University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

The effect of drought and heavy metal stresses on growth characteristics, morphology and seed weight of quinoa plant

Fatemeh Mirzaei[1] | Mohammad Rafieiolhossaini[2]✉ | Nafiseh Rangzan[3] | Mehdi Amiryousofi[4]

1. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Chaharmahal and Bakhtiari, Iran. E-mail: mirzaeii@ stu.sku.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Chaharmahal and Bakhtiari, Iran. E-mail: rafiei@sku.ac.ir
3. Department of Soil Science and Engineering, Agricultural Sciences and Natural ResourcesUniversity of Khuzestan, Khuzestan, Iran. E-mail: rangzan@asnrukh.ac.ir
4. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Chaharmahal and Bakhtiari, Iran. E-mail: amiryousefi@stu.sku.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 December 2022
Received in revised form
26 February 2023
Accepted 6 April 2023
Published online
20 September 2023

Keywords:
Cadmium
Osmotic stress
Plant height
Quinoa
Seed weight

ABSTRACT

Objective: Quinoa, with its high nutritional value, is highly resistant to a wide range of non-biological stresses. Despite the limited resources and the increasing demand for food products in lands with low or limited fertility, it can be cultivated well and produces a good product.

Methods: This experiment was conducted with the aim of investigating the simultaneous effect of drought stress and heavy metals on the quinoa plant, in a factorial format in a completely randomized design with 3 replications. The first component involved two levels of soil (contaminated and uncontaminated), and the second factor, three levels of drought stress (100% of field capacity 60% of field capacity, and 30% of field capacity).

Results: Interaction effect of soil type and drought stress was significant on all traits except the fresh weight of shoot and plant height. The lowest amount of fresh and dry weight of roots, dry weight of shoot and weight of thousand seeds was observed in contaminated soil with severe drought stress. Nevertheless, the weight of 1000 quinoa seeds under the influence of moderate drought stress was not significantly different from the condition without drought stress. Examining the simple effects showed that soil contamination with heavy metals caused a decrease of 13.7% in fresh weight of shoot and 30.5% decrease in dry weight of shoot compared to plants grown in uncontaminated soil.

Conclusion: In general, it can be stated that the increase in drought stress has significantly reduced root fresh weight and 1000 seed weight in quinoa, but the percentage and ratio of this reduction in soil contaminated with heavy metals was much higher than that of non-contaminated soil. According to the results of this research, the cultivation of quinoa can be investigated as a promising plant in soils with similar limitations.

Cite this article: Mirzaei, F., Rafieiolhossaini, M., Rangzan, N., & Amiryousofi, M. (2023). The effect of drought and heavy metal stresses on growth characteristics, morphology and seed weight of quinoa plant. *Journal of Crops Improvement*, 25 (3), 737-754. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.352391.2771

© The Authors.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.352391.2771

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۲۳۴۵-۶۹۵۷

اثر تنش‌های خشکی و فلزات سنگین بر ویژگی‌های رشد، مرفولوژی و وزن دانه گیاه کینوا

فاطمه میرزایی[۱] | محمد رفیعی‌الحسینی[۲]✉ | نفیسه رنگ‌زن [۳] | مهدی امیریوسفی[۴]

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه: mirzaeii@ stu.sku.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه: rafiei@sku.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: rangzan@asnrukh.ac.ir

۴. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه: amiryousefi@stu.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

کلیدواژه‌ها:
ارتفاع بوته
تنش اسمزی
کادمیم
کینوا
وزن دانه

چکیده

هدف: کینوا با ارزش غذایی بالا، در برابر طیف وسیعی از تنش‌های غیرزیستی نیز بسیار مقاوم است. با وجود محدودیت منابع و افزایش تقاضا برای محصولات غذایی، می‌توان کینوا را در اراضی با باروری کم یا محدود، به‌خوبی کشت کرد و محصول خوبی تولید کرد.

روش پژوهش: این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در یک گلخانه تحقیقاتی واقع در منطقه صنعتی شهر ماهشهر از توابع استان خوزستان انجام شد. فاکتور اول شامل نوع خاک در دو سطح (آلوده و غیرآلوده) و فاکتور دوم شامل تنش خشکی (رژیم‌های آبیاری) در سه سطح (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه (بدون تنش)، ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه (تنش متوسط) و ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه (تنش شدید)) بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد اثر متقابل نوع خاک و تنش خشکی بر کلیه صفات به‌جز وزن تر اندام هوایی و ارتفاع بوته معنی‌دار بود که کم‌ترین مقدار وزن تر و خشک ریشه، وزن خشک اندام هوایی و وزن هزاردانه در خاک آلوده همراه با تنش خشکی شدید مشاهده شد. با این وجود وزن هزاردانه کینوا تحت تأثیر تنش خشکی متوسط، اختلاف معنی‌داری با شرایط بدون تنش خشکی نداشت. بررسی اثرات ساده نشان داد آلودگی خاک با فلزات سنگین موجب کاهش ۱۳/۷ درصد وزن تر اندام هوایی و کاهش ۳۰/۵ درصدی وزن خشک اندام هوایی کینوا در مقایسه با گیاهانی که در خاک غیرآلوده رشد کرده‌اند، شده است.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی می‌توان گفت افزایش تنش خشکی، وزن تر ریشه و وزن هزاردانه در کینوا را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده است، اما درصد و نسبت این کاهش در خاک آلوده به فلزات سنگین به مراتب بیش‌تر از خاک غیرآلوده بود. با توجه به نتایج این پژوهش، کشت گیاه کینوا به‌عنوان گیاهی امیدبخش در خاک‌های دارای محدودیت‌های مشابه قابل بررسی است.

استناد: میرزایی، فاطمه؛ رفیعی‌الحسینی، محمد؛ رنگ‌زن، نفیس؛ و امیریوسفی، مهدی (۱۴۰۲). اثر تنش‌های خشکی و فلزات سنگین بر ویژگی‌های رشد، مرفولوژی و وزن دانه گیاه کینوا. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۵ (۳)، ۷۳۷-۷۵۴. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.352391.2771

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

از جمله ارکان اصلی توسعه پایدار هر کشور، تأمین خوراک کافی با قیمت و کیفیت مناسب برای افراد آن جامعه است. در عصر حاضر محدودیت منابع تولید، افزایش روزافزون جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا برای محصولات غذایی ایجاب می‌کند، از منابع محدود و تجدیدناپذیر به‌نحو بهینه استفاده شود (Van Zanten *et al.*, 2019). این در حالی است که امروزه کشاورزی عمده‌ترین مصرف‌کننده منابع آب جهان و در نتیجه آسیب‌پذیرترین بخش از بحران کم‌آبی است. از این‌رو مهم‌ترین مشکلی که امنیت غذایی کشور و جهان را تهدید می‌کند، کمبود منابع آب مناسب است (سواری و همکاران، ۱۴۰۰). به‌نحوی‌که نیاز به غذای بیش‌تر و محدودیت منابع آب بشر را به سمت اعمال مدیریت کم‌آبیاری سوق داده است. خشکسالی منابع آب و خاک روابط آبی خاک را تغییر می‌دهد، تعادل یونی را مختل و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)[۱] را تولید می‌کند، در نتیجه موجب آسیب رسیدن به بافت‌های گیاهی شده و تولید گیاهان را محدود می‌کند (Aslam *et al.*, 2020; Hosseinifard *et al.*, 2022).

علاوه بر این در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان که به کم‌آبی مبتلا هستند، مشکل آلودگی فلزات سنگین نیز وجود دارد. به همین دلیل در این مناطق گیاهان اغلب به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر هر دو تنش فلزات سنگین و کم آبی قرار دارند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). به عناصری که عدد اتمی آن‌ها بیش‌تر از ۲۰ و وزن مخصوص آن‌ها بیش‌تر از ۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب باشد، فلزات سنگین گفته می‌شود. از دلایل سمیت فلزات سنگین برای موجودات زنده به ایجاد تنش اکسیداتیو در نتیجه تحریک رادیکال‌های آزاد، اتصال به مولکول‌های آلی و تخریب آن‌ها، جایگزینی دیگر فلزات ضروری در رنگدانه‌ها یا آنزیم‌ها و تخریب کارکرد آن‌ها، اتصال به گروه‌های سولفیدریل در پروتئین‌ها و در نتیجه برهم زدن ساختار و کارکرد پروتئین‌ها اشاره شده است (Gavrilescu, 2022). به‌طوری‌که در چند دهه اخیر، آلودگی خاک با فلزات سنگین به‌دلیل پایداری بلندمدت و تأثیرات زیان‌بار بوم‌شناختی این عناصر، به یک بحران زیست‌محیطی تبدیل شده است. از این‌رو، معرفی گیاهان جدید و با پتانسیل عملکرد بالا که هم از نظر زراعی در شرایط تنش‌های محیطی عملکرد مناسبی داشته باشند و هم محصول تولیدی از کیفیت بالایی برخوردار باشد در دستور کار وزارت جهاد کشاورزی قرار گرفته است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷).

