خطای آزمایش	۳۰	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۷
ضریب تغییرات (%)		۱۰/۲۴	۱۰/۳	۱۹
				۱۸/۸

ns، * و **: غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

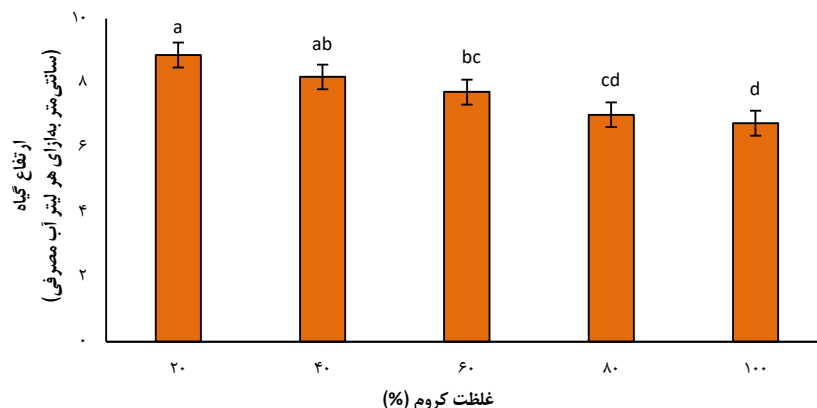
۳.۴.۱. ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ارقام مورد مطالعه و سطوح مختلف کروم به ازای هر واحد (لیتر) آب مصرفی بر صفت ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($P < 0.01$)، اما اثر برهم‌کنش رقم و سطوح مختلف کروم بر ارتفاع بوته معنی‌دار نبود (جدول ۷). بررسی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که رقم اولتان با ۹/۴ سانتی‌متر به ازای هر لیتر آب مصرفی، بالاترین ارتفاع بوته را به خود اختصاص داد، به طوری که با رقم محلی و دشتستان به ترتیب با ۷/۲ و ۶/۶ سانتی‌متر ارتفاع، اختلاف معنی‌داری نشان داد.

نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که آبیاری بر ارتفاع گیاه اثر مستقیم دارد. در رابطه با ارتفاع گیاه در این آزمایش، کارایی مصرف آب برحسب سانتی‌متر ارتفاع گیاه در یک لیتر آب مصرفی بیان شده است (شکل ۲). نتایج نشان داد که واکنش ارقام موردبررسی نسبت به آب یکسان نیست. به طوری که در شرایط آبیاری یکسان رقم اولتان از نظر ارتفاع بوته نسبت به دو رقم دیگر (محلی و دشتستان) برتری داشت و بالاترین شاخص بهره‌وری آب را در صفت ارتفاع گیاه کنجد به خود اختصاص داده است. اختلاف بین ارقام کنجد در بهره‌وری آب احتمالاً ناشی از اختلاف ژنتیکی بین آن‌ها از نظر ظرفیت اختصاص تولیدات فتوسنتزی به بخش رویشی می‌باشد.

نتایج حاکی از آن است که با افزایش غلظت کروم به ازای هر لیتر آب مصرفی، کاهش خطی ارتفاع بوته مشاهده گردید. به طوری که، بیش‌ترین ارتفاع گیاه با میانگین ۸/۹ سانتی‌متر به ازای هر لیتر آب مصرفی، در گیاهان تیمار شده با غلظت ۲۰ درصد کروم به دست آمد. در مقابل، گیاهان تیمار شده با غلظت ۱۰۰ درصد کروم نیز با ارتفاع ۶/۸ سانتی‌متر به ازای هر لیتر آب مصرفی، کم‌ترین مقدار این صفت را به خود اختصاص دادند (شکل ۲).

نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده مقاومت گیاه کنجد به سمیت ناشی از کروم تا غلظت ۴۰ درصد بود. به بیان دیگر، با افزایش غلظت کروم از ۲۰ به ۴۰ درصد، ارتفاع گیاه به ازای هر لیتر آب مصرفی کاهش معنی‌داری نشان نداد و در غلظت‌های بالاتر از ۴۰ درصد این کاهش ارتفاع کاملاً مشهود بود (شکل ۲). در واقع می‌توان از نتایج چنین استنباط نمود که با افزایش بیش از حد غلظت کروم، کارایی آب مصرفی کاهش یافته و در نهایت به دنبال افزایش غلظت کروم، کاهش معنی‌دار ارتفاع در گیاه رخ خواهد داد.



