Publisher: Soil Science Society of Iran

*Journal of Soil Research*

*(Soil and Water Sci.)*

https:// srjournal.areeo.ir/

# The Effect of Different Salinity Levels on Cadmium Uptake and Phytoremediation Capacity in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)

Siros Sadeghi[a*]

[a] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

## Article Info

**Article Type**
Research Article

**Received**
October 18, 2025
**Revised**
January 23, 2026
**Accepted**
January 24, 2026
**Published online**
March 16, 2026

**Keywords**
bioremediation,
environment,
hyperaccumulator plants,
pollution,
soil remediation

***Corresponding author's email**
sirossadeghi@gmail.com

## Extended Abstract

**Background and Objectives:** Soil contamination with heavy metals, particularly cadmium (Cd), poses serious threats to ecosystem health and food safety. Phytoremediation using salt-tolerant crops offers a sustainable approach for remediating contaminated soils in arid and semi-arid regions where salinization often accompanies metal pollution. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) has gained attention for its remarkable tolerance to abiotic stresses, including salinity and heavy metals. This study aimed to: (1) evaluate the interactive effects of Cd contamination and soil salinity on Cd uptake and accumulation in different organs of quinoa; (2) determine the distribution pattern of Cd within plant tissues (root, stem, leaf, and grain) under combined stress conditions; (3) assess how increasing salinity levels influence Cd mobility, bioavailability, and extractability in soil; (4) investigate the potential of quinoa to reduce soil Cd concentrations and electrical conductivity (EC) through phytoextraction; and (5) examine the morphological stability and tolerance of quinoa when exposed to concurrent Cd and salinity stress.

**Materials and Methods:** A factorial experiment was conducted under laboratory conditions using a completely randomized design with two factors: four levels of soil salinity (0, 4, 8, and 12 dS/m) and three levels of Cd contamination (0, 6, and 12 mg/kg soil), each with three replications. Soil texture was determined by the hydrometric method. Calcium carbonate equivalent (CCE) was measured using the titration method. Soil pH was determined in a 1:2.5 soil:distilled water suspension using a pH meter. Electrical conductivity (EC) was measured in saturated paste extract. Available Cd concentration in soil was extracted using the DTPA method. Quinoa plants were grown under controlled conditions and harvested after the complete growth period. Cd concentrations in different plant organs (root, stem, leaf, and grain) were measured. Data were analyzed using MSTATC and SPSS software, and means were compared using Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

**Results:** Quinoa demonstrated a high capacity for Cd uptake and accumulation across all plant organs, with accumulation increasing significantly in response to higher Cd concentrations and elevated soil salinity levels. A significant interaction was observed between Cd and salinity stresses, leading to enhanced Cd uptake under combined stress conditions. Cadmium accumulation followed the consistent order: root > stem > leaf > grain, indicating effective retention of toxic metals in belowground tissues and limited translocation to reproductive organs. Increasing soil salinity enhanced Cd mobility and bioavailability, resulting in greater plant uptake. Post-harvest analysis revealed significant reductions in both soil Cd content and electrical conductivity, confirming the active role of quinoa in phytoextraction of Cd and soluble salts. The plant maintained morphological

stability across all treatment combinations, demonstrating remarkable tolerance to both stressors.

**Conclusion:** This study confirms that quinoa possesses exceptional capacity for Cd phytoextraction in saline soils, with the highest accumulation occurring in roots followed by stems and leaves, while grains maintained the lowest Cd concentrations—a desirable trait for food safety. Elevated salinity enhanced Cd bioavailability and subsequent plant uptake, demonstrating a synergistic effect between the two stressors. The significant reduction in soil Cd and EC after harvest underscores quinoa's potential as an effective phytoremediation agent for Cd-contaminated saline soils. These findings support the use of quinoa in sustainable remediation strategies for degraded lands in arid and semi-arid regions, though field-scale validation is recommended to develop practical guidelines for optimal phytoremanagement.

**Cite this article**: Sadeghi, S., 2026. The Effect of Different Salinity Levels on Cadmium Uptake and Phytoremediation Capacity in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Research Article, *Journal of Soil Research, 39 (4)*, pp 455-467.

**DOI**: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371007.794
**Publisher:** Soil Science Society of Iran

نشریه علمی پژوهش‌های خاک / جلد۳۹ / شماره ۴۵۷/۴

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

# تأثیر سطوح مختلف شوری بر جذب و توانایی گیاه‌پالایی عنصر کادمیم در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa.* Willd)

سیروس صادقی[1*]

[1] گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۱/۰۳

**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

**واژه‌های کلیدی**

آلودگی،
اصلاح خاک،
زیست‌پالایی،
گیاهان بیش انباشتگر،
محیط‌زیست

* **ایمیل نویسنده مسئول**
sirossadeghi@gmail.com

**چکیده**

کینوا یک گیاه هالوفیت است که در برخی کشورهای آمریکای جنوبی به‌عنوان غلات استفاده می‌شود و دارای ارزش غذایی بالایی است. در سال‌های اخیر این گیاه به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. تحقیق حاضر، در راستای بررسی توانایی جذب و تحمل گیاه کینوا برای گیاه‌پالایی عنصر کادمیم در شرایط شور انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با دو فاکتور اصلی شامل: شوری (سطوح ۰، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) و آلودگی کادمیم (سطوح ۰، ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. برای تیمار کردن خاک با سطوح کادمیم از سولفات کادمیم و برای اعمال تیمار شوری خاک از کلرید سدیم استفاده شد. پس از سپری شدن ۱۲ هفته از زمان کاشت، گیاهان برداشت شدند. نتایج نشان داد حداکثر مقادیر کادمیم جذب شده در دانه ۲۷/۰۵، برگ ۷۴/۴۷، ساقه ۶۸/۳۴ و ریشه ۲۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه بود. در همه قسمت‌های گیاه با افزایش مقادیر کادمیم و شوری، جذب کادمیم نیز افزایش یافت. بیشترین مقدار کادمیم باقیمانده در خاک پس از برداشت ۰/۱۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی خاک پس از برداشت ۰/۸۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. این پژوهش نشان داد که کینوا گیاهی مناسب جهت گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به کادمیم، به‌ویژه در شرایط شور، است. همچنین عدم مشاهده تغییرات جدی در صفات مورفولوژیکی گیاه در شرایط آلودگی، پایداری و مقاومت آن را در برابر تنش‌های شوری و کادمیم تأیید می‌نماید.

**استناد:** صادقی، س.، ۱۴۰۴. تاثیر سطوح مختلف شوری بر جذب و توانایی گیاه‌پالایی عنصر کادمیم در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa.* Willd). مقاله پژوهشی، نشریه *پژوهش‌های خاک، (۴) ۳۹*، ص ۴۵۵-۴۶۷.