۲. پیشینه پژوهش

۲. ۱. پیشینه نظری

کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa* Willd گیاهی یکساله و متعلق به خانواده اسفناجیان (*Chenopodiaceae*) است که از آمریکای لاتین منشأ گرفته و با وجود ارزش غذایی بالایی که دارد در شرایطی که زمین‌ها دارای حاصل‌خیزی کم و یا دارای محدودیت هستند به‌خوبی قابل‌کشت بوده و محصول مناسب تولید می‌کند. این گیاه مقاومت زیادی در برابر طیف گسترده‌ای از تنش‌های غیرزیستی مانند سرما، شوری و خشکی از خود نشان داده است (امیریوسفی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Adolf *et al.*, 2013). کینوا به‌عنوان گیاهی مستعد و قابل‌توسعه و توصیه از نظر بوم‌شناختی (اکولوژیکی) موردتوجه ناسا قرار گرفته است، زیرا این گیاه CO_2 مازاد در اتمسفر و سفینه‌ها را جذب کرده و غذا اکسیژن و آب موردنیاز برای فضانوردان را در سفرهای درازمدت فضایی فراهم می‌کند (Aslam *et al.*, 2020). گیاه کینوا از طرف سازمان خواروبار جهانی (FAO)[۲] به‌عنوان یک راهبرد برای امنیت غذایی دنیا معرفی شده است که ضمن دارابودن

۱. Reactive Oxygen Species

۲. Food and Agriculture Organization of the United Nations

پروتئین بالا نسبت به شرایط نامساعد محیطی متحمل بوده و امکان تولید اقتصادی در زمین‌های حاشیه‌ای را خواهد داشت. کینوا در بیش‌تر خاک‌ها از شنی تارسی با اسیدیته ۴/۵ تا ۹ و شوری متوسط می‌تواند رشد کند (Sezgin & Sanlier, 2019).

هرچند پژوهش‌ها در مورد میزان مقاومت کینوا به تنش فلزات سنگین بسیار محدود است، اما بنا به گزارش‌های این گیاه قابلیت تحمل به درجات بالای خشکی دارد (Cai & Gao, 2020). بنابراین می‌تواند در اکثر زمین‌های کم‌بازده که کم‌تر گیاه زراعی قابلیت تولید در این شرایط را دارد، به‌عنوان یک گیاه استراتژیک کشت شود. از طرفی با توجه به این‌که بخش عمده مساحت ایران از نظر اقلیمی جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود، امکان استفاده از آب‌های لب‌شور بیش از پیش موردتوجه قرار گرفته است. بنابراین ازآنجایی‌که بنا به گزارش‌ها، گیاهان نمک‌دوست (هالوفیت‌ها) توانایی استخراج فلزات سنگین را دارند و گزینه مناسب‌تری نسبت به گلیکوفیت‌ها برای گیاه پالایی هستند (Cao *et al.*, 2020)، تصفیه خاک‌های آلوده با استفاده از گیاهان هالوفیت (مانند کینوا) فرصتی را برای پاکسازی خاک‌ها و استفاده از آن‌ها برای تولید محصولات فراهم می‌کند.

۲. ۲. پیشینه تجربی

در پژوهشی با بررسی اثر آسکوربیک‌اسید (ویتامین C) بر ویژگی‌های مورفولوژیک و متابولیت‌های اولیه و ثانویه در کینوا تحت سطوح مختلف تنش خشکی (رژیم‌های مختلف آبیاری شامل کنترل ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی) گزارش شد که در اثر تنش اسمزی جریان آب در اطراف سلول‌های در حال رشد کینوا کاهش می‌یابد و در نتیجه طویل‌شدن این سلول‌ها متوقف می‌شود، در این شرایط ترشح هورمون سیتوکینین از ریشه کاهش یافته و از طریق کاهش تقسیم سلول‌ها، ارتفاع گیاه کاهش می‌یابد، به‌نحوی‌که تنش اسمزی گسترش برگ، تولید خوشه، ارتفاع بوته و عملکرد کینوا را کاهش می‌دهد (Aziz *et al.*, 2020). هم‌چنین در معدود آزمایش‌هایی که اثر فلزات سنگین بر کینوا بررسی شده است. Bhargava *et al.* (2008) گونه‌های مختلف *Chenopodium* را تحت شرایط خاک فلزات سنگین موردمطالعه قرار داده و گزارش کردند که کینوا در مقایسه با به گونه‌های دیگر خانواده *Chenopodiace*، مقادیر بیش‌تری از اکثر فلزات سنگین مانند روی، کروم، نیکل و کادمیم را در برگ‌های خود تجمع می‌دهند. مطالعه پاسخ فیزیولوژیکی کینوا به غلظت‌های مختلف کروم نیز نشان داد که برگ‌های مختلف "Regalona" تا ۱ میلی‌مولار کلریدکروم (III) را تحمل می‌کند، تجمع توکوفرول را فعال می‌سازد و محتوای آمینوترانسفراز تیروزین را افزایش می‌دهد. با این‌حال، بالاترین دوزهای ۵ میلی‌مولار کروم(III) باعث ایجاد تنش اکسیداتیو، تولید پراکسید هیدروژن زیاد و افزایش محتوای پرولین می‌شود. ارزیابی تأثیرپذیری ارتفاع بوته و شاخص سبزینگی برگ علف هرز سلمه‌تره (گیاه هم‌خانواده با کینوا) نیز از آلودگی خاک با عناصر کروم و کادمیم نشان داد که آلودگی کادمیم 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).

بنابراین در مجموع می‌توان گفت که پژوهش‌ها بر گیاهان زراعی به‌منظور تولید پایدار غذا در خاک‌های مناطق گرم و خشک، آن هم در شرایطی که آلودگی خاک به‌آرامی در حال گسترش است، کم‌تر موردتوجه بوده است. لذا برای پایداری تولید غذا در خاک‌های زراعی این مناطق، انجام پژوهش‌هایی پیرامون تأثیر فلزات سنگین بر گیاهان امیدبخش و متحمل به‌تنش اسمزی، ضروری به‌نظر می‌رسد. از طرفی با درنظرگرفتن این مطلب و با توجه به

مدل‌های کاهش رطوبت خاک‌ها در دهه‌های آینده، تشدید تنش کم‌آبی در اراضی کشاورزی امری محتمل است (Tagliotti *et al.*, 2021) و تنش کم‌آبی نیز به نوبه خود ضمن افزایش اسمولیت‌ها (Xu *et al.*, 2020)، منجر به افزایش غلظت بعضی کاتیون‌ها در گیاه برای تنظیم اسمزی می‌شود و از آنجایی‌که بنا به گزارش‌ها، کینوا به طیف گسترده‌ای از تنش‌های محیطی مقاوم است و پتانسیل بالایی در تأمین بخشی از زنجیره غذایی انسانی و دامی دارد (Sezgin & Sanlier, 2019)، در این پژوهش تأثیر فلزت سنگین کادمیم، سرب، مس و روی بر رشد و دانه این گیاه در شرایط تنش خشکی موردمطالعه قرار گرفت.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش درسال۱۴۰۰ به‌صورت گلدانی در یک گلخانه تحقیقاتی واقع در منطقه صنعتی شهر ماهشهر از توابع استان خوزستان انجام شد. شهر ماهشهر با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی، براساس مقیاس طبقه‌بندی آب‌وهوایی کوبن دارای دارای آب و هوای نیمه‌خشک، گرم و خشک می‌باشد. پژوهش حاضر در قالب آزمایش فاکتوریل و بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد که فاکتور اول شامل نوع خاک در دو سطح (آلوده و غیرآلوده) و فاکتور دوم شامل تنش خشکی (رژیم‌های آبیاری) در سه سطح (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه، ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه و ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه) بودند (Aslam *et al.*, 2020). فلزات سنگین موردارزیابی در پژوهش حاضر شامل روی، مس، سرب و کادمیم بودند و میانگین درجه آلودگی برای تیمارهای حاوی خاک آلوده در آزمایش، حدود ۱۱ (درجه آلودگی خیلی زیاد) (Karimi *et al.*, 2022) مدنظر قرار گرفته شد. بر این اساس، برای تهیه نمونه خاکی با میزان آلودگی ذکرشده، از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه منابع طبیعی خوزستان نمونه‌برداری و پس از تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن (جدول ۱)، درون گلدان‌های ۳ کیلوگرمی قرار داده شد و با توجه به مقادیر اولیه فلزات موجود در خاک که در جدول (۲) نشان داده شده است، مقادیر عناصر روی، مس، سرب و کادمیم موجود در گلدان‌های حاوی تیمارهای خاک آلوده، با استفاده از نمک‌های نیتراته، به‌ترتیب به حدود ۸۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰ و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (Karimi *et al.*, 2022) رسانده شد. سپس خاک‌های آلوده تقریباً با رطوبت اشباع آبیاری و تا دو هفته رها شدند تا در حد امکان برهم‌کنش آلاینده‌های خاک تکوین پیدا کند. پس از آن در تاریخ ۲۰ دی‌ماه، تعداد ۱۰ عدد بذر کینوا رقم تیتیکاکا در هر گلدان در عمق دو سانتی‌متری خاک کاشته شد و پس از جوانه‌زدن بذرها، سه بوته سالم و قوی‌تر در هر گلدان برای ماندن انتخاب و بقیه بوته‌ها تنک گردیدند. رقم تیتیکاکا شش روز پس از کاشت و آبیاری بذور جوانه زد و ۱۶ روز پس از کاشت به مرحله سه‌برگی رسید. میزان ۵۰ درصد گلدهی آن حدود ۳۰ روز پس از کاشت و زمانی‌که ارتفاع گیاه ۲۵ سانتی‌متر بود رخ داد. گل‌آذین این رقم از نوع خوشه‌ای است. رسیدگی کامل خوشه‌های آن ۱۲۲ روز پس از کاشت بود. خوشه‌ها همگی قبل از رسیدن سبزرنگ و در زمان رسیدگی کامل، زردرنگ هستند.

