

## ارزیابی ظرفیت گیاه پالایی کادمیوم توسط بیش‌انباشت‌گر نیکل *Odontarrhena inflata*

### چکیده

پژوهش حاضر به منظور بررسی، پتانسیل انباشت کادمیوم و میزان رشد گیاه بیش‌انباشت‌گر نیکل بومی ایران (*Odontarrhena inflata*) در مقایسه با نیکل انجام شد. البته ویژگی‌های شاخص خاک‌های سرپنتینی منطقه سروآباد کرمانشاه نیز ارزیابی شد. بدین منظور ابتدا ویژگی‌های خاک این منطقه از لحاظ اسیدیته، مواد آلی و عناصر سنگین ارزیابی شد. سپس میزان رشد و تجمع گیاه بیش‌انباشت‌گر در حضور نیکل و کادمیوم بررسی شد. گیاه بیش‌انباشت‌گر در محیط هیدروپونیک کشت شد و به مدت ۱۴ روز گیاهان در معرض تیمارهای مختلف نیکل و کادمیوم قرار گرفتند. نتایج نشان داد خاک‌های سرپنتینی این منطقه، سرشار از آهن و منیزیم، دارای کمبود مواد آلی، میانگین بالای نیکل (۱۴۶۸ میلی‌گرم در کیلوگرم)، نسبت پایین کلسیم به منیزیم (۰/۴۷) و اسیدیته قلیایی است. با افزایش غلظت نیکل و کادمیوم رشد گیاه کاهش داشت. بطوری‌که در بالاترین تیمار نیکل (۳۵۰ میکرومولار) و کادمیوم (۴۰ میکرومولار) وزن خشک اندام هوایی به ترتیب ۴۷/۷ و ۶۵/۵ درصد نسبت به گروه شاهد کاهش داشت. تجمع نیکل و کادمیوم در گیاه با افزایش غلظت آنها در محیط افزایش یافت. میانگین میزان انتقال نیکل و کادمیوم از ریشه به ساقه به ترتیب ۲/۲ و ۰/۱۳ بود که منجر به تجمع نیکل در اندام‌های هوایی و کادمیوم در ریشه گیاه *O. inflata* شد با توجه به انباشت بیش از ۱۰۰۰ میکروگرم نیکل در گرم وزن خشک این گیاه در پایین‌ترین غلظت (۵۰ میکرومولار)، گیاه *O. inflata* برای نیکل بیش‌انباشت‌گر ولی برای کادمیوم محدود کننده است. گیاه *O. inflata* با سازگاری به خاک‌های سرپنتینی و کده‌بندی نیکل در واکنول، دیواره سلولی و کرک‌های محافظتی اندام‌های هوایی قادر به انباشت آن در اندام‌های هوایی است. اما نسبت به تجمع فلز کادمیوم حساس است. با توجه به سازگاری این گیاه به خاک‌های سرپنتینی ایران می‌توان از آن برای معدن‌کاوی در مناطق سرپنتینی ایران و کاه‌پایی نیکل از خاک‌های آلوده بهره برد.

واژه‌های کلیدی: فلز سنگین، رشد، خاک‌های سرپنتینی، گیاه پالایی، میزان انتقال

## Evaluation of the potential cadmium phytoremediation in the nickel hyperaccumulating plant *Odontarrhena inflata*

### Abstract

To understand the potential for cadmium (Cd) accumulation and growth rate in the native Iranian nickel-hyperaccumulating plant (*Odontarrhena inflata*) compared with nickel (Ni). Then, the characteristics of serpentine soils in the Sarvabad region of Kermanshah province were assessed. For this purpose first, the soil characteristics were evaluated for acidity, organic matter, and elements, and then the resistance of the *O. inflata* to Ni and Cd was examined. The hyperaccumulator plants were grown in a hydroponic medium, and they were exposed to different concentrations of Ni and Cd for 14 days. The results showed that the serpentine soils of this region are rich in Fe and Mg, poor in organic matter, have a high average Ni content (1468 mg/kg), a low Ca/Mg ratio (0.47), and have alkaline acidity. With increasing concentrations of Ni and Cd, the growth decreased, and Ni and Cd in the medium, the accumulation of these metals in the root and shoot of *O. inflata* is enhanced. The average transfer location factors for Ni and Cd were 2.7 and 0.43, respectively, resulting in the accumulation of Ni in the shoots and Cd in the roots of *O. inflata*, indicating that this plant is a hyperaccumulator of Ni but an excluder of Cd. *O. inflata*. It is sensitive to the accumulation of Cd. Regarding the adaptation of this plant to Iranian serpentine soils, it can be used for nickel phytomining and phytoremediation in serpentine and nickel-contaminated soils.

**Keywords:** Growth, Heavy metals, Phytoremediation, Translocation factor, Serpentine soils.

# Evaluation of the potential cadmium phytoremediation in the nickel hyperaccumulating plant *Odontarrhena inflata*

## Introduction

Serpentine soils are derived primarily from *ultramafic rocks composed of ferromagnesian silicates*. These soils are often rich in heavy metals, predominantly Ni, and poor in essential macronutrients. Moreover, they are usually shallow, stony, highly porous, and low in organic matter, resulting in low water-holding capacity. Low Ca/Mg ratios further characterize them. Therefore, vegetations of natural serpentine are floristically very distinct from non-serpentine vegetations in neighboring areas. Serpentine areas are widespread in many parts of our country, but in the western parts (Kermanshah), they have high precipitation (700 mm) and rich vegetation. Phytomining can be considered a new technology that uses a hyperaccumulator for economic metal recovery. It provides an innovative approach that can exploit low-grade Ni resources in soils derived from ultramafic outcrops, which are not accessible using conventional mining technologies. Hyperaccumulator plants collected heavy metals in their shoots at the highest concentration specific to each heavy metal. *Odontarrhena inflata* is a nickel-hyperaccumulating Iranian serpentine endemic in Kermanshah province. It has high potential for Ni-agricultural mining. Cadmium (Cd) is one of the most toxic non-essential heavy metals. Some hyperaccumulator plants can accumulate more than one heavy metal. Given that there was no report on the resistance and accumulation of this hyperaccumulator plant against the heavy metal cadmium, we decided to evaluate its resistance and accumulation compared to nickel in the present study.

## Material and methods

Soil samples were collected from around the roots of the Ni-hyperaccumulator *O. inflata* plant growing in a serpentine habitat. The acidity, water holding capacity, and organic compounds were determined and after acid digestion, the concentration of heavy elements was measured by the use of acid digestion and different solvents. Seeds of *O. inflata* were collected around the Kermanshah serpentine soils. The seedlings were grown in a greenhouse with a 16 h photoperiod (light intensity  $200 \mu\text{Em}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), day/night temperature of 25/20 °C, and regularly watered with one-fourth-strength modified Hoagland's solution for 25 days. Then they were exposed to 0, 50, 100, 200, 300, and 350 mg/L treatments of Ni and 0, 10, 20, and 40 mg/L treatments of Cd for 14 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 and Cd concentrations were determined in roots and shoots using a flame atomic absorption spectrophotometer (AAS, Shimadzu model 6200). The Ni and Cd translocation factor (TF) from root to shoot was calculated as their concentration in the shoot divided by their concentration in the root.

## Result

The results show that the serpentine soils of this region are rich in Fe (iron) and Mg (magnesium), low in organic matter and water holding capacity, high average Ni (1468 mg/kg), low calcium to magnesium ratio (47/0), and alkaline pH. With increasing concentrations of Ni and Cd, the shoot and root dry weight decreased, so that in the highest concentrations of Ni (350  $\mu\text{m}$ ) and cadmium (40  $\mu\text{m}$ ), the dry weight of shoots decreased by 47.7 and 65.5%, respectively, compared to the control group, and the dry weight of roots reduced in these highest treatments by 38.4% and 46.2%, respectively. It should be noted that the high concentration of Ni in the medium was more than 8.7-fold that of Cd. Ni and Cd accumulated in the roots at the highest concentration by 3140 and 3858  $\mu\text{g g}$  dry weight, respectively. But these metals accumulated in the shoot were 6516 (Ni) and 353 (Cd)  $\mu\text{g g}$  dry weight, respectively, of *O. inflata*. The translocation factors (Tf) were recorded, 2.7 and 0.13 for Ni and Cd, respectively.

## Conclusions

The characteristics of the studied soil indicate nutrient deficiency, rich in heavy elements, especially Fe, Mg, and Ni, which is in agreement with other reports of serpentine soils. The dry weight of the shoots and roots of the hyperaccumulator plant decreased as the concentrations of Ni and Cd in the medium increased. This decrease was greater at the highest level of Cd. Accumulation of Ni and Cd in shoots and roots increased with increasing concentrations of these heavy elements in the medium. The translocation factor of Ni and Cd was higher and lower than 1, respectively, so Ni and Cd accumulated in the shoots and roots of *O. inflata*. This demonstrates that *O. inflata* is a Ni-hyperaccumulator but an excluder for Cd. Therefore, the fact that this plant is a hyperaccumulator of Ni cannot be a basis for its hyperaccumulation of other heavy elements. Regarding the adaptation of this plant to Iranian serpentine soils, it can be used for nickel phytomining and phytoremediation in serpentine and nickel-contaminated soils.

خاک‌های سرپنتینی<sup>۱</sup> از سنگ‌های بستر آلترامافیک<sup>۲</sup> در اثر هوازدگی از سنگ‌های ایجاد می‌شوند. آنها دارای غلظت بالایی از نیکل (Ni)، کروم (Cr)، کبالت (Co)، منگنز (Mn)، آهن (Fe) و منیزیم (Mg) هستند. این خاک‌ها با فقر عناصر غذایی ضروری چون پتاسیم (K)، فسفر (P) و کلسیم (Ca) مواجه هستند و نسبت کلسیم به منیزیم، محتوای مواد آلی و ظرفیت نگهداری آب در آنها پایین است (Ghafoori et al., 2022; Kazakou et al., 2008; Nkrumah et al., 2016). این ویژگی‌ها باعث شده پوشش گیاهی این مناطق از نواحی مجاور متمایز شود که به سندروم سرپنتینی نیز مشهور است (Alves et al., 2011). سندروم سرپنتینی با بومی بودن گیاهی این مناطق و پایین بودن بهره‌وری گیاهی (ناشی از کاهش رشد گیاهان) نمایان می‌شود (Kazakou et al., 2008). خاک‌های سرپنتینی کمتر از ۱ درصد از سطح کره زمین را به خود اختصاص داده‌اند و در طیف وسیعی از مناطق آب و هوایی یافت می‌شوند. این نواحی شامل مناطق گرمسیری (برزیل، کالدونیای جدید، مالزی، اندونزی، عمان) و همچنین مناطق معتدل چون ایالات متحده، چندین کشور اروپایی، استرالیا، ترکیه و کشورهای اطراف آن می‌شود (Galey et al., 2017; Nascimento et al., 2022; Omori et al., 2026). مناطق سرپنتینی در بسیاری از مناطق کشور ما، همچون آذربایجان غربی، کرمانشاه، مشهد، اصفهان، یزد، بندرعباس، شیراز، کرمان و سیستان و بلوچستان گسترده شده است (Ghaderian & Baker, 2007).

استفاده از گیاهان برای رفع آلاینده‌ها از بسترهای آلوده (خاک و آب) را گیاه پالایی<sup>۳</sup> می‌نامند که از لحاظ اقتصادی کم هزینه است. چون انرژی آن توسط خوشید تامین می‌شود و هزینه نگهداری آن پایین است. گیاه پالایی باعث حفظ ساختار طبیعی خاک شده و با رها شدن مواد آلی مختلف، حاصلخیزی آن نیز بهبود می‌یابد (Ghosh et al., 2023). گیاه پالایی مانع از اثرات نامطلوب فلزات در محیط زیست می‌شود. گیاهان بوسیله تثبیت<sup>۴</sup> و استخراج گیاهی<sup>۵</sup> آن را انجام می‌دهند. گیاهان در تثبیت گیاهی، سمیت فلزات سنگین موجود در اطراف ریشه (ریزوسفر) را بوسیله کاهش ظرفیت فلز، جذب توسط ریشه و کمپلکس کردن آن کاهش می‌دهند. در استخراج گیاهی با کاشت گیاهان بیش‌انباشت‌گر در مناطق آلوده یا باطله‌های معادن از گیاهان برای هدف فلزات در معدن‌کاوی گیاهی یا آگروماینینگ بهره می‌برند (Madhav et al., 2024).

میزان نیکل در خاک‌های سرپنتینی از ۰/۱ تا ۰/۶ درصد وزنی متغیر است. این میزان نیکل برای استخراج با روش‌های مرسوم معدن‌کاری (۱/۸ درصد وزنی) به‌صرفه نیست (Omori et al., 2026; van Der Ent et al., 2015). اما استخراج نیکل از خاک‌های سرپنتین به روش‌های نوین بازیابی فلزات سنگین توسط گیاهان بیش‌انباشت‌گر (hyperaccumulator)، این عیب را برطرف می‌نماید. گیاهان بیش‌انباشت‌گر جهت معدن‌کاوی زارعی در بسترهای طبیعی سرپنتینی یا باطله‌های معدنی کشت می‌شوند. آنها قادر به تغلیظ فلزات سنگین در بیومس (زیست‌توده) خود هستند، پس از برداشت آنها به کانی‌های زیستی غنی از فلز تبدیل می‌شوند که فلز هدف، ۱۰ تا ۲۵ درصد وزنی آن را تشکیل می‌دهد (Divya et al., 2024; Omori et al., 2026). با توجه به تعداد زیاد گونه‌های

<sup>۱</sup>-Serpentine

<sup>۲</sup>-Ultramafic

<sup>۳</sup>-Phytoremediation

<sup>۴</sup>-Phytostabilization

<sup>۵</sup>-phytoextraction

<sup>۶</sup>-phytomining/agromining

بیش‌انباشت‌کننده نیکل (بیش از ۵۳۰ گونه) و قیمت بالای نیکل در بازار، تحقیقات معدن‌کاوی‌زارعی برای بازیابی نیکل رو به گسترش است (Reeves et al., 2020; Rosenkranz et al., 2019).

معیارهای شناسایی گونه‌های بیش‌انباشت‌گر، داشتن فاکتور تغلیظ زیستی خاک<sup>۱</sup> (BCF) و فاکتور انتقال<sup>۲</sup> (TF) بیش از ۱ است. بنابراین این گیاهان، فلزات سنگین را بیشتر در اندام‌های هوایی انباشت می‌کنند (Egendorf et al., 2020; Van der Ent et al., 2018). معمولاً این گونه‌ها می‌توانند کادمیوم، کبالت یا مس، نیکل یا سرب، روی و منگنز به ترتیب بیش از ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۱۰۰،۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در اندام‌های هوایی خود (بر اساس وزن خشک) تجمع دهند (Omori et al., 2026). تحقیقات در مناطق سرپنتینی استان‌های کردستان و کرمانشاه، نشان داد این مناطق از لحاظ میزان نیکل و گونه‌های بومی بیش‌انباشت‌گر دارای پتانسیل بالایی برای معدن‌کاوی‌زارعی هستند بطوری‌که نیکل موجود در خاک این مناطق به‌طور متوسط دارای ۱۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. از طرفی دارای گیاهان بومی بیش‌انباشت‌کننده نیکل چون *Odontarrhena inflata*، *Odontarrhena penjwinesis* و *Odontarrhena callichroa* هستند (Ghafoori et al., 2023).

کادمیوم (Cd) از فلزات غیرضروری که به علت حلالیت بالا در آب برای گیاهان و انسان بسیار سمی است (Furini, 2012; Haider et al., 2021). با توجه به ماهیت سمی و خطرناک Cd، سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (USEPA) و سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) حداکثر مجاز کادمیوم در خاک و آب را به ترتیب ۳ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم و ۱۰ میکروگرم در لیتر تعیین کرده‌اند (Alotaibi, 2026). منابع اصلی کادمیوم در محیط زیست، فعالیت‌های انسانی چون منابع کشاورزی ( کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها)، معدن‌کاوی، عامل ضد خوردگی در فولاد، رنگ‌ها (Andresen & Küpper, 2012)، احتراق مواد نفتی و تصفیه محصولات نفتی است (Haider et al., 2021). استفاده از باتری‌های کادمیوم-نیکل، به دلیل بازده بالا، نیاز کم به نگهداری، عمر طولانی و تحمل بالا در برابر فشارهای الکتریکی و فیزیکی رو به گسترش است و زباله‌های جامد شهری حاصل از آن‌ها منابع اصلی آلودگی کادمیوم و نیکل محسوب می‌شود (Haider et al., 2021; Rizwan et al., 2018). جذب کادمیوم حتی در غلظت‌های پایین، انتقال آن به اندام‌های رویشی و زایشی تأثیر منفی بر تغذیه معدنی، هموستازی، رشد و نمو گیاهان اعمال می‌کند (Xu et al., 2017). برخی گیاهان بیش‌انباشت‌گر قابلیت انباشت بیش از یک فلز سنگین را دارند که از آنها می‌توان به *Thlaspi caerulescens* (Ni و Cd، Fe، Zn)، *T. goesingense* (Ni و Zn) و *Arabidopsis helleri* (Fe و Cd، Zn) اشاره کرد (Bhat et al., 2025; Furini, 2012).

گیاه *Odontarrhena inflata* از گونه‌های بومی فلزدوست و بیش‌انباشت‌گر نیکل در غرب ایران است. برخی گونه‌های بیش‌انباشت‌گر همچون *Thlaspi caerulescens* با گونه مورد مطالعه ما از یک خانواده (*Brassicaceae*) هستند و بجز نیکل، قادر به انباشت کادمیوم نیز هستند، از طرفی انباشت روزافزون زباله‌های حاصل از آلودگی‌های شهری (همچون باتری‌های کادمیوم-نیکل)، یافتن گیاهان مقاوم و انباشت‌کننده بومی از بهترین گزینه‌ها برای حذف این آلودگی‌هاست. با توجه به اینکه گزارشی در مورد مقاومت

<sup>۱</sup>-Bioconcentration factor

<sup>۲</sup>-Translocation Factors

و انباشت این گیاه بیش‌انباشت‌گر در برابر فلز سنگین کادمیوم وجود نداشت و گیاه‌پالایی یکی از ارزان‌ترین روش‌های حذف فلزات سنگین از مناطق آلوده است. ما را بر آن داشت تا در پژوهش حاضر میزان مقاومت و انباشت آن را در مقایسه با نیکل ارزیابی نماییم.

## روش بررسی

### رویشگاه مورد مطالعه

رویشگاه سرپنتینی مورد مطالعه در حومه شهرستان سروآباد استان کرمانشاه واقع شده است. این زیستگاه دارای شیب توپوگرافی ملایم، سنگی و خشک در ارتفاع ۱۲۶۸ متر از سطح دریا با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی قرار گرفته است. میانگین بارش سالانه بیش از ۷۰۰ میلی‌متر است. بیشینه و کمینه دمای آن در تابستان و زمستان به ترتیب ۳۵/۴ و ۴/۶- درجه سانتی‌گراد است.

### نمونه‌برداری خاک و تجزیه شیمیایی

در این مطالعه برای اندازه‌گیری عناصر، هشت نمونه خاک (عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری) از اطراف ریشه گیاه بیش‌انباشت‌گر *O. inflata* روئیده در خاک‌های زیست‌گاه سرپنتین جمع‌آوری شد. سپس ۰/۵ گرم از نمونه‌های خشک و غربال شده با ذرات کمتر از ۲ میلی‌متر را جهت هضم اسیدی به ۱۰ میلی‌لیتر از محلول هضم‌کننده اسیدی (مخلوط اسید کلریدریک ۳۷٪ و اسید نیتریک ۶۵٪ به نسبت ۳ به ۱) افزوده شد. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در حمام شنی قرار داده شده و در نهایت نمونه‌ها صاف و حجم نهایی با آب مقطر به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد (Ghaderian & Baker, 2007; Pollard et al., 2021). **آنالیز کل** (غلظت کل) عناصر سنگین مختص **خاک‌های سرپنتینی** (Mg و Ca, Fe, Co, Cr, Mn, Ni) در عناصره حاصل از هضم نمونه‌های خاک توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی مدل Shimadzu AA-6200 (ساخت کشور ژاپن) مورد سنجش قرار گرفت. **محدوده اندازه‌گیری عناصر با این دستگاه، در محدوده یک ppm یا یک میلی‌گرم در لیتر بود.** جهت محاسبه قسمت قابل‌تبادل عناصر ذکر شده، ۲۰ گرم خاک خشک غربال شده (با غربال ۲ میلی‌متری) به ارلن مایر حاوی ۵۰ میلی‌لیتر محلول ۱ مولار نیترات آمونیوم ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) افزوده شد و سوسپانسیون به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بر روی همزن الکتریکی قرار داده شد پس از ته‌نشین ذرات معلق آن محلول رویی صاف گردید و از آن جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین ذکر شده توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی استفاده گردید (Ghafoori et al., 2022; Gryschko et al., 2005).

درصد ماده آلی (OM%: The organic matter) نمونه‌های خاک به روش LOI (Loss on Ignition) با کمی تغییر وزن محاسبه شد (Santisteban et al., 2004). در این روش، ابتدا نمونه‌های خشک خاک و توزین شده (WS) سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد آون (Memmert مدل UN55) قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد کوره قرار داده شدند و پس از هر مرحله جهت تعیین  $\text{DW}_{105}$  و  $\text{DW}_{360}$  توزین شده و  $\text{LOI}_{360}$  با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد.

<sup>1</sup>-Atomic Absorption Spectrophotometer

برای تعیین ظرفیت نگهداری آب (WHC)، ۵۰ گرم خاک خشک از نمونه‌ها در قیف دارای کاغذ صافی قرار داده شد. سپس ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به خاک افزوده شد و میزان حجم آب خارج شده از قیف تا زمان توقف خروج آب، اندازه‌گیری شد. ظرفیت نگهداری آب برحسب درصد، بر اساس حجم آب نگهداری شده توسط خاک‌ها محاسبه شد. برای تعیین pH خاک، ۱۰ گرم خاک با ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر در یک بشر با همزن الکتریکی مخلوط شد. پس از گذشت ۳۰ دقیقه پس از توقف همزدن pH آن، با استفاده از pH متر (Metrohm مدل ۸۲۷) تعیین شد (Ghafoori et al., 2022).

### کشت هیدروپونیک و شرایط رشد

دانه‌های گیاه *O. inflata* از حداقل ۸۰ گیاه روییده در منطقه سرپینتینی سروآباد، جمع‌آوری شده و در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد درون پاکت‌های کاغذی نگهداری شدند. بذرها برای ضدعفونی به مدت ۱۵ دقیقه در محلول هیپوکلرید سدیم ۵ درصد قرار داده شده و سپس چندین بار با آب معمولی شستشو داده شدند. برای جوانه‌زنی بذرهای به گلدان‌های حاوی پرلیت در اتاق کشت با دمای  $25 \pm 3$  درجه سانتی‌گراد، دارای دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی، ۸ ساعت تاریکی و شدت نور ۲۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه منتقل و تا ایجاد اولین برگ در گیاهچه‌ها با آب مقطر آبیاری شدند. ۸ عدد از گیاهچه‌های یک‌دست به گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۸ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر دارای حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر منتقل و با محلول غذایی هوگلند اصلاح‌شده (یک‌چهارم غلظت)، دارای pH در محدوده ۵/۸ تا ۶ تغذیه و هوادهی شدند. جهت تنظیم pH از محلول ۱/۱ نرمال KOH و HCl استفاده کردیم. جهت جلوگیری از هر هفته محلول غذایی تعویض شد. محلول هوگلند مورد استفاده حاوی  $1.25 \text{ mM KNO}_3$ ,  $1.5 \text{ mM Ca(NO}_3)_2$ ,  $0.28 \text{ mM KH}_2\text{PO}_4$ ,  $0.75 \text{ mM MgSO}_4$ ,  $5 \text{ }\mu\text{M Fe(Na)-EDTA}$ ,  $50 \text{ }\mu\text{M KCl}$ ,  $25 \text{ }\mu\text{M H}_3\text{BO}_3$ ,  $5 \text{ }\mu\text{M MnSO}_4$ ,  $1 \text{ }\mu\text{M ZnSO}_4$ ,  $0.5 \text{ }\mu\text{M CuSO}_4$ ,  $0.1 \text{ }\mu\text{M Na}_2\text{MO}_4$  بود (Salehi-Eskandari et al., 2022).

گیاهان ۲۵ روزه *O. inflata* جهت مقایسه میزان رشد و انباشت فلزات سنگین نیکل و کادمیوم به مدت ۱۴ روز تحت تنش غلظت‌های مختلف آنها قرار گرفتند. جهت نشر نیکل از نمک سولفات نیکل ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ )، تیمارهای ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میکرومولار نیکل و با استفاده از نمک کلرید کادمیوم ( $\text{CdCl}_2$ ) تیمارهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میکرومولار کادمیوم تهیه کردیم.

### ارزیابی رشد، ماده خشک، و میزان عناصر (نیکل و کادمیوم) گیاه

پس از ۱۴ روز تیماردهی، برای محاسبه میزان رشد، اندام‌های هوایی و ریشه گیاهان *O. inflata* از یکدیگر جدا شد. قبل و بعد از خشک شدن در آون توزین شدند. نسبت ساقه به ریشه جهت نشان دادن میزان سمیت از حاصل تقسیم وزن خشک اندام‌های هوایی بر وزن خشک ریشه محاسبه شد.

جهت تعیین میزان نیکل و کادمیوم، بافت‌های خشک گیاهی با هضم اسیدی تجزیه شدند بدین منظور ۰/۱ گرم از بافت گیاهی ساییده شده به لوله‌های آزمایش حاوی ۳ میلی‌لیتر اسید نیتریک (۶۵ درصد) افزوده شد و لوله‌های آزمایش در زیر هود به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند سپس در حمام شنی به مدت ۳ ساعت حرارت داده شدند. پس از سرد شدن به آنها ۱/۵ میلی‌لیتر آب اکسیژنه افزوده و مجدداً به مدت ۲۰ دقیقه در حمام شنی قرار داده شدند تا از آنها محلول بیرنگی ایجاد شود. در نهایت نمونه‌ها صاف و حجم نهایی آنها با آب مقطر به ۱۰ میلی‌لیتر رسید (صالحی اسکندری و همکاران، ۱۴۰۴). مقدار نیکل و کادمیوم توسط دستگاه طیف سنج اتمی (AAS, Shimadzu model 6200) اندازه‌گیری شد. نسبت انتقال نیکل و کادمیوم (translocation factor; TF) به اندام های هوایی از تقسیم میزان این عناصر در اندام‌های هوایی بر میزان آنها در بافت ریشه محاسبه شد (Shi et al., 2015).

### محاسبه‌های آماری

آزمایش در قالب یک طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. صفات مورد مطالعه با تیمارهای ذکر شده با استفاده از نرم افزار SPSS تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن با ضریب اطمینان ۹۵ درصد صورت پذیرفت و از نرم افزار Excel برای رسم نمودارها استفاده شد.

## یافته‌های پژوهش

### آنالیز میزان کل، قابل تبادل عناصر در نمونه‌های خاک سرپنتینی

میزان عناصر (کل، قابل تبادل) در هشت مکان نمونه برداری شده از رویشگاه سرپنتینی طبق جدول ۱ نشان داد. بیشترین و کمترین میزان عناصر کل در این رویشگاه به ترتیب مربوط به منیزیم و کبالت بود ( $Co < Mn < Ni < Ca < Fe < Mg$ ). اما بیشترین و کمترین میزان عناصر قابل تبادل به ترتیب مربوط به آهن و نیکل بود. ترتیب میزان عناصر قابل تبادل بدین صورت:  $Ni < Co < Mn < Ca < Mg < Fe$  که با ترتیب میزان عناصر کل به محلول بدین صورت  $Mn < Fe < Ca < Mg < Co < Ni$  که بیانگر انحلال بیشتر منگنز و آهن است و در مقابل نیکل و کبالت کمترین انحلال را داشته‌اند و اسیدیته نشان دهنده خاک قلیایی است.

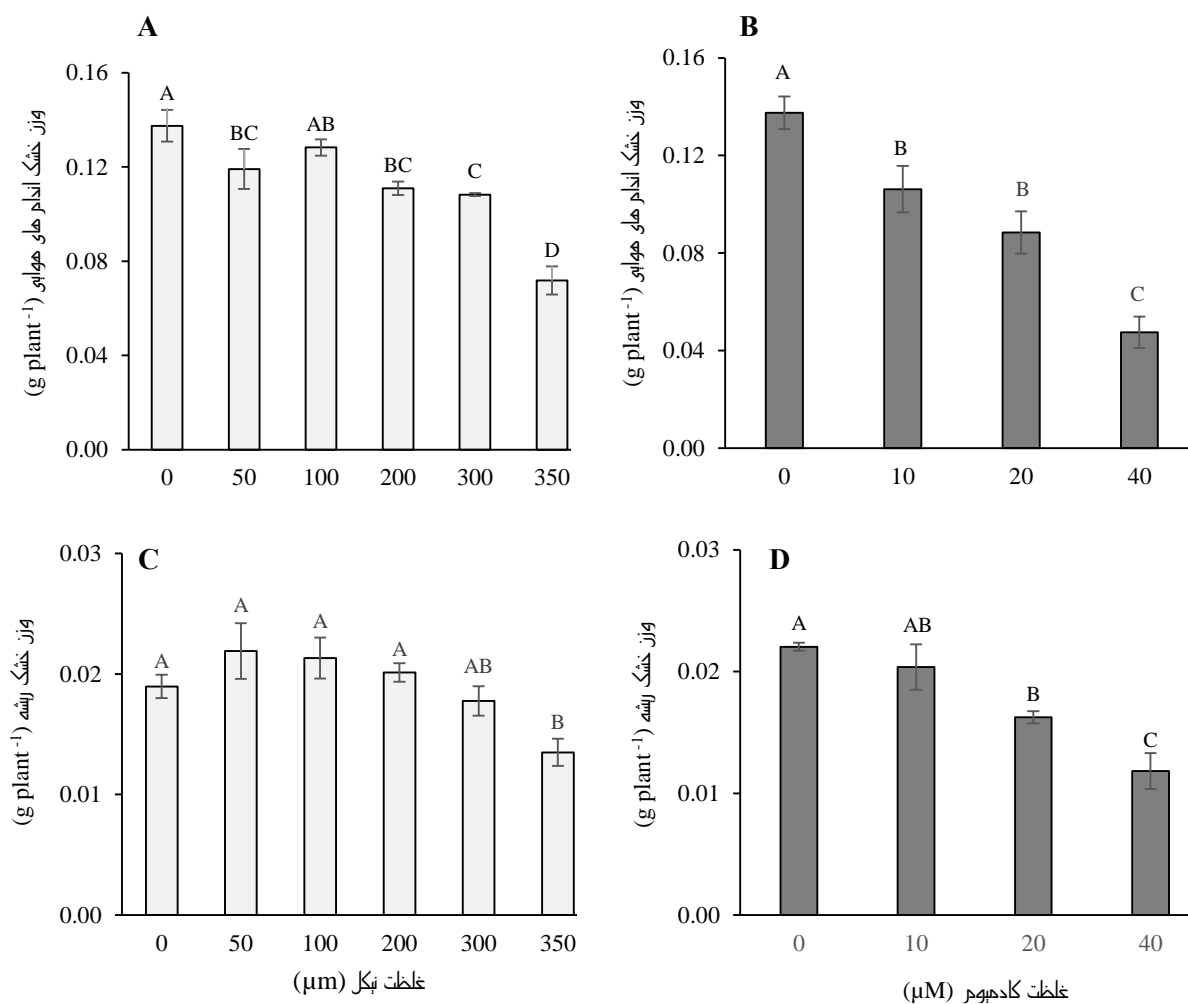
جدول ۱. میزان عناصر کل، قابل تبادل (برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم) به همراه ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی خاک‌های سرپنتینی سروآباد استان کرمانشاه

متغیر	انحراف از معیار ± میانگین	متغیر	انحراف از معیار ± میانگین
میزان pH	۸/۷ ± ۰/۳	کبالت کل (Co t)	۷۸/۷ ± ۰/۶
میزان ماده آلی (OM%)	۱ ± ۰/۳	کبالت قابل تبادل (Co e)	۶/۷ ± ۰/۹
ظرفیت نگهداری آب (WHC%)	۴۴/۳ ± ۱/۵	آهن کل (Fe t)	۶۰۴۷ ± ۲۲۹
نیکل کل (Ni t)	۱۴۶۸ ± ۶۹/۴	آهن قابل تبادل (Fe e)	۲۲۸۰ ± ۴۲۳
نیکل قابل تبادل (Ni e)	۶/۶ ± ۰/۶	کلسیم کل (Ca t)	۳۴۷۴ ± ۷۵۴
منگنز کل (Mn t)	۸۸۴/۷ ± ۱۵۰/۷	کلسیم قابل تبادل (Ca e)	۶۰۸ ± ۱۰۶
منگنز قابل تبادل (Mn e)	۴۱۸/۵ ± ۶۹/۷	منیزیم کل (Mg t)	۹۳۱۱ ± ۲۴۶
Ca/Mg قابل تبادل (Ca/Mg e)	۰/۴۹ ± ۰/۲۵	منیزیم قابل تبادل (Mg e)	۱۲۳۰ ± ۱۱۲

### اثر غلظت‌های مختلف نیکل و کادمیوم بر وزن خشک اندام‌های هوایی، ریشه و نسبت اندام‌های هوایی به ریشه

تغییرات میانگین وزن خشک اندام‌های هوایی در شکل ۱، نشان داد که وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه بیش‌انباشت‌گر *O. inflata* با افزایش غلظت نیکل (شکل ۱-A) و کادمیوم (شکل ۱-B) کاهش داشت اما همواره این کاهش در تنش کادمیوم بیشتر بود. به طوری که درصد کاهش وزن تر اندام‌های هوایی در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میکرومولار نیکل، نسبت به گروه شاهد به ترتیب ۱۳/۳، ۶/۶، ۱۹/۲، ۲۱/۲ و ۴۷/۷ درصد بود ولی این کاهش برای غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میکرومولار کادمیوم به ترتیب ۲۲/۸، ۳۵/۷ و ۶۵/۵ درصد بود که نشان می‌دهد روند کاهش وزن خشک برای نیکل در این بیش‌انباشت‌گر نسبت کادمیوم،

شیب ملایم‌تری داشت و هر تیمار نسبت به تیمار قبلی اختلاف معنی‌دار نداشت به‌جز بالاترین سطح تنش ۳۵۰ میکرومولار نیکل که با تیمار ۳۰۰ میکرومولار نیکل اختلاف معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ ).

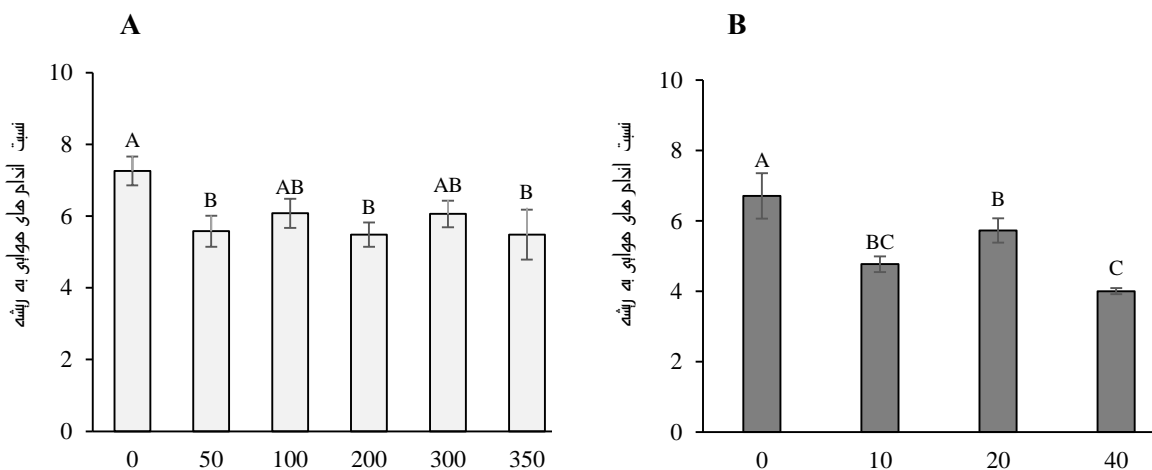


**شکل ۱.** اثر غلظت‌های مختلف نیکل بر وزن خشک اندام‌های هوایی (A) و ریشه (C) و اثر غلظت‌های مختلف کادمیوم بر وزن خشک اندام‌های هوایی (B) و ریشه (D) گیاه بیش‌انباشت‌گر نیکل *O. inflata*. داده هر ستون، میانگین سه تکرار  $\pm$  خطای استاندارد است. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها، براساس آزمون دانکن ( $P < 0.05$ ) است.

مطابق شکل C-1، وزن خشک ریشه تحت تنش حاصل از غلظت‌های مختلف نیکل، نشان داد که وزن خشک ریشه در تمام غلظت‌ها بجز ۳۵۰ میکرومولار نیکل نسبت گروه شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P > 0.05$ ). در بالاترین سطح تنش نیکل (۳۵۰ میکرومولار) وزن خشک ریشه نسبت به گروه شاهد ۳۸/۴ درصد کاهش داشت. وزن خشک ریشه گیاه بیش‌انباشت‌گر *O. inflata* در غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میکرومولار کادمیوم به‌ترتیب ۷/۵، ۲۶/۲ و ۴۶/۲ درصد نسبت به گروه شاهد کاهش داشت که نشان‌دهنده کاهش بیشتر ریشه در تنش کادمیوم است (شکل D-1).

تغییرات نسبت وزن خشک اندام‌های هوایی به ریشه (شکل ۲) در تنش نیکل (Ni) نشان داد که با شروع تنش (۵۰ میکرومولار) این نسبت کاهش معنی‌داری بود اما اختلاف معنی‌داری بین مابقی تیمارها وجود نداشت و آن‌ها از لحاظ آماری در یک سطح قرار داشتند ( $P > 0.05$ ). برخلاف نیکل نسبت وزن خشک اندام‌های هوایی به ریشه در تنش کادمیوم (Cd) در آخرین سطح تنش نسبت به

تیمارهای قبلی کاهش معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ ). روند تغییرات وزن خشک اندام‌های هوایی به ریشه در تیمارهای نیکل بطور متوسط ۲۰ درصد نسبت به گروه شاهد کاهش داشت (شکل ۲-۱). نسبت وزن خشک اندام‌های هوایی به ریشه گیاه بیش‌انباشت‌گر *O. inflata* در غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میکرومولار کادمیوم به ترتیب ۲۸/۹، ۱۴/۷ و ۴۰/۳ درصد نسبت گروه شاهد کاهش داشت (شکل ۲-۲).



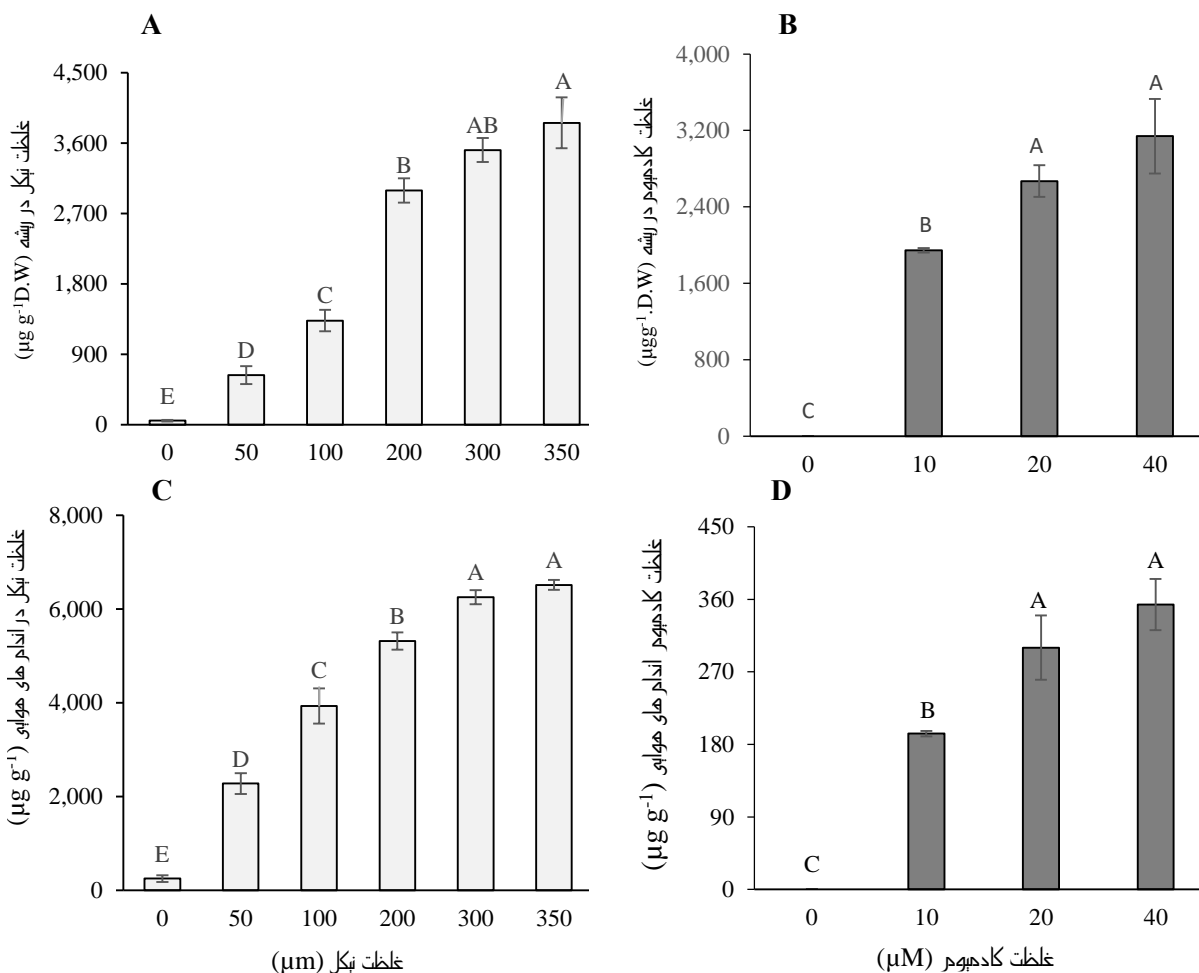
**شکل ۲.** اثر غلظت‌های مختلف نیکل (A) و کادمیوم (B) بر نسبت وزن خشک اندام‌های هوایی به ریشه در غلظت‌های مختلف از آنها در گیاه بیش‌انباشت‌گر نیکل *O. inflata*. داده هر ستون، میانگین سه تکرار ± خطای استاندارد است. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها، براساس آزمون دانکن ( $P < 0.05$ ) است.

### بررسی میزان انباشت نیکل و کادمیوم (اندام‌های هوایی و ریشه) و انتقال آن‌ها به اندام‌های هوایی

با افزایش غلظت نیکل و کادمیوم در محیط، میزان تجمع این عناصر در ریشه گیاه بیش‌انباشت‌گر *O. inflata* افزایش یافت (شکل ۳). میزان تجمع نیکل در ریشه نیکل در پایین‌ترین سطح تیمارها (۵۰ میکرومولار) نسبت به گروه شاهد افزایش ۳/۲ برابری داشت و انباشت آن در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میکرومولار نیکل، نسبت به پایین‌ترین سطح تنش (۵۰ میکرومولار) به ترتیب افزایش ۲/۱، ۴/۷، ۵/۵ و ۶/۱ برابری داشت (شکل ۳-۱). این افزایش بجز در بالاترین سطح تنش (۳۰۰ و ۳۵۰ میکرومولار نیکل) در هر تیمار نسبت به تیمار قبلی معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). میزان تجمع کادمیوم در تیمارهای ۱۰ و ۴۰ میکرومولار کادمیوم، نسبت به تیمار ۱۰ میکرومولار (کمترین غلظت) به ترتیب افزایش ۱/۴ و ۱/۶ برابری داشت (شکل ۳-۲). این افزایش بجز در بالاترین سطح تنش کادمیوم (۲۰ و ۴۰ میکرومولار) در مابقی سطوح نسبت به تیمار قبلی معنی‌داری بود ( $P < 0.05$ ).

همانطور که شکل ۳- C, D مشاهده می‌گردد، میزان انباشت نیکل و کادمیوم در اندام‌های هوایی گیاه بیش‌انباشت‌گر *O. inflata* با افزایش آنها در محیط افزایش داشت. به طوری که میزان نیکل در پایین‌ترین غلظت (۵۰ میکرومولار) نسبت به گروه شاهد افزایش مشهود ۹/۱ برابری داشت و در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میکرومولار نیکل، نسبت به پایین‌ترین سطح تنش (۵۰ میکرومولار) به ترتیب افزایش ۱/۷، ۲/۳، ۲/۷ و ۲/۹ برابری داشتند. این افزایش‌ها در تیمارهای مختلف نیکل، در هر تیمار نسبت به تیمار قبلی بجز در بالاترین غلظت‌ها (۳۰۰ و ۳۵۰ میکرومولار) معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). میزان تجمع کادمیوم در ریشه و اندام‌های هوایی گروه شاهد، برخلاف نیکل توسط دستگاه قابل اندازه‌گیری نبود و میزان تجمع آن در تیمارهای ۲۰ و ۴۰ میکرومولار کادمیوم،

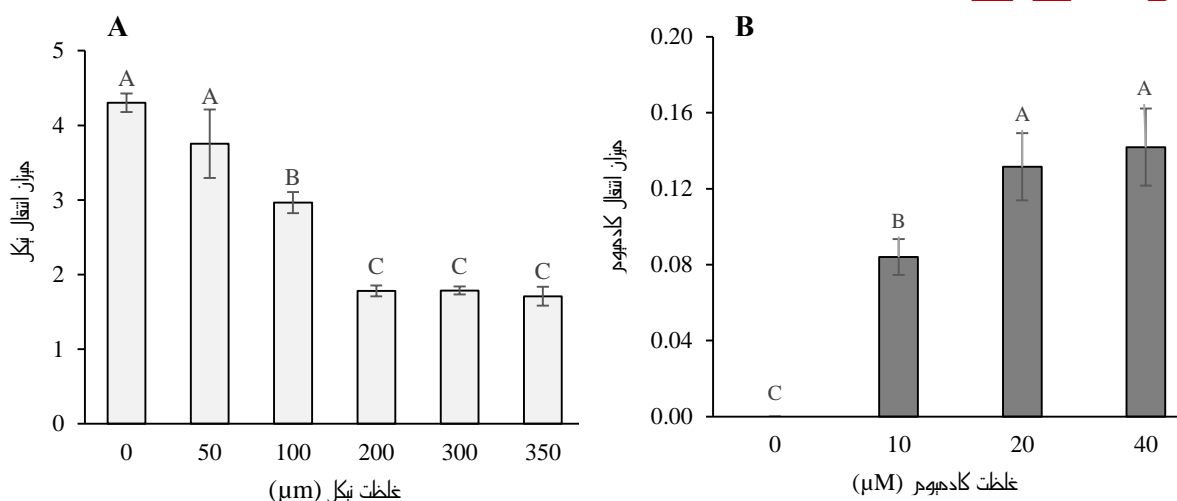
نسبت به پایین‌ترین غلظت (۱۰ میکرومولار) به ترتیب افزایش ۱/۶ و ۱/۸ برابری داشت (شکل B-۳). البته این تیمارها از لحاظ آماری باهم اختلاف معنی‌داری نداشتند ( $P>0.05$ ).



شکل ۳. اثر غلظت‌های مختلف نیکل و کادمیوم، بر میزان نیکل در اندام‌های خشک هوایی (A)، ریشه (C) و میزان کادمیوم در اندام‌های خشک هوایی (B)، ریشه (D) گیاه بیش‌انباشت‌گر نیکل *O. inflata*. داده هر ستون، میانگین سه تکرار  $\pm$  خطای استاندارد است. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها، براساس آزمون دانکن ( $P<0.05$ ) است

شکل A-۴، میزان انتقال نیکل از ریشه به اندام‌های هوایی گیاه بیش‌انباشت‌گر *O. inflata* نشان می‌دهد که افزایش غلظت نیکل در محیط باعث کاهش آن به ساقه می‌شود. این کاهش در بین سطوح مختلف تنش نیکل نسبت به سطح قبل تا تیمار ۲۰۰ میکرومولار معنی‌دار بود ( $P<0.05$ ) و سطوح بالای تنش (۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میکرومولار نیکل) از لحاظ آماری در یک سطح قرار داشتند ( $P>0.05$ ). میزان انتقال کادمیوم از ریشه به اندام‌های هوایی برخلاف نیکل با افزایش غلظت آن در محیط افزایش داشت (شکل B-۴). این افزایش در تیمارهای ۲۰ و ۴۰ میکرومولار کادمیوم، نسبت به تیمار ۱۰ میکرومولار به ترتیب افزایش ۵۶/۶ و ۶۸/۹ درصدی داشت (شکل B-۴). البته این تیمارها (۲۰ و ۴۰ میکرومولار) نیز از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند ( $P>0.05$ ).

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اسیدیته خاک منطقه سرپنتینی مورد مطالعه قلیایی ( $8.7 \pm 0.3$ ) و مشابه مابقی خاک‌های سرپنتینی دارای pH کمتر از ۱۰ می‌باشد (Brooks, 1987; Kazakou et al., 2008). میزان ماده آلی مورد مطالعه در خاک سرپنتینی سروآباد استان کرمانشاه در حدود ۱ درصد است که نسبت به میزان ماده آلی در دیگر نقاط سرپنتینی بررسی شده در ایران (Omori et al., 2026) و دیگر دشتهای غیر سرپنتینی (Santisteban et al., 2004) کمتر است قدرت نگهداری آب با میزان ماده آلی خاک همخوانی دارد و رشد گیاهان در خاک‌های سرپنتینی با زهکشی بالا و ظرفیت کم نگهداری آب، پایین است. به طوری که گیاهان این مناطق با وجود بارش بالا در این مناطق با کمبود آب مواجه هستند (Hatanaka et al., 2022; Rajakaruna et al., 2009). **ظرفیت پایین نگهداری آب این مناطق باعث عمق کم و سنگی بودن بستر است که باعث افزایش خلل و فرج شده و کم‌آبی را تشدید می‌نماید** (Salehi-Eskandari et al., 2017).



**شکل ۴.** اثر غلظت‌های مختلف نیکل (A) و کادمیوم (B) بر میزان انتقال آنها از ریشه به اندام‌های هوایی و ریشه در گیاه بیش‌انباشت‌گر نیکل *O. inflata*. داده هر ستون، میانگین سه تکرار  $\pm$  خطای استاندارد است. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها، براساس آزمون دانکن ( $P < 0.05$ ) است.

میزان نیکل در خاک‌ها بسیار متفاوت است و از ۳ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تخمین زده شده می‌شود (Kumar et al., 2023); محدوده‌ی استاندارد آن بین ۰/۲ تا ۴۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است، در حالی که میانگین کل ۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم محاسبه شده است (Iyaka, 2011). میزان نیکل کل در منطقه سرپنتینی سروآباد استان کرمانشاه حدود ۱۴۶۸ میلی‌گرم در کیلوگرم که بیش از ۶۸ برابر استاندارد جهانی است. البته میزان نیکل، در خاک‌های سرپنتینی معمولاً از ۱۷۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است (Vithanage et al., 2019). بیشترین میزان نیکل در خاک سرپنتینی مورد مطالعه به صورت غیرمحلول و جزء کوچکی (۰/۴۵ درصد) از آن بصورت محلول است. میزان نیکل قابل دسترس به عوامل متعددی چون میزان انحلال، شرایط احیا-اکسیداسیون، pH و تغییرات بیولوژیکی خاک وابسته است (Kumar et al., 2023; Rajapaksha et al., 2018). میزان نیکل قابل تبادل در pH خنثی تا قلیایی بسیار پایین است البته تحرک آن به میزان مواد آلی اسیدی موجود در خاک نیز وابسته است (Harasim & Filipek, 2015) که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد. اکسیدهای غیر متبلور آهن و منگنز و همچنین سایر مواد معدنی خاک، بخش عمده از نیکل موجود در محیط را جذب می‌کنند و باعث تجمع آن در خاک می‌شوند (Gardner et al., 2012; Harasim & Filipek, 2015; Kumar et al., 2023). طبق جدول ۱، آهن و منیزیم کل و قابل تبادل خاک سرپنتینی مورد مطالعه بیش از دیگر مابقی عناصر سنگین است. این نتایج با یافته‌های دیگر محققین همخوانی دارد. معمولاً بیش از ۷۰ درصد صخره‌های آلترامافیک از فرو منیزیم تشکیل شده است. آنها منشاء

خاک‌های سرپنتینی محسوب می‌شوند (Kazakou et al., 2008; Kumar & Maiti, 2013; Rajakaruna & Boyd, 2014). نسبت کلسیم و منیزم قابل تبادل و کل در خاک سرپنتینی مورد مطالعه به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۳۷ است که مطابق با یافته‌های دیگر محققین این نسبت در خاک‌های سرپنتینی برخلاف مابقی خاک‌ها (بیشتر از ۱) کمتر از ۰/۷ است (Hewawasam et al., 2014; Palm et al., 2024). این نسبت برای رشد و بقاء بسیاری از گونه‌های گیاهی محدود کننده است در نتیجه، پوشش گیاهی مناطق سرپنتینی در مقایسه با نواحی مجاور، اغلب دارای ترکیب گونه‌ای متفاوت و دارای گونه‌های بومی خاص این مناطق است (D'Amico et al., 2017; Kazakou et al., 2008). گیاهان بومی این مناطق نمی‌توانند در خاک‌های معمولی حاوی غلظت‌های بالای کلسیم ( $Ca^{2+}$ ) زنده بمانند. پادبر (آنتی پورتر)  $CAX1 (Ca^{2+}/H^+)$  مستقر در غشاء واکنشی (تونوپلاست) با استفاده از نیروی محرک پروتونی (PMF) کلسیم مازاد را از سیتوپلاسم به داخل واکوئل هدایت می‌کند. انتقال کلسیم اضافی از سیتوپلاسم به داخل واکوئل، به حفظ هموستاز کلسیم سیتوپلاسمی کمک می‌کند (Pittman & Hirschi, 2016). گیاهان مناطق سرپنتینی در عملکرد  $CAX1$  نقص دارند و تنها به دلیل غلظت کم کلسیم در خاک‌های سرپنتین قادرند غلظت کلسیم سیتوزولی را در محدوده طبیعی حفظ کنند (Pakdaman et al., 2013). البته نقص در عملکرد  $CAX1$  باعث افزایش غلظت کلسیم سیتوپلاسمی شده و در ایجاد تحمل به نیکل در گیاهان بیش‌انباشتگر ایفای نقش می‌کند (Ghasemi et al., 2018).

وزن خشک اندام‌های هوایی (شکل ۱) و ریشه (شکل ۲) گیاه بیش‌انباشتگر *O. inflata* با افزایش غلظت نیکل و کادمیوم کاهش یافت اما این کاهش در بالاترین غلظت نیکل (۳۵۰ میکرو مولار) نسبت به گروه شاهد برای اندام‌های هوایی و ریشه به ترتیب ۴۷/۷ و ۳۸/۴ درصد بود. اما میزان کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه در تنش کادمیوم در بالاترین سطح (۴۰ میکرو مولار) به ترتیب ۶۵/۵ و ۴۶/۲ درصد نسبت به گروه کنترل کاهش داشت باید در نظر داشت بالاترین سطح نیکل در محیط بیش از ۸/۵ برابر غلظت کادمیوم است. کاهش رشد در فلزات سنگین (نیکل و کادمیوم) مربوط به تجمع بیش از حد فلزات سنگین در گیاهان است که با تنش اکسیداتیو و افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) همراه می‌گردد، کاهش جذب عناصر غذایی، فتوسنتزی و برهم زدن روابط آبی گیاه نیز منجر به کاهش تقسیمات سلولی شده که با کاهش رشد نمایان می‌شود (El Rasafi et al., 2022; Hassan et al., 2019).

نیکل از عناصر کم مصرف ضروری که محدوده طبیعی آن در بیشتر گیاهان ۰/۱ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک است (Deng et al., 2018; Gerendás et al., 1999). آن برای فعالیت اوره‌آز، گلی‌اکسیلاز، متیل ردوکتاز، هیدروژناز، دهیدروژناز و نیکل سوپراکسید دسموتاز ضروری است (Helaoui et al., 2023; Pishchik et al., 2021). اگر میزان نیکل در برگ‌ها گونه‌های زارعی از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک فراتر رود علائم آن بروز می‌نماید (Gregson & Hope, 1994). از علائم سمیت علاوه بر مهار رشد گیاه، می‌توان به توقف رشد ریشه، کلروزه و نکروزه شدن بافت برگی بین رگ‌برگ‌ها اشاره کرد (Helaoui et al., 2023; Rather et al., 2020). اما گونه‌های بیش‌انباشتگر می‌توانند بدون بروز علائم سمیت، نیکل را در بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک اندام‌های هوایی خود انباشت کنند (Kazakou et al., 2008; Reeves et al., 2020). افزایش غلظت نیکل در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه بیش‌انباشتگر *O. inflata* بیش از ۳۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک با علائم سمیت نیکل و کاهش رشد نمایان می‌شود. این غلظت در اندام‌های هوایی و ریشه به ترتیب در تیمار ۱۰۰ و ۳۰۰ میکرومول نیکل ایجاد می‌شود (شکل ۳). انباشت نیکل در اندام‌های هوایی، بیش‌انباشتگر بودن این گیاه را نسبت به نیکل تایید می‌نماید. این گیاهان نیکل از طریق کده‌بندی نیکل در واکوئل، دیواره سلولی و کرک‌های محافظتی اندام‌های هوایی انباشت می‌نمایند که در گزارشات قبلی نیز ذکر شده است (Ghafoori et al., 2023; Ghasemi et al., 2018).

<sup>۱</sup>-Proton motive force

نسبت اندام‌های هوایی به ریشه در تیمارهای مختلف نیکل نسبت به گروه شاهد در یک سطح قرار داشت و به‌طور متوسط ۲۰ درصد کاهش یافت (شکل ۲-A). اما این نسبت برای تنش کادمیوم با توجه به افزایش ناچیز غلظت در بالاترین سطح نسبت به نیکل حدود ۲۸ درصد کاهش داشت (شکل ۲-A). علت این کاهش را می‌توان در میزان انباشت و انتقال نیکل و کادمیوم بررسی کرد (شکل ۳ و ۴). بیشترین تجمع نیکل و کادمیوم در تیمارهای مختلف این فلزات سنگین به‌ترتیب در اندام‌های هوایی و ریشه *O. inflata* است. از طرفی میزان انتقال این عناصر سنگین برای نیکل در پایین‌ترین غلظت (۵۰ میکرومولار) و در بالاترین سطح تنش (۳۵۰ میکرومولار) ۱/۷ بود و بطور متوسط برای تمام تیمارها ۲/۷ بود که نشان می‌دهد با افزایش غلظت نیکل در محیط میزان انتقال کاهش داشت (شکل ۴-A). اما میزان انتقال برای کادمیوم برای تمام تیمارها بطور متوسط ۰/۱۳ است و برخلاف نیکل میزان انتقال با افزایش غلظت روند صعودی داشت (شکل ۴-B). با توجه به میزان انباشت و انتقال *O. inflata* برای نیکل بیش‌انباشت‌گر ولی برای کادمیوم محدود کننده (Excluder) محسوب می‌شود (Baker, 1981; Kazakou et al., 2008). گیاه *O. inflata* برخلاف گیاه *Thlaspi caerulescens* قابلیت انباشت کادمیوم را همچون نیکل ندارد (Reeves, 2024).

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز خاک سرپنتینی منطقه سروآباد استان کرمانشاه می‌توان استنباط کرد که از لحاظ اسیدیته قلیایی، فقر از مواد آلی، میزان بالای آهن، منیزیم و نسبت پایین کلسیم و منیزیم مشابه دیگر مناطق سرپنتینی است. اما میزان نیکل آن کمتر از میانگین گزارش شده در مناطق سرپنتینی است. با افزایش غلظت نیکل و کادمیوم در محیط میزان کاهش رشد در بالاترین سطح از نیکل (۳۵۰ میکرومولار) و پایین‌ترین تیمار از کادمیوم (۱۰ میکرومولار) نمایان شد. میانگین میزان انتقال (TF) نیکل و کادمیوم از ریشه به ساقه به ترتیب ۲/۷ و ۰/۱۳ بود که منجر به تجمع نیکل در اندام‌های هوایی و کادمیوم در ریشه *O. inflata* گیاه می‌شود. تجمع نیکل در ریشه اثبات می‌کند این گیاه برای نیکل بیش‌انباشت‌گر ولی برای کادمیوم محدود کننده است. گیاه *O. inflata* با کده‌بندی نیکل در واکنش، دیواره سلولی و کرک‌های محافظتی اندام‌های هوایی قادر است آن را در اندام‌های هوایی انباشت کرده و ضمن رشد تعادل نسبت اندام‌های هوایی به ریشه را در تیمارهای مختلف حفظ نماید اما نسبت به تجمع فلز کادمیوم حساس است. باتوجه به سازگاری این گیاه به خاک‌های سرپنتینی ایران و بارش مناسب این منطقه می‌توان از آن برای معدن‌کاوی و گیاه‌پای نیکل از خاک‌های سرپنتینی در این منطقه بهره برد.

## سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه پیام نور اصفهان به دلیل حمایت مالی از این تحقیق صمیمانه سپاسگزاری می‌شود همچنین از جناب آقای دکتر محمد غفوری برای راهنمایی‌ها و همفکری ارزنده ایشان برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایم.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد."

صالحی اسکندری، بهروز، قاسمی، زهره و 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.*). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶(۵)، ۱۱۶۰-۱۱۴۷

## REFERENCES

- Alotaibi, M. O. (2026). A new perspective on wastewater phytoremediation: pH-driven cadmium removal by *Atriplex halimus* L. *International Journal of Phytoremediation*, 1-11.
- Alves, S., Trancoso, M. A., Gonçalves, M. d. L. S. & dos Santos, M. M. C. (2011). A nickel availability study in serpentinised areas of Portugal. *Geoderma*, 164(3-4), 155-163 .
- Andresen, E. & Küpper, H. (2012). Cadmium toxicity in plants. *Cadmium: from toxicity to essentiality*, 395-413.
- Baker, A. J. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of plant nutrition*, 3(1-4), 643-654.
- Bhat, B. A., Rather, M. A., Bilal, T., Nazir, R., Qadir, R. U. & Mir, R. A. (2025). Plant hyperaccumulators: a state-of-the-art review on mechanism of heavy metal transport and sequestration. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1631378.
- Brooks, R. R. (1987). Serpentine and its vegetation: a multidisciplinary approach. *Ecology, Phytogeography and physiology Ser.*, 1, 1-454.
- D'Amico, M. E., Freppaz, M., Zanini, E & Bonifacio, E. (2017). Primary vegetation succession and the serpentine syndrome: the proglacial area of the Verra Grande glacier, North-Western Italian Alps. *Plant and Soil*, 415(1), 283-298.
- Deng, T.-H.-B., van Der Ent, A., Tang, Y.-T., Sterckeman, T., Echevarria, G., Morel, J.-L. & Qiu, R.-L. (2018). Nickel hyperaccumulation mechanisms: a review on the current state of knowledge. *Plant and Soil*, 423(1), 1-11.
- Divya, V., Sindhu, P. & Aiswarya, N. (2024). Agromining: Agroremediation for heavy metal contaminated ecosystems: A review. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*, 39(1), 51-55.
- Egendorf, S. P., Groffman, P., Moore, G. & Cheng, Z. (2020). The limits of lead (Pb) phytoextraction and possibilities of phytostabilization in contaminated soil: a critical review. *International Journal of Phytoremediation*, 22(9), 916-930.
- El Rasafi, T., Oukarroum, A., Haddioui, A., Song, H., Kwon, E. E., Bolan, N., . . . Rinklebe, J. (2022). Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(5), 675-726.
- Faucou, M.-P., Shurcha, M. N. & Meerts, P. (2007). Revisiting copper and cobalt concentrations in supposed hyperaccumulators from SC Africa: influence of washing and metal concentrations in soil. *Plant and Soil*, 301(1), 29-36.
- Furini, A. (2012). *Plants and heavy metals*. Springer Science and Business Media .
- Galey, M., van Der Ent, A., Iqbal, M. & Rajakaruna, N. (2017). Ultramafic geoecology of south and Southeast Asia. *Botanical Studies*, 58(1), 18 .
- Gardner, M., Comber, S., Scrimshaw, M. D., Cartmell, E., Lester, J. & Ellor, B. (2012). The significance of hazardous chemicals in wastewater treatment works effluents. *Science of the Total Environment*, 437, 363-372.
- Gerendás, J., Polacco, J. C., Freyermuth, S. K. & Sattelmacher, B. (1999). Significance of nickel for plant growth and metabolism. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162(3), 241-256.

- Ghaderian, S. & Baker, A. (2007). Geobotanical and biogeochemical reconnaissance of the ultramafics of Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 92(1), 34-42.
- Ghafoori, M., Shariati, M., van der Ent, A. & Baker, A. J. (2022). Interpopulation variation in nickel hyperaccumulation and potential for phytomining by *Odontarrhena penjwinensis* from Western Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 237, 106985.
- Ghafoori, M., Shariati, M., van der Ent, A. & Baker, A. J. (2023). Nickel hyperaccumulation, elemental profiles and agromining potential of three species of *Odontarrhena* from the ultramafics of Western Iran. *International Journal of Phytoremediation*, 25(3), 381-392.
- Ghasemi, R., Share, H., Sharifi, R., Boyd, R. S. & Rajakaruna, N. (2018). Inducing Ni sensitivity in the Ni hyperaccumulator plant *Alyssum inflatum* Nyárády (Brassicaceae) by transforming with CAX1, a vacuolar membrane calcium transporter. *Ecological Research*, 33(4), 737-747.
- Ghosh, P., Konar, A., Dalal, D. D., Roy, A. & Chatterjee, S. (2023). Phytoremediation technology: A review. *International Journal of Agriculture and Plant Science*, 400, 5-00.
- Gregson, S. & Hope, A. (1994). Review of Phytotoxicity. *Uptake and Accumulation of Elements and Organic Chemicals in Terrestrial Higher Plants, AERC Report for Department of the Environment, London*.
- Gryschko, R., Kuhnle, R., Terytze, K., Breuer, J. & Stahr, K. (2005). Soil extraction of readily soluble heavy metals and as with 1 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-solution-evaluation of DIN. 19730 (6 pp). *Journal of Soils and Sediments*, 5(2), 101-106.
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., . . . Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and environmental safety*, 211, 111887.
- Harasim, P. & Filipek, T. (2015). Nickel in the environment. *Journal of Elementology*, 20(2).
- 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(13), 12673-12688.
- Hatanaka, T., Ogura, T., Matsuyama, S. & Hobara, S. (2022). Variation in soil chemical properties in relation to vegetation characteristics in a serpentine area of Hokkaido, Japan. *Geoderma Regional*, 31, e00589.
- Helaoui, S., Mkhini, 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.
- Hewawasam, T., Fernando, G. & Priyashantha, D. (2014). Geo-vegetation mapping and soil geochemical characteristics of the Indikolapelessa serpentinite outcrop, southern Sri Lanka. *Journal of Earth Science*, 25(1), 152-168.
- Iyaka, Y. A. (2011). Nickel in soils: A review of its distribution and impacts. *Scientific Research and Essays*, 6(33), 6774-6777.
- Kazakou, E., Dimitrakopoulos, P., Baker, A., Reeves, R. & Troumbis, A. (2008). Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level. *Biological reviews*, 83(4), 495-508.
- Kumar, A., Kumar, V., Thakur, M., Bakshi, P., Koul, A., Javaid, A., . . . Pandey, V. C. (2023). Comprehensive review of nickel biogeochemistry, bioavailability, and health risks in the environment. *Land Degradation & Development*, 34(14), 4141-4156.
- Kumar, A. & Maiti, S. K. (2013). Availability of chromium, nickel and other associated heavy metals of ultramafic and serpentine soil/rock and in plants. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2), 256-268.

- Madhav, S., Mishra, R., Kumari, A., Srivastav, A., Ahamad, A., Singh, P., . . . Sillanpää, M. (2024). A review on sources identification of heavy metals in soil and remediation measures by phytoremediation-induced methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1), 1099-1120.
- Nascimento, C. W. A. d., Lima, L. H. V., Silva, Y. J. A. B. d. & Biondi, C. M. (2022). Ultramafic soils and nickel phytomining opportunities: A review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0210099.
- Nkrumah, P. N., Baker, A. J., Chaney, R. L., Erskine, P. D., Echevarria, G., Morel, J. L. & van Der Ent, A. (2016). Current status and challenges in developing nickel phytomining: an agronomic perspective. *Plant and Soil*, 406(1), 55-69.
- Omori, S., Abedi, A., Seifpanahi-Shabani, K., Abbasdokht, H., Ghafoori, M., Abasian, M. & Van Der Ent, A. (2026). Assessment of Growth Performance and Biomass Processing of *Odontarrhena inflata* for Nickel Agromining in Serpentine Soils. *Journal of Mining and Environment*. 17(1), 219-238.
- Pakdaman, N., Ghaderian, S. M., Ghasemi, R. & Asemaneh, T. (2013). Effects of calcium/magnesium quotients and nickel in the growth medium on growth and nickel accumulation in *Pistacia atlantica*. *Journal of plant nutrition*, 36(11), 1708-1718 .
- Palm, E., Nissim, W. G., Colasurdo, G. & Van Volkenburgh, E. (2024). Inducible tolerance to low Ca: Mg in serpentine ecotype of *Erythranthe guttata*. *Journal of Plant Physiology*, 303, 154355.
- Pishchik, V., Mirskaya, G., Chizhevskaya, E., Chebotar, V. & Chakrabarty, D. (2021). Nickel stress-tolerance in plant-bacterial associations. *PeerJ*, 9, e12230.
- Pittman, J. & Hirschi, K. (2016). CAX-ing a wide net: Cation/H<sup>+</sup> transporters in metal remediation and abiotic stress signalling. *Plant Biology*, 18(5), 741-749.
- Pollard, A. J., McCartha, G. L., Quintela-Sabaris, C., Flynn, T. A., Sobczyk, M. K. & Smith, J. A. C. (2021). Intraspecific variation in nickel tolerance and hyperaccumulation among serpentine and limestone populations of *Odontarrhena serpyllifolia* (Brassicaceae: Alysseae) from the Iberian Peninsula. *Plants*, 10(4), 800.
- Rajakaruna, N. & Boyd, R. S. (2014). Serpentine soils. *Oxford bibliographies in ecology*.
- Rajakaruna, N., Harris, T. B. & Alexander, E. B. (2009). Serpentine geocology of eastern North America: a review. *Rhodora*, 111(945), 21-108.
- Rajapaksha, A. U., Alam, M. S., Chen, N., Alessi, D. S., Igalavithana, A. D., Tsang, D. C. & Ok, Y. S. (2018). Removal of hexavalent chromium in aqueous solutions using biochar: chemical and spectroscopic investigations. *Science of the Total Environment*, 625, 1567-1573.
- Rather, B. A., Masood, A., Sehar, Z., Majid, A., Anjum, N. A. & Khan, N. A. (2020). Mechanisms and role of nitric oxide in phytotoxicity-mitigation of copper. *Frontiers in Plant Science*, 11, 675.
- Reeves, R. D. (2024). The discovery and global distribution of hyperaccumulator plants: A personal account. *Ecological Research*, 39(4), 416-436.
- Reeves, R. D., van Der Ent, A., Echevarria, G., Isnard, S. & Baker, A. J. (2020). Global distribution and ecology of hyperaccumulator plants. In *Agromining: farming for metals: extracting unconventional resources using plants* (pp. 133-154). Springer.
- Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, M. Z., Rinklebe, J., Tsang, D. C., Bashir, A., . . . Ok, Y. S. (2018). Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* crop species: a review. *Science of the Total Environment*, 631, 1175-1191.
- Rosenkranz, T., Hipfinger, C., Ridard, C. & Puschenreiter, M. (2019). A nickel phytomining field trial using *Odontarrhena chalcidica* and *Noccaea goesingensis* on an Austrian serpentine soil. *Journal of Environmental Management*, 242, 522-528.
- 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(1), 183-195

- Salehi-Eskandari, B., Gahrouei, M. S., Boyd, R. S., Rajakaruna, N. & Ghasemi, R. (2022). Physiological responses to lead and PEG-simulated drought stress in metallophilous and non-metallophilous *Matthiola* (Brassicaceae) species from Iran. *South African Journal of Botany*, 150, 1011-1021.
- 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 (In Persian).
- Santisteban, J. I., Mediavilla, R., Lopez-Pamo, E., Dabrio, C. J., Zapata, M. B. R., García, M. J. G., . . . Martínez-Alfaro, P. E. (2004). Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? *Journal of paleolimnology*, 32(3), 287-299.
- Shi, G., Xia, S., Ye, J., Huang, Y., Liu, C. & Zhang, Z. (2015). PEG-simulated drought stress decreases cadmium accumulation in castor bean by altering root morphology. *Environmental and Experimental Botany*, 111, 127-134 .
- van Der Ent, A., Baker, A. J., Reeves, R. D., Chaney, R. L., Anderson, C. W., Meech, J. A. . . . Morel, J. L. (2015). Agromining: farming for metals in the future? In: ACS Publications.
- Van der Ent, A., Echevarria, G., Baker, A. J. & Morel, J. L. (2015). Agromining: Farming for metals. *Extracting unconventional resources using plants*. Cham: Springer .
- Vithanage, M., Kumarathilaka, P., Oze, C., Karunatilake, S., Seneviratne, M., Hseu, Z.-Y., . . . Rinklebe, J. (2019). Occurrence and cycling of trace elements in ultramafic soils and their impacts on human health: A critical review. *Environment international*, 131, 104974 .
- Xu, Z.-M., Li, Q.-S., Yang, P., Ye, H.-J., Chen, Z.-S., Guo, S.-H., . . . Zeng, E. Y. (2017). Impact of osmoregulation on the differences in Cd accumulation between two contrasting edible amaranth cultivars grown on Cd-polluted saline soils. *Environmental Pollution*, 224, 89-97 .

پایان