ارزیابی آلودگی نیکل و مس و انتقال خاک-گیاه در اراضی کشاورزی حوضه‌های آبخیز استان ایلام

چکیده

عناصر بالقوه سمی از آلاینده‌های پایدار محیطی هستند که می‌توانند در خاک تجمع یافته و از طریق انتقال به پوشش گیاهی وارد زنجیره غذایی شوند. این پژوهش در سال ۱۳۹۹ با هدف ارزیابی وضعیت آلودگی نیکل و مس در سامانه خاک- گیاه در مزارع لوبیا و نخود استان ایلام انجام شد. برای هر گونه ۶۰ نمونه از خاک و بافت گیاهی بررسی و غلظت عناصر با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) تعیین شد. شاخص آلودگی خاک، شاخص آلودگی گیاه، ضریب انتقال و همبستگی بین غلظت عناصر در خاک و بافت گیاهی محاسبه شد. مقدار SPI نیکل در لوبیا و نخود به ترتیب ۱/۸۸۴ و ۱/۲۶۵ و برای مس به ترتیب ۲/۳۵۶ و ۲/۲۰۴ بود. CPI نیکل در لوبیا و نخود به ترتیب ۱/۳ و ۱/۰۷۷ و CPI مس به ترتیب ۰/۶۷۵ و ۰/۵۸۸محاسبه شد. ضریب انتقال نیکل ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۰۵۴ و مس ۰/۱۰۳ و ۰/۱۳۹ به ترتیب در لوبیا و نخود بود. بین غلظت نیکل و مس در خاک و بافت گیاهی همبستگی مثبت و بسیار قوی مشاهده شد. نتایج نشان داد شدت آلودگی خاک، تجمع عناصر در گیاه و قابلیت انتقال خاک به گیاه الزاماً الگوی یکسانی ندارند. پایش یکپارچه خاک و پوشش گیاهی و تعیین زیست‌فراهمی عناصر سنگین برای ارزیابی دقیق‌تر وضعیت آلودگی منطقه در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: عناصر بالقوه سمی؛ نیکل؛ مس؛ شاخص آلودگی خاک؛ شاخص آلودگی گیاه؛ ضریب انتقال؛ ایلام.

خلیل عموزاده [۱]
سینا عطار روشن [۱*]
سیما سبزعلیپور [۱]
مریم محمدی روزبهانی [۱]
سید کیوان مرعشی [۲]

۱. گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲. گروه زراعت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* **نویسنده مسئول مکاتبات**
s.attarroshan@iau.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵

این مقاله برگرفته از رساله دکترا است.

مقدمه

آلودگی خاک به عناصر بالقوه سمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی در اکوسیستم‌های خشکی محسوب می‌شود، زیرا این عناصر برخلاف بسیاری از آلاینده‌های آلی تجزیه پذیری محدودی دارند و می‌توانند برای مدت طولانی در محیط باقی بمانند. ورود عناصر بالقوه سمی به خاک می‌تواند در نتیجه فرایندهای طبیعی مانند هوازدگی سنگ مادر و همچنین فعالیت‌های انسانی از جمله مصرف نهاده‌های شیمیایی، انتشار آلاینده‌های صنعتی، رسوب جوی و ورود پساب‌ها و سایر منابع آلاینده رخ دهد.

پس از ورود به خاک، سرنوشت و تحرک این عناصر به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و همچنین شکل شیمیایی و میزان فراهمی آنها وابسته است (Hu *et al.*, 2017; Kowalska *et al.*, 2018). خاک علاوه بر آنکه یکی از مخازن اصلی عناصر بالقوه سمی در محیط زیست است، می‌تواند به عنوان یک واسط انتقال این عناصر به اجزای زیستی اکوسیستم (گیاهان) عمل کند. ریشه گیاه در محل تماس مستقیم با خاک، نخستین مرحله ورود بسیاری از عناصر محلول و قابل جذب به زنجیره زیستی را تشکیل می‌دهد.