**DOI**: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371007.794

## مقدمه

در پی افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و صنایع مختلف در جهان، موجبات به خطر افتادن منابع طبیعی و آلودگی محیط‌زیست فراهم شده است. آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از توسعه صنعت، تغییرات آب و هوایی، آشفتگی‌های سیاسی و توسعه شهرنشینی و عوامل دیگر است (Al-Muilali and Ozturk, 2015). آلودگی محیط‌زیست به یک نگرانی جدی برای سلامت عمومی تبدیل شده است زیرا در سراسر جهان منبع اصلی ایجاد خطر برای سلامتی است و باعث بیماری می‌شود (Briggs, 2003).

یکی از مشکلات قابل توجه که از آلودگی محیط‌زیست نشأت می‌گیرد، آسیب به منابع کشاورزی است که باعث اثرات منفی بر کیفیت مواد غذایی می‌گردد. یکی از آلاینده‌های جدی زیست‌محیطی فلزات سنگین است. اگرچه اثرات سلامتی فلزات سنگین مدت زیادی است که شناخته شده است، اما قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین همچنان در برخی مناطق ادامه دارد و حتی در حال افزایش است. تأثیر فلزات سنگین بر سلامتی انسان حتی می‌تواند منجر به مرگ شود (Jarup, 2003).

آلودگی فلزات سنگین از زمان آغاز انقلاب صنعتی به سرعت تسریع یافته است، همچنین سمّیت فلزات سنگین مشکلات عمده زیست‌محیطی و بهداشتی را ایجاد کرده است (Carlin, 1994). فلزات سنگین می‌توانند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشند. به‌طوری که در طی فرآیندهای پدوژنتیکی و هوازدگی مواد مادری به محیط خاک اضافه می‌شوند، اما به ندرت باعث ایجاد اثرات سمی می‌شوند (Kabata-Pendias, 2010; Pierzynski et al., 2005). منبع اصلی ایجاد آلودگی فلزات سنگین فعالیت‌های انسان که شامل استخراج معادن، ذوب سنگ معدن فلزی، سوزاندن بنزین، فاضلاب شهری و زباله‌های صنعتی است (Seaward and Richardson, 1989). از متداول‌ترین آلودگی‌های فلزات سنگین می‌توان به آلودگی کادمیم، کروم، مس، جیوه، سرب و روی اشاره کرد. یکی از آلودگی‌های نامطلوب محیط‌زیست، آلودگی خاک به وسیله فلزات سنگین است که باعث کاهش بازدهی کشاورزی و تأثیر بر رشد گیاهان شده و در نهایت وارد چرخه غذایی می‌شود (Friesl et al., 2006). جذب فلزات سنگین در گیاهان از قابل توجه‌ترین راه‌های قرار گرفتن انسان در معرض آلودگی فلزات سنگین است (Liu et al., 2007).

یکی از فلزات سنگین خطرناک که در این مطالعه نیز مد نظر قرار گرفته، کادمیم است. بروز بیماری ایتای در ژاپن وجود کادمیوم در محیط‌زیست را به عنوان یک عامل خطرناک برای سلامت انسان نشان داده است. کادمیوم در انسان باعث از دست دادن حس بویایی، سرطان، سکته مغزی، آمفیزم و پوکی استخوان می‌شود (Khan, 2005). از دیگر مشکلات جدی پیش روی کشاورزی خاک‌های شور است. شوری خاک از مهم‌ترین فاکتورهای محدودکننده کشاورزی در ایران است و از نظر وسعت زمین‌های شور در رده سوم آسیا و در رده پنجم جهان قرار گرفته است (Szabolcs, 1989). تنش شوری بر گیاهان اثرات مختلفی می‌گذارد. گیاهان در برابر شوری اغلب دچار دو مشکل می‌شوند: از یک سو پتانسیل آب محیط اطراف ریشه به دلیل کاهش آب برای گیاه کاهش پیدا می‌کند، همچنین بسیاری از یون‌ها آثار مخربی بر فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان دارند که این موارد باعث اختلالاتی در جذب مواد مغذی توسط گیاه شده و در نهایت باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (Noitszkis et al., 1996).

به‌طور کلی، تخریب خاک ناشی از شوری یک محدودیت مهم زیست‌محیطی با تأثیر منفی شدید بر بهره‌وری و پایداری کشاورزی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است. با افزایش شوری در خاک، تحرک فلزات سنگین افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که افزایش شوری در خاک، تحرک فلزات سنگین و جذب آن توسط گیاهان را افزایش می‌دهد (Usman et al., 2005; Weggler-Beaton et al., 2000). پژوهشگران گزارش کرده‌اند که شوری خاک دسترسی زیستی کادمیوم را در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین افزایش می‌دهد و روی جذب و تجمع کادمیوم به وسیله گیاهان تأثیر می‌گذارد (Lefever et al., 2009). همچنین گزارش شده که افزایش غلظت کلرید سدیم، باعث افزایش معنادار غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی گیاه گندم، متناسب با سطح شوری کلرید سدیم گردید (Khoshgoftarmanesh et al., 2003). با توجه به این مطالب، حذف آلودگی فلزات سنگین در خاک، همچنین در خاک‌هایی که مشکل شوری نیز دارند بسیار حائز اهمیت است. روش‌های مختلفی برای حذف یا کاهش فلزات سنگین از خاک آلوده ارائه شده است، روش‌های فیزیکی مانند شستشوی خاک که خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی را به همراه دارد و روش‌های شیمیایی، بیولوژیکی مختلف که هزینه بالایی دارند و نیز اثرات نامطلوبی بر فعالیت‌های بیولوژیکی خاک می‌گذارند (Khan, 2005; Pulford and Watson, 2003). تکنیک‌های فیزیکی و شیمیایی برای اصلاح خاک باعث می‌شود از کارآیی زمین برای رشد گیاه کاسته شود زیرا همه فعالیت‌های بیولوژیکی خاک طی فرآیند حذف آلودگی از بین می‌رود (Chaney and Oliver, 1996). از روش‌های مهم برای بهسازی مناطق آلوده که نسبت به سایر روش‌ها دارای معایب کمتری است می‌توان به گیاه‌پالایی اشاره کرد. فناوری‌های زیست پالایی گیاهی مبتنی بر گیاه به‌طور کلی گیاه‌پالایی نامیده می‌شوند که به استفاده از گیاهان سبز برای