شکل ۲. اثر غلظت کروم بر شاخص بهره‌وری آب ارتفاع گیاه کنجد

۲.۳.۴. تعداد برگچه

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که از نظر صفت تعداد برگچه در گیاه کنجد، در سطح احتمال یک درصد، به‌ازای هر لیتر آب مصرفی اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد بین رقم‌های مورد مطالعه وجود داشت. اما اثر غلظت‌های مختلف کروم و اثر متقابل آن با رقم در صفت مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۷).

با توجه به نتایج مقایسات میانگین، بیش‌ترین تعداد برگچه (۴/۸ عدد) به‌ازای هر لیتر آب مصرفی متعلق به رقم اولتان بود. تعداد برگچه در ارقام دشتستان و محلی به‌ترتیب ۳/۹ و ۳/۸ به‌ازای هر لیتر آب مصرفی به‌دست آمد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند.

۳.۳.۴. طول ریشه

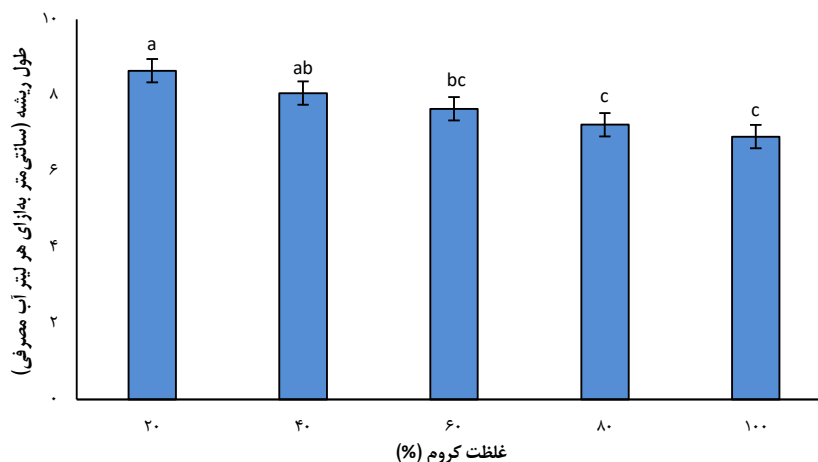
نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش حاکی از آن است که در گیاه کنجد به‌ازای هر لیتر آب مصرفی، در سطح احتمال یک درصد، اختلاف معنی‌داری بین ارقام مورد مطالعه و غلظت‌های مختلف کروم به لحاظ صفت طول ریشه وجود داشت، اما اثر آن بر برهم‌کنش رقم و غلظت‌های مختلف کروم در صفت مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۷). با توجه به نتایج مقایسه میانگین، رقم اولتان با طول ریشه (۸/۸ سانتی‌متر) به‌ازای هر لیتر آب مصرفی بالاترین مقدار این صفت را به خود اختصاص داد. میزان این صفت در ارقام محلی و دشتستان به‌ترتیب ۷/۶ و ۶/۹ سانتی‌متر به‌ازای هر لیتر آب مصرفی بود که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان دادند.

نتایج حاصل از این آزمایش در رابطه با کارایی مصرف آب به لحاظ طول ریشه بر روی سه رقم کنجد (دشتستان، محلی و اولتان)، نشان داد که در شرایط آبیاری یکسان بین سه رقم مذکور، طول ریشه در رقم اولتان افزایش بیش‌تری نشان داده است. به‌عبارت دیگر، می‌توان گفت که این رقم نسبت به دو رقم دیگر دارای عمق ریشه بیش‌تری بوده است و برای جذب آب بیش‌تر مواد ذخیره‌ای خود را صرف طولیل شدن ریشه کرده است.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطوح مختلف کروم طول ریشه گیاه کنجد به‌ازای هر لیتر آب مصرفی، در تمامی تیمارها کاهش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین طول ریشه (۸/۶ سانتی‌متر) در ۲۰ درصد غلظت کروم به‌دست آمد، با این حال، بین غلظت ۲۰ و ۴۰ درصد کروم (۸/۱ سانتی‌متر) از لحاظ آماری اختلاف وجود نداشت (شکل ۳).

نتایج حاصل از غلظت‌های مختلف کروم بر طول ریشه به‌ازای هر لیتر آب مصرفی، نشان داد که طول ریشه در

غلظت‌های پایین کروم (۲۰ و ۴۰ درصد) تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نشان ندادند، اما غلظت‌های بالاتر این فلز طول ریشه را به‌طور محسوسی کاهش داده است. بیش‌ترین کاهش طول ریشه در غلظت ۱۰۰ و ۸۰ درصد کروم به‌دست آمد که به‌ترتیب کاهش ۲۰/۱ و ۱۶/۴ درصدی نسبت به تیمار ۲۰ درصد غلظت کروم نشان دادند (شکل ۳).



