



Influence of nickel and zinc on growth, metal accumulation, and uptake and transport of iron in basil (*Ocimum basilicum* L.).

Behrooz Salehi-Eskandari^{1*} , Zahra Ghasemi² , Somayeh Mousavi Rizi³ 

1. Corresponding Author, Department of Biology, Payame Noor University, Tehran, Iran, Email: behsalehi@pnu.ac.ir

2. Department of Biology Education, Farhangian University, Tehran, Iran, Email: zhr.ghsmi@gmail.com

3. Department of Biology, Faculty of Science and Technology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: somayehmousavi147@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Jan. 27, 2025

Revised: Feb. 19, 2025

Accepted: March. 8, 2025

Published online: July. 2025

Keywords:

Accumulation,
Growth,
Nickel,
Ocimum basilicum,
Zinc.

ABSTRACT

Nickel (Ni) and zinc (Zn) are essential micronutrients and most of their contaminations are related to the increasing use of fertilizers and pesticides. The present study focuses on the effects of the different concentrations of Ni (0, 17, 43, 85 and 170 mM) and Zn (0, 60, 120, 300 and 600 mM) on the growth factors, Ni and Zn accumulation, and the concentration of Iron (Fe) in roots and shoots. The experiments carried out in this study used a randomized complete block design with three replications in the growth chamber at Isfahan University. The basil plants the seeds of which were provided from Pakan Bazr Company (Isfahan) were transferred to hydroponic mediums and after proper vegetative growth, they were exposed to different concentrations of Ni and Zn for 10 days. The findings showed that the increasing concentrations of Ni and Zn resulted in a significant decrease in the growth, so that the shoots and roots dry weight decreased at the highest level of treatments in Ni (170 mM) in comparison with the control treatment by 52.8% and 65.9% and Zn (600 mM) by 38.9% and 41.7%, respectively. With the increasing concentration of Ni and Zn in the medium, the accumulation of both heavy metals in the roots and shoots increased which caused a disruption in Fe transport, hence an enhancement in the accumulation of Fe in the roots, and decline its accumulation in shoots. Fe accumulation in root at highest level of Ni and Zn stress (170 and 600 mM) increased in comparison with the control treatment by 51% and 89.9%, respectively, while it reduced in shoot at highest level of Ni and Zn stress by 66.8% and 59%, respectively. However, translocation factor of Zn (mean translocation factor in treatments; 0.56) was higher than Ni (mean translocation factor in treatments; 0.28) which indicated that basil is resistant to Zn accumulation. These results revealed that basil is an Ni and Zn excluder plant, so root growth was restricted in comparison with shoot growth. Therefore, the excessive use of micronutrient fertilizers has not only contaminated agricultural soils, but also entered into food chains.

Cite this article: Salehi-Eskandari, B., Ghasemi, Z., Mousavi Rizi, S. (2025) Influence of nickel and zinc on growth, metal accumulation, and uptake and transport of iron in basil (*Ocimum basilicum* L.), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (5), 1147-1160. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389532.669873>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389532.669873>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Nickel (Ni) and zinc (Zn) are essential micronutrients and most of their contaminations are related to the increasing use of fertilizers and pesticides. Basil (*Ocimum basilicum* L.) is a medicinal plant that is also used as a vegetable. By the increase in the Earth's population and consequently the rising demand for agricultural products, along with the limitation of farm lands, the use of chemical fertilizers to enhance their productivity has become common. Therefore, the contamination of agricultural soils has increased due to heavy metals. The present study focuses on the effects of the different concentrations of Ni (0, 17, 43, 85 and 170 mM) and Zn (0, 60, 120, 300 and 600 mM) on the growth factors, Ni and Zn accumulation, and the concentration of Iron (Fe) in roots and shoots.

Materials and methods

In this study, basil (*Ocimum basilicum*) seeds were obtained from Pakaan Bazr Company. The disinfected seeds were transferred to perlite pots for germination, watered with distilled water, and fed with a modified Hoagland solution at the two-leaf stage. After 12 days, four uniform seedlings were transferred to plastic pots containing half-strength Hoagland medium and grown in a greenhouse with day/night temperature of 25/20 °C, a 16 h photoperiod. After 25 days plants were transferred to hydroponic mediums and after proper vegetative growth, they were exposed to 0, 17, 43, 85, 170 mM treatments of nickel ($\text{NiSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) and 0, 60, 120, 300, 600 mM treatments of zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) for 10 days. The nutrient solutions were aerated continuously and changed every three days. Shoot and root dry weights were measured after drying in an oven at 70 °C for 48 h and Ni, Zn and Fe concentrations were determined in root and shoots using a flame atomic absorption spectrophotometer (AAS, Shimadzu model 6200). The Ni, Zn, Fe translocation factor (TF) from root to shoot were calculated as their concentration in the shoot divided by their concentration in the root. The experiments carried out in this study used a randomized complete block design with three replications. Duncan's test with $P < 0.05$ as significance threshold was used to compare individual means.

Results

The results showed that with the increasing concentrations of Ni and Zn in the medium, the growth significantly decreased, so that the shoots and roots dry weight decreased at the highest level of treatments in Ni (170 mM) in comparison with the control treatment by 52.8% and 65.9% and Zn (600 mM) by 38.9% and 41.7%, respectively. The ratio of shoots to roots increased at the high levels of Ni treatment (85, 170 mM), but this increase only occurred at the highest level of Zn (600 mM). With increasing in the concentrations of heavy metals in the medium, their accumulation in the roots and shoots increased, but the accumulation in the roots was always more than in the shoots in both heavy metals. The translocation factor of these heavy metals to shoots varied, but the translocation factor of Zn was consistently greater than Ni which indicated basil is resistant to Zn accumulation. With the enhancing concentration of Ni and Zn in the medium, the accumulation of both heavy metals in the roots and shoots increased which caused a disruption in Fe transport, hence an enhancement in the accumulation of Fe in the roots, and decline its accumulation in shoots. Under the highest levels of Ni and Zn stress (170 and 600 mM), Fe accumulation in the roots increased by 51% and 89.9%, respectively, compared to the control treatment. In contrast, Fe levels in the shoots decreased by 66.8% for Ni and by 59% for Zn under the same stress conditions. Additionally, the translocation factor for Zn (mean: 0.56) was greater than Ni (mean: 0.28).

Conclusion

Considering the higher accumulation of heavy metals Ni and Zn in the roots of the basil plants, they can be classified as excluder plants for these elements, so root growth was restricted in comparison with shoot growth. Although the basil displayed greater resistance to zinc. With increasing in the concentrations of essential heavy metals (Ni and Zn) in the medium, Fe accumulation in the roots also increased, while its transfer to the shoots decreased. This reduction in translocation of Fe is one of the reasons for the reduced growth in the shoots due to the deficiency of essential elements. Therefore, the excessive use of micronutrient fertilizers has not only contaminated agricultural soils, but also entered into food chains.

Author Contributions

Behrooz Salehi-Eskandari: Writing – review & editing, Software, Methodology. Zahra Ghasemi: Writing – review & editing. Somayeh Mousavi Rizi: writing – original draft, Investigation.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

The authors are thankful to the Graduate School of University of Isfahan for providing the research facilities needed for this study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

اثر فلزات سنگین نیکل و روی بر میزان رشد، انباشت آن‌ها و جذب و انتقال آهن در گیاه ریحان (*Ocinum Basilicum L.*)

بهروز صالحی اسکندری^{۱✉}، زهرا قاسمی^۲، سمیه موسوی ریزی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه زیست‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، رایانامه: behsalehi@pnu.ac.ir

۲. گروه آموزش زیست‌شناسی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران، رایانامه: zhr.ghsmi@gmail.com