تصفیه خاک و آب‌های زیرزمینی اطلاق می‌گردد (Sadowsky, 1999). گیاه‌پالایی روشی بر مبنای استفاده از گیاهان است که کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست محسوب می‌شوند (Liphadzi and Kirkham, 2006). گیاه‌پالایی می‌تواند برای آلاینده‌های آلی و غیر آلی موجود در خاک، آب یا هوا نیز استفاده شود (Salt et al., 1998; Raskin et al., 1994). این روش به‌طور بالقوه برای انواع آلاینده‌ها کاربرد دارد و شامل چندین روش مختلف است که می‌تواند از طریق تجمع آلاینده منجر به حذف آلاینده‌ها شود که عبارت‌اند از: تخریب توسط گیاه، استخراج توسط گیاه، تثبیت توسط گیاه، تصعید توسط گیاه و فیلتر کردن توسط گیاه است (Awad et al., 2014; Cheng, 2003). در گیاه‌پالایی از گیاهانی استفاده می‌شود که در طول دوره رشد میزان زیادی از آلودگی‌های سمی را تجمیع می‌کنند که اصطلاحاً بیش انباشت‌گر نامیده می‌شوند. همچنین می‌توان با افزودن عوامل کلات کننده به داخل خاک سرعت گیاه‌پالایی را افزایش داد. کلات کننده‌هایی مانند EDTA در افزایش تحرک فلزات سنگین مانند سرب، کادمیم نقش دارد (Huang et al., 1997; Lombi et al., 2001). همان طور که ذکر شد، بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان که تحت تأثیر مشکل شوری خاک قرار دارند و در بسیاری از همین مناطق آلودگی خاک با فلزات سنگین نیز وجود دارد که مسئله اصلاح خاک در این مناطق را دشوارتر می‌کند، زیرا جداسازی یک وضعیت نامطلوب از سایرین امکان‌پذیر نیست. در این شرایط، گیاهان هالوفیت به‌عنوان کاندیدای گیاه‌پالایی و حذف عناصر آلاینده از خاک توصیه می‌شوند (Manousaki and Kalogerakis, 2009). برخی هالوفیت‌ها قادر به بقا در محیط‌هایی هستند که غلظت نمک کلرید سدیم در آنها حدود ۲۰۰ میلی مولار یا بیشتر است که اغلب در این محیط‌ها بیشتر گونه‌های گیاهی از بین می‌روند (Manousaki and Kalogerakis, 2011). با توجه به تحمل بالای گیاهان هالوفیت نسبت به شوری بالا، احتمالاً استفاده از گیاهانی که نسبت به شوری تحمل بالایی دارند، می‌تواند در مناطق گرم و خشک راندمان فرآیند گیاه‌پالایی را افزایش دهد. لذا این تحقیق در راستای بررسی کارآیی گیاه کینوا بر حذف آلودگی کادمیم در شرایط شور مورد مطالعه قرار گرفت. کینوا با نام علمی (Chenopodium quinoa. Willd) گیاهی سنتی است با قدمت ۵۰۰۰ ساله که بومی مناطق آند در بولیوی، شیلی و پرو است که به‌عنوان یک شبه غله مصرف می‌شود. کشت این گیاه برای امرار معاش در آمریکای جنوبی صورت می‌گرفت، ولی اخیراً با توجه به معرفی جهانی و افزایش مصرف این گیاه کشت آن در سایر نقاط دنیا آغاز شده است. کینوا یک محصول مقاوم به خشکسالی است که نیاز به آب کم دارد، اما عملکرد آن می‌تواند به میزان قابل توجهی تحت تأثیر آبیاری قرار گیرد (Bhargava et al., 2006). با توجه به اینکه قابلیت هدایت الکتریکی آب دریا (ds/m) ۵۰ است گزارش شده این گیاه در آبیاری با آب دریا نیز رشد کرده است. چنین مشاهداتی نشان می‌دهد که گیاه کینوا یک هالوفیت است که ممکن است از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی بی‌نظیری برای تحمل شوری خاک استفاده کند (Morales et al., 2011). با توجه به مسئله آلودگی خاک به کادمیم و هم‌زمان وجود شوری در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، این پژوهش با اهداف زیر انجام شده است: بررسی اثر سطوح مختلف شوری بر تحرک‌پذیری و قابلیت جذب کادمیم در خاک که مشخص شود افزایش شوری چگونه بر فراهمی کادمیم در خاک، حرکت آن به سمت ریشه و میزان جذب آن توسط گیاه کینوا تأثیر می‌گذارد. همچنین ارزیابی اثر سطوح مختلف آلودگی کادمیم بر جذب و تجمع آن در اندام‌های مختلف گیاه کینوا در سطوح مختلف آلودگی می‌پردازد. در ضمن بررسی اثرات متقابل شوری و کادمیم بر توانایی گیاه کینوا در جذب فلز سنگین مورد ارزیابی قرار گرفت که آیا اثر تقویتی است یا تضعیفی است و یا باعث تغییر الگوی توزیع در اندام‌ها می‌شود. ارزیابی توان گیاه کینوا به‌عنوان یک گیاه هالوفیت برای استفاده در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کادمیم هدف اصلی پژوهش است که ارزیابی نماید که آیا کینوا می‌تواند: در شرایط شور رشد مناسب داشته باشد و مقادیر قابل توجهی از کادمیم را از خاک استخراج کند و به‌عنوان یک گیاه بیش‌انباشتگر یا حداقل گیاه کارا در فیتواِکستراکشن عمل کند. در نهایت داده‌ها باید پاسخ دهند که آیا کینوا گزینه مناسبی برای گیاه‌پالایی در خاک‌های شورـآلوده است؛ بنابراین هدف نهایی پژوهش درک رفتار کادمیم در سیستم خاک ـ گیاه تحت شرایط شوری و ارزیابی عملی کینوا به‌عنوان ابزاری برای زیست‌پالایی است.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه پژوهشی شیمی و بیولوژیکی گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه مراغه در سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ انجام شد. برای انجام آزمایش، نمونه خاک از محوطه دانشگاه مراغه با موقعیت جغرافیایی طول ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه و ۲۹/۴۳۸ ثانیه و عرض شمالی ۳۷ درجه و ۲۲ دقیقه و ۳۸/۸۵۳ ثانیه واقع در استان آذربایجان شرقی با ارتفاع ۱۵۳۰ متر از تراز سطح دریا با این هدف که مقدار کادمیم آن کمتر از ۰/۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک و دارای بافت لوم‌شنی است انتخاب گردید (McBride, 1994). خاک مورد نظر از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه گردید. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پس از انجام مراحل آماده‌سازی (هوا خشک کردن