لازم به ذکر و تأکید است که با توجه به این‌که یکی از اهداف اصلی در کشاورزی پایدار با محوریت اکولوژیکی، حفظ سلامت و پایداری محیط زیست است، نمونه‌های خاکی که به‌روش مصنوعی با فلزات سنگین آلوده شده بودند، پس از اتمام پژوهش، به طبیعت بازگردانده نشدند و جهت انجام پژوهش‌های آتی در زمینه آلودگی خاک، نشانه‌گذاری و در آزمایشگاه شیمی و آلودگی خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان نگهداری می‌گردند.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق نمونه (سانتی‌متر)	اسیدیته –	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	نیتروژن کل (درصد)	مواد آلی (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت خاک
۰-۳۰	۷/۳۷	۱/۴۷	۱۵۸/۹	۶/۴	۰/۲	۰/۵	۲۱/۵	۵۳/۲	۲۵/۳	لومی‌رسی

جدول ۲. مقادیر اولیه ومقادیر قابل استخراج فلزات سنگین موجود در خاک مورد آزمایش

نام فلز سنگین	مقادیر اولیه موجود در خاک آزمایش (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	مقادیر قابل استخراج DTPA (قابلیت بالای دسترسی زیستی) (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
روی	۷۵/۹	۲۰/۴
مس	۲۰/۱	۱۵/۹
سرب	۷/۷۲	۳/۵۳
کادمیم	۰/۴۳	۰/۲

فاکتور تنش خشکی در سه سطح شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه)، تنش متوسط خشکی (۶۰ درصد ظرفیت مزرعه) و تنش شدید خشکی (۳۰ درصد ظرفیت مزرعه)، از طریق محاسبه ظرفیت مزرعه[1] به‌روش وزنی، اعمال شد. برای تعیین میزان رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی از معادله (۱) (احمدی‌آذر و همکاران، ۱۳۹۴)، استفاده شد و رطوبت ظرفیت مزرعه در خاک موردنظر برابر ۳۱ درصد وزنی برآورد شد.

میزان آب موردنیاز هر گلدان از روش توزین گلدان‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین و میانگین آن به‌عنوان آب مصرفی تیمارها استفاده شد. در طول دوره رشد، هر روز کلیه گلدان‌ها با توجه به تغییرات دمای گلخانه توزین و هر گلدان در وزن تیمار مربوطه ثابت نگه داشته شد (احمدی‌آذر و همکاران، ۱۳۹۴). به‌عبارت دیگر، اعمال تنش خشکی با استفاده از وزن‌کردن گلدان‌ها به‌طوری صورت گرفت که در ابتدای آزمایش تمام گلدان‌ها از وزن مساوی برخوردار بودند و در هر بار آبیاری بسته به نوع تیمار تنش، میزان آب موردنیاز براساس رابطه (۱) محاسبه و به هر گلدان اختصاص داده شد.

$$\text{درصد رطوبت در ظرفیت زراعی} = \frac{(\text{وزن تر خاک} - \text{وزن خشک خاک})}{\text{وزن خشک خاک}} \times ۱۰۰ \qquad \text{رابطه ۱)}$$

وزن تر اندام هوایی بوته‌های انتخاب‌شده، بلافاصله پس از برداشت توسط ترازوی دیجیتال و ارتفاع بوته به‌وسیله خط‌کش اندازه‌گیری شد. سپس اندام هوایی گیاه به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد درون آون قرار گرفت و وزن خشک آن‌ها نیز اندازه‌گیری شد. هم‌چنین ریشه‌ها تمیز و شسته شده و وزن تر آن‌ها توسط ترازو تعیین شد و سپس جهت تعیین وزن خشک، ریشه‌ها توسط چاقو ریز شده و در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷۲ ساعت قرار گرفت (Khorshid *et al.*, 2020). تعیین وزن دانه (بخش خوراکی) نیز با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم، در مرحله قهوه‌ای‌شدن کامل خوشه و هنگامی‌که دانه سفت شده و به سختی توسط ناخن نصف می‌شد، صورت گرفت (Soleiman *et al.*, 2020). داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین داده‌ها به‌روش LSD[2] در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نگارش و رسم جدول‌های آماری با استفاده از برنامه‌های Word صورت پذیرفت. نمودارها نیز با استفاده از برنامه Excel رسم شدند.

۱. رطوبت ظرفیت زراعی مقدار رطوبتی است که یک خاک اشباع‌شده پس از خارج شدن آب ثقلی درخود نگه می‌دارد.

۲. Least Significant Difference

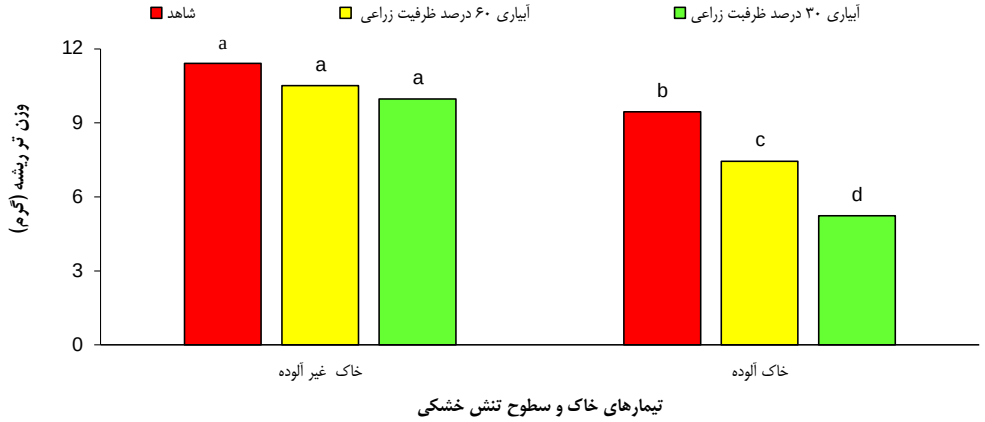
۴. یافته‌های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که وزن تر ریشه در گیاه کینوا تحت تأثیر تیمارهای آلودگی خاک و سطوح مختلف تنش خشکی قرار گرفت، به‌طوری‌که اثر ساده این تیمارها در سطح احتمال یک درصد و اثر برهم‌کنش دوگانه این تیمارها در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تیمارهای آلودگی خاک در تنش خشکی (شکل ۱) نشان داد که در هر دو تیمار خاک (خاک غیر آلوده و خاک آلوده)، با افزایش تنش خشکی، وزن تر ریشه در کینوا کاهش یافت، اما نکته قابل‌توجه این بود که در خاک‌های غیر آلوده، میزان کاهش وزن تر ریشه کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری از نظر آماری چشم‌گیر (معنی‌دار) نبوده است. در حالی‌که در خاک‌های آلوده، افزایش سطح خشکی موجب کاهش معنی‌دار وزن تر ریشه کینوا نسبت به سطح قبلی تنش شده است (شکل ۱). بیش‌ترین وزن تر ریشه کینوا در شرایط خاک غیر آلوده و عدم تنش خشکی (آبیاری معادل صد در صد ظرفیت زراعی) به‌دست آمد. به‌عبارت دیگر، آلودگی خاک به فلزات سنگین، میزان حساسیت ریشه کینوا را به سطوح مختلف تنش خشکی را افزایش داد و موجب کاهش بسیار زیاد در وزن تر آن شد.