شکل ۳. اثر غلظت کروم بر شاخص بهره‌وری آب طول ریشه گیاه کنجد

۵. بحث

اثرات سوء کروم بر ارتفاع بوته و رشد ساقه محصولات در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است. آلودگی کروم با غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، علاوه بر کاهش شاخص سبزی‌نگی برگ، باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته گیاه سلمه تره شد (محمودی و همکاران، ۱۳۹۴). در پژوهشی دیگر، افزودن کروم (سه ظرفیتی) به خاک کشت یونجه، موجب کاهش رشد ساقه در گیاه یونجه می‌شود (Barton *et al.*, 2000). گزارش شده است که مهار رشد ریشه توسط کروم می‌تواند به‌علت سمیت کروم در تقسیم سلولی و همچنین به‌علت تثبیت کروم در بافت‌های گیاهی و ایجاد اختلال در روابط اسموتیک گیاه یا محدودیت در انتقال Ca^{2+} از طریق غشای پلاسمایی باشد (Lodeiro *et al.*, 2008) و این پاسخ طبیعی گیاه نسبت به سمیت با کروم است. فلزات سنگین در رشد ریشه و جوانه‌زنی دانه اختلال ایجاد می‌کنند.

با توجه به نتایج حاضر و نتایج به‌دست‌آمده در قسمت‌های گذشته، رقم اولتان از طول ریشه بالاتری نسبت به ارقام محلی و دشتستان برخوردار بود. دارا بودن طول و وزن بیش‌تر ریشه در رقم اولتان و به‌دنبال آن جذب آب و مواد غذایی از فضای بیش‌تری از خاک، یکی از ویژگی‌هایی است که در ایجاد تحمل این رقم به تنش‌های محیطی مؤثر است. گزارش شده است که ارقام مختلف الگوهای متفاوتی در توزیع مواد فتوسنتزی بین اندام‌های خود داشته دارا می‌باشند (منجم و همکاران، ۱۳۸۹). رشد مناسب ریشه‌ها و وظیفه آن‌ها به‌عنوان سطوح جذب‌کننده آب و مواد غذایی، به عوامل زیادی در محیط بستگی دارد. تنش فلزات سنگین از جمله عوامل محدودکننده رشد ریشه است و از آنجاکه تعیین مقدار آب و مواد غذایی معدنی قابل‌دسترس برای گیاه از روی حجم خاک یا محلول در تماس با ریشه‌ها صورت می‌گیرد، کاهش رشد ریشه، سایر فعالیت‌های رشدی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (علیزاده، ۱۳۹۰).

از نشانه‌های سمیت ناشی از کروم، توقف سریع رشد ریشه‌ها، کلروز و کاهش رشد گیاه است. فلزات سنگین با کاهش تورژسانس سلولی موجبات کاهش تقسیم سلولی و مهار رشد سلولی را فراهم می‌آورند و از طرف دیگر با تجمع در دیواره

سلولی و ورود به سیتوپلاسم، در متابولیسم طبیعی سلول اختلال ایجاد کرده و باعث کاهش رشد می‌گردند (نجایی و همکاران، ۱۳۹۶). کاهش در وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه می‌تواند به مهار جذب آب توسط ریشه و انتقال آن به بخش‌های هوایی در اثر سمیت کروم مرتبط باشد. از طرفی کروم با مداخله در فرایندهای متابولیک گیاهان می‌تواند باعث مهار مسیرهای آنابولیسم و تولید بیوماس گیاه شود (Sundaramoorthy *et al.*, 2010). کاهش رشد ریشه‌ها که با کاهش طول و وزن آن مشخص می‌شود، منجر به عدم توسعه و گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای شده، با کاهش سطوح جذب‌کننده و تغییر در ساختار غشای سلولی، جذب آب کاهش یافته، محتوای آب گیاه افت می‌کند که این امر بر فرایندهای فیزیولوژیکی نظیر تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر کرده و در نهایت موجب کاهش رشد در سایر بخش‌های گیاه خواهد شد.

نتایج حاصل از بررسی تأثیر فلز سنگین کروم بر میزان تجمع، عوامل رشد و القای تنش اکسیداتیو در اندام هوایی گیاه آفتابگردان نشان داد که غلظت‌های ۵ و ۱۰ میلی‌مولار کروم در محلول غذایی باعث کاهش شاخص‌های رشد اندام هوایی شد، اما غلظت‌های پایین‌تر از آن، اختلاف معنی‌داری نسبت به گروه شاهد نداشت (پیروز و منوچهری کلانتری، ۱۳۹۱). در مجموع در ارقام کنجد همراه با افزایش غلظت کروم، مقادیر ارتفاع، تعداد برگچه، طول ریشه و وزن تر هوایی روند کاهشی داشته است. برتری رقم اولتان بر دیگر ارقام مشهود بوده و تفاوت خاصی بین دو رقم دیگر وجود ندارد. بر این اساس می‌توان گفت این رقم در مقابل سمیت با کروم، متحمل‌تر از دو رقم دیگر (محلی و دشتستان) عمل نمود. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در قسمت‌های قبل، اولتان از طول ریشه بیش‌تری نسبت به دو رقم دیگر برخوردار بود. طول ریشه بیش‌تر موجب افزایش جذب آب و مواد مغذی بیش‌تری از خاک شده و تحمل گیاه را نسبت به تنش با فلزات سنگین افزایش می‌دهد.