۳. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم و فناوری‌های زیستی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، رایانامه: somayehmousavi147@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	نیکل (Ni) و روی (Zn) از عناصر سنگین ضروری کم‌مصرف هستند که قسمت عمده آلودگی ناشی از آن‌ها، مربوط به استفاده روزافزون از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها است. در این پژوهش اثر تیمارهای مختلف نیکل (۰، ۱۷، ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی‌مولار) و روی (۰، ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار) بر میزان رشد، انباشت آن‌ها و همچنین اثر آن‌ها بر غلظت آهن در ریشه و ساقه گیاه ریحان ارزیابی شد. این آزمایش‌ها، طبق طرح کاملاً تصادفی (هر تیمار با سه تکرار) در دانشگاه اصفهان (سال ۱۳۹۶) انجام شد. گیاهچه‌های ریحان سبز که بذر آنها از موسسه پاکان بذر (اصفهان) تهیه شده بود، به مدت ۱۰ روز در محیط‌های هیدروپونیک حاوی تیمارهای مختلف نیکل و روی قرار گرفتند. نتایج نشان داد، با افزایش غلظت نیکل و روی در محیط، رشد گیاه کاهش یافت. بطوری‌که کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه برای نیکل در بالاترین سطح تنش (۱۷۰ میلی‌مولار)، به ترتیب ۵۲/۸ و ۶۵/۹ درصد و برای روی (۶۰۰ میلی‌مولار) به ترتیب ۳۸/۹ و ۴۱/۷ درصد بود. با افزایش غلظت عناصر سنگین در محیط، تجمع آن‌ها در ریشه و اندام‌های هوایی افزایش یافت که با اختلال در انتقال آهن همراه شد. بنابراین میزان انباشت آهن در ریشه افزایش و مقدار آن در اندام‌های هوایی کاهش یافت. این افزایش تجمع در ریشه در بالاترین سطح تنش نیکل و روی (۱۷۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار)، به ترتیب ۵۱ و ۸۹/۹ درصد بود، اما میزان کاهش آهن در اندام‌های هوایی ۶۶/۸ و ۵۹ درصد بود. میزان تجمع عناصر در ریشه بیشتر از اندام‌های هوایی بود با این تفاوت که میزان انتقال روی (میانگین فاکتور انتقال برای تیمارها، ۰/۵۶) به برگ‌ها بیشتر از نیکل (میانگین فاکتور انتقال برای تیمارها ۰/۲۸) بود که نشان‌دهنده مقاومت بیشتر گیاه به روی است. در نتیجه مکانیسم سازگاری ریحان، نسبت به نیکل و روی محدود کردن آن‌ها در ریشه است به‌همین دلیل میزان کاهش رشد در ریشه بیشتر بود، هرچند این گیاه مقاومت بیشتری نسبت به روی داشت. بنابراین استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی ریز مغذی باعث آلودگی خاک‌های زراعی شده که نه‌تنها بازدارنده رشد محسوب شده بلکه باعث ورود آن‌ها به زنجیره‌های غذایی خواهد شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

انباشت،

رشد،

روی،

ریحان،

نیکل

استناد: صالحی اسکندری؛ بهروز، قاسمی؛ زهرا، موسوی ریزی؛ سمیه، (۱۴۰۴) اثر فلزات سنگین نیکل و روی بر میزان رشد، انباشت آن‌ها و جذب و انتقال آهن در گیاه ریحان (*Ocinum Basilicum L.*)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۵)، ۱۱۶۰-۱۱۴۷.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389532.669873>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389532.669873>

مقدمه

خاک دارای نقش کلیدی در چرخه‌ی تولید و بازیافت است. بنابراین آلودگی خاک، این چرخه‌ها را از طریق برهم زدن (اختلال) فرایندهای زیستی موجودات خاک‌زی و گیاهان مختل می‌نماید. افزایش آلودگی خاک به فلزات سنگین^۱ (HMs)، مشکلی زیست محیطی در سراسر جهان است که به دلیل رشد سریع صنعتی شدن، شهرنشینی، افزایش جمعیت و استفاده از کودهای آلی و معدنی، بدون توجه به اثرات مخرب آن‌ها بر طبیعت است. عناصری که چگالی آن‌ها بیش از ۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد را فلز سنگین می‌نامند (Mousavi et al., 2022; Mousavi et al., 2023). برخی از آن‌ها همانند سرب، جیوه و کادمیوم فاقد نقش تغذیه‌ای در گیاهان بوده و در غلظت‌های کم نیز سمی هستند ولی عناصر دیگری چون مس، آهن، کبالت، منگنز، روی، مولیبدن و نیکل که در غلظت‌های بسیار کم برای متابولیسم و رشد گیاهان ضروری هستند را عناصر مغذی کم‌مصرف (کمیاب) می‌نامند اما عناصر سنگین کم‌مصرف برخلاف نوع غیرمغذی در غلظت‌های بالا سمی هستند (Sarwar et al., 2017; Steingraber et al., 2022). فلزات سنگین برخلاف آلاینده‌های آلی، توسط موجودات زنده تجزیه‌پذیر نیستند بنابراین در طبیعت انباشت شده و به علت شباهت‌شان با برخی از عناصر ضروری جایگزین آن‌ها شده و رشد و متابولیسم موجودات زنده را مختل می‌نمایند (Wu et al., 2018).

نیکل از عناصر سنگین کم‌مصرف مغذی است. این عنصر به عنوان کوفاکتور برای فعالیت آنزیم‌های گلی اکسیداز-I و اوره‌آز که در متابولیسم نیتروژن گیاهان عالی ضروری هستند، عمل می‌کند (Iori et al., 2013; Mustafiz et al., 2014). بنابراین، کمبود نیکل ممکن است با علائمی چون تاخیر در رشد گیاه، پیری، کاهش متابولیسم نیتروژن و کاهش جذب آهن در گیاهان نمایان شود (Chen et al., 2020; Gajewska et al., 2006; Vidican et al., 2009; al., 2009). معمولاً، نیکل قابل دسترس در خاک در محدوده ۰/۲ تا ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است، با این حال میانگین محتوای نیکل در خاک تقریباً ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که با توجه به نوع بستر (خاک) متفاوت است و میزان آن در آب‌های سطحی کمتر از ۰/۰۰۵ میلی‌گرم در لیتر است (Chen et al., 2009; McGrath, 1995). با این حال، سمیت نیکل ناشی از نیکل مازاد در مقایسه با کمبود آن در گیاهان مشهودتر است (Alloway, 1995). منابع آلاینده طبیعی نیکل در محیط، به طور جزئی از آتش‌سوزی‌ها، فوران آتشفشان‌ها، گرد و غبار و بیشترین مقدار آن بواسطه فرسایش سنگ‌های آذرین است (Kachenko et al., 2007). آلودگی نیکل ناشی از فعالیت‌های صنعتی چون معدن‌کاوی، تولید مواد شیمیایی و کاتالیزورهای مختلف، صنایع سیمان و سرامیک، تولید مواد ضدعفونی کننده، صنایع ذوب و ساخت آلیاژ، استیل ضد زنگ، برخی باتری‌ها و انواع رنگ می‌باشد (Helaoui et al., 2023; Mustafa et al., 2023 Hassan et al., 2019;). میزان آلودگی ناشی از فعالیت‌های صنعتی بیش از ۱۰۰ برابر بیشتر از انتشارات ناشی از منابع طبیعی است (Chen et al., 2009).

افزایش غلظت نیکل در محیط کاهش دهنده جوانه‌زنی (Rao & Sresty, 2000; Salehi-Eskandari et al., 2017)، رشد گیاه (Molas, 2002)، تقسیم سلولی (Hassan et al., 2019)، زیست‌توده^۲ (Nakazawa et al., 2004)، جذب عناصر ضروری (Aggarwal et al., 1990)، فتوسنتز (Ameen et al., 2019; Ekmekci et al., 2020)، تعرق (Batool, 2018) شده که با کلروزه و نکروز برگ‌ها (González et al., 2015) نمایان می‌شود. بنابراین این اثرات سمی باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصول می‌شود (Ahmad et al., 2011).