با این حال وجود یک عنصر در خاک الزاماً به معنای انتقال آن به گیاه نیست بلکه ویژگی‌هایی مانند اسیدیته، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، بافت خاک، کانی شناسی و شکل شیمیایی عناصر شیمیایی می‌توانند فراهمی زیستی و جذب آنها را کنترل کنند (Chojnacka *et al.*, 2005). در میان عناصر بالقوه سمی، نیکل (Ni) و مس (Cu) از نظر رفتار محیطی و بر هم کنش خاک- گیاه اهمیت ویژه‌ای دارند. هر دو عنصر در غلظت‌های مناسب می‌توانند در فرایندهای زیستی گیاه نقش داشته باشند، اما افزایش غلظت آنها در محیط می‌تواند موجب اختلال در فرایندهای فیزیولوژیک و ایجاد آثار نامطلوب بر موجودات زنده شود. بنابراین، ارزیابی وضعیت این عناصر صرفاً بر اساس غلظت آنها در یک جزء محیطی کافی نیست و بررسی هم زمان میزان آلودگی و قابلیت انتقال آنها در سامانه خاک- گیاه اهمیت دارد

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

(Vandenhove *et al.*, 2009). در مورد Cu نیز ویژگی‌های خاک و فرایندهای جذب و واجذب نقش مهمی در تعیین فراهمی آن برای گیاه دارند (Shabbir *et al.*, 2020).

یکی از رویکردهای کاربردی برای ارزیابی آلودگی محیطی استفاده از شاخص‌های کمی آلودگی است. شاخص آلودگی خاک می‌تواند امکان مقایسه وضعیت عناصر مختلف و شناسایی عناصر دارای غلظت غیرطبیعی نسبت به مقادیر مرجع را فراهم کند. در این چارچوب، شاخص آلودگی محصول یا بافت گیاهی نیز می‌تواند برای ارزیابی میزان تجمع عنصر در بخش زیستی اکوسیستم مورد استفاده قرار گیرد. استفاده هم زمان از شاخص‌های خاک و گیاه امکان تفکیک دو مؤلفه مهم را فراهم می‌کند: شدت حضور عنصر در محیط خاک و میزان تجمع آن در جزء زیستی. چنین رویکردی در مطالعات پایش محیطی برای شناسایی مناطق یا عناصری که نیازمند بررسی دقیق‌تر هستند بسیار کاربردی است (Kowalska *et al*., 2018). از سوی دیگر، ضریب انتقال (Transfer Factor; TF) یکی از شاخص‌های متداول برای توصیف انتقال عناصر از خاک به بافت‌های گیاهی است. این شاخص به صورت نسبت غلظت عنصر در بافت گیاه به غلظت متناظر آن در خاک بیان می‌شود و می‌تواند اطلاعات کاربردی درباره قابلیت انتقال نسبی عنصر از مخزن خاک به بخش زیستی (گیاه) را فراهم کند. با این حال، TF باید با دقت تفسیر شود زیرا انتقال عناصر تنها تابع غلظت کل آنها در خاک نیست و فراهمی زیستی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شکل شیمیایی عنصر و خصوصیات گونه گیاهی می‌توانند بر مقدار آن اثر بگذارند (Chojnacka *et al.*, 2005). اهمیت استفاده از شاخص‌های انتقال زمانی بیشتر آشکار می‌شود که یک عنصر شیمیایی دارای غلظت نسبتاً بالا در خاک باشد، اما انتقال آن به بافت‌های گیاه محدود باشد، یا برعکس، غلظت نسبتاً پایین یک عنصر در خاک با انتقال بیشتر به بافت گیاهی همراه شود. مطالعات نشان داده‌اند که الگوی تجمع عناصر شیمیایی میان گونه‌های گیاهی متفاوت است و نوع عنصر، ویژگی‌های خاک و خصوصیات گیاه می‌توانند به طور هم زمان میزان جذب و انتقال را کنترل کنند. در یک فر اتحلیل گسترده نیز تفاوت قابل توجه در ظرفیت تجمع و انتقال عناصر میان گونه‌های مختلف گیاهی گزارش شده است (Chojnacka *et al.*, 2005; Shabbir *et al.*, 2020).