غلظت بالای کروم در دسترس گیاهان باعث کاهش بیوماس گیاهان، سنتز کلروفیل و مهار فتوسنتز شد (Scoccianti *et al.*, 2016). تحت تنش کروم و در شرایط هیدروپونیک صفات رشد و ویژگی‌های فتوسنتزی شش محصول (گندم، تربچه، خیار، کلم چینی، کلزا و کاهو) با افزایش غلظت تیمار محدود شد. در این میان، گندم با کم‌ترین میزان تجمع کروم در اندام‌های هوایی، قوی‌ترین تحمل را نسبت به کروم نشان داد. کاهو حساس‌ترین سبزی است که بیش‌ترین کروم در ریشه آن انباشته شده است. کلم چینی تحمل ویژه‌ای نسبت به کروم داشت و بیش‌ترین تجمع کروم را در قسمت‌های خوراکی نشان داد که در صورت کاشت در خاک‌های آلوده به کروم ممکن است تهدیدی برای سلامت محصولات کشاورزی باشد (Sun *et al.*, 2019). نتایج مطالعه دیگری نشان داد که کروم در تمام غلظت‌ها بر تمامی پارامترهای رشد نسبت به شاهد تأثیر منفی داشت (Joshi *et al.*, 2019). همچنین نتایج پژوهش دیگری نشان داد که آبیاری پساب تأثیر منفی بر رشد گیاه و پارامترهای فیزیولوژیکی دارد. آب آبیاری حاوی عناصری مانند کروم، نیکل، کادمیوم و نیترات بوده که سلامتی انسان را در معرض خطر قرار می‌دهد (Nawaz *et al.*, 2021) و اساساً فلزات سنگین به‌دلیل اثرات فیزیولوژیکی سمی بر اندام‌ها و بافت‌های موجودات، از نظر سلامتی، بالقوه سمی هستند (Ugulu, 2015). در پژوهش دیگری با افزایش سطح غلظت کروم، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و سرعت فتوسنتزی شش محصول گندم، تربچه، خیار، کلم چینی، کلزا و کاهو روند کاهشی نشان داد (Sun *et al.*, 2019) و در مجموع در محصولات کشاورزی، عنصر کروم در کاهش عملکرد محصولات کشاورزی تأثیر داشته است (Kumar & Chopra, 2015). نتایج حاکی از آن است که مشابه با ارتفاع بوته، ارقام مختلف کنجد در مقابل مقادیر یکسان آب آبیاری، واکنش متفاوتی از نظر صفت تعداد برگچه نشان دادند. به‌طوری‌که مقادیر برآوردشده تعداد برگچه به‌ازای هر لیتر آب مصرفی حاکی از آن بود که رقم اولتان قدرت بهره‌وری بالاتری از آب نسبت به دو رقم محلی و دشتستان داشته است که احتمالاً به‌دلیل