جدول ۳. تجزیه واریانس وزن ترو خشک ریشه و اندام هوایی، ارتفاع بوته و وزن هزاردانه کینوا در شرایط آلودگی خاک و تنش خشکی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	ارتفاع بوته	وزن هزاردانه
آلودگی خاک (a)	۱	۴۷/۵۶۳**	۲/۸۵۶**	۳۳۳/۲۰۷**	۱۷۶/۶۵۱**	۲۴۷/۹۷۶**	۲/۰۰۶**
تنش خشکی (b)	۲	۱۲/۰۴۴**	۰/۶۶۸**	۴۱۲/۶۹۴**	۴۷/۹۶۶**	۱۵۴/۸۸۹**	۰/۷۷۶**
a×b	۲	۲/۹۲۵*	۰/۲۸۵**	۱۸/۴۷۲n.s	۵/۱۹۳**	۱۴/۴۹۲n.s	۰/۱۳۷*
خطای آزمایش	۱۲	۰/۴۱۲	۰/۰۳۷	۱۴/۴۱۰	۱/۵۷۰	۱۹/۶۴۷	۰/۰۴۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۱۳	۸/۲۰	۶/۴۶	۶/۷۹	۶/۴۲	۷/۱۲

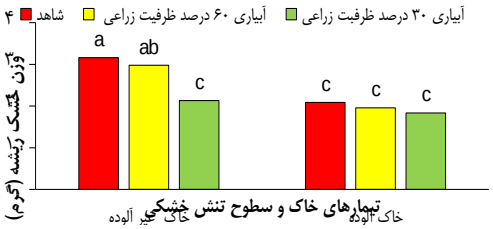
n.s، * و **: به‌ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.



شکل ۱. اثر برهم‌کنش آلودگی خاک و تنش خشکی بر وزن تر ریشه کینوا

وزن خشک ریشه کینوا تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت و هر یک از اثرات ساده آلودگی خاک و تنش خشکی، هم‌چنین اثر برهم‌کنش دوگانه این تیمارها بر این صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نکته قابل‌توجه این است که روند تأثیر خشکی بر وزن تر ریشه کینوا در خاک غیرآلوده و خاک آلوده کاملاً متفاوت بوده

است، به‌طوری‌که در خاک غیرآلوده وزن خشک ریشه تا سطح تنش متوسط خشکی (آبیاری معادل ۶۰ درصد ظرفیت زراعی)، از نظر آماری کاهش محسوسی نداشته است و پس از آن با افزایش تنش خشکی از سطح متوسط به سطح شدید (آبیاری معادل ۳۰ درصد ظرفیت زراعی)، حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است (شکل ۲) که این یافته بیانگر مقاومت نسبی ریشه کینوا به شرایط تنش خشکی در محیط عاری از فلزات سنگین می‌باشد. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، گزارش شده است که کینوا با افزایش بیش‌تر طول اندام زیرزمینی، آب و مواد غذایی را بهتر جذب می‌کنند و به این طریق اثر تنش خشکی بر کاهش رشد و وزن خشک ریشه‌را تا حدی تعدیل می‌کند (Tang *et al.*, 2021)، اما آلودگی خاک با فلزات سنگین، وزن خشک ریشه کینوا را حتی در شرایط عدم وجود تنش خشکی (آبیاری معادل ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شرایط عدم وجود آلودگی فلزات سنگین در خاک غیرآلوده کاهش داده است (شکل ۲).

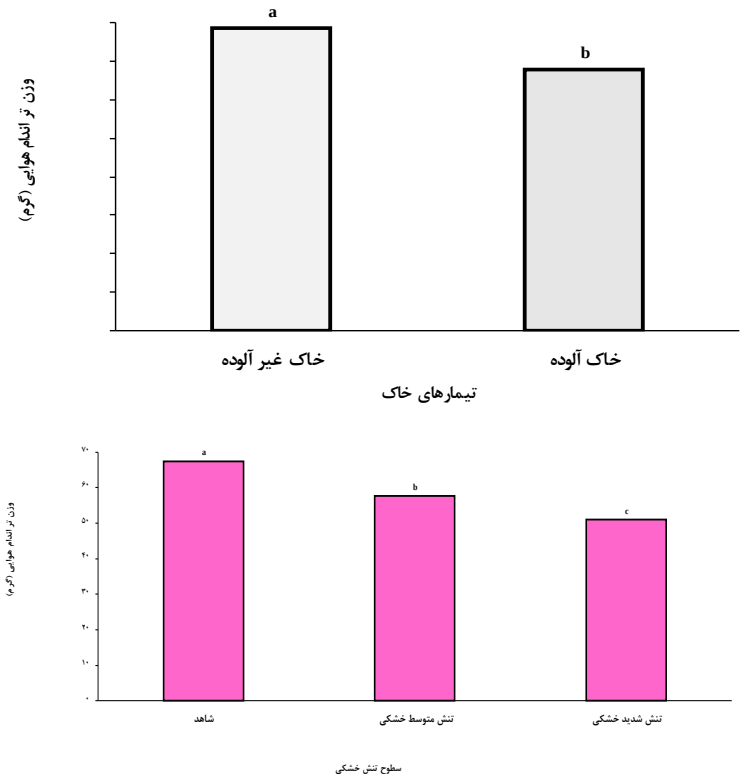


شکل ۲. اثر برهم‌کنش آلودگی خاک و تنش خشکی بر وزن خشک ریشه کینوا

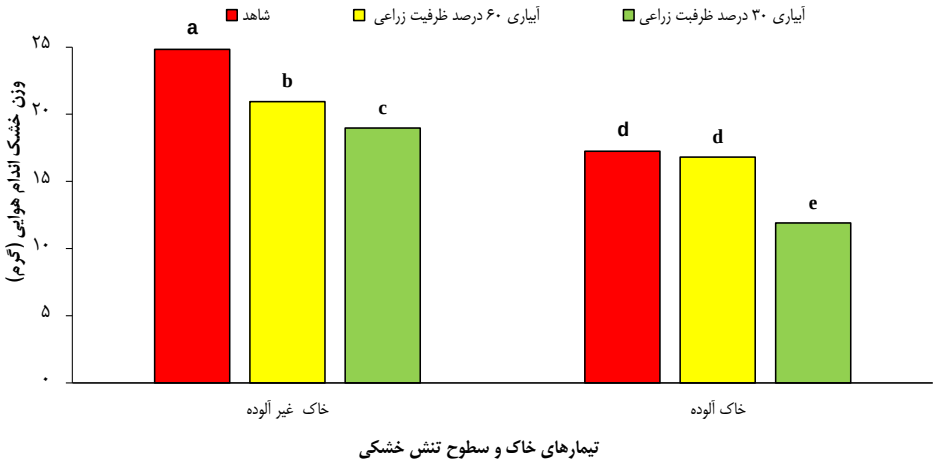
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر آلودگی خاک و سطوح تنش خشکی در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر اندام هوایی کینوا معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای خاک نشان داد که آلودگی خاک با فلزات سنگین موجب کاهش ۱۳/۷ درصد از وزن تر اندام هوایی کینوا در مقایسه با گیاهانی که در خاک غیر آلوده رشد کرده‌اند، شده است (شکل ۳- الف). نتایج پژوهش حاضر هم‌چنین در مورد تأثیر تنش خشکی بر وزن تر اندام هوایی نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی، وزن تر اندام‌هوایی به‌طور معنی‌داری در مقایسه با سطوح کم‌تر خشکی کاهش یافت (شکل ۳- ب).

اثرات ساده و برهم‌کنش تیمارهای آلودگی خاک و سطوح تنش خشکی در سطح احتمال یک درصد بر وزن خشک اندام هوایی در کینوا معنی‌دار بود (جدول ۳). به‌طوری‌که در خاک غیر آلوده، افزایش تنش خشکی از سطح بدون تنش به سطح تنش متوسط، موجب کاهش حدود ۱۵/۷ درصدی و افزایش سطح خشکی از متوسط به خشکی شدید نیز موجب کاهش ۹/۴ درصدی در وزن خشک اندام هوایی کینوا شد (شکل ۴). درحالی‌که آلودگی خاک کاهش حدود ۳۰/۵ درصدی وزن خشک اندام هوایی کینوا را در شرایط بدون تنش خشکی در مقایسه با خاک غیر آلوده با تیمار آبیاری مشابه (عدم وجود تنش خشکی) در پی داشت. لازم به ذکر است که در سطح تنش متوسط خشکی وزن خشک اندام هوایی در کینوا از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با شرایط بدون تنش خشکی در خاک آلوده نداشت، اما با افزایش تنش به سطح تنش شدید، وزن خشک اندام هوایی این گیاه در خاک آلوده دوباره کاهش معنی‌داری را نشان داد (شکل ۴). بنابراین در

مجموع می‌توان گفت که افزایش تنش خشکی، وزن خشک اندام هوایی در کینوا را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده است، اما درصد و نسبت این کاهش در خاک آلوده به فلزات سنگین و در تنش خشکی شدید به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از خاک غیرآلوده بود.