استان ایلام با توجه به تنوع شرایط محیطی، تفاوت ویژگی‌های خاک و پراکنش فعالیت‌های انسانی و کاربری‌های مختلف سرزمین، می‌تواند الگوهای متفاوتی از تجمع و انتقال عناصر را در سامانه خاک- گیاه نشان دهد. با وجود مطالعات متعدد درباره آلودگی عناصر بالقوه سمی در خاک و گیاه، اطلاعات مقایسه‌ای درباره ارتباط میان وضعیت آلودگی خاک، تجمع عناصر در گیاه و انتقال آنها از خاک به گیاه برای این منطقه محدود است. بنابراین بررسی هم زمان شاخص‌های آلودگی در خاک و گیاه و ضریب انتقال می‌تواند به شناسایی عناصری کمک کند که از نظر آلودگی محیطی و انتقال در سامانه خاک- گیاه اهمیت بیشتری دارند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در سامانه خاک- گیاه و انتقال آنها در استان ایلام انجام شد. در این مطالعه، رفتار Ni و Cu در خاک و دو گونه گیاهی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از شاخص آلودگی خاک (Soil Pollution Index; SPI)، شاخص آلودگی گیاه (Crop Pollution Index; CPI) و ضریب انتقال (TF)، شدت آلودگی در بخش غیر زیستی و زیستی و همچنین انتقال نسبی این عناصر از خاک به گیاه ارزیابی و مقایسه شد. این رویکرد با تمرکز بر ارتباط میان آلودگی خاک و پاسخ زیستی گیاه می‌تواند اطلاعات کاربردی برای پایش محیط زیستی و ارزیابی وضعیت آلودگی در سامانه خاک- گیاه فراهم کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در قالب یک مطالعه میدانی توصیفی- تحلیلی با هدف ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در سامانه خاک- گیاه و انتقال آنها در استان ایلام واقع در غرب ایران انجام شد. نمونه برداری در سال ۱۳۹۹ از مزارع کشت لوبیا و نخود در ۱۰ شهرستان استان شامل آبدانان، ایلام، ایوان، بدره، دره شهر، دهلران، چرداول، ملکشاهی، مهران و سیروان انجام گرفت. انتخاب مناطق نمونه برداری با هدف پوشش مناطق عمده کشت و ایجاد پراکنش جغرافیایی مناسب در سطح استان صورت گرفت (شکل۱).

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]



شکل ۱: نقشه منطقه مورد مطالعه (موقعیت در جهان، ایران و استان ایلام)

در این مطالعه نمونه برداری در فصل برداشت محصولات در استان ایلام انجام شد. در هر یک از شهرستان‌ها یک مزرعه برای هر گونه گیاهی انتخاب و در هر مزرعه ۲ ایستگاه نمونه برداری تعیین شد. موقعیت ایستگاه‌ها با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد. در هر ایستگاه، نمونه برداری با سه تکرار انجام و در نهایت برای هر گونه ۶۰ نمونه و همچنین ۶۰ نمونه خاک متناظر جمع آوری شد. برای نمونه برداری گیاهی، در هر ایستگاه یک پلات ۱۰×۱۰ متر در نظر گرفته شد. چهار زیر نمونه از چهار گوشه پلات و یک زیر نمونه از مرکز آن برداشت و پس از اختلاط و همگن سازی، نمونه مرکب تشکیل شد. نمونه‌های خاک نیز از محل متناظر با نمونه‌های گیاهی برداشت از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر برداشت شد.

پس از انتقال نمونه‌های گیاهی به آزمایشگاه، بقایای غیر گیاهی و علف‌های هرز از نمونه‌ها جدا و نمونه‌ها با آب مقطر شست‌وشو داده شدند. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و نمونه‌های خشک شده آسیاب شده و پس از همگن‌سازی از الک با اندازه چشمه ۰/۳ میلی‌متر عبور داده شدند. از هر نمونه، ۱ گرم ماده خشک آسیاب شده به بالن هضم منتقل و سپس ۴ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به نمونه افزوده و محلول به مدت ۳ تا ۵ دقیقه حرارت داده شد. در ادامه، ۱۶/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن به تدریج به نمونه افزوده و محلول حدود یک دقیقه حرارت داده شد تا محلولی شفاف حاصل شود. پس از سرد شدن، محلول هضم شده با آب دیونیزه به حجم نهایی ۵۰ میلی لیتر رسانده شد و پس از صاف کردن برای اندازه‌گیری عناصر مورد استفاده قرار گرفت.

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، از بقایای گیاهی و مواد زائد پاک شدند و پس از خشک شدن، از الک ۲ میلی متری عبور داده شده و سپس بخش ریزتر نمونه‌ها برای آماده سازی و هضم شیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. برای هضم، ۱ گرم خاک خشک با اسید کلریدریک ۶ مولار و اسید نیتریک غلیظ با نسبت ۱:۳ مخلوط و پس از ۲۴ ساعت، در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. پس از هضم، محلول با اسید نیتریک ۲ مولار به حجم نهایی ۵۰ میلی لیتر رسانده و در نهایت غلظت عناصر نیکل (Ni) و مس (Cu) در محلول حاصل بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک (mg kg^{-1} DW) با استفاده از دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری شد (Turner *et al*., 1992; Mingorance, 2002). در این مطالعه به منظور ارزیابی وضعیت آلودگی Ni و Cu در خاک مناطق مورد مطالعه، شاخص آلودگی منفرد خاک (Soil Pollution Index; SPI) محاسبه شد. این شاخص از نسبت غلظت اندازه‌گیری شده هر عنصر در خاک به مقدار زمینه یا مقدار مرجع همان عنصر محاسبه شد:

$$SPI_i = \frac{C_{Soil,i}}{B_i}$$

که در آن $C_{Soil,i}$، غلظت اندازه‌گیری شده عنصر i در خاک و B_i مقدار زمینه یا مقدار مرجع عنصر i است. در این مطالعه، مقادیر B_i برای Ni و Cu به ترتیب ۲۰/۷ mg kg^{-1} و ۲۳/۱ در نظر گرفته شد (Hu *et al*., 2017).