شاخه‌دهی و کارایی بهتر آن در مصرف نور به دلیل ارتفاع بوته بیش‌تر، بوده است. در مطالعه‌ای که بر روی ارقام مختلف کنجد انجام شد (فروغی و همکاران، ۱۳۹۲)، اظهار شد که دلیل مقاومت رقم اولتان، احتمالاً به دلیل چند شاخه‌بودن این رقم و توانایی این رقم در تولید شاخه و برگ بیش‌تر و در نهایت دریافت نور بیش‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که گیاهان برای جذب آب از خاک، وابسته به سیستم ریشه خود هستند و افزایش طول ریشه، یکی از راه‌های سازگاری گیاه به شرایط خشک می‌باشد. چرا که با افزایش طول ریشه به توسعه سیستم ریشه‌ای کمک نموده و موجب افزایش توانایی گیاهان در جذب آب زراعی می‌شود. از طرفی مقاومت گیاهان زراعی در مقابل خشکی بسته به عمق سیستم ریشه‌ای است تا بتوانند آب موردنیاز خود را از توده بیش‌تری از خاک جذب نمایند و هرچه عمق ریشه افزایش یابد آب قابل‌استفاده گیاه نیز افزایش می‌یابد (علیزاده، ۱۳۹۰).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج حاصل از بررسی اثر آبیاری با سطوح مختلف آب آلوده به کروم بر شاخص‌های رشدی ارقام کنجد نشان داد که افزایش غلظت کروم موجب کاهش ارتفاع بوته، طول ریشه و وزن اندام هوایی شد. بدیهی است که نقصان در رشد رویشی گیاه، منجر به کاهش عملکرد محصول خواهد شد و گزینش رقم مناسب برای شرایط آلودگی آب آبیاری به عنصر کروم، بسیار اهمیت دارد. بدیهی است که کاهش شاخص‌های رشدی گیاه، سبب کاهش شاخص بهره‌وری آب خواهد شد. علاوه بر این، تجمع کروم در دانه کنجد، تهدیدی برای سلامت انسان محسوب می‌شود. اگرچه هر شاخص‌های رشدی هر سه رقم مورد مطالعه متأثر از تبعات آلودگی ناشی از غلظت کروم بوده، اما رقم اولتان که دارای بالاترین ارتفاع بوته (۹/۴۳ سانتی‌متر)، تعداد برگچه (۴/۷۷) و طول ریشه (۸/۵۹ سانتی‌متر) به‌ازای هر لیتر آب مصرفی بوده و در نتیجه دارای بالاترین شاخص بهره‌وری آب در تولید این شاخص‌های رشدی بوده، دارای ارجحیت است.

۷. تشکر و قدردانی

از سازمان جهاد کشاورزی استان سمنان، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار و استانداری سمنان به خاطر تأمین منابع مالی موردنیاز، آنالیز نمونه‌ها و سایر حمایت‌ها در اجرای پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

آذرشب، زهرا و سبحان اردکانی، سهیل (۱۳۹۵). تعیین مخاطره سلامت آهن و کروم در برخی ادویه‌جات مصرفی شهر همدان در سال ۱۳۹۴. *مجله علوم پزشکی رازی*، ۲۳ (۱۵۰)، ۲۸-۳۴.

استاندارد ملی ایران. (۱۳۸۸). *آب آشامیدنی - ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی*. استاندارد ۱۰۵۳ ویرایش پنجم. تهران: مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

اصغری، علی؛ درگاهی، یاور؛ رسول‌زاده، علی و احمدیان، مریم (۱۳۹۱). ارزیابی صفات مورفولوژیک ارقام کنجد در شرایط تنش کم‌آبی با استفاده از تجزیه به عامل. *مجله پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۱ (۴)، ۵۹۳-۶۰۷.