روی (Zn) عنصر ضروری کم مصرف که در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مانند تقسیم سلولی، گسترش سلولی و سنتز پروتئین مشارکت کرده و نقش اساسی در ساختار کروماتین، بیان و تنظیم ژن، متابولیسم اسیدهای نوکلئیک، کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، پروتئین‌ها و همچنین کربن فتوسنتزی دارد (Kaur & Garg, 2021). روی همچنین برای سنتز اسید آمینه تریتوفان ضروری است که ماده اولیه تولید اکسین محسوب می‌شود (Tsonev & Cebola Lidon, 2012). روی برای عملکرد بیش از ۳۰۰ آنزیم مورد نیاز است که از آنها می‌توان به کربنیک‌آنیدراز، آلدولازها، کربوکسی‌پپتیدازها، آلکالین فسفاتازها، سوپراکسید دیسموتاز، فسفولیپاز و الکل دهیدروژناز اشاره کرد (Kaur & Garg, 2021). متالوآنزیم‌های روی (RNA پلیمرازها و رونویسی معکوس) در سنتز DNA و RNA دخالت دارند (Choi et al., 2018). میزان روی مورد نیاز برای بیشتر گیاهان ۳۰ تا ۲۰۰ میکروگرم در گرم وزن خشک است (Marschner, 2011). منابع آلاینده روی، ناشی از فعالیت‌هایی چون مصرف سوخت‌های فسیلی، کودهای فسفاته، کود دامی، سنگ آهک، استفاده از قارچ‌کش‌ها و قطعات پلاستیکی با روکشی از روی می‌باشد (Alloway, 2008). فعالیت بشر باعث افزایش میزان روی در گیاهان (بیش از ۳۰۰

1 - Heavy metals

2 -Biomass

میکروگرم روی در گرم وزن خشک برگ) شده که باعث نمایان شدن اثرات سمی و اختلالات متابولیکی در آن‌ها می‌شود (Kaur & Garg, 2021; Mohtadi & Schat, 2024).

سمیت روی، رشد ریشه را بوسیله صدمه به مناطق رشد طولی ریشه (مهار ناشی از روی) مهار کرده و با کاهش ظرفیت جذب عناصر غذایی ممکن است باعث مرگ سلولی شود (Simon et al., 2021). افزایش بیش از حد روی باعث اختلال در جذب عناصر ضروری (N, P, K, Mg, Ca, Fe و غیره) شده و جایابی^۱ آن‌ها در اندام‌های مختلف گیاه مختل می‌نماید (Garg & Singh, 2018) در نتیجه به طور غیرمستقیم بسیاری از پدیده‌های متابولیکی مانند رشد و فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kaur & Garg, 2021).

ریحان با نام علمی *Ocimum basilicum* L. گیاه دارویی متعلق به خانواده Lamiaceae است که از زمان باستان کشت و بهره‌برداری شده و در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری به وفور یافت می‌شود (Khakdan et al., 2016). اسانس آن دارای خاصیت ضد قارچی، باکتریایی و تریکوموناسی و کنترل کننده حشرات است. همچنین این اسانس در صنایع غذایی، آرایشی، بهداشتی و عطرسازی کاربردهای فراوانی دارد (Georgiadou et al., 2018).

گیاهان، به‌عنوان اولین حلقه‌ی زنجیره‌های غذایی، نه‌تنها با آب و خاک آلوده (HMs)، در ارتباط هستند بلکه با انتقال HMs، کیفیت و ایمنی غذا را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Mousavi et al., 2023). افزایش بیش از حد HMs، رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد در این پژوهش رشد و مقاومت گیاه ریحان در برابر غلظت‌های مختلف نیکل و روی مورد آزمایش قرار گرفت. بدین منظور، میزان رشد همچنین مقدار انباشت آن‌ها در ریشه و ساقه و اثرشان بر غلظت آهن در ریشه و ساقه مورد ارزیابی قرار گرفت تا اثر سمی آنها بر رشد گیاهان آشکار و میزان انتقال فلزات سنگین (نیکل و روی) به مصرف‌کنندگان مشخص گردد.

روش بررسی

مواد گیاهی و اعمال تنش نیکل و روی:

بذر گیاه ریحان سبز (*Ocimum basilicum*) از شرکت پاکان بذر تهیه شد. آزمایش‌ها سال ۱۳۹۶ در اتاق کشت دانشگاه اصفهان انجام شد. بذرها جهت ضدعفونی در محلول هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند. سپس با آب مقطر چندین بار شستشو داده شدند. دانه‌ها برای جوانه‌زنی به گلدان‌های حاوی پرلیت منتقل شده و با آب مقطر آبیاری شدند و در مرحله دو برگی با محلول هوگلند تغییر یافته تغذیه شدند. بعد از ۱۲ روز چهار گیاهچه یک‌دست به گلدان‌های پلاستیکی حاوی محیط هوگلند اصلاح شده یک دوم غلظت (نیم هوگلند) دارای 2 mM KNO_3 ، $2/5\text{ mM Ca(NO}_3)_2$ ، $3\text{ mM KH}_2\text{PO}_4$ ، $0/56\text{ mM MgSO}_4$ ، $1/5\text{ mM Fe(Na)-EDTA}$ ، $20\text{ }\mu\text{M ZnSO}_4$ ، $10\text{ }\mu\text{M MnSO}_4$ ، $1\text{ }\mu\text{M CuSO}_4$ ، $50\text{ }\mu\text{M H}_3\text{BO}_3$ ، $0/2\text{ }\mu\text{M Na}_2\text{MoO}_4$ و $100\text{ }\mu\text{M KCl}$ منتقل و pH محیط حدود ۵/۸ تنظیم شد و آن‌ها در اتاق کشتی با دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی، ۸ ساعت تاریکی با شدت نور ۲۰۰ میکرو مول فوتون بر متر مربع بر ثانیه و دمای 25 ± 5 درجه‌سانتی‌گراد نگهداری و هوادهی شدند (Salehi-Eskandari & Hesami, 2024). سپس گیاهچه‌های ۲۵ روزه به مدت ۱۰ روز تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نیکل و روی (به طور جداگانه) قرار گرفتند. غلظت‌های ۰، ۱۷، ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی‌مولار از سولفات نیکل ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{ H}_2\text{O}$) و برای ایجاد تیمارهای روی از غلظت‌های ۰، ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار از سولفات روی ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{ H}_2\text{O}$) استفاده شد. محلول‌های غذایی، هر چهار روز یک‌بار با محلول جدید تعویض شدند.

اندازه‌گیری رشد با محاسبه ماده خشک و تعیین غلظت نیکل، روی و آهن:

اندام‌های هوایی و ریشه‌ها پس از برداشت، از هم جدا و توزین شدند. سپس در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد آون (دارای تهویه)، به مدت ۷۲ ساعت نگهداری و مجدداً جهت تعیین وزن خشک، توزین شدند.

برای اندازه‌گیری میزان نیکل، روی و آهن در بافت‌های خشک، ۰/۱ گرم از نمونه‌های گیاهی پودر شده خشک به لوله‌های شیشه‌ای حاوی ۳ میلی‌لیتر محلول هضم کننده اسیدی منتقل شدند. این محلول دارای اسید کلریدریک ۶۵ درصد و اسید نیتریک ۶۵ درصد با نسبت ۱ به ۴ بود. جهت هضم اسیدی ابتدا در زیر هود به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده سپس به مدت ۴ ساعت در حمام شنی ۹۰ تا ۹۶ درجه‌سانتی‌گراد حرارت داده شدند. پس از خنک شدن آن‌ها، به میزان ۱/۵ میلی‌لیتر آب اکسیژنه افزوده و مجدداً ۳۰ دقیقه در حمام شن قرار داده شدند تا محلول بی‌رنگی حاصل شود. در نهایت نمونه‌ها صاف و حجم نهایی آنها با آب مقطر دیونیزه ۱۰ میلی‌لیتر گردید (Salehi-

(Eskandari & Hesami, 2024). مقدار عناصر نیکل، روی سرب بوسیله دستگاه طیف سنج اتمی (AAS, Shimadzu model 6200) اندازه گیری شد، دقت اندازه گیری دستگاه در حد میلی گرم در لیتر بود. میزان انتقال نیکل و روی به اندام های هوایی^۱ (TF) از تقسیم میزان این عناصر در یک گرم بافت خشک اندام های هوایی بر میزان آنها در یک گرم بافت خشک ریشه محاسبه شد (Salehi-Eskandari & Hesami, 2024).