بر این اساس، مقادیر $SPI \leq 1$ نشان دهنده وضعیت ایمن، مقادیر بیش از ۱ تا ۲ نشان دهنده آلودگی ناچیز، مقادیر بیش از ۲ تا ۳ نشان دهنده آلودگی خفیف، مقادیر بیش از ۳ تا ۵ نشان دهنده آلودگی متوسط و مقادیر بیش از ۵ نشان دهنده آلودگی شدید در نظر گرفته خواهد

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

شد. برای ارزیابی میزان تجمع Ni و Cu در بافت گیاهی، شاخص آلودگی گیاه (Crop Pollution Index; CPI) محاسبه شد. CPI از نسبت غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در بافت گیاهی به مقدار استاندارد مجاز همان عنصر در بخش خوراکی گیاه به دست آمد:

$$CPI_i = \frac{C_{Plant,i}}{S_i}$$

که در آن $C_{Plant,i}$ ، غلظت اندازه‌گیری شده عنصر i در بافت گیاهی و S_i مقدار استاندارد مجاز همان عنصر است. در این مطالعه، مقادیر S_i برای Ni و Cu به ترتیب ۰/۳۵ $mg\ kg^{-1}$ و ۱۰ در نظر گرفته شد (Hu *et al*., 2017). برای ارزیابی انتقال نسبی از خاک به بافت گیاهی، ضریب انتقال (Transfer Factor; TF) محاسبه شد. این شاخص از نسبت غلظت عنصر در بافت گیاهی به غلظت همان عنصر در خاک متناظر به دست آمد:

$$TF_i = \frac{C_{plant,i}}{C_{soil,i}}$$

که در آن C_{plant} غلظت عنصر i در بافت گیاهی و C_{soil} غلظت همان عنصر در خاک متناظر است. در این پژوهش، برای هر یک از عناصر Ni و Cu، شاخص‌های SPI، CPI و TF برای دو گونه لوبیا و نخود محاسبه و در قالب آمار توصیفی به صورت میانگین و انحراف معیار گزارش شد. برای مقایسه غلظت Ni و Cu در خاک و بافت گیاهی و همچنین مقادیر شاخص‌های SPI، CPI و TF بین دو گونه مورد مطالعه، از آزمون t ولچ (Welch's independent-samples t-test) استفاده شد. این آزمون با توجه به استقلال دو گروه و عدم فرض برابری واریانس‌ها به کار گرفته شد. مستقل استفاده شد. پیش فرض نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk و همگنی واریانس‌ها با آزمون Levene بررسی شد. به منظور بررسی رابطه بین غلظت Ni و Cu در خاک و غلظت متناظر آنها در بافت گیاهی، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. سطح معنی‌داری در تمامی آزمون‌ها $P < ۰/۰۵$ در نظر گرفته شد. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics ورژن ۲۰۲۲ انجام و نرم افزار Microsoft Excel برای سازمان‌دهی داده‌ها و محاسبه شاخص‌های SPI، CPI و TF مورد استفاده قرار گرفت.