- پیروز، پریا سادات و منوچهری کلانتری، خسرو (۱۳۹۱). تأثیر فلز سنگین کروم بر میزان تجمع، عوامل رشد و القاء تنش اکسیداتیو در اندام هوایی گیاه آفتابگردان. *مجله زیست‌شناسی گیاهی*، ۴ (۱۳)، ۹۷-۱۱۴.
- پیروز، پریا سادات؛ منوچهری کلانتری، خسرو و نصیبی، فاطمه (۱۳۹۱). بررسی فیزیولوژیک گیاه آفتابگردان تحت تنش کروم: تأثیر بر رشد، تجمع و القای تنش اکسیداتیو در ریشه آفتابگردان. *مجله زیست‌شناسی گیاهی*، ۴ (۱۱)، ۷۳-۸۶.
- تشکری‌زاده، منصوره و سعیدنژاد، امیرحسین (۱۳۹۶). تأثیر غلظت‌های مختلف کروم (III) بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و ترکیب شیمیایی اسانس ریحان. *مجله دانش آب و خاک*، ۲۷ (۱)، ۱۳۵-۱۴۵.
- درگاهی، یاور؛ اصغری، علی؛ شکرپور، مجید و رسول‌زاده، علی (۱۳۹۱). اثر تنش کم‌آبی بر خصوصیات مورفولوژیک ریشه در ارقام کنجد. *مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی*، ۵ (۴)، ۱۵۱-۱۷۲.
- ذاکر، آرزو؛ لاهوتی، مهرداد؛ ابریشم‌چی، پروانه و اجتهادی، حمید (۱۳۸۴). بررسی تأثیر انباشتگی Cr^{6+} و Cr^{3+} بر رشد و میزان کلروفیل در گیاه جعفری. *مجله زیست‌شناسی ایران*، ۱۸، ۱۰۹-۱۰۱.
- رحیمی، مونا؛ قراچوللو، مریم و قوامی، مهرداد (۱۳۹۹). اندازه‌گیری برخی ترکیبات ضد تغذیه‌ای و فلزات سنگین در روغن کنجد، دانه کنجد خام و پوست‌گیری شده دو وارسته کشت‌شده در ایران. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، ۱۷ (۹۸)، ۱۶۹-۱۸۱.
- شکرزاده، محمد؛ رکنی، محمودعلی و گالستین (۱۳۹۱). بررسی میزان فلزات سنگین (کروم- کادمیوم- سرب) در آب آبیاری و برنج رقم طارم تولیدی مزارع شهرهای مرکزی استان مازندران. *مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران*، ۲۲ (۹۸)، ۲۳۴-۲۴۲.
- عباسی، فریبرز؛ عباسی، نادر و توکلی، علیرضا (۱۳۹۶). بهره‌وری آب در بخش کشاورزی؛ چالش‌ها و چشم اندازه‌ها. *مجله آب و توسعه پایدار*، ۴۰ (۱۰)، ۱۴۱-۱۴۴.
- علیزاده، امین (۱۳۹۰). *رابطه آب و خاک و گیاه*. مشهد: انتشارات آستان قدس رضوی.
- فروغی، عباس؛ قرخلو، جاوید و قادری‌فر، فرشید (۱۳۹۲). تأثیر فاصله ردیف کاشت و تداخل علف هرز توق بر عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم کنجد در گرگان. *مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی*، ۶ (۲)، ۱۰۱-۱۱۶.
- قاسمی، علی؛ نعمت‌الهی، محمدجواد و تقوی ثانی، حسام‌الدین (۱۳۹۴). بررسی پتانسیل منابع آلاینده و خصوصیات هیدروژئوشیمیایی کروم در منابع آب گلیو (شمال تربت حیدریه، خراسان رضوی). *مجله زمین‌شناسی محیط زیست*، ۱۰ (۳۴)، ۱-۱۵.
- محمودی، سهراب؛ سیاری، محمدحسن؛ گلستانی‌فر، فرزانه؛ محرابی، پگاه و ابوالحسنی، حکیمه (۱۳۹۴). تأثیرپذیری ارتفاع و شاخص سبزی‌نگی برگ علف هرز سلمه تره (*Chenopodium album* L.) در شرایط آلودگی خاک با عناصر کروم و کادمیوم. *ششمین همایش علوم علف‌های هرز ایران*، بیرجند ۱۲-۱۰ شهریور، ۱۷۰-۱۶۶.
- منجم، سالار، احمدی، علی، و محمدی، ولی‌اله (۱۳۸۹). اثرات تنش خشکی در مراحل زایشی بر تسهیم مواد فتوسنتزی ارقام تجاری کلزا. *تولید گیاهان زراعی (مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی)*، ۳ (۳)، ۱۷۸-۱۶۳.
- مهرابی، زهرا و احسان‌زاده، پرویز (۱۳۹۱). بررسی خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد چهار رقم کنجد تحت رژیم‌های رطوبتی خاک. *مجله به‌زراعی کشاورزی*، ۱۳ (۲)، ۷۵-۸۸.
- نجبایی، سیده آیدا؛ قاجار سپانلو، مهدی و بهمنیار، محمدعلی (۱۳۹۶). بررسی غلظت سرب و کروم در برگ گیاهان جعفری و شاهی در خاک آبیاری شده با آب آلوده. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۱ (۲)، ۱۸۱-۱۹۴.
- نقیبی‌پور، داریوش؛ تقوی، کامران؛ صداقت‌حور، شهرام و واعظ‌زاده، مرضیه (۱۳۹۴). بررسی کارایی عدسک آبی در حذف

فلزات سنگین از محلول‌های آبی. *مجله اکوبیولوژی تالاب*، ۲۳ (۶)، ۴۹-۵۶.