و نرم کردن) اندازه‌گیری شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Or, 2002) کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون (Klute, 1986)، pH در سوسپانسیون ۱:۲/۵ خاک و آب مقطر با دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد (Mclean, 1982). اندازه‌گیری قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع انجام شد (Rhoades, 1996). برای اندازه‌گیری کادمیم قابل جذب از روش عصاره‌گیری با DTPA استفاده شد (جدول ۱). تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور شامل چهار سطح شوری خاک، صفر، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و سه سطح آلودگی کادمیم صفر، ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک با سه تکرار انجام شد که به منظور آلوده کردن خاک از سولفات کادمیم و برای شور نمودن خاک از کلرید سدیم استفاده شد. لازم به ذکر است که خاک‌ها قبل از اقدام به کشت طبق تیمارهای آلودگی با کادمیم در سطوح مورد نظر آلوده و در نهایت به گلدان منتقل شدند. بذر گیاه کینوا در سینی‌های کشت حاوی کوکوپیت، جهت نشاءگیری کاشته شد. پس از رشد، نشاها و رسیدن نشانه به مرحله سه برگی، نشاهای از سینی کشت به گلدان‌های ۴ کیلوگرمی حاوی خاک‌آلوده به کادمیم انتقال داده شدند. البته برای حصول اطمینان بیشتر در هر گلدان ۶ بذر کاشته شد تا پس از رشد، بوته‌های نامناسب را تنک نمائیم. نشاءها در گلدان‌های ۴ کیلوگرمی کاشته شدند و چهار سطح شوری همراه با آب آبیاری در شرایط زهکشی نزدیک به صفر انجام شد. برای تأمین نیازهای غذایی گیاهان با توجه به نتایج آزمون خاک، ۱۸۰ میلی‌گرم نیتروژن از منبع اوره ($CH_4N_2O$) و در سه نوبت و هر نوبت یک سوم مقدار ذکر شده (قبل از کاشت، ۲۰ و ۴۰ روز بعد از کاشت)، ۵۰ میلی‌گرم فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل ($Ca(H_2PO_4)2H_2O$)، ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم ($K_2SO_4$)، ۱۰ میلی‌گرم آهن از منبع سولفات آهن آبدار ($FeSO_4.7H_2O$)، ۱۰ میلی‌گرم منگنز از منبع سولفات منگنز آبدار ($MnSO_4.H_2O$)، ۵ میلی‌گرم مس از منبع سولفات مس آبدار ($CuSO_4.5H_2O$) و ۲ میلی‌گرم بور از منبع اسید بوریک ($H_3BO_3$) به ازای هر کیلوگرم خاک، قبل از کشت اضافه گردید. اندازه‌گیری میزان غلظت کادمیم جذب شده در اندام‌های مختلف گیاه با استفاده از روش یور انجام شد (Ure et al., 1993). در پایان، داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و SPSS تجزیه‌وتحلیل شده و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام و نتایج تفسیر شدند. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

**جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد مطالعه**

**Table 1. Chemical and physical characteristics of the studied soil**

| Cd ($mg.kg^{-1}$) | EC ($dS.m^{-1}$) | pH | کربن آلی OC (%) | آهک Lime (%) | رس Clay (%) | سیلت Silt (%) | شن Sand (%) | کلاس بافت خاک Soil texture class |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0726 | 1.637 | 7.37 | 1.26 | 11.50 | 12.20 | 10.66 | 77.14 | لوم شنی Loam sandy |

| قابل‌جذب Available (mg.kg-1) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| مس Cu | منگنز Mn | آهن Fe | سدیم Na | پتاسیم K | فسفر P |
| 1.3 | 1.1 | 1.8 | 108.8 | 250 | 5.7 |

## بحث و نتایج

بررسی اثرات متقابل کادمیم و شوری بر جذب کادمیم در اندام‌های گیاه کینوا نشان داد که با افزایش سطوح شوری و مقدار کادمیم در خاک، جذب کادمیم و املاح در اندام‌های مختلف گیاه افزایش یافت. همان‌طور که در (جدول ۲) مشاهده می‌گردد اثرات اصلی کادمیم و شوری و اثرات متقابل این دو فاکتور بر مقدار کادمیم استخراجی در اندام‌های مختلف گیاه در سطح یک درصد معنادار است. از آنجائی که اثرات متقابل فاکتورهای مذکور معنادار می‌باشند لذا به بررسی و تفسیر اثرات اصلی نیاز نیست. به همین دلیل بررسی و تحلیل اثرات متقابل فاکتورها بر جذب مقادیر کادمیم استخراج شده در گیاه کینوا مورد بررسی قرار گرفته شده است.

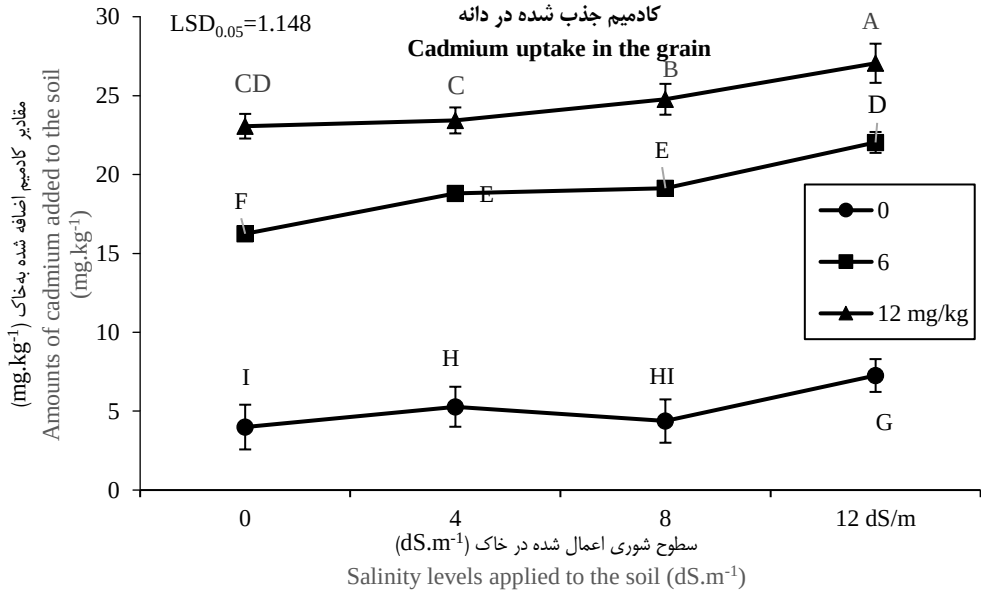
**جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات کادمیم و شوری بر روی مقادیر کادمیم جذب شده در اندام‌های مختلف گیاه کینوا**
**Table 2. Analysis of variance (mean squares) for the effects of cadmium and salinity on cadmium accumulation in different organs of quinoa.**

| منابع تغییر S.O.V. | درجه آزادی DF | میانگین مربعات Mean squares | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | دانه Seed ($mg.kg^{-1}$) | برگ Leaf ($mg.kg^{-1}$) | ساقه Stem ($mg.kg^{-1}$) | ریشه Root ($mg.kg^{-1}$) | خاک Soil ($mg.kg^{-1}$) | EC خاک Soil EC ($dS.m^{-1}$) |
| کادمیم Cadmium | 2 | 1192.102** | 6931.12** | 8496.68** | 114789.85** | 0.012** | 0.020** |
| شوری Salinity | 3 | 29.707** | 1542.28** | 159.992** | 5768.642** | 0.001 | 0.005** |
| کادمیم*شوری Cd*Salinity | 6 | 65.1** | 236.571** | 62.609** | 1358.740** | 0.002* | 0.017** |
| خطا Error | 24 | 0.466 | 0.923 | 2.226 | 4.796 | 0.000 | 0.001 |
| ضریب تغییرات C.V (%) | | 4.18 | 2.3 | 3.77 | 2.04 | 35.36 | 3.58 |