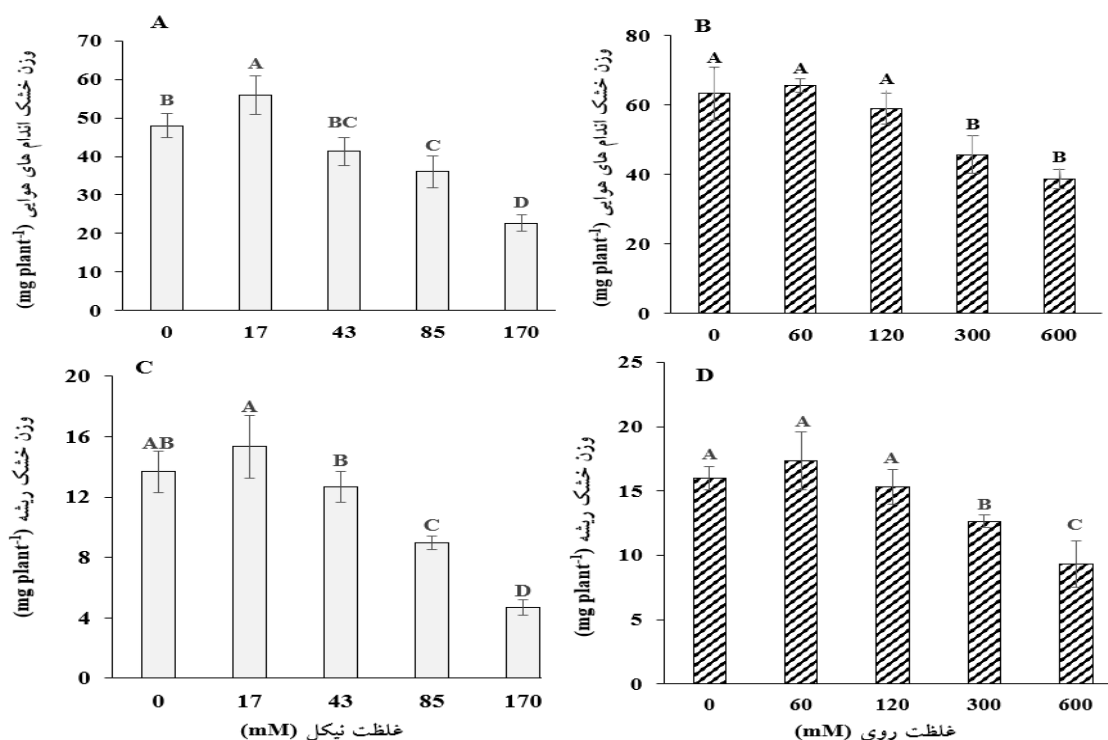
محاسبه های آماری:

آزمایش ها بر طبق، الگوی کاملاً تصادفی با حداقل سه تکرار برای هر تیمار صورت گرفت. با استفاده از نرم افزار SPSS، آنالیز و تحلیل آماری داده ها انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد و برای مقایسه میانگین ها از آزمون چند دامنه ای دانکن با ضریب اطمینان ۹۵ درصد بهره بردیم.

یافته های پژوهشی

اثر غلظت های مختلف نیکل و روی بر وزن خشک اندام های هوایی، وزن خشک ریشه و نسبت اندام های هوایی به ریشه:

نتایج اثر تیمارهای مختلف نیکل بر تغییرات میانگین وزن خشک اندام های هوایی در شکل A-۱، نشان داد که وزن خشک اندام های هوایی گیاه ریحان در اولین سطح تنش نیکل نسبت به شاهد افزایش معنی داری داشت ($P < 0.05$). اما با افزایش غلظت نیکل در محیط وزن خشک اندام های هوایی کاهش یافت. این کاهش در غلظت های ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی مولار، نسبت به گروه شاهد به ترتیب ۱۳/۸، ۲۵ و ۵۲/۸ درصد بود. اما این کاهش فقط در تیمار ۴۳ میلی مولار با گروه شاهد اختلاف معنی دار نداشت ($P > 0.05$) و تیمارهای بالاتر از ۴۳ میلی مولار هر تیمار نسبت به تیمار قبلی کاهش معنی داری داشت ($P < 0.05$). همان طور که شکل B-۱، اثر غلظت های مختلف روی، بر وزن خشک اندام های هوایی را نشان می دهد، فقط سطوح بالای تنش (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی مولار) موجب کاهش معنی دار وزن خشک اندام های هوایی شد ($P < 0.05$) و مابقی تیمارها (۶۰ و ۱۲۰ میلی مولار) با گروه شاهد اختلاف معنی داری نداشتند ($P > 0.05$).



شکل ۱- اثر تنش نیکل و روی بر وزن خشک اندام های هوایی (A, B) و وزن خشک ریشه (C, D) ریحان (*Ocimum basilicum*). هر عدد میانگین سه تکرار، $\pm$ انحراف از معیار است. حروف غیر مشابه، بیان گر اختلاف معنی دار بین داده ها براساس آزمون دانکن ($P < 0.05$) است. پاسخ وزن خشک ریشه به غلظت های مختلف نیکل در شکل C-۱، نشان داد که وزن خشک ریشه گیاه ریحان مشابه با اندام های

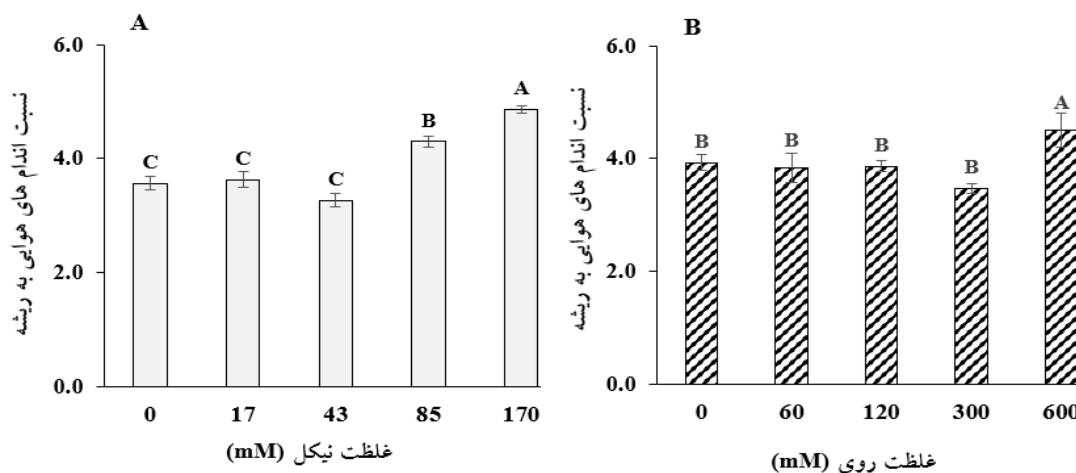
هوایی فقط در اولین سطح تنش نیکل نسبت به شاهد افزایش داشت. اما با افزایش غلظت نیکل در محیط وزن خشک ریشه نیز کاهش یافت. بطوری که در بالاترین سطح تنش (۱۷۰ میلی مولار) نسبت به گروه شاهد کاهش ۶۵/۹ درصد داشت ($P < 0.05$). وزن خشک ریشه (شکل D-۱) مجدداً مشابه با وزن خشک اندام‌های هوایی در غلظت‌های پایین تنش (۶۰ و ۱۲۰ میلی مولار) مشابه با گروه شاهد بود ($P > 0.05$). اما در سطوح بالاتر کاهش معنی‌داری داشت به‌طوری که در غلظت‌های ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی مولار، نسبت به گروه شاهد به ترتیب ۲۰/۸ و ۴۱/۷ درصدی کاهش یافت ($P < 0.05$).

نسبت اندام‌های هوایی به ریشه عناصر در تیمارهای مختلف فلزات سنگین (نیکل و روی) در شکل ۲ نشان داد که غلظت‌های پایین هر دو عنصر اثری بر این نسبت نداشت ($P > 0.05$). اثر افزایشی نیکل بر نسبت اندام‌های هوایی به ریشه در تیمارهای ۸۵ و ۱۷۰ میلی مولار نسبت به گروه شاهد به ترتیب ۲۰/۶ و ۳۶/۴ درصد بود ($P < 0.05$). اما این اثر افزایشی برای عنصر روی، فقط در بالاترین سطح تنش (۶۰۰ میلی مولار) معنی‌دار بود که باعث افزایش ۱۴/۴ درصد آن نسبت به گروه شاهد شد (شکل B-۲).