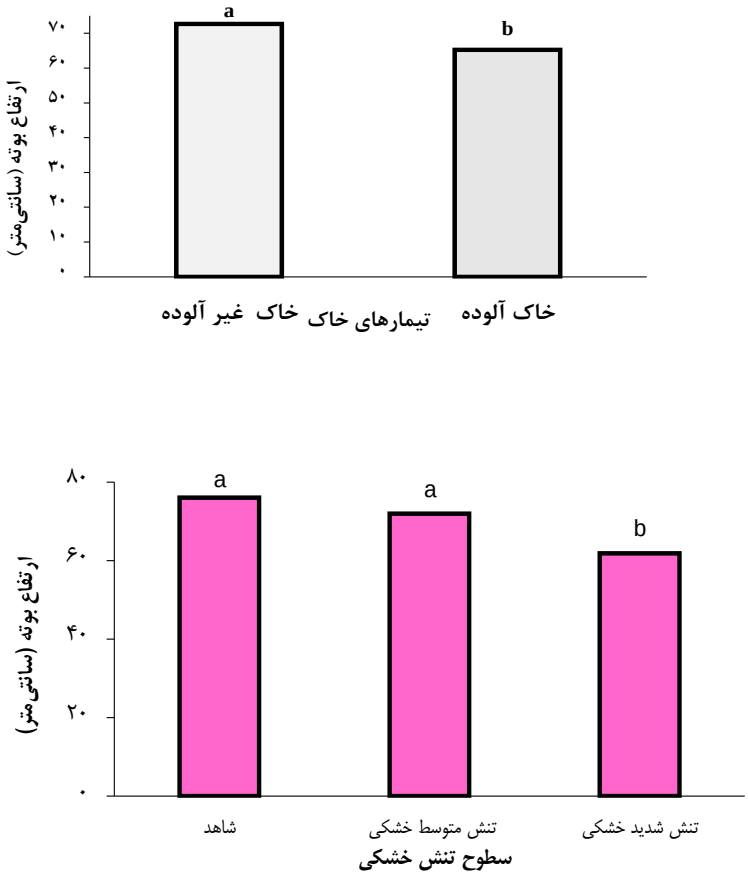


شکل ۳. (الف) و (ب) به‌ترتیب اثر آلودگی خاک و سطوح خشکی بر وزن تر اندام‌های هوایی کینوا



شکل ۴. اثر برهم‌کنش آلودگی خاک و تنش خشکی بر وزن خشک اندام‌هوایی کینوا

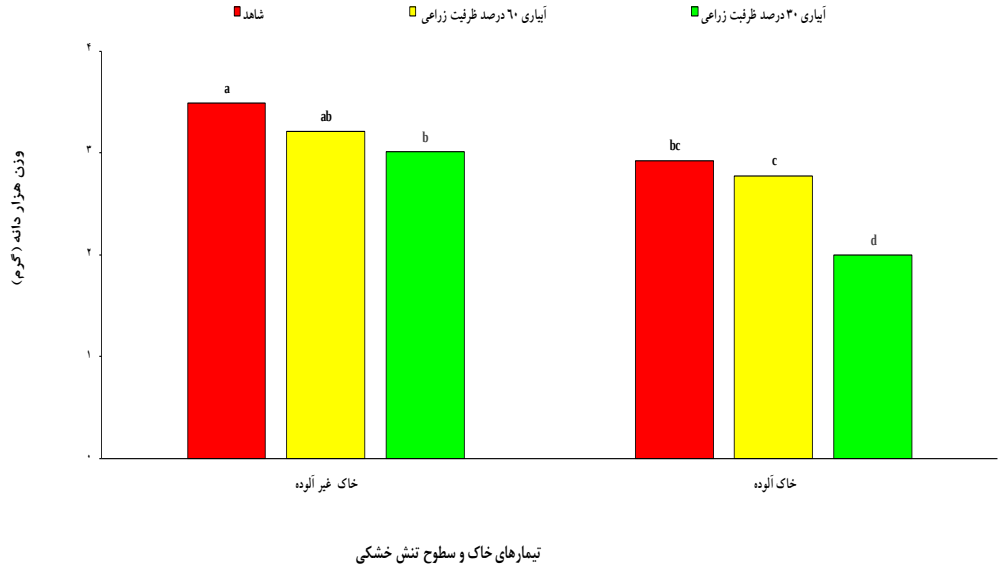
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر آلودگی خاک و تنش خشکی در سطح احتمال یک درصد بر ارتفاع بوته کینوا معنی‌دار بود، اما اثر متقابل این تیمارها بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار آلودگی خاک با فلزات سنگین موجب کاهش ۱۰/۲ درصد از ارتفاع بوته کینوا در مقایسه با رشد این گیاه در شرایط خاک غیرآلوده شده است (شکل ۵- الف). نتایج پژوهش حاضر هم‌چنین نشان داد که تنش متوسط خشکی موجب تغییر معنی‌داری در ارتفاع بوته کینوا در مقایسه با شرایط بدون تنش اسمزی نشده است اما با افزایش خشکی به‌سطح تنش شدید، میزان ارتفاع بوته در کینوا ۱۸/۶ درصد در مقایسه با تیمار شاهد خشکی کاهش یافت که این مقدار از نظر آماری نیز معنی‌دار بود (شکل ۵- ب). به‌عبارت دیگر، نتایج نشان داده است که کینوا تا سطح تنش متوسط خشکی به کاهش ارتفاع بوته مقاوم بوده اما در سطح تنش شدید خشکی ارتفاع بوته این گیاه کاهش معنی‌داری را تجربه کرده است.



شکل ۵. اثر آلودگی خاک. (الف) و سطوح خشکی، (ب) بر ارتفاع بوته کینوا

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول۳)، مشخص شد که وزن هزاردانه در کینوا به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای آلودگی خاک و سطوح خشکی قرار گرفته است. به‌طوری‌که اثرات ساده این تیمارها در سطح احتمال یک درصد و اثر برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر وزن دانه کینوا معنی‌دار بوده است. نکته قابل‌توجه این بود که هم در خاک غیرآلوده و هم در خاک آلوده، وزن دانه کینوا تحت تأثیر تنش خشکی متوسط،

اختلاف معنی‌داری با شرایط بدون تنش خشکی نداشت و پس از آن با افزایش خشکی به سطح تنش شدید، وزن هزاردانه کینوا در مقایسه با شرایط عدم وجود تنش خشکی در هر دو تیمار خاک غیرآلوده و آلوده، به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که البته درصد کاهش وزن دانه کینوا تحت تأثیر تیمار تنش شدید خشکی، در خاک آلوده به مراتب بیش‌تر از خاک غیرآلوده بوده است. به‌طوری‌که در مجموع بیش‌ترین وزن هزاردانه کینوا (۳/۴۸ گرم) در شرایط خاک غیرآلوده و تیمار عدم وجود تنش خشکی (شاهد خشکی) و کم‌ترین مقدار وزن هزاردانه این گیاه (۲ گرم) نیز در شرایط خاک آلوده با تیمار تنش شدید خشکی مشاهده شد (شکل ۶). بنابراین نتایج پژوهش حاضر نشانگر حساسیت وزن هزاردانه کینوا به آلودگی خاک با فلزات سنگین و در عین‌حال مقاومت نسبی این گیاه به کاهش وزن هزاردانه خود در شرایط تنش متوسط خشکی بوده است.



شکل ۶. اثر برهم‌کنش آلودگی خاک و تنش خشکی بر وزن هزاردانه کینوا

۵. بحث

نتایج مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که فشار ریشه‌ای گیاهان زراعی بین ۰/۲۴ تا ۱/۴۵ مگاپاسکال است و چنانچه فشار ریشه‌ای گیاه کم‌تر از مقاومت مکانیکی خاک باشد، جذب آب و مواد غذایی توسط ریشه کاهش یافته و این موضوع کاهش وزن تر ریشه را به‌همراه دارد (Hinojosa *et al.*, 2018). بر این اساس کاهش وزن تر ریشه تحت تأثیر تنش خشکی، به افزایش مقاومت مکانیکی خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی گیاه در شرایط تنش نسبت داده شده است (Podar & Frans, 2021). بنابراین بخشی از کاهش شدید وزن تر ریشه کینوا تحت تأثیر تنش هم‌زمان خشکی و فلزات سنگین در این مطالعه می‌تواند به‌دلیل افزایش مقاومت مکانیکی خاک به‌ویژه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین باشد.

ریشه‌ها به‌عنوان سطوح اصلی جذب‌کننده آب و مواد غذایی تأثیر بسیار زیادی در جذب آب و املاح گوناگون دارند. بنابراین عوامل مختلف محیطی از طریق تأثیر بر ریشه، رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Du *et al.*, 2020). تنش

فلزات سنگین از جمله مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده رشد ریشه گزارش شده است که از طریق کاهش سطح و قدرت جذب آب، وزن ریشه و رشد گیاه را کاهش می‌دهند (Aghili *et al.*, 2009). از طرفی عدم توسعه و گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای باعث تغییر در ساختار غشای سلولی و کاهش محتوای آب می‌شود که این امر فرایندهای فیزیولوژیکی مانند تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش وزن تر ریشه می‌شود (Hassan *et al.*, 2021). بنابراین در مجموع به‌نظر می‌رسد که برهم‌کنش تنش خشکی و فلزات سنگین موجب افزایش مقاومت مکانیکی خاک و تضعیف سیستم ریشه‌ای کینوا شده و این عوامل از طریق کاهش قدرت جذب آب، منجر به کاهش وزن تر ریشه در این گیاه شده‌اند.