** و * به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

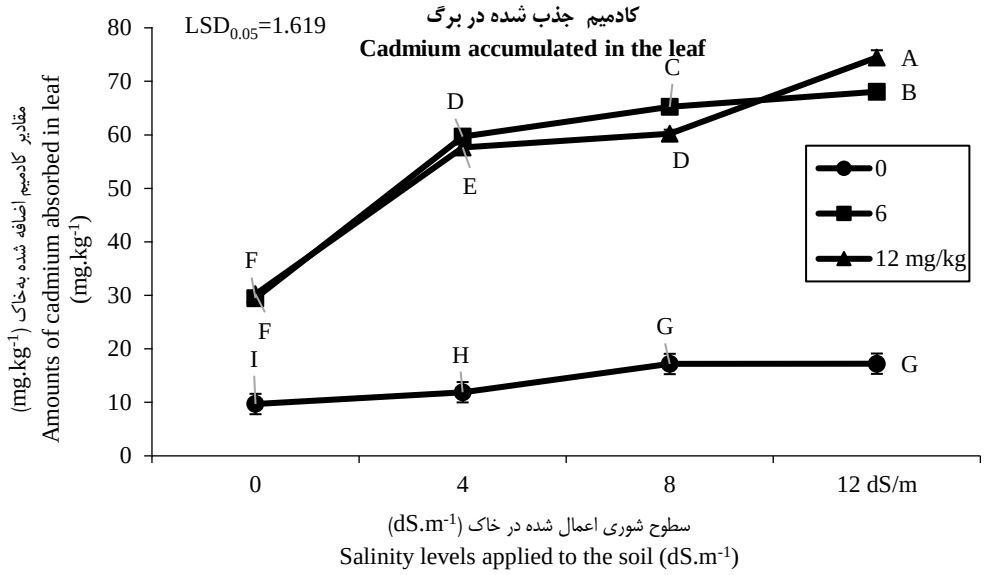
** and *: non-significant, significant at $p\leq0.01$ and $p\leq0.05$, respectively

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد اثر متقابل کادمیم و شوری بر مقادیر کادمیم استخراج شده از خاک معنادار است. مطابق (شکل ۱) بیش‌ترین مقدار کادمیم جذب شده در دانه گیاه در تیمار با سطح کادمیم ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر برابر با ۲۷/۰۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک دانه است. همچنین کم‌ترین مقدار کادمیم جذب شده در دانه مربوط به تیمار با سطح کادمیم صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری صفر دسی‌زیمنس بر متر است که میزان آن ۳/۹۹۶ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک دانه است.




**شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات کادمیم و شوری بر مقادیر کادمیم جذب شده در دانه**
**Figure 1. Comparison of the mean effects of cadmium and salinity on cadmium accumulation in the grain**

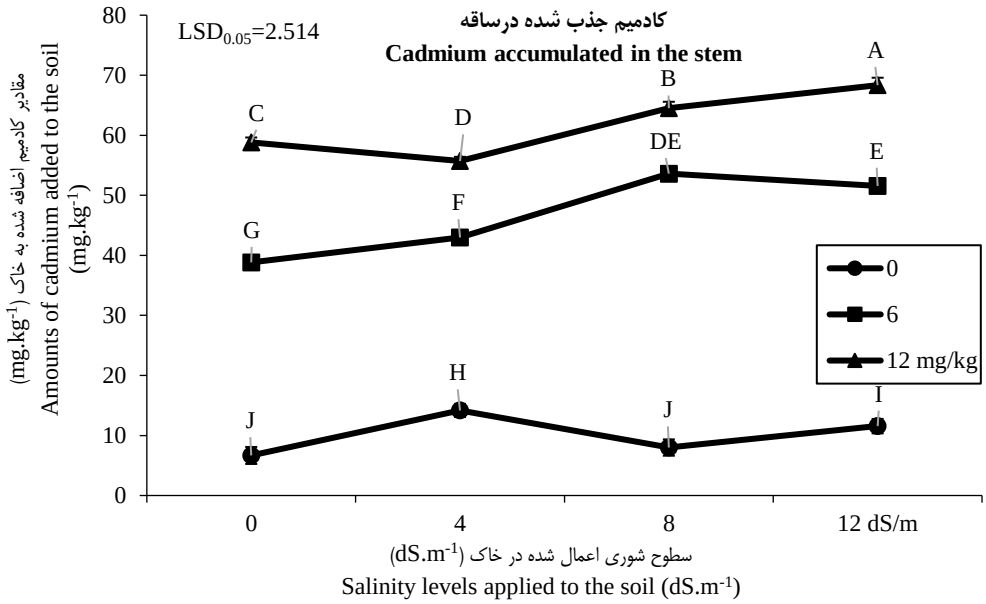
نمودار مقدار کادمیم جذب شده با توجه به (شکل ۲) در برگ گیاه را نشان می‌دهد. طبق این نمودار بیش‌ترین میزان کادمیم جذب شده در برگ در تیمار با سطح کادمیم ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر با مقدار ۷۴/۴۷ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک برگ می‌باشد و کم‌ترین مقدار کادمیم جذب شده در تیمار با سطح کادمیم صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری صفر دسی‌زیمنس بر متر با مقدار ۹/۶۹۳ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک برگ است.




**شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات کادمیم و شوری بر مقادیر کادمیم جذب شده در برگ**

**Figure 2. Comparison of the mean effects of cadmium and salinity on cadmium accumulation in the leaf**

نمودار مقدار کادمیم جذب شده در ساقه گیاه را در (شکل ۳) نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار کادمیم جذب شده در ساقه گیاه مربوط به تیمار با سطح کادمیم ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر برابر با ۶۸/۳۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک ساقه است. کم‌ترین مقدار کادمیم جذب شده نیز در تیمار با سطح کادمیم صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری صفر دسی‌زیمنس بر متر معادل با ۶/۶۷۳ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک ساقه است.