References

- Abbasi, F., Abbasin, N., & Tavakoli, A. R. (2017). Water productivity in agriculture; Challenges and prospects. *Journal of Scientific-Extension of Water and Sustainable Development*, 40(10), 144-141. (In Persian)
- Abdul, G. (2011). Effect of chromium toxicity on growth, chlorophyll and some mineral nutrients of brassica juncea L. *Egyptian Academic Journal Biological Sciences*, 2(1), 9-15.
- Akenga, T., Sudio, V., Machuka, W., & Kerich, E. (2016). Heavy metal concentrations in agricultural farms in homa hills homa bay county, Keny. *International Journal of Science and Research*, 5(10), 1664-1669.
- Alizadeh, A. (2011). *The relationship between water, soil and plants*. Mashhad: Astan Quds Razavi Publications. (In Persian)
- Asghari, A., Dargahi, A., Rasoulzadeh, A., & Ahmadian, M. (2012). Evaluation of morphological traits of sesame cultivars under low water stress using factor analysis. *Iranian Journal of Crop Research*, 11(4), 607-593. (In Persian)
- Azarshab, Z., & Sobhan Ardakani, S. (2016). Study of health risk assessment of Fe and Cr content in some spices marketed in Hamedan city in 2015. *Razi Journal of Medical Sciences*, 23(150), 28-34. (In Persian)
- Barton, L. L., Johnson, A. G., & Wagener, B. M. (2000). Inhibition of ferric chelate reductase in alfalfa roots by cobalt, nickel, chromium and copper. *Journal of Plant Nutrition*, 23, 1833-1845.
- Bhalerao, S. A., & Sharma, A. S. (2015). Chromium: As an environmental pollutant. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4, 732-746.
- Chatterjee, J., & Chatterjee, C. (2000). Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower. *Environmental Pollution*, 109, 69-74.
- Dargahi, A., Asghari, A., Shakarpour, M., & Rasoulzadeh, A. (2012). Effect of water deficit stress on root morphological characteristics in sesame cultivars. *Elec. Journal of Crop Production*, 5(4), 172-151. (In Persian)
- Environmental Protection Agency (EPA). (2006). *Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories*. Washington DC: Office of Water U.S. Environmental Protection Agency.
- Eric, O., & Robert, E. S. (2007). Regulation of root growth responses to water deficit. In *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*. edited by Jenks, M.A., Hasegawa, P.M. & Jain, S.M.. New York: Springer. 33-53.
- Foroughi, A., Gharkhloo, J., & Ghaderifar, F. (2013). The effect of planting row spacing and interference of Tuq weed on yield and yield components of two sesame cultivars in Gorgan. *Electronic Journal of Crop Production*, 6(2), 116-101. (In Persian)
- Ghasemi, A., Nematollahi, M. J., & Taghavi Sani, H. (2015). Investigation of potential sources of pollutants and hydrogeochemical properties of chromium in Golbo water sources (north of Torbat Heydariyeh, Khorasan Razavi). *Environmental Geology*, 10(34), 15-1. (In Persian)
- Joshi, N., Menon, P., & Joshi, A. (2019). Effect of chromium on germination in some crops of India. *Journal agricultural science botany*, 3(1), 1-5.
- Karunathilaka, W. A. K. (2002). Rooting and moisture extraction pattern of sesame. *Ann. Sri Lanka Dep. Agriculture*, 4, 73-81.
- Kumar, V., & Chopra, A. K. (2015). Toxicity of chromium in agricultural crops with respect to its chemical speciation-a review. *World Applied Sciences Journal*, 33(6), 944-969.
- Lodeiro, P., Fuentes, A., Herrero, R., & Sastre de Vicente, M. E. (2008). Cr (III) binding by surface polymers in natural biomass: the role of carboxylic groups. *Environmental Chemistry*, 5, 355-36.