Aslam *et al.* (2020) با بررسی اثر سطوح خشکی بر مرحله رشد گیاهچه‌ای کینوا گزارش کردند که در شرایط تنش اسمزی، دسترسی بذر به رطوبت کاهش می‌یابد و در نتیجه عمل هیدرولیز مواد ذخیره‌ای، جهت تولید بافت‌های گیاهچه‌ای با مشکل مواجه شده و وزن خشک ریشه این گیاه کاهش می‌یابد. Du *et al.* (2020) نیز نشان دادند که کینوا در شرایط تنش خشکی تولید ریشه‌چه‌های ظریف و نازک و البته طویل می‌کند. این پژوهش‌گران گزارش کردند که افزایش طول ریشه‌چه در گیاه کینوا تحت شرایط تنش اسمزی، موجب تأمین آب توسط بخش وسیع‌تری از اندام زیرزمینی برای اندام هوایی و در نتیجه تحمل بیش‌تر خشکی و کاهش اثرات تنش بر وزن خشک این گیاه می‌شود. در مورد اثر فلزات سنگین بر ریشه گیاهان زراعی گزارش شده است که از دیدگاه فیزیولوژی، فلزات سنگین از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی و هم‌چنین رشد طولی سلول‌های ریشه جلوگیری می‌کنند که این امر موجب کاهش وزن خشک ریشه می‌شود (Bhat *et al.*, 2019). از طرف دیگر، گزارش شده است که غلظت بالای فلزات سنگین در محیط ریشه، باعث تمایز زودرس و چوبی‌شدن دیواره‌های سلولی واقع در منطقه رشد طولی ریشه می‌شوند و از این طریق حجم و طول ریشه را به‌شدت کاهش می‌دهند (AbdElgawad *et al.*, 2020). در پژوهش حاضر نیز به‌نظر می‌رسد وجود هم‌زمان آلودگی خاک و خشکی به‌عنوان دو عامل تنش‌زا در محیط رشد ریشه، باعث زودرسی در این گیاه شده است و این عوامل وزن خشک ریشه را به‌شدت کاهش داده اند.

اساساً وزن تر، به‌عنوان نماد عملکرد رشد گیاهی در نظر گرفته می‌شود و هر عاملی که به نوعی اثر مهاری بر رشد داشته باشد، باعث کاهش وزن گیاه می‌شود (Tagliotti *et al.*, 2021). فلزات سنگین با اثر منفی بر رشد و فتوسنتز به‌طور غیرمستقیم بیوماس گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (AbdElgawad *et al.*, 2020). علت اصلی کاهش در وزن اندام هوایی گیاهان تحت تأثیر آلودگی خاک با فلزات سنگین، کاهش رشد ریشه در نتیجه عدم توسعه مناسب سلول‌های ریشه و در نتیجه کاهش انتقال آب و مواد غذایی به بخش‌های هوایی گیاه گزارش شده است (Bhat *et al.*, 2019). علاوه بر این، انتقال فلزات سنگین به بخش‌های هوایی گیاه با اثر منفی بر متابولیسم سلولی اندام‌های هوایی، منجر به کاهش وزن تر گیاه خواهد شد. کاهش وزن تر اندام هوایی گیاه می‌تواند به مهار جذب آب توسط ریشه و انتقال آن به بخش‌های هوایی در اثر سمیت فلزات سنگین نیز مرتبط باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). از طرفی فلزات سنگین با مداخله در فرایندهای متابولیکی گیاهان می‌تواند باعث مهار مسیرهای آنابولیسم و تولید زیست‌توده گیاه شود (AbdElgawad *et al.*, 2020).

براساس نتایج مطالعات انجام‌شده درباره تأثیر تنش خشکی بر خصوصیات ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی محصولات مختلف کشاورزی دو عامل کاهش سطح برگ و افزایش نسبت ریشه به ساقه را می‌توان از واکنش‌های مهم گیاه به تنش خشکی دانست، به‌طوری‌که در شرایط کمبود آب، ریشه گیاه به‌منظور یافتن آب بیش‌تر دچار کشیدگی سلولی شده و در عمق خاک نفوذ پیدا خواهد کرد (Lukic *et al.*, 2020). اما در نهایت جذب آب ناکافی و عدم انتقال آب و مواد غذایی

به بخش‌های هوایی گیاه به میزان لازم، موجب کاهش سطح برگ و رشد محدود بخش‌های هوایی گیاه خواهد شد و سرانجام این شرایط کاهش وزن اندام هوایی را در بر خواهد داشت (Hinojosa *et al.*, 2018). در پژوهش حاضر نیز به‌نظر می‌رسد آلودگی خاک با فلزات سنگین و تنش خشکی موجب کاهش جذب آب و مواد غذایی از ریشه و درنتیجه محدودیت انتقال آب به اندام هوایی کینوا شده‌اند و وزن تر اندام هوایی این گیاه را به‌طور معنی‌داری کاهش داده‌اند.

هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر، تأیید حساس‌بودن برگ و اندام هوایی به کاهش رطوبت خاک در کینوا صورت گرفته است، به‌طوری‌که بنا به گزارش Alandia *et al.* (2016) در شرایط تنش خشکی، ضعیف شدن سیستم ریشه‌ای در کینوا درنهایت منجر به کاهش سطح، تعداد برگ و هم‌چنین کاهش وزن اندام هوایی در این گیاه شده است. به‌طور کلی محدودشدن سطح برگ و کاهش قطر ساقه در گیاهان زراعی تحت تأثیر تنش خشکی به کاهش تقسیم و توسعه سلولی نسبت داده شده است (Du *et al.*, 2018). درنتیجه رکود پتانسیل آبی خاک، به‌عنوان علت اصلی روند نزولی تولید در برگ و کاهش وزن خشک اندام هوایی معرفی شده است. هم‌چنین گزارش شده است که با افزایش خشکی در گیاهی مانند کینوا که به تنش اسمزی مقاوم است، از رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی کاسته می‌شود، اما رشد اندام‌های زیرزمینی کم‌تر از رشد اندام‌های هوایی کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، در این گیاهان تحت شرایط تنش خشکی، اختصاص کربوهیدرات‌ها به ریشه نسبت به ساقه اولویت دارد و به همین دلیل وزن ماده خشک به نسبت بیش‌تری کاهش می‌یابد (Hinojosa *et al.*, 2018).

از طرفی بنا به گزارش‌های پژوهش‌گران، آلودگی خاک با فلزات سنگین، پتانسیل جذب آب توسط ریشه گیاه را به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، با شدت بیش‌تری کاهش می‌دهد (Bilal *et al.*, 2018). در مورد تأثیر تجمع فلزات سنگین در محیط رشد گیاه گزارش شده است که فلزات سنگین باعث بازدارندگی رشد ساقه و ریشه شده و با از بین‌بردن ساختار بهینه گرانا موجب کاهش سنتز کلروفیل و اختلال در جذب عناصر غذایی، تنفس و فتوسنتز، روابط آبی گیاه و در نهایت باعث کاهش تجمع ماده خشک در گیاه می‌شود (AbdElgawad *et al.*, 2020). در پژوهش حاضر نیز احتمالاً تنش هم‌زمان فلزات سنگین و خشکی، از طریق کاهش پتانسیل آب در خاک موجب محدودشدن توسعه سلول‌های ریشه کینوا شده و کاهش انتقال آب به اندام هوایی، رشد ساقه، میزان فتوسنتز و در نتیجه تولید ماده خشک را در این گیاه کاهش داده است.

کوتاه‌قدی از نشانه‌های اصلی مسمومیت گیاه به‌وسیله فلزات سنگین گزارش شده است. به‌طوری‌که در خاک‌های کشاورزی حاوی غلظت‌های بسیار زیاد عناصر سنگین، رشد گیاهان زراعی به‌شدت کاهش می‌یابد و گیاهان کوتاه‌قدتر و هم‌چنین دارای ریشه‌های کوتاه و قهوه‌ای رنگ می‌شوند که در نهایت ممکن است به مرگ گیاه منجر شود (Tang *et al.*, 2019). بررسی‌ها نشان می‌دهد که فلزات سنگین با اثرگذاری منفی بر تقسیم و رشد سلول‌ها، تقسیم سلولی منطقه مریستمی و تنظیم رشدونمو گیاهان، باعث کاهش تعداد گره‌ها و فاصله بین آن‌ها می‌شوند و به‌دنبال آن ارتفاع گیاه کاهش می‌یابد (AbdElgawad *et al.*, 2020). بر این اساس نشان داده شده است که تجمع فلزات سنگین در گیاه موجب کاهش فعالیت هورمون سیتوکنین می‌شود که تأثیر به‌سزایی در تکثیر سلول و رشد طولی گیاه دارد. هم‌چنین گزارش شده است که وقتی فلزات سنگین به قسمت هوایی گیاه منتقل می‌شوند، باعث اختلال در متابولیسم سلول و کاهش ارتفاع بوته می‌گردند (Sharma, 2021). کاهش رشد ارتفاع بوته تحت تأثیر وجود فلزات سنگین در گیاه، به ازبین‌رفتن آماس سلول و کاهش در فعالیت‌های میتوزی و یا مهار طویل‌شدن سلول نیز نسبت داده شده است و گزارش شده که وجود فلزات سنگین در سلول‌های گیاهی می‌تواند دیواره سلولی و به‌ویژه لایه میانی دیواره سلولی را که در تقسیم‌شدن سلول نقش دارد، تحت تأثیر قرار دهد (Tang *et al.*, 2019).