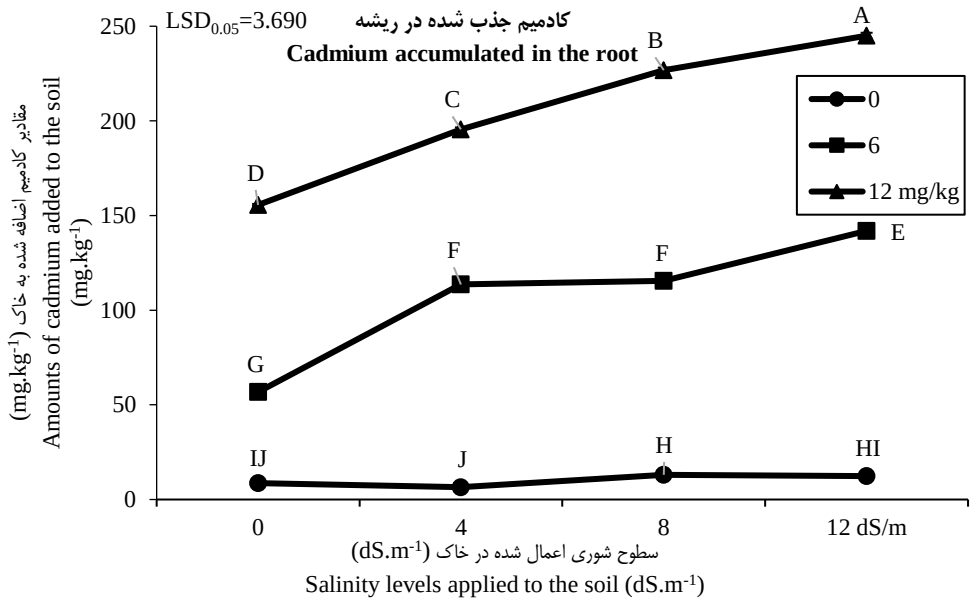



**شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات کادمیم و شوری بر مقادیر کادمیم جذب شده در ساقه**

**Figure 3. Comparison of the mean effects of cadmium and salinity on cadmium accumulation in the stem**

نمودار مقدار کادمیم جذب شده در ریشه گیاه را در (شکل ۴) نشان می‌دهد. مطابق نمودار بیشترین مقدار کادمیم جذب شده در تیمار با سطح کادمیم ۱۲ میلی‌گرم بر صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر برابر با ۲۴۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک ریشه و کم‌ترین مقدار کادمیم جذب شده در تیمار با مقادیر کادمیم صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سطح شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر که معادل با ۶/۵۲۷ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم وزن خشک ریشه است که

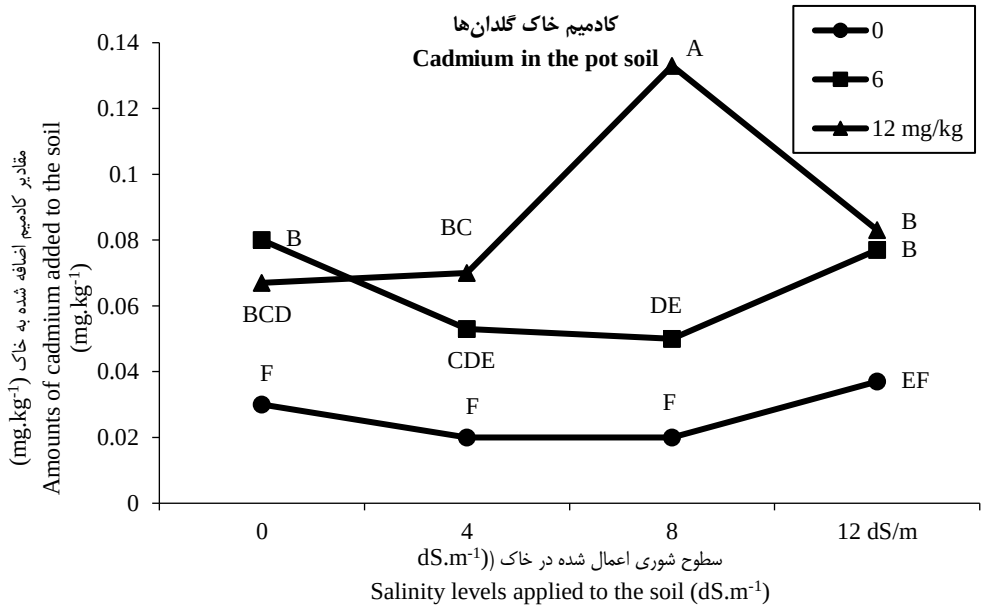
تفاوت معناداری با تیمار کادمیم صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک ندارد.




**شکل ۴- مقایسه میانگین اثرات کادمیم و شوری بر مقادیر کادمیم جذب شده در ریشه**

**Figure 4. Comparison of the mean effects of cadmium and salinity on cadmium accumulation in the root**

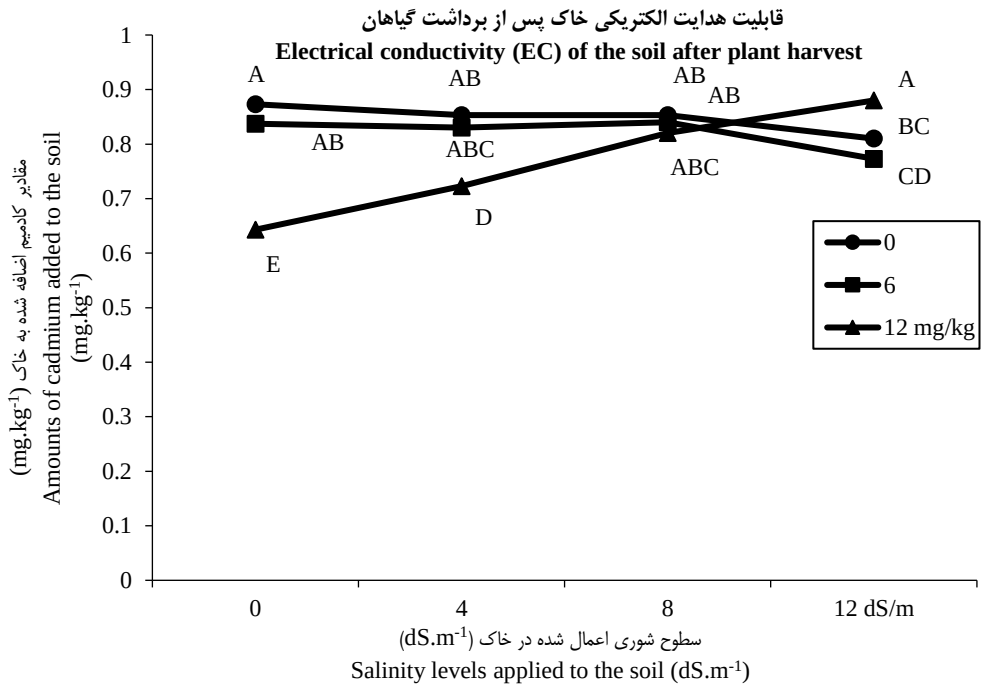
نمودار مقادیر کادمیم خاک پس از برداشت گیاهان در خاک گلدان‌ها را در (شکل ۵) نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار دیده می‌شود، مقدار کادمیم خاک گلدان‌ها پس از مراحل برداشت گیاهان از گلدان، کاهش یافته است که این به‌دلیل جذب و انباشت کادمیم در بخش‌های مختلف گیاهان بوده است. کمپلکس‌های کلرید ناشی از کلرید سدیم با کادمیوم، جذب این فلز سنگین به وسیله خاک را به‌طور چشمگیری کاهش داده و به تبع آن افزایش غلظت کادمیوم و کلر در فاز محلول می‌تواند فراهمی کادمیوم در خاک را افزایش دهد (Acosta et al., 2011).




**شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات کادمیم و شوری بر مقادیر کادمیم باقیمانده در خاک گلدان‌ها**

**Figure 5. Comparison of the mean effects of cadmium and salinity on the residual cadmium levels in the pot soil**

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک گلدان‌ها پس از برداشت گیاهان را در (شکل ۶) نمایش می‌دهد. مطابق این نمودار شوری خاک گلدان‌ها در تمام تیمارها کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل جذب شوری و کادمیم اعمال شده توسط گیاه باشد.




**شکل ۶- مقایسه میانگین اثرات کادمیم و شوری بر هدایت الکتریکی (EC) خاک پس از برداشت گیاهان**

**Figure 6. Comparison of the mean effects of cadmium and salinity on soil electrical conductivity (EC) after plant harvest**

اثرات متقابل کادمیم و شوری بر جذب کادمیم در اندام‌های مختلف گیاه کینوا بررسی شد و نتایج نشان داد که گیاه کینوا قابلیت جذب و تجمیع کادمیم را در اندام‌های خود دارد و بیشترین مقادیر انباشت کادمیم به ترتیب در ریشه، ساقه، برگ و کمترین مقدار انباشت کادمیم در دانه گیاه بود. با توجه به افزایش حلالیت کادمیم در خاک‌های شور (Paalman et al., 1994; Hatje et al., 2003) با افزایش سطوح شوری اعمال شده و مقادیر کادمیم، میزان جذب و انباشت کادمیم در اندام‌های گیاه نیز افزایش یافت و مقادیر کادمیم و سطوح شوری اعمال شده در خاک پس از برداشت گیاهان کاهش یافته بود که این نتایج می‌تواند توانایی این گیاه را برای کاربرد در فرآیند گیاه‌پالایی اثبات کند. با توجه به مقاومت گیاه کینوا نسبت به سطوح شوری بسیار بالا (Jacobsen et al., 2000; Tagle and Planella, 2002) و سازگاری این گیاه با شرایط نامساعد آب و هوایی و خاک‌های فقیر، نتایج آزمایش عدم تغییر در شرایط مورفولوژیکی و صفات ظاهری این گیاه نسبت به آلودگی فلزات سنگین را نشان داد.

## نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که گیاه کینوا توانایی بالایی در جذب و انباشت کادمیم در اندام‌های مختلف خود دارد و شدت این فرایند به‌طور مستقیم تحت تأثیر افزایش هم‌زمان غلظت کادمیم و سطوح شوری خاک قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که اثرات متقابل کادمیم و شوری بر غلظت کادمیم در تمامی اندام‌های گیاه در سطح یک درصد معنادار بود و با افزایش تنش‌های اعمال‌شده، میزان جذب و انتقال کادمیم در گیاه نیز به‌طور محسوسی افزایش یافت. الگوی توزیع کادمیم در اندام‌ها نشان داد که بیشترین انباشت در ریشه و سپس در ساقه و برگ رخ می‌دهد، در حالی که کمترین مقدار در دانه گیاه مشاهده شد. این الگوی تجمع نشان‌دهنده مکانیسم‌های کارآمد گیاه در محبوس‌سازی عناصر سمی در بخش‌های زیرزمینی و حداقل‌رسانی انتقال آن‌ها به ساختارهای تولیدمثلی است. افزایش شوری سبب افزایش تحرک‌پذیری کادمیم در خاک و افزایش بخش قابل جذب آن شد که در نهایت به افزایش جذب کادمیم توسط گیاه انجامید. کاهش مقدار کادمیم و کاهش هدایت الکتریکی خاک پس از برداشت نیز تأییدی بر نقش فعال گیاه در استخراج کادمیم و جذب بخشی از املاح محلول است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کینوا می‌تواند یک گیاه مناسب برای کاربردهای گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، به‌ویژه در شرایط شور، باشد .افزون بر این، عدم مشاهده تغییرات جدی در صفات مورفولوژیکی گیاه در شرایط آلودگی، پایداری و مقاومت آن را در برابر تنش‌های محیطی تأیید می‌کند.

## تعارض منافع

در رابطه با انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد و نویسندگان در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده‌اند.

## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل کار تحقیقی در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه است. نویسندگان از کلیه مسئولان دانشگاه به‌ویژه کارشناسان آزمایشگاه نهایت تشکر و سپاس را دارد.