اثر غلظت‌های مختلف نیکل و روی بر تجمع و انتقال آن

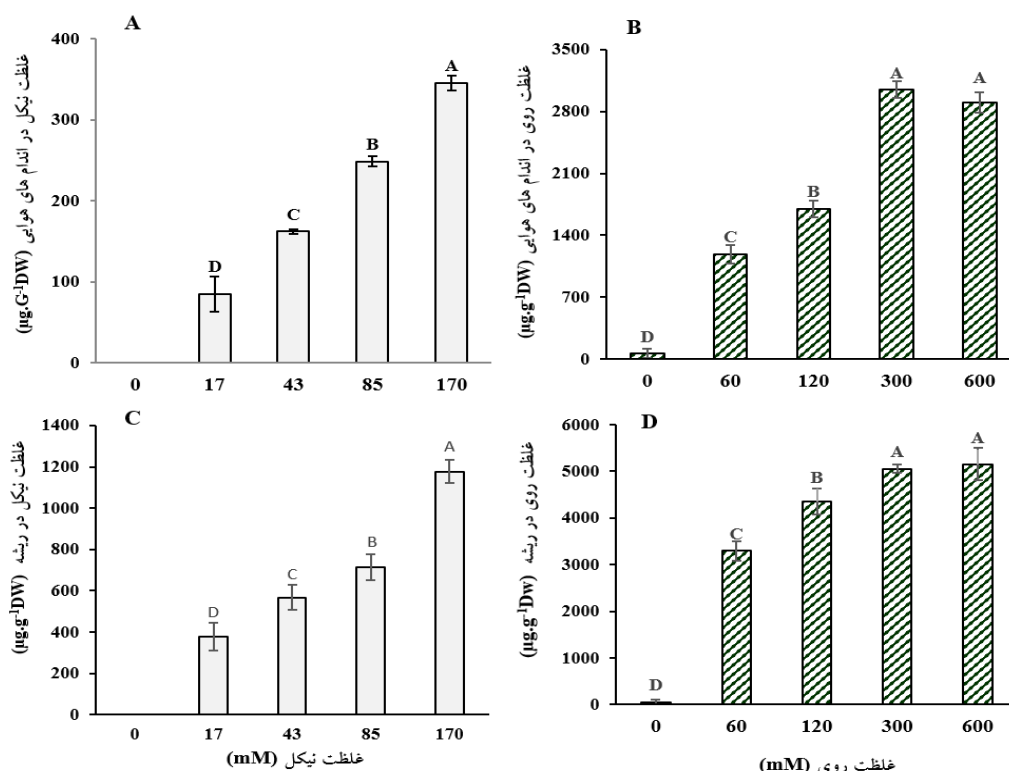
نتایج اثر غلظت‌های مختلف نیکل و روی بر جذب و انباشت آن‌ها (شکل C, D-۳) در ریشه گیاه ریحان نشان داد که جذب نیکل و روی با افزایش غلظت آن‌ها در محیط افزایش یافت. این افزایش برای هر تیمار نسبت به تیمار قبلی خود در هر دو عنصر، بجز بالاترین سطوح تنش روی (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی مولار) معنی‌داری شد ($P < 0.05$). انباشت نیکل در ریشه برای غلظت‌های ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی مولار، نسبت به تیمار ۱۷ میلی مولار به ترتیب ۵۱/۱، ۹۰/۵ و ۲۱۳/۳ درصد بود. در صورتی که تجمع روی در غلظت‌های ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی مولار، نسبت به غلظت ۶۰ میلی مولار به ترتیب ۳۲/۱، ۵۳/۴ و ۵۶/۳ درصد شد.

مطابق شکل A, B-۳ تجمع نیکل و روی در اندام‌های هوایی، مشابه انباشت این عناصر در ریشه بود. تجمع نیکل در اندام‌های هوایی برای غلظت‌های ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی مولار، نسبت به غلظت ۱۷ میلی مولار به ترتیب ۹۰/۱، ۱۹۳/۱ و ۳۰۷/۴ درصد شد. تجمع روی برای اندام‌های هوایی در غلظت‌های ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی مولار، نسبت به غلظت ۶۰ میلی مولار به ترتیب ۴۲/۸، ۱۵۶/۲ و ۱۴۴/۲۳ درصد بود.



شکل ۲- اثر تنش نیکل و روی بر نسبت اندام‌های هوایی به ریشه (A, B) گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*). هر عدد میانگین سه تکرار، $\pm$ انحراف از معیار است. حروف غیرمشابه، بیان‌گر اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها براساس آزمون دانکن ($P < 0.05$) است.

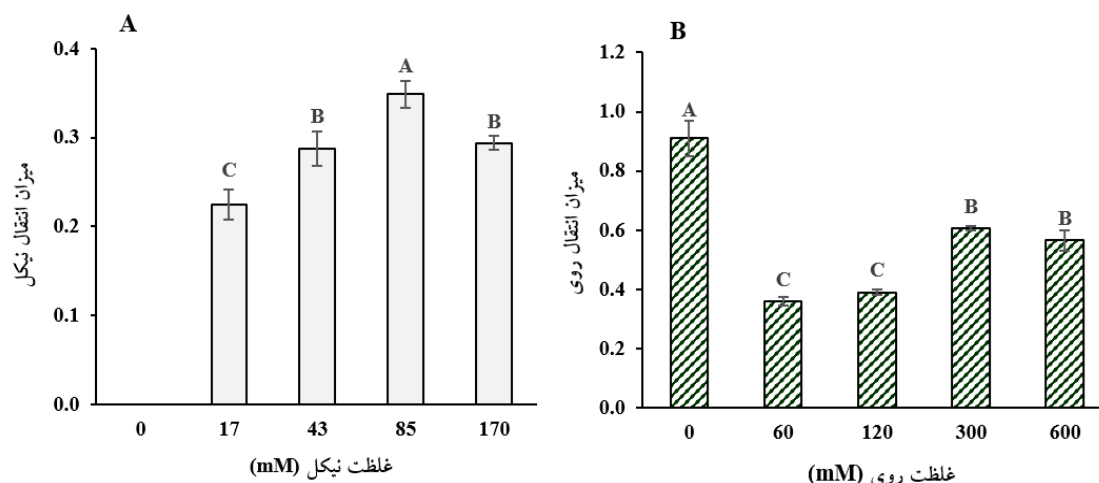
شکل A-۴ نشان داد، با افزایش غلظت نیکل در محیط، میزان انتقال آن، از ریشه به اندام‌های هوایی گیاه ریحان افزایش داشت ($P < 0.05$). به‌طوری که در غلظت‌های ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی مولار نیکل، نسبت به پایین‌ترین سطح تنش (۱۷ میلی مولار) به ترتیب ۲۸/۱، ۵۵/۴ و ۳۰/۹ درصد افزایش داشت. اما با افزایش غلظت روی در محیط میزان انتقال آن به اندام‌های هوایی کاهش داشت به‌طوری که در غلظت‌های ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی مولار روی، نسبت به گروه شاهد (۲ میکرومولار) کاهش ۶۰/۴، ۵۷/۱، ۳۳/۳ و ۳۷/۸ درصدی داشت (شکل B-۴). بالاترین (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی مولار) و پایین‌ترین (۶۰ و ۱۲۰ میلی مولار) سطوح تنش از لحاظ آماری باهم اختلاف معنی‌داری نداشتند ($P > 0.05$).



شکل ۳- اثر غلظت‌های مختلف نیکل و روی بر تجمع آن‌ها در ریشه (C, D) و اندام هوایی (C, D) گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*). هر عدد میانگین سه تکرار، $\pm$ انحراف از معیار است. حروف غیرمشابه، بیان‌گر اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها براساس آزمون دانکن ($P < 0.05$) است.