Stoleru *et al.* (2019) با بررسی اثر تنش اسمزی ناشی از نمک طعام بر جوانه‌زنی و رشد ارقام کینوا اظهار کردند که در شرایط تنش شدید اسمزی، ارتفاع گیاه در ارقام متحمل کینوا با کاهش کم‌تری مواجه می‌شود. Cai *et al.* (2020) نیز گزارش کردند که در شرایط تنش، میزان تجمع ماده خشک در بافت گیاهچه اکثر ارقام کینوا افزایش می‌یابد که این امر را دلیل بر مقاومت نسبی این گیاه به تنش خشکی معرفی کردند. این پژوهش‌گران هم‌چنین اظهار کردند، ارقامی که بتوانند در شرایط تنش رطوبتی طول ساقه خود را افزایش دهند یا افت طول ساقه در آن‌ها با افزایش تنش کم باشد، احتمالاً ارقام متحمل‌تری در برابر تنش اسمزی به‌شمار می‌آیند. با توجه به مطالب ذکرشده در مجموع به‌نظر می‌رسد سطح متوسط خشکی برای گیاه کینوا از نظر حفظ ارتفاع بوته قابل‌تحمل بوده است و تنش آلودگی با فلزات سنگین با تأثیر منفی بر آماس سلولی و هم‌چنین جلوگیری از طویل‌شدن سلول‌های ساقه، تأثیر شدیدی بر کاهش ارتفاع بوته در کینوا داشته است.

همراستا با نتایج پژوهش حاضر، Cocozza *et al.* (2013) نیز مقاومت نسبی کینوا به کاهش وزن هزاردانه، تحت تأثیر سطوح ملایم تنش خشکی را گزارش کرده‌اند. این پژوهش‌گران هم‌چنین کاهش عملکرد کینوا در اثر سطوح بالای تنش خشکی را به کاهش تعداد و و وزن دانه کینوا در شرایط تنش شدید اسمزی نسبت داده و این موضوع را با مرگ‌ومیر دانه‌های گرده، در اثر افزایش آبسیسیک‌اسید در ارتباط دانسته‌اند. در پژوهشی دیگر، علت کاهش تعداد و وزن دانه در کینوا تحت شرایط تنش خشکی، کاهش منابع غذایی قابل دسترس برای کینوا و درنهایت کاهش تولیدات فتوسنتزی این گیاه در سطوح بالای خشکی بیان شده است (Gamez *et al.*, 2020). به‌طورکلی کاهش وزن دانه و تعداد دانه در واحد سطح تحت تأثیر تنش کم‌آبی در گیاه کینوا، نوعی مکانیسم سازگاری معرفی شده است که در جهت تنظیم تعداد مقصدهای فیزیولوژیکی با میزان تولید مواد پرورده رخ می‌دهد (Cocozza *et al.*, 2013).

در مورد تأثیر تنش فلزات سنگین بر وزن دانه گیاهان زراعی نیز گزارش شده است که وجود این عناصر در بافت‌های گیاهی، از طریق جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های مؤثر در بیوسنتز کلروفیل، موجب کاهش سنتز کلروفیل می‌گردند و با ایجاد اختلال در فعالیت آنزیم‌های مؤثر در چرخه تثبیت دی‌اکسیدکربن، اثر مخرب بر واکنش‌های وابسته به نور و مستقل از نور و ممانعت از فعالیت آنزیم روبیسکو، تثبیت دی‌اکسیدکربن و فتوسنتز را در گیاه کاهش می‌دهند (Taie *et al.*, 2019). این عوامل در مجموع باعث کاهش تولید ماده پرورده، اختلال در روند پرشدن دانه و درنتیجه عدم توسعه مناسب دانه‌ها و کاهش وزن آن‌ها می‌شود (Soliman *et al.*, 2020). بنابراین در مجموع به‌نظر می‌رسد که در پژوهش حاضر نیز وجود هم‌زمان تنش شدید خشکی و آلودگی خاک با فلزات سنگین از طریق ایجاد اختلال در تولید مواد پرورده و اختصاص مناسب آن به دانه، موجب کاهش وزن هزاردانه در گیاه کینوا شده است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که اکثر ویژگی‌های رشدی و هم‌چنین وزن هزاردانه کینوا که نمودی از عملکرد گیاه است، در خاک غیرآلوده، تحت تنش متوسط خشکی (آبیاری معادل ۶۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه)، تفاوت معنی‌داری با شرایط بدون تنش خشکی نداشت. بنابراین، در راستای دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار، می‌توان در شرایط کمبود آب، از طریق زراعت کینوا به‌روش کم‌آبیاری اقدام به تولید غذای مناسب و با کیفت نمود. نتایج هم‌چنین نشان داد که گیاه کینوا در یک خاک دارای آلودگی شدید از نظر فلزات سنگین توانسته، حتی تحت تنش خشکی شدید (تیمار آبیاری ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه) نیز دوره رشد خود را کامل کرده و تولید بذر کند. مجموع این عوامل نشان می‌دهد که گیاه کینوا تاب‌آوری بالایی به شرایط تنش‌های شدید و هم‌زمان محیطی دارد. درمجموع، نتایج این بررسی نشان داد که با وجود آن‌که تنش هم‌زمان فلزات سنگین و خشکی

تأثیر منفی بر ویژگی‌های مرفولوژی، رشدی و وزن دانه کینوا داشت، اما با توجه به این‌که وزن دانه به‌عنوان شاخص عملکرد گیاه، در سطح تنش متوسط خشکی کاهش معنی‌داری نداشته است به‌نظر می‌رسد گیاه کینوا توانسته تاحد زیادی از طریق حفظ عملکرد سیستم ریشه در انتقال آب به بخش‌های فتوسنتزکننده، مقاومت نسبی خود در برابر تنش اسمزی ایجادشده ناشی از وجود خشکی و فلزات سنگین در محیط ریشه را حفظ کند. بنابراین با توجه به نتایج این پژوهش، کشت گیاه کینوا به‌عنوان گیاهی امیدبخش که هم از نظر زراعی عملکرد قابل‌قبولی داشته باشد و هم محصول تولیدی از کیفیت بالایی برخوردار باشد، در خاک‌های دارای محدودیت آبی مشابه قابل‌توصیه است.

۷. تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از حمایت‌های اساتید بزرگوار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان و گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد که برای اجرای طرح مذکور یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

احمدی‌آذر، فرزاد؛ حسنلو، طاهره؛ ایمانی، علی و فیضی اصل، ولی (۱۳۹۴). تنش خشکی و کاربرد زئولیت معدنی بر رشد و برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه پنیرک (*Malva sylvestris*). *پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*. ۲۸ (۳)، ۴۵۹-۴۷۴.

امیریوسفی، مهدی، تدین، محمودرضا و حسینی فرد، مرجان سادات (۱۴۰۱). تأثیر کودهای زیستی نیتروژنه و فسفره بر برخی صفات جوانه‌زنی بذر دو رقم کینوا تحت تنش شوری. *مهندسی اکوسیستم بیابان*. ۸ (۲۴)، ۷۹-۹۴. doi: 10.22052/deej.2018.7.24.49

حسینی، یاسر؛ رمضانی مقدم، جواد؛ نیک‌پور، محمدرضا و عبدلی، عطیه (۱۳۹۷). ارزیابی توابع جذب آب در شرایط تنش هم‌زمان خشکی و شوری در گیاه گوجه‌فرنگی مینیاتوری. *پژوهش آب در کشاورزی*. ۳۲ (۲)، ۲۴۷-۲۶۵. doi: 10.22092/jwra.2018.116969

سواری، مسلم؛ برفی‌زاده، لیلا و اسدی، زینب (۱۴۰۰). آثار سرمایهٔ اجتماعی بر دستیابی به امنیت غذایی در شرایط خشکسالی نمونهٔ پژوهش: سکونت گاه های روستایی شهرستان دورود. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. ۳۲ (۴)، ۱-۲۸. doi: 10.22108/gep.2021.127786.1405

محمودی، سهراب؛ سیاری، محمدحسن؛ گلستانی فر، فرزانه؛ محرابی، پگاه و ابوالحسنی، حکیمه (۱۳۹۴، شهریور). تأثیرپذیری ارتفاع و شاخص سبزینگی برگ علف هرز سلمه‌تره (*Chenopodium album* L.) در شرایط آلودگی خاک با عناصر کروم و کادمیم. *ششمین همایش علوم علف‌های هرز ایران*، بیرجند، ایران.