**References**


1. Acosta, J. A., Jansen, B., Kalbitz, K., Faz, A., and Martínez-Martínez, S. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 85(8), 1318-1324. DOI:10.1016/j.chemosphere.2011.07.046.
2. Al-Mulali, U., and Ozturk, I. 2015. The effect of energy consumption, urbanization, trade openness, industrial output, and the political stability on the environmental degradation in the MENA (Middle East and North African) region. Energy, 84, 382-389. https://doi.org/10.1016/j.*Energy*.2015.03.004
3. Awad, M., Al Solaim, S. G., and El-Nakhlawy, F. S. 2014. Phytoextraction of salts by indigenous weeds in arid land. International *Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 4(6), 110-115.
4. Bhargava, A., Shukla, S., and Ohri, D. 2006. Chenopodium quinoa—an Indian perspective. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 73-87. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.04.002.
5. Briggs, D. 2003. Environmental pollution and the global burden of disease. *British Medical Bulletin*, 68(1), 1-24. DOI:10.1093/bmb/ldg019.
6. Carlin, A. 1994. *Environmental investments: The cost of a clean environment. DIANE Publishing*. EPA, 11. 90-083.
7. Chaney, R. L., and Oliver, D. P. 1996. Sources, potential adverse effects and remediation of agricultural soil contaminants. *In Contaminants and the Soil Environment in the Australasia-Pacific Region* (pp. 323-359). Springer, Dordrecht. DOI:10.1007/978-94-009-1626-5_11
8. Cheng, S. 2003. Heavy metal pollution in China: origin, pattern and control. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(3), 192-198. DOI:10.1065/espr2002.11.141.1.
9. Friesl, W., Friedl, J., Platzer, K., Horak, O., and Gerzabek, M. H. 2006. Remediation of contaminated agricultural soils near a former Pb/Zn smelter in Austria: batch, pot and field experiments. *Environmental Pollution*, 144(1), 40-50. DOI:10.1016/j.envpol.2006.01.012.
10. Gee, G. W., and Or, D. 2002. 2.4 Particle-size analysis. *Methods of Soil Analysis*. Part, 4(598), 255-293.
11. Hatje, V., Payne, T. E., Hill, D. M., McOrist, G., Birch, G. F., and Szymczak, R. 2003. Kinetics of trace element uptake and release by particles in estuarine waters: effects of pH, salinity, and particle loading. *Environment International*, 29(5), 619-629. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00049-7.
12. Huang, J. W., Chen, J., Berti, W. R., and Cunningham, S. D. 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environmental Science & Technology*, 31(3), 800-805. DOI:10.1021/es9604828.
13. Jacobsen, S. E., Quispe, H. and Mujica, A. 2000. Quinoa: an alternative crop for saline soils. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 54, pp. 25-25.
14. Järup, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68(1), 167-182. https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032.
15. Kabata-Pendias, A. 2010. *Trace elements in soils and plants*. CRC Press. Taylor & Francis Group. https://doi.org/10.1201/b10158.
16. Khan, A. G. 2005. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18(4), 355-364. doi: 10.1016/j.jtemb.2005.02.006.
17. Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. pp: 635-660. In: A. Klute (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
18. Khoshgoftarmanesh, A, H., Shariyatmadari, H., and Karimian, N. 2003. Effects of irrigation water salinity and zinc application on soil cadmium solubility and its concentration in wheat. *Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources*, 7(4), 53-59. 20.1001.1.24763594.1382.7.4.5.5. (In Persian).
19. Lefèvre, I., Marchal, G., Meerts, P., Corréal, E., and Lutts, S. 2009. Chloride salinity reduces cadmium accumulation by the Mediterranean halophyte species *Atriplex halimus L. Environmental and Experimental Botany*, 65(1), 142-152. DOI:10.1016/j.envexpbot.2008.07.005.

20. Liphadzi, M. S., and Kirkham, M. B. 2006. Availability and plant uptake of heavy metals in EDTA-assisted phytoremediation of soil and composted biosolids. *South African Journal of Botany*, 72(3), 391-397. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2005.10.010.
21. Liu, W. X., Shen, L. F., Liu, J. W., Wang, Y. W., and Li, S. R. 2007. Uptake of toxic heavy metals by rice (*Oryza sativa L.)* cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou City, People's Republic of China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 79(2), 209-213. doi: 10.1007/s00128-007-9164-0.
22. Lombi, E., Zhao, F. J., Dunham, S. J., and McGrath, S. P. 2001. TECHNICAL REPORTS-Bioremediation and Biodegradation-Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Natural Hyperaccumulation versus Chemically Enhanced Phytoextraction. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 1919-1926. doi: 10.2134/jeq2001.1919.
23. Manousaki, E., and Kalogerakis, N. 2009. Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus L.*): metal uptake in relation to salinity. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7), 844-854. doi: 10.1007/s11356-009-0224-3.
24. Manousaki, E., and Kalogerakis, N. 2011. Halophytes present new opportunities in phytoremediation of heavy metals and saline soils. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(2), 656-660. https://doi.org/10.1021/ie100270x.
25. McBride, M. B. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press. New York.
26. McLean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. pp: 199-224. In: A.L. Page (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. ASA and SSSA, Madison, WI.
27. Morales, A. J., Bajgain, P., Garver, Z., Maughan, P. J., and Udall, J. A. 2011. Physiological responses of *Chenopodium quinoa to salt stress. International Journal of Plant Physiology Biochemistry*. 3(6), 219-232. DOI: 10.5897/IJPPB11.026.
28. Noitsakis, B., Dimassi, K., and Therios, I. 1996. Effects of NaCl Induced Salinity on Growth, Chemical Composition and Water Relations of Two Almond (Prunus Amygdalus L.) Cultivars and the Hybrid GF-677 (*Prunus Amygdalus x Prunus Persica*). *In II International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*, 449 (pp. 641-648). https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.449.89.
29. Paalman, M. A. A., Van Der Weijden, C. H., and Loch, J. P. G. 1994. Sorption of cadmium on suspended matter under estuarine conditions; competition and complexation with major sea-water ions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 73(1), 49-60.
30. Pierzynski, G. M., Sims, J. T., and Vance, G. F. 2005. *Soils and Environmental Quality* (Vol. 3). CRC Press, Taylor & Francis Group.
31. Pulford, I. D., and Watson, C. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees-a review. *Environment international*, 29(4), 529-540. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00152-6.
32. Raskin, I., Kumar, P. N., Dushenkov, S., and Salt, D. E. 1994. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 5(3), 285-290. DOI:10.1016/0958-1669(94)90030-2.
33. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3, Chemical methods* (Vol.5,.pp. 417-435).
34. Sadowsky, M. J. 1999. Phytoremediation: past promises and future practices. *In Proceedings of the 8th international symposium on microbial ecology. Halifax*, Canada (pp. 1-7).
35. Salt, D. E., Smith, R. D., and Raskin, I. 1998. *Phytoremediation.Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49(1), 643-668. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.643.
36. Seaward, M. R. D., and Richardson, D. H. S. 1989. Atmospheric sources of metal pollution and effects on vegetation. *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*, 75-92.
37. Szabolcs, I. 1989. Salt-affected soils.,(CRC Press Inc.: Boca Raton, FL).
38. Tagle, M. B., and Planella, M. T. 2002. *La quinoa en La Zona Central de Chile. Supervivencia de una Tradición Prehispana. Editorial IKU*, Santiago de

Chile, (pp, 25-29). DOI 10.7764/rcia.v46i2.2153.

39. Ure, A. M., Quevauviller, P. H., Muntau, H., and Griepink, B. 1993. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. *International journal of environmental analytical chemistry*, 51(1-4), 135-151. https://doi.org/10.1080/03067319308027619
40. Usman, A. R. A., Kuzyakov, Y., and Stahr, K. 2005. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil. *Soil & Sediment Contamination*, 14(4), 329-344. DOI:10.1080/15320380590954051.
41. 41- Weggler-Beaton, K., McLaughlin, M. J., and Graham, R. D. 2000. Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids. *Australian Journal of Soil Research*, 38(1), 37-46. DOI:10.1071/SR99028.