- Mahmoodi, S., Sayyari Zahan, M. H., Golestani Far, F., Mehrabi, P., & Abolhasani, H. (2015). Influence height and SPAD index of leaf *Chenopodium album* L. in contaminated soil with chromium and cadmium. *The 6th Iran Weed Science Conference*, Birjand, 10-12 September, 166-170. (In Persian)
- Mehrabi, A., & Ehsanzadeh, P. (2012). Study of physiological characteristics and yield of four sesame cultivars under soil moisture regimes. *Journal of Agriculture*, 13(2), 88-75. (In Persian)
- Ministry of the Environment, Finland (MEF). (2007). *Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs*. Helsinki: Ministry of the Environment, Finland.
- Monajjem, S., Ahmadi, A., & Mohammadi, A. (2011). Effect of drought stress on photosynthesis, partitioning of photo-assimilates and grain yield in rapeseed cultivars. *Crop Production (Electronic Journal of Crop Production)*, 3(3), 163-178. (In Persian)
- Naqibipour, D., Taghavi, K., Sedaghat Hooher, Sh., & Vaezzadeh, M. (2015). Investigation of the efficiency of aqueous lentils in removing heavy metals from aqueous solutions. *Wetland Ecology Quarterly*, 23(6), 56-49.
- National Standard of Iran. (2009). *Drinking Water-Physical and Chemical Properties*. Standard 1053 Fifth Edition. Tehran: Iranian Institute of Standards and Industrial Research. (In Persian)
- Nawaz, H., Anwar-ul-Haq, M., Akhtar, J., & Arfan, M. (2021). Cadmium, chromium, nickel and nitrate accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) using wastewater irrigation and health risks assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208(111685), 1-9.
- Nojabae, S. A., Ghajar Sepanlou, M., & Bahmanyar, M. A. (2017). Concentration of lead and chromium in leaves of cress and parsley in soils irrigated with contaminated water. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(2), 181-194. (In Persian)
- Orhue, E. R., & Uzu, F. O. (2010). Residual Effects of Chromium on Early Growth of Fluted Pumpkin (*Telfairia occidentalis* Hook F) in an Ultisol. *African Journal of General Agriculture*, 6, 235-247.
- Panda, S. K., & Choudhury, S. (2005). Chromium stress in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 95-192.
- Pirooz, P. S., & Manouchehri Kalantari, Kh. (2012). The effect of chromium heavy metal on the rate of accumulation, growth factors and induction of oxidative stress in the shoot of sunflower. *Iranian Journal of Plant Biology*, 4(13), 97-114. (In Persian)
- Pirooz, P. S., Manouchehri Kalantari, Kh., & Nasibi, F. (2012). A physiological analysis of sunflower under chromium stress: Impact on plant growth, bioaccumulation and oxidative stress induction on sunflower (*Helianthus annuus*). *Iranian Journal of Plant Biology*, 11, 73-86. (In Persian)
- Rahimi, M., Qarachorlou, M., & Ghavami, M. (2020). Measurement of some anti-nutritional compounds and heavy metals in sesame oil, raw and peeled sesame seeds of two varieties grown in Iran. *Iranian Food Science and Technology*, 17(98), 181-169. (In Persian)
- Rahnama, A., Fakhri, Sh., & Meskarbashee, M. (2017). Genotypic variation in root and shoot growth traits of wheat seedlings and its association with salt tolerance. *Journal of Plant Process and Function*, 6(21), 115-126.
- Schneider, R. M., Cavalin, C. F., Barros, M. A. S. D., & Tavares, C. R. G. (2007). Adsorption of chromium ions in activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 132, 355-62.
- Scoccianti, V., Bucchini, A. E., Iacobucci, M., Ruiz, K. B., & Biondi, S. (2016). Oxidative stress and antioxidant responses to increasing concentrations of trivalent chromium in the Andean crop species *Chenopodium quinoa* Wild. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 133, 25-35.
- Seregin, I. V., & Ivaniov, V. B. (2001). Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 48(4), 606-630.

- Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment International*, 31, 739-753.
- Shokrzadeh, M., Rokni, M. A., & Galstvan. (2013). Lead, Cadmium, and Chromium Concentrations in Irrigation Supply of/and Tarom Rice in Central Cities of Mazandaran Province-Iran. *Journal of Mazandaran University Medical Science*, 22(98), 234-242. (In Persian)
- Srivastava, D., Tiwari, M., Dutta, P., Singh, P., Chawda, K., Kumari, M., & Chakrabarty, D. (2021). Chromium stress in plants: toxicity, tolerance and phytoremediation. *Sustainability*, 13(9), 4629. <https://doi.org/10.3390/su13094629>.
- Sun, Z. Q., Qiu, Y. H., Li, S. W., Han, X. M., & Li, H. L. (2019). Comparison on the tolerance and accumulation of hexavalent chromium by different crops under hydroponic conditions. *Applied Ecology and Environmental Resrarch*, 17(5), 11249-11260. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1705_1124911260
- Sundaramoorthy, P., Alagappan, C., Kaliyaperumal, S. G., Pachikkaran, U., & Logalashmanan, B. (2010). Chromium stress in paddy: (i) Nutrient status of paddy under chromium stress; (ii) Phytoremediation of chromium by aquatic and terrestrial weeds. *Comptes Rendus Biologies*, 333, 597-607.
- Tashakorizadeh, M., & Saeidnejad, A. H. (2016). Effect of Different Concentrations of Chromium (III) on Morphological Characteristics and Essential Oil Chemical Composition of Basil. *Water and Soil Science*, 27(1), 135-145. (In Persian)
- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299-309
- Ugulu, I. (2015). Determination of heavy metal accumulation in plant samples by spectrometric techniques in Turkey. *Applied Spectroscopy Reviews*, 50, 113-151.
- World Health Organization (WHO). (2011). *Guidelines for Drinking-Water Quality*. Geneva: World Health Organization.
- World Health Organization (WHO). (2020). *Chromium in Drinking-water*. Geneva: World Health Organization.
- Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Sai Prasad, S. V., Rebetzke, G. J., Kirkegaard, J. A., Christopher, J., & Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, 63, 3485-3498.
- Zaker, A., Lahouti, M., Abrishamchichi, P., & Ejtehadi, H. (2005). Investigation of the effect of Cr³⁺ and Cr⁶⁺ accumulation on growth and chlorophyll content in parsley. *Iran Biology Magazine*, 18, 109-101. (In Persian)