References

AbdElgawad, Z., Gaurav, A., Hamed, B., Gerrit, H., Wael, W., Mohammed, A. M.; Asard, H., & Abuelsoud, W. (2020). Maize roots and shoots show distinct profiles of oxidative stress and antioxidant defense under heavy metal toxicity. *Environmental Pollution, 258*(7), 113705. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113705.

Adolf, V. I., Jacobsen, S. E., & Shabala, S. (2013). Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environmental and Experimental Botany, 92*, 43-54

https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.004.

Aghili, F., Khoshgoftarmanesh, A. H., Afyuni, M., & Schulin, R. (2009). Health risks of heavy metals through consumption of greenhouse vegetables grown in central Iran. *Human and Ecological Risk Assessment*. 15: 999-1015. https://doi.org/10.1080/10807030903153337.

Ahmadi Azar, F., Hassanlou, T., Imani, A. & Faizi Asl, V. (2014). Drought stress and application of mineral zeolite on the growth and some physiological parameters of *Malva sylvestris*. *Plant research*, 28(3), 459-474. (In Persian).

Alandia, G., Jacobsen, S.-E., Kyvsgaard, N. C., Condori, B., & Liu, F. (2016). Nitrogen sustains seed yield of quinoa under intermediate drought. *Journal of Agronomy and Crop Science, 202*(4), 281-291. https://doi.org/10.1111/jac.12155.

Amiryousefi, M., Tadayon, M. R., & Hoseinifard, M. S. (2022). Effect of Nitrogen and Phosphorus Bio Fertilizers on Some Seed Germination Traits of Two Cultivars of Quinoa under Salinity Stress. *Desert Ecosystem Engineering*, *8*(24), 79-94. https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.24.49. (In Persian).

Aslam, M. U., Raza, M. A., Saleem, S., Waqas, M. F., Iqbal, M., Ahmad, R. & Haider, I. (2020). Improving strategic growth stage-based drought tolerance in quinoa by Rhizobacterial Inoculation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1–16. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1744634.

Aziz, A., Akram, N. A., & Ashraf M. (2018). Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*.) plants under water deficit regimes. *Plant Physiology and Biochemistry*, *123*, 192-203. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.004.

Bhargava, A., Shukla, S., Srivastava, J., Singh, N., & Ohri, D. (2008). *Chenopodium*: a prospective plant for phytoextraction. *Acta Physiologiae Plantarum*, *30*(1), 111-120. https://doi.org/10.1007/s11738-007-0097-3.

Bhat, J., Akhter, S. M., Singh, P., Navadagi, B., Tripathi, D., Dash, K., Solanke, U., Sonah, H., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*. *8*(3), 71-82. https://doi.org/10.3390/plants8030071.

Bilal, S., Shahzad, R., Imran, M., Jan, R., Kim, K., & Lee, I. (2020). Synergistic association of endophytic fungi enhances Glycine max L. resilience to combined abiotic stresses: Heavy metals, high temperature and drought stress. *Industrial Crops and Products, 143*(7), 111931. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111931.

Cai, Z. Q., & Gao, Q. (2020). Comparative physiological and biochemical mechanisms of salt tolerance in five contrasting highland quinoa cultivars. *Plant Biology*, *20*(1), 9-24. https://doi.org/10.1186/s12870-020-2279-8.

Cao, Y., Zou, L., Li, W., Song, Y., Zhao, G., & Hu, Y. (2020). Dietary quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) polysaccharides ameliorate high-fat diet-induced hyperlipidemia and modulate gut microbiota. *International Journal of Biological Macromolecules, 163,* 55-65. https://doi.org/ 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.241.

Cocozza, C., Pulvento, C., Lavini, A., Riccardi, M., d'Andria, R., & Tognetti, R. (2012). Effects of increasing salinity stress and decreasing water availability on ecophysiological traits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grown in a Mediterranean-type agroecosystem. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *199*(4), 229-240. https://doi.org/10.1111/jac.12012.

Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao, X., Zhang, W., Zhang, B., & Xie, F. (2020). Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, *146*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.11.003.

Gavrilescu, M. (2022). Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Current Opinion in Biotechnology, 74*, 21-31. https://doi.org/0.1016/j.copbio.2021.10.024.

Hassan, A., Khan, A., Kiyani, A., Mirza, C., Butt, T. A., Barros, R., Ali, B., Iqbal, M., & Yousef, S. (2021). Ornamental plants for the phytoremediation of heavy metals: Present knowledge and future perspectives. *Environmental Research*, *195*(22), 48-56. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110780.

Hinojosa, L., Gonzalez, J., Barrios-Masias, F., Fuentes, F., & Murphy, K. (2018). Quinoa abiotic stress responses: A review. Plants, 7(4), 106-138. https://doi.org/10.3390/plants7040106.

Hosseini, Y., Ramezani Moghadam, J., Nikpour, M. R., & Abdoli, A. (2017). Evaluation of water absorption functions under simultaneous drought and salinity stress conditions in tomato plants. *Journal of Water Research in Agriculture*, *32*(2), 247-265. (In Persian).

Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5186.

Karimi, H., Mahdavi, S., & Asgari Lajayer, B. (2022). Insights on the bioremediation technologies for pesticide-contaminated soils. *Environ Geochem Health*, *44*, 1329-1354. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01081-z.

Khurshid, A. M., Asadi, A., & Hatami, A. (2020). Effect of drought stress on sugar beet breeding genotypes under greenhouse conditions. *Journal of Crop Breeding*, *12*(34), 83-92. https://doi.org/10.29252/jcb.12.34.83.

Lukic, N., Kukavica, B., Davidović-Plavšić, B., Hasanagić, D., & Walter J. (2020). Plant stress memory is linked to high levels of anti-oxidative enzymes over several weeks. *Environmental and Experimental Botany*, 104166. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104166.

Mahmoudi, M., Sayari, M. M., Golestanifar, F., Mehrabi, P., & Abolhasani, H. (2014, September). *Effect of height and leaf greenness index of salma tere weed (Chenopodium album L.) in conditions of soil pollution with chromium and cadmium elements*. 6th Iran Weed Science Conference, Birjand, Iran. (In Persian).

Podar, D., & Frans, J. M. (2021). The role of roots and rhizosphere in providing tolerance to toxic metals and metalloids. Plant, *Cell & Environment*, *45*(3), 719-736. https://doi.org/10.1111/pce.14188.

Savari, M., Barfizdeh, L., & Asadi, Z. (2021). The effects of social capital on achieving food security in drought conditions. Research sample: rural settlements of Durood city. *Quarterly Journal of Geography and Environmental Planning*, *32*, 1-28. (In Persian).

Sezgin, S. A., & Sanlier N. (2019). New generation plant for the conventional cuisine: quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Trends in Food Science and Technology*, *86*, 51-58. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.039.

Sharma, P. (2021). Efficiency of bacteria and bacterial assisted phytoremediation of heavy metals: *An update. Bioresource Technology*, *328*, 18-26. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124835.

Soliman, M. M., El- Deriny, D. S. S., Ibrahim, H., Zakaria, Y., & Ahmed, M. (2021). Suppression of root- kot nematode Meloidogyne incognitaon tomato plants using the nematode trapping fungus Arthrobotrys oligospora Fresenius. *Journal of Applied Microbiology*, *131*(5), 2402-2415. https://doi.org/10.1111/jam.15101.

Stoleru, V., Slabu, C., Vitanescu, M., Peres, C., Cojocaru, A., Covasa M., & Mihalache G. (2019). Tolerance of three quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd.) to salinity and alkalinity stress during germination stage. *Agronomy*, *9*(6), 287-301. https://doi.org/10.3390/agronomy9060287.

Tagliotti, M. E., Deperi, S. I., Bedogni, M. C., & Huarte, M. (2021). Genome- wide association

analysis of agronomical and physiological traits linked to drought tolerance in a diverse potatoes Solanum tuberosum panel. *Plant Breeding*, *140*(4), 654-664. https://doi.org/10.1111/pbr.12938.

Taie, H. A. A., Seif El-Yazal, M. A., & Ahmed, S. M. A. (2019). Polyamines modulate growth, antioxidant activity, and genomic DNA in heavy metal–stressed wheat plant. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 22338-22350. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05555-7.

Tang, D., Wei, F., Qin, S., Khan, A., Kashif, M. H., & Zhou, R. (2019). Polyethylene glycol induced drought stress strongly influences seed germination root morphology and cytoplasm of different kenaf genotypes. *Industrial Crops and Products*, *137*, 180-186. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.019.

Van Zanten, H. H. E., Van Ittersum, M. K., & De Boer, I. J. M. (2019). The role of farm animals in a circular food system. *Global Food Security*, *21*, 18-22. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.06.