اثر غلظت‌های مختلف نیکل و روی بر تجمع آهن در ریشه و اندام‌های هوایی

نتایج اثر غلظت‌های مختلف نیکل بر جذب و انباشت آهن (شکل A-5) نشان داد که غلظت آهن با افزایش غلظت نیکل در ریشه ریحان افزایش یافت. این افزایش در غلظت‌های ۱۷، ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی‌مولار نیکل، نسبت به گروه شاهد به‌ترتیب افزایش ۱/۲۲، ۱/۳۶، ۱/۹ و ۱/۹ برابری داشت. اما بجز بالاترین سطح تنش (۱۷۰ میلی‌مولار نیکل)، مابقی غلظت‌ها هر تیمار نسبت به تیمار قبلی در یک سطح قرار گرفته و از لحاظ آماری باهم اختلاف معنی‌داری نداشتند ($P > 0.05$). میزان تجمع آهن در اندام‌های هوایی با افزایش غلظت نیکل برخلاف ریشه روند کاهشی داشت بطوریکه میزان غلظت آهن در تیمارهای ۱۷، ۴۳، ۸۵ و ۱۷۰ میلی‌مولار نیکل، نسبت به گروه شاهد به ترتیب ۹/۱، ۳۷/۱، ۴۹/۸ و ۵۸/۹ درصد کاهش یافت.

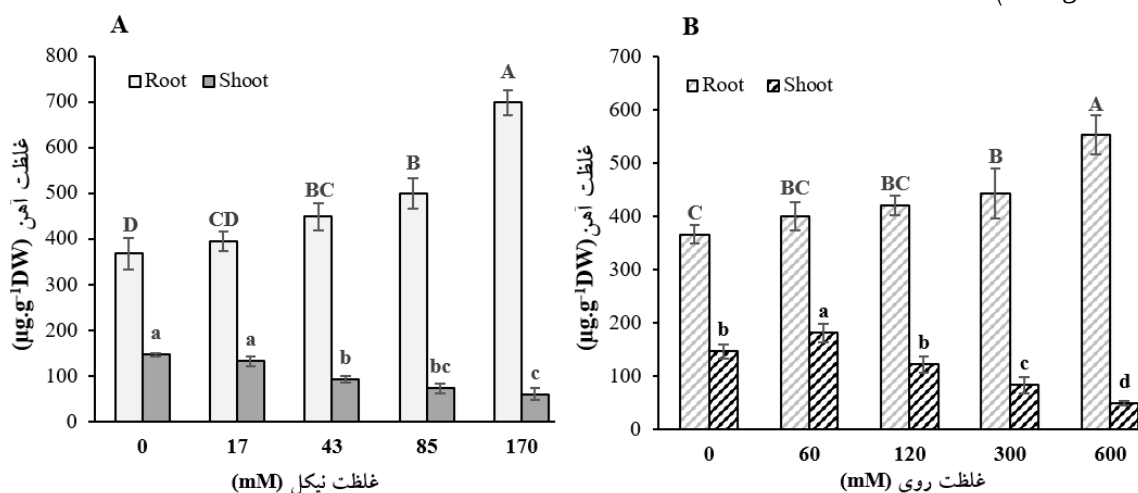


شکل ۴- اثر غلظت‌های مختلف نیکل و روی بر میزان انتقال آن‌ها در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*). هر عدد میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف از معیار که در شکل نشان داده شده است. حروف غیرمشابه، بیان‌گر اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها براساس آزمون دانکن ($P < 0.05$) است.

مطابق شکل B-۵، میزان انباشت آهن در ریشه گیاه ریحان با افزایش غلظت روی در محیط افزایش داشت. به طوری که در غلظت‌های ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار روی، نسبت به گروه شاهد (۲ میکرومولار) به ترتیب افزایش ۱/۰۹، ۱/۱۴، ۱/۲۱ و ۱/۵۱ برابری نسبت به گروه شاهد نشان داد که این افزایش فقط در بالاترین سطوح تنش (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار) نسبت به گروه شاهد معنی‌دار بود ($P < 0.05$). میزان انتقال آهن از ریشه به اندام‌های هوایی گیاه ریحان با افزایش تنش روی در محیط روند متغیری داشت بطوریکه در پایین‌ترین سطح تیمار (۶۰ میلی‌مولار) میزان روی نسبت به گروه شاهد افزایش ۲۳/۸ درصد داشت ($P < 0.05$). اما در سطوح بالاتر تنش ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار نسبت به گروه شاهد به ترتیب ۱۶/۲، ۴۳/۱ و ۶۶/۸ درصد کاهش یافت. این کاهش فقط در بالاترین سطوح (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار روی) نسبت به گروه شاهد معنی‌دار شد ($P < 0.05$).

بحث

آلودگی محیط زیست با فلزات سنگین یک معضل جهانی است که حیات انسان‌ها و دیگر موجودات را تهدید می‌نماید. برخی از فلزات سنگین از جمله نیکل و روی در غلظت‌های بسیار کم، برای رشد یا متابولیسم گیاهان مورد نیاز هستند که آن‌ها را به عنوان عناصر کم‌مصرف در نظر می‌گیرند (Gautam et al., 2017). در این پژوهش وزن خشک اندام‌های هوایی، وزن خشک ریشه، با افزایش غلظت نیکل و روی کاهش یافت به طوری که کمترین رشد در بالاترین غلظت نیکل و روی (به ترتیب ۱۷۰ و ۶۰۰ میلی‌مولال نیکل و روی) رخ داد (شکل ۱). انباشت بیش از حد نیکل در گیاهان از طریق جایگزین شدن آن با سایر عناصر ضروری منجر به غیرفعال شدن آنزیم‌ها، اختلال در یکپارچگی غشاء و تغییر در ساختارهای مولکولی شده که پیامد آن تغییر در فرآیند فیزیولوژیکی سلول است که با کاهش رشد نمایان می‌شود (Wakeel et al., 2020). افزایش بیش از حد روی، رشد برگ‌ها را از طریق کاهش تقسیم، طولی شدن سلول‌ها کاهش می‌دهد (Kaur & Garg, 2021). افزایش سطح روی با صدمه به سازمندی میتوکندری‌ها باعث کاهش سطح نیکوتین آمید (ویتامین‌های گروه B) می‌شود که با تسریع تجزیه NAD^+ و کاهش متابولیسم انرژی همراه می‌شود و در نهایت کاهش رشد گیاه را در پی خواهد داشت (Zhang et al., 2019).



شکل ۵- اثر غلظت‌های مختلف نیکل و روی بر میزان انباشت آهن در ریشه و اندام‌های هوایی گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*). هر عدد میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف از معیار که در شکل نشان داده شده است. حروف غیرمشابه، بیان‌گر اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها براساس آزمون دانکن ($P < 0.05$) است.

میزان کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی در سطوح بالای تنش نیکل (۸۵ و ۱۷۰ میلی‌مولال) برای گیاه ریحان متناسب با افزایش غلظت بود بطوریکه وزن خشک اندام‌های هوایی نسبت به گیاهان شاهد به ترتیب ۲۵ و ۵۲/۷ درصد کاهش داشت (شکل A-۱) اما این کاهش برای عنصر روی (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولال) با افزایش غلظت متناسب نبود بطوریکه وزن خشک اندام‌های هوایی نسبت به گیاهان شاهد در این تیمارها به ترتیب ۲۷/۸ و ۳۸/۹ درصد کاهش داشت (شکل B-۱) که نشان‌دهنده سمیت یا حساسیت بیشتر گیاه ریحان به نیکل است. سمیت بالاتر نیکل در مقایسه با روی، در دیگر گونه‌های گیاهی نیز مشاهده شده است که ممکن است بعلت استقرار بیشتر

نیکل در سمپلاست گیاهان بیش‌انباشت‌گر^۱ و محدود‌کننده^۲ باشد (Seregin et al., 2014). کمترین وزن خشک ریشه برای هر دو فلز سنگین (نیکل و روی) در آخرین سطح تنش مشاهده شد. کاهش رشد ریشه نسبت به اندام‌های هوایی باعث افزایش نسبت اندام‌های هوایی به ریشه می‌شود که نشان‌دهنده اثر سمیت بیشتر این عناصر، در ریشه است (Kaur & Garg, 2021). مهار بیشتر رشد ریشه نسبت به اندام‌های هوایی ناشی از تجمع بیشتر نیکل و روی در ریشه (شکل ۳) است که منجر به مهار رشد طولی و تقسیم سلولی در ریشه می‌شود و ممانعت از رشد اندام‌های هوایی بیشتر ناشی از کمبود جذب آب و مواد غذایی در ریشه است (Salehi-Eskandari et al., 2017; Visioli et al., 2014). اثر تیمارهای مختلف فلزات سنگین (نیکل و روی) بر نسبت اندام‌های هوایی به ریشه (شکل ۲) نشان داد که نیکل در سطوح بالای تنش (۸۵ و ۱۷۰ میلی‌مولار) اثر افزایشی داشت که نشان‌دهنده اثر مهاری فلزات سنگین در ریشه است اما این اثر افزایشی برای عنصر روی فقط در بالاترین سطح تنش (۶۰۰ میلی‌مولار) معنی‌دار بود. که نشان می‌دهد گیاه ریحان نسبت به روی مقاوم تر است. نتایج ما با گزارش دیگر محققین مطابقت دارد چون گیاهان خانواده نعناع (Lamiaceae) که ریحان هم جزئی از آنهاست بیش مقاوم^۳ به روی محسوب شده بنابراین قادرند در غلظت‌های بالای روی رشد نمایند (Broadley et al., 2007).

میزان انباشت نیکل و روی در ریشه و اندام‌های هوایی با افزایش تدریجی غلظت آن‌ها در محیط افزایش داشت اما این افزایش در غلظت‌های بالای روی معنی‌دار نشد که نشان می‌دهد مکانیسم جذب این دو عناصر متفاوت است. اما همواره میزان انباشت این عناصر (نیکل و روی) در ریشه بیشتر از اندام‌های هوایی است (شکل ۳). گیاهان از لحاظ میزان تجمع فلزات سنگین در ریشه یا اندام‌های هوایی به‌ترتیب به دو گروه محدود‌کننده و انباشت‌گر^۴ تقسیم می‌شوند (Seregin et al., 2014). میزان انتقال نیکل از ریشه به اندام‌های هوایی گیاه ریحان با افزایش غلظت آن در محیط افزایش داشت بیشترین میزان انتقال (۰/۳۵) در تیمار ۸۵ میلی‌مولار نیکل و میانگین میزان انتقال نیکل در تیمارهای مختلف ۰/۲۹ ثبت گردید. بیشترین میزان انتقال روی در تیمار شاهد ثبت شد و میانگین میزان انتقال روی در تیمارهای مختلف ۰/۵۶ بود (شکل ۴). با توجه به اینکه میزان انتقال هر دو عنصر ضروری کمتر از یک می‌باشد بنابراین این گیاهان برای عناصر ضروری نیکل و روی محدود‌کننده محسوب می‌شوند (Antonkiewicz et al., 2016).

افزایش غلظت نیکل و روی در محیط با افزایش غلظت آهن در ریشه و کاهش انتقال آن به اندام‌های هوایی همراه شد. میزان کاهش انتقال آهن به اندام هوایی در تنش نیکل بیشتر بود (شکل ۵). نتایج ما با گزارش دیگر محققین مطابقت داشته و افزایش نیکل در محیط از طریق رقابت با دیگر کاتیون‌ها در محل جذب، مانع از جذب و انتقال آن‌ها به اندام‌های هوایی می‌شود که ترتیب بازدارندگی نیکل ($Na^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Co^{2+} < Fe^{2+}$) نشان می‌دهد بیشترین بازدارندگی آن برای جذب و انتقال مربوط به آهن است (Helaoui et al., 2023). با افزایش غلظت نیکل در محیط برخلاف افزایش غلظت آهن در ریشه، غلظت آن در اندام‌های هوایی کاهش یافت. احتمالاً میزان انباشت آهن در پوست^۵ ریشه افزایش یافته چون اغلب انتقال آن در این قسمت، آپوپلاستی است اما انتقال آن از لایه آندورم به آوند چوبی سیمپلاستی است بنابراین افزایش غلظت نیکل، انتقال آن را محدود کرده است. با افزایش غلظت روی در محیط مقدار آهن در ریشه افزایش یافت چون روی از طریق ناقلین کاتیونی (بجای آهن) به اندام‌های هوایی منتقل شده به همین دلیل مقدار زیادی از آهن در ریشه باقی می‌ماند (Dinh et al., 2015).

نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج می‌توان چنین استنباط کرد که گیاه ریحان نسبت به عناصر سنگین ضروری نیکل و روی محدود‌کننده محسوب شده و مقدار زیادی از آن‌ها را در ریشه انباشت می‌نماید به‌همین علت میزان کاهش رشد ریشه نسبت اندام‌های هوایی در غلظت‌های بالای نیکل و روی مشهود بود هرچند، این گیاه مقاومت بیشتری نسبت به روی داشت. با افزایش غلظت عناصر سنگین ضروری (نیکل و روی) در محیط، میزان انباشت آهن در ریشه، افزایش و میزان انتقال آن به اندام‌های هوایی کاهش یافت. یکی از علل کاهش رشد در اندام‌های هوایی، کمبود عناصر ضروری برای رشد است. بنابراین استفاده بهینه از کودهای شیمیایی ریز مغذی باعث جلوگیری از آلودگی خاک‌های زراعی به فلزات سنگین شده که نه‌تنها بازدارنده رشد گیاهان محسوب شده بلکه باعث ورود آن‌ها در زنجیره غذایی شده که برای مصرف

1- Hyperaccumulators

2 - Excluders

3- Hypertolerance

4- Accumulators

5- Cortex



کنندگان، مضر خواهند بود.

سپاس‌گزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان به دلیل حمایت مالی از این تحقیق صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

صالحی اسکندری، بهروز و حسامی، رضا. (۱۴۰۲). مقایسه‌ی تجمع سرب و میزان رشد دو جمعیت فلز دوست و غیر فلزدوست *Marrubium cuneatum* در شرایط هیدروپونیک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴(۱۱)، ۱۶۸۱-۱۶۹۵.

REFERENCES

- Aggarwal, N., Laura, J. S. & Sheoran, I. S. (1990). Effect of cadmium and nickel on germination, early seedling growth and photosynthesis of wheat and pigeonpea. 141-147.
- Ahmad, M. S. A., Ashraf, M. & Hussain, M. (2011). Phytotoxic effects of nickel on yield and concentration of macro-and micro-nutrients in sunflower (*Helianthus annuus* L.) achenes. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 1295-1303.
- Alloway, B. (1995). Soil processes and the behaviour of metals. *Heavy metals in soils*, 13, 3488.
- Alloway, B. (2008). Zinc in Soils and Crop Nutrition. International Zinc Association and International Fertilizer Association, 16.
- Ameen, N., Amjad, M., Murtaza, B., Abbas, G., Shahid, M., Imran, M., . . . Niazi, N. K. (2019). Biogeochemical behavior of nickel under different abiotic stresses: toxicity and detoxification mechanisms in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 10496-10514.
- Antonkiewicz, J., Jasiewicz, C., Koncewicz-Baran, M. & Sendor, R. (2016). Nickel bioaccumulation by the chosen plant species. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, 1-11.
- Batool, S. (2018). Impact of bioaccumulation of nickel on growth, seed yield and mineral uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties. *Pak. J. Bot*, 50(6), 2147-2150.
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I. & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New phytologist*, 173(4), 677-702.
- Chen, C., Huang, D. & Liu, J. (2009). Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects. *Clean-soil, air, water*, 37(4-5), 304-313.
- Choi, S., Hu, Y.-M., Corkins, M. E., Palmer, A. E. & Bird, A. J. (2018). Zinc transporters belonging to the Cation Diffusion Facilitator (CDF) family have complementary roles in transporting zinc out of the cytosol. *PLoS genetics*, 14(3), e1007262.
- Dinh, N. T., Vu, D. T., Mulligan, D. & Nguyen, A. V. (2015). Accumulation and distribution of zinc in the leaves and roots of the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens*. *Environmental and Experimental Botany*, 110, 85-95.
- Ekmekci, Y., Erdal, Ş. Ç., Nalçaiyi, A. S. B. & Cicek, N. (2020). Acquisition of boron tolerance by salt pretreatment in two sunflower cultivars. *Turkish Journal of Botany*, 44(2), 153-166.
- Gajewska, E., Skłodowska, M., Słaba, M. & Mazur, J. (2006). Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. *Biologia plantarum*, 50, 653-659.
- Garg, N. & Singh, S. (2018). Arbuscular mycorrhiza *Rhizophagus irregularis* and silicon modulate growth, proline biosynthesis and yield in *Cajanus cajan* L. Millsp.(pigeonpea) genotypes under cadmium and zinc stress. *Journal of plant growth regulation*, 37, 46-63.
- Gautam, S., Rathoure, A., Chhabra, A. & Pandey, S. (2017). Effects of nickel and zinc on biochemical parameters in plants-a review. *Octa Journal of Environmental Research*, 5(1).
- Georgiadou, E. C., Kowalska, E., Patla, K., Kulbat, K., Smolińska, B., Leszczyńska, J. & Fotopoulos, V. (2018). Influence of heavy metals (Ni, Cu, and Zn) on nitro-oxidative stress responses, proteome regulation and allergen production in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants. *Frontiers in Plant Science*, 9, 862.
- González, C. I., Maine, M. A., Cazenave, J., Hadad, H. R. & Benavides, M. P. (2015). Ni accumulation and its effects on physiological and biochemical parameters of *Eichhornia crassipes*. *Environmental and*

- Experimental Botany*, 117, 20-27.
- Hassan, M. U., Chattha, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Aamer, M., Nawaz, M., . . . Khan, T. A. (2019). Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 12673-12688.
- Helaoui, S., Mkhinini, M., Boughattas, I., Bousserhine, N. & Banni, M. (2023). Nickel Toxicity and Tolerance in Plants. *Heavy Metal Toxicity and Tolerance in Plants: A Biological, Omics, and Genetic Engineering Approach*, 231-250.
- Iori, V., Pietrini, F., Cheremisina, A., Shevyakova, N. I., Radyukina, N., Kuznetsov, V. V. & Zacchini, M. (2013). Growth responses, metal accumulation and phytoremoval capability in *Amaranthus* plants exposed to nickel under hydroponics. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224, 1-10.
- Kachenko, A. G., Singh, B. & Bhatia, N. P. (2007). Heavy metal tolerance in common fern species. *Australian journal of botany*, 55(1), 63-73.
- Kaur, H. & Garg, N. (2021). Zinc toxicity in plants: a review. *Planta*, 253(6), 129.
- Khakdan, F., Ranjbar, M., Nasiri, J., Ahmadi, F. S., Bagheri, A. & Alizadeh, H. (2016). The relationship between antioxidant compounds contents and antioxidant enzymes under water-deficit stress in the three Iranian cultivars of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, 1-15.
- Marschner, H. (2011). Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.
- McGrath, D. (1995). Organic micropollutant and trace element pollution of Irish soils. *Science of the Total Environment*, 164(2), 125-133.
- Mohtadi, A. & Schat, H. (2024). A comparison of nickel and zinc uptake and translocation in three species of Brassicaceae: The Ni hyperaccumulator *Odontarrhena corsica* and two non-hyperaccumulators, *Aurinia saxatilis* and *Lobularia maritima*. *Ecological Research*.
- Molas, J. (2002). Changes of chloroplast ultrastructure and total chlorophyll concentration in cabbage leaves caused by excess of organic Ni (II) complexes. *Environmental and Experimental Botany*, 47(2), 115-126.
- Mousavi, S. M., Raiesi, T., Sedaghat, A., & Srivastava, A. K. (2023). Potentially Toxic Metals: Their Effects on the Soil-Human Health Continuum. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 12(2), 86-101.
- Mousavi, S. M., Brodie, G., Payghamzadeh, K., Raiesi, T., & Srivastava, A. K. (2022). Lead Bioavailability in the Environment: Its Exposure and and Effects. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 10(1), 1-14.
- Mustafa, A., Zulfiqar, U., Mumtaz, M. Z., Radziemska, M., Haider, F. U., Holatko, J., . . . Kintl, A. (2023). Nickel (Ni) phytotoxicity and detoxification mechanisms: A review. *Chemosphere*, 328, 138574.
- Mustafiz, A., Ghosh, A., Tripathi, A. K., Kaur, C., Ganguly, A. K., Bhavesh, N. S., . . . Singla-Pareek, S. L. (2014). A unique Ni²⁺-dependent and methylglyoxal-inducible rice glyoxalase I possesses a single active site and functions in abiotic stress response. *The Plant Journal*, 78(6), 951-963.
- Nakazawa, R., Kameda, Y., Ito, T., Ogita, Y., Michihata, R. & Takenaga, H. (2004). Selection and characterization of nickel-tolerant tobacco cells. *Biologia plantarum*, 48, 497-502.
- Rao, K. M. & Sresty, T. (2000). Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. *Plant science*, 157(1), 113-128.
- Salehi-Eskandari, B., Ghaderian, S. M., Ghasemi, R. & Schat, H. (2017). Optimization of seed germination in an Iranian serpentine endemic, *Fortuynia garcinii*. *Flora*, 231, 38-42.
- Salehi-Eskandari, B., & Hesami, R. (2024). A comparison of lead accumulation and growth factors of metalcolous and non-metalcolous populations of *Marrubium cuneatum* in hydroponic conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1681-1695. (In Persian).
- Salehi Eskandari, B., Ghaderian, S. M. & Schat, H. (2017). The role of nickel (Ni) and drought in serpentine adaptation: contrasting effects of Ni on osmoprotectants and oxidative stress markers in the serpentine endemic, *Cleome heratensis*, and the related non-serpentinophyte, *Cleome foliolosa*. *Plant and Soil*, 417, 183-195.
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., . . . Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710-721.
- Seregin, I., Erlikh, N. & Kozhevnikova, A. (2014). Nickel and zinc accumulation capacities and tolerance to these metals in the excluder *Thlaspi arvense* and the hyperaccumulator *Noccaea caerulea*. *Russian journal of plant physiology*, 61, 204-214.
- Šimon, M., Shen, Z.-J., Ghoto, K., Chen, J., Liu, X., Gao, G.-F., . . . Zhang, J.-Y. (2021). Proteomic investigation of Zn-challenged rice roots reveals adverse effects and root physiological adaptation. *Plant*



and Soil, 460, 69-88.

- Steingraber, L. F., Ludolph, C., Metz, J., Kierdorf, H. & Kierdorf, U. (2022). Uptake of lead and zinc from soil by blackberry plants (*Rubus fruticosus* L. agg.) and translocation from roots to leaves. *Environmental Advances*, 9, 100313.
- Tsonev, T. & Cebola Lidon, F. J. (2012). Zinc in plants-an overview. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 24(4).
- Vidican, R., Mihăiescu, T., Pleșa, A. & Crișan, I. (2020). Conceptual delimitation of heavy metals in environmental science. *ProEnvironment Promediu*, 13(43).
- Visioli, G., Conti, F. D., Gardi, C. & Menta, C. (2014). Germination and root elongation bioassays in six different plant species for testing Ni contamination in soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92, 490-496.
- Wakeel, A., Xu, M. & Gan, Y. (2020). Chromium-induced reactive oxygen species accumulation by altering the enzymatic antioxidant system and associated cytotoxic, genotoxic, ultrastructural, and photosynthetic changes in plants. *International journal of molecular sciences*, 21(3), 728.
- Wu, W., Wu, P., Yang, F., Sun, D.-l., Zhang, D.-X. & Zhou, Y.-K. (2018). Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. *Science of the Total Environment*, 630, 53-61.
- Zhang, H., Yang, J., Li, W., Chen, Y., Lu, H., Zhao, S., . . . Li, C. (2019). PuHSFA4a enhances tolerance to excess zinc by regulating reactive oxygen species production and root development in *Populus*. *Plant Physiology*, 180(4), 2254-2271.