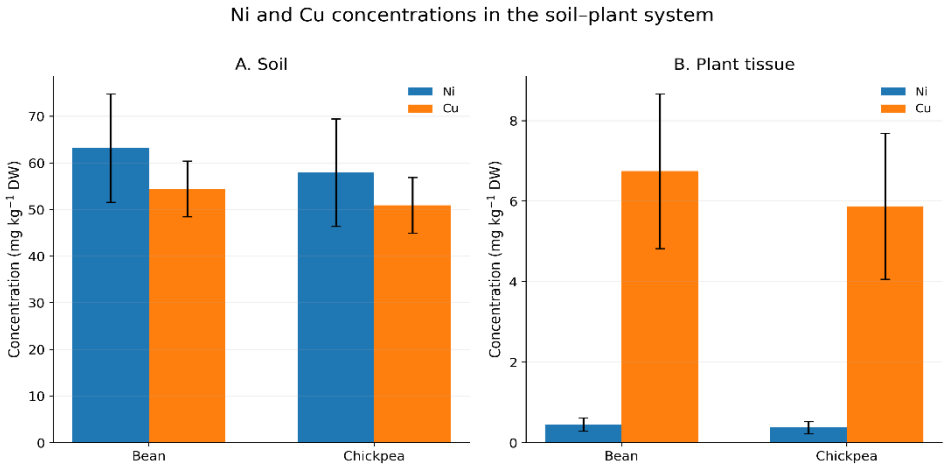
نتایج

میانگین غلظت نیکل در خاک متناظر با مزارع لوبیا $mg\ kg^{-1}$ ۱۱/۶۳ ± ۶۳/۱۷ و در خاک مزارع نخود $mg\ kg^{-1}$ ۱۱/۵۲۸ ± ۵۷/۹۱۵ بود. غلظت مس نیز در خاک مزارع لوبیا $mg\ kg^{-1}$ ۵/۹۶ ± ۵۴/۴۳ و در خاک مزارع نخود $mg\ kg^{-1}$ ۵/۹۷۶ ± ۵۰/۹۰۲ به دست آمد. در هر دو گونه، غلظت نیکل و مس در خاک بالاتر از مقادیر مرجع مورد استفاده برای محاسبه شاخص آلودگی قرار داشت. در بافت گیاهی، میانگین غلظت نیکل در لوبیا $mg\ kg^{-1}$ ۰/۱۶۴ ± ۰/۴۵۵ و در نخود $mg\ kg^{-1}$ ۰/۱۴۹ ± ۰/۳۷۷ بود. میانگین غلظت مس نیز به ترتیب ۱/۹۲۱ ± ۶/۷۴۵ $mg\ kg^{-1}$ ۱/۸۱۳ ± ۵/۸۷۵ در لوبیا و نخود محاسبه شد. بنابراین، غلظت هر دو عنصر در بافت لوبیا اندکی بیشتر از مقادیر متناظر در نخود بود (جدول۱ و شکل۲).

جدول ۱: غلظت نیکل و مس در خاک و بافت گیاهی لوبیا و نخود در استان ایلام

	عناصر	گونه ها	تعداد	درجه آزادی	میانگین±انحراف معیار	t	معنی داری
خاک	Ni	لوبیا	12	17.99	63.17±11.63	2.486	0.014
		نخود	0		57.915±11.52		
	Cu	لوبیا	12	118	54.43±5.96	3.238	0.002
		نخود	0		50.9±5.97		
گیاه	Ni	لوبیا	12	116.93	0.455±0.164	2.727	0.007
		نخود	0		0.377±0.149		
	Cu	لوبیا	12	117.61	6.745±1.92	2.551	0.012
		نخود	0		5.875±1.81		

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]



شکل ۲: مقایسه غلظت نیکل و مس در خاک و بافت گیاهی لوبیا و نخود

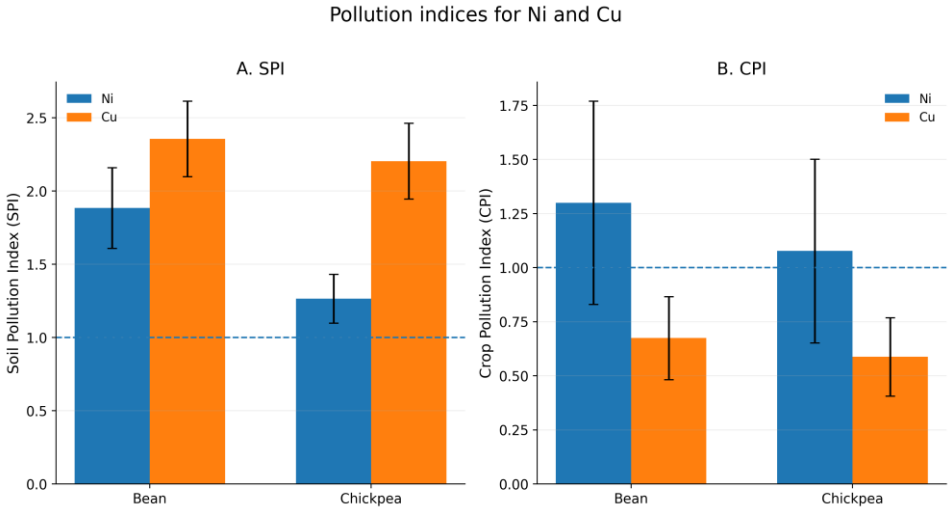
مقادیر SPI نشان داد که نیکل و مس در هر دو نوع خاک مورد بررسی، وضعیت متفاوتی از نظر شدت آلودگی داشتند. در لوبیا، میانگین SPIبرای نیکل ۰/۲۷۵ ± ۱/۸۸۴ و برای مس ۰/۲۵۸ ± ۲/۳۵۶ بود. در نخود نیز میانگین SPI نیکل ۰/۱۶۶ ± ۱/۲۶۵ و مس ۰/۲۵۹ ± ۲/۲۰۴ به دست آمد. بر اساس طبقه بندی مورد استفاده، SPI نیکل در هر دو گونه در محدوده آلودگی ناچیز قرار گرفت، در حالی که SPI مس در هر دو گونه در محدوده آلودگی خفیف قرار داشت. در هر دو گونه، مقدار SPI مس بیشتر از نیکل بود به طوری که این نسبت در لوبیا و نخود نیز الگوی مشابهی داشت.

میانگین CPI نیکل در لوبیا ۰/۴۷۰ ± ۱/۳۰۰ و در نخود ۰/۴۲۵ ± ۱/۰۷۷ بود، در حالی که میانگین CPI مس به ترتیب ۰/۱۹۲ ± ۰/۶۷۴ و ۰/۱۸۱ ± ۰/۵۸۷ محاسبه شد. بنابراین، در هر دو گونه، CPI نیکل بیشتر از یک و CPI مس کمتر از یک بود. همچنین، مقدار CPIهر دو عنصر در لوبیا بیشتر از مقادیر متناظر در نخود برآورد شد (جدول۲ و شکل۳).

جدول ۲: شاخص آلودگی خاک (SPI) و گیاه (CPI) برای نیکل و مس در مزارع لوبیا و نخود

	عناصر	گونه ها	تعداد	درجه آزادی	میانگین±انحراف معیار	t	معنی داری
SPI	Ni	لوبیا نخود	120	96.96	1.884±0.275 1.265±0.166	14.927	<0.001
	Cu	لوبیا نخود	120	118	2.356±0.258 2.204±0.259	3.321	0.002
CPI	Ni	لوبیا نخود	120	116.82	1.3±0.47 1.07±0.425	2.726	0.007
	Cu	لوبیا نخود	120	117.59	0.674±0.192 0.587±0.181	2.554	0.012

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

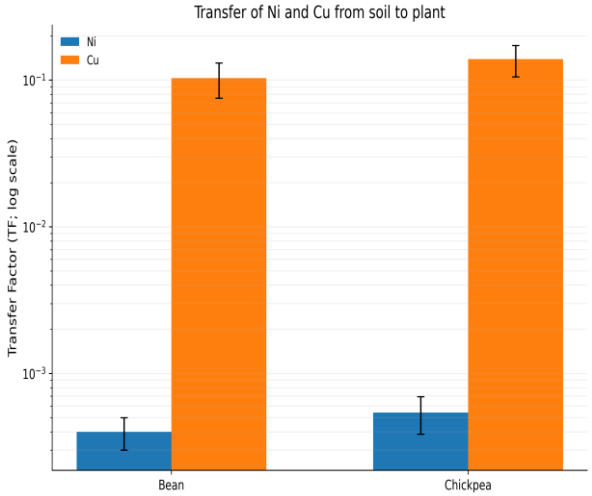


شکل ۳: مقایسه شاخص آلودگی خاک (SPI) و شاخص آلودگی گیاه (CPI) برای نیکل و مس در لوبیا و نخود

ضریب انتقال نیکل در لوبیا ۰/۰۰۰۱ ± ۰/۰۰۰۴ و در نخود ۰/۰۰۰۱ ± ۰/۰۰۰۵ به دست آمد. در مقابل، TF مس در لوبیا 9 ۰/۰۲۷ ± ۰/۱۰۳ و در نخود ۰/۰۳۳ ± ۰/۱۳۹ بود. بنابراین در هر دو گونه، ضریب انتقال مس به مراتب بیشتر از نیکل تعیین شد. در مقایسه گونه‌ای، TF نیکل در نخود اندکی بیشتر از لوبیا بود، در حالی که TF مس نیز در نخود (۰/۱۳۹) نسبت به لوبیا (۰/۱۰۳) مقدار بالاتری داشت. در مجموع، اختلاف بسیار زیاد بین TF دو عنصر نشان داد که شدت حضور عناصر در خاک و گیاه الزاماً با قابلیت انتقال آنها از خاک به بافت گیاهی یکسان نیست به طوری که نیکل با وجود مقادیر بالاتر شاخص آلودگی گیاه، TF بسیار پایین‌تری نسبت به مس داشت (جدول-۳ و شکل-۴).

جدول ۳: ضریب انتقال (TF) عناصر نیکل و مس در گونه های لوبیا و نخود

	عناصر	گونه ها	تعداد	درجه آزادی	میانگین±انحراف معیار	t	معنی داری
TF	Ni	لوبیا	120	100.86	0.0004±0.0001	-5.879	<0.001
		نخود			0.00054±0.0001		
	Cu	لوبیا	120	114.11	0.103±0.027	-6.35	<0.001
		نخود			0.139±0.033		



شکل ۴: مقایسه ضریب انتقال نیکل و مس از خاک به بافت گیاهی لوبیا و نخود

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که بین غلظت عناصر در خاک و بافت گیاهی هر دو گونه، رابطه مثبت و معنی‌داری وجود داشت. در لوبیا، ضریب همبستگی بین غلظت نیکل در خاک و بافت گیاهی ۰/۹۹۷ و برای مس ۰/۹۹ بود (P<۰/۰۰۱). در نخود نیز ضرایب همبستگی برای نیکل و مس به ترتیب ۰/۹۷۳ و ۰/۹۸۸ به دست آمد (P<۰/۰۰۱). بنابراین، افزایش غلظت این عناصر در خاک با افزایش غلظت متناظر آنها در بافت گیاهی همراه بود (جدول۴).

جدول ۴: ضرایب همبستگی پیرسون بین غلظت نیکل و مس در خاک و بافت گیاهی لوبیا و نخود

گونه ها	عناصر	Pearson (r)	معنی داری
لوبیا	Ni	0.997	<0.001
	Cu	0.990	<0.001
نخود	Ni	0.973	<0.001
	Cu	0.988	<0.001

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت Ni و Cu در خاک‌های مورد بررسی در هر دو محصول لوبیا و نخود قابل توجه بوده و مقادیر شاخص آلودگی خاک (SPI) نیز نشان دهنده تفاوت رفتاری این دو عنصر در محیط خاک بود. مقدار SPI برای Ni در لوبیا و نخود به ترتیب ۱/۸۸۴ و ۱/۲۶۵ و برای Cu به ترتیب ۲/۳۵۶ و ۲/۲۰۴ به دست آمد. بر اساس طبقه بندی مورد استفاده، Ni در محدوده آلودگی ناچیز و Cuدر محدوده آلودگی خفیف قرار گرفت. استفاده از شاخص‌های آلودگی منفرد می‌تواند برای تفکیک شدت نسبی آلودگی عناصر در خاک مفید باشد اگر چه تفسیر آنها به انتخاب مقدار زمینه یا مقدار مرجع وابسته است و نتایج باید در چارچوب ویژگی‌های ژئوشیمیایی منطقه بررسی شوند (Kowalska *et al.*, 2018). این موضوع اهمیت استفاده از شاخص‌های آلودگی در کنار داده‌های غلظت واقعی عناصر را نشان می‌دهد زیرا یک مقدار مطلق به تنهایی لزوماً بیانگر وضعیت آلودگی یک محیط نیست. مقدار بالاتر SPI برای Cu نسبت به Ni در هر دو نوع خاک نشان می‌دهد که Cu از نظر مقایسه با مقادیر مرجع مورد استفاده، سهم بیشتری در وضعیت آلودگی خاک داشته است. Cu اگر چه یک عنصر ضروری برای موجودات زنده است، افزایش زیست فراهمی و تجمع آن در محیط می‌تواند به اختلال در فرایندهای زیستی و سمیت منجر شود. رفتار Cu در خاک به شدت تحت تأثیر شکل شیمیایی، pH، ماده آلی، کانی‌های خاک و فعالیت میکروبی قرار دارد و بنابراین غلظت کل آن الزاماً معادل بخش قابل جذب برای گیاه نیست (Kumar *et al.*, 2021). از این رو، SPI بالاتر Cu در مطالعه حاضر می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از افزایش نسبی بار محیطی این عنصر تفسیر شود. مقایسه با مطالعات انجام شده در سایر مناطق ایران نشان می‌دهد که وضعیت عناصر مورد مطالعه در ایلام دارای ویژگی‌های منطقه‌ای است. Ahmadi-Doabi و همکاران در سال ۲۰۱۹ در بررسی ۵۳ نمونه خاک کشاورزی در استان کرمانشاه، میانگین غلظت Ni و Cu را به ترتیب ۱۳۱/۵ و ۴۱/۲ $mg\ kg^{-1}$ گزارش کردند. در مقایسه با نتایج مطالعه حاضر، غلظت Ni در خاک‌های مزارع ایلام پایین‌تر، در حالی که غلظت Cu در محدوده بالاتری قرار داشت. این تفاوت می‌تواند بیانگر تفاوت در شرایط زمین شناسی، ویژگی‌های خاک، شدت و نوع نهاده‌های مصرفی و منابع ورودی عناصر در دو منطقه باشد. همچنین، مطالعه دیگری در خاک‌های کشاورزی استان کرمانشاه، دامنه وسیعی از غلظت Ni و Cu را گزارش کرده و Ni و Cu را از عناصر مهم در الگوی آلودگی خاک‌های کشاورزی منطقه معرفی کرده است. بنابراین، قرار گرفتن Ni و Cu در سطح بالاتر از مقادیر زمینه در مناطق کشاورزی غرب ایران، اگر چه شدت متفاوتی دارد، می‌تواند نشان دهنده اهمیت این دو عنصر در پایش محیطی خاک‌های کشاورزی این ناحیه باشد. در مقابل، Ni با وجود SPI پایین‌تر از Cu، CPI بالاتری در بافت گیاهی نشان داد. مقدار CPI نیکل در لوبیا و نخود به ترتیب ۱/۳ و ۱/۰۷ بود در حالی که CPI مس به ترتیب ۰/۶۷۵ و ۰/۵۸۸ محاسبه شد. این تفاوت نشان می‌دهد که شدت آلودگی خاک و میزان تجمع یک عنصر در بافت گیاهی الزاماً یکسان نیست. در واقع، رفتار عناصر در مرز خاک با گیاه تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی قرار دارد و قابلیت جذب و انتقال آنها را نمی‌توان صرفاً از غلظت کل خاک پیش بینی کرد (Antoniadis *et al.*, 2017).

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

مطالعات گسترده در سامانه خاک- گیاه نیز نشان داده‌اند که شاخص‌های آلودگی خاک و شاخص‌های تجمع در گیاه می‌توانند الگوهای متفاوتی برای عناصر مختلف نشان دهند (Hu *et al.*, 2017).

Hu و همکاران در سال ۲۰۱۷ در بررسی انتقال و تجمع فلزات در سامانه خاک–گیاه نشان دادند که شاخص‌های آلودگی خاک و شاخص‌های تجمع در گیاه الزاماً الگوی مشابهی ندارند و رفتار هر عنصر به ویژگی‌های خاک و گیاه وابسته است. از سوی دیگر، مطالعات انجام شده در محیط‌های کشاورزی نشان داده‌اند که حتی در شرایطی که غلظت عناصر در خاک نسبتاً بالا باشد، انتقال آن‌ها به اندام هوایی گیاه می‌تواند محدود باقی بماند. این موضوع با یافته مطالعه حاضر، یعنی بالاتر بودن CPI نیکل نسبت به CPI مس در کنار SPI بالاتر مس، سازگار است و نشان می‌دهد که شدت آلودگی خاک را نمی‌توان مستقیماً معادل میزان تجمع عنصر در بافت گیاهی در نظر گرفت. تفاوت در فراهمی زیستی، برهم‌کُنش عنصر با اجزای خاک و سازوکارهای جذب و تنظیم گیاه می‌تواند موجب ایجاد چنین الگویی شود.

تفاوت چشمگیر ضریب انتقال Ni و Cu از خاک به بافت گیاهی بود. TF نیکل در لوبیا و نخود به ترتیب ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۰۵۴ وTF مس به ترتیب ۰/۱۰۳ و ۰/۱۳۹ به دست آمد که نشان می‌دهد انتقال Cu از خاک به بافت گیاهی در هر دو گونه به مراتب بیشتر از Ni بود. تمام مقادیر TF کمتر از یک برآورد شد که نشان می‌دهد غلظت این عناصر در بافت گیاهی نسبت به غلظت آنها در خاک پایین‌تر است. TFیکی از شاخص‌های متداول توصیف انتقال عناصر از خاک به گیاه است که مقدار آن به گونه گیاهی، ویژگی‌های خاک و شرایط محیطی وابسته است (Chojnacka *et al.*, 2005; Antoniadis *et al.*, 2017). بنابراین، TFپایین Ni و Cu در این مطالعه را می توان با ویژگی‌های محیطی منطقه و قابلیت جذب و انتقال این عناصر مرتبط دانست. در مقایسه دو گونه، TF مس در نخود بیشتر از لوبیا بود، در حالی که TF نیکل نیز در نخود اندکی بیشتر از لوبیا مشاهده شد. این تفاوت نشان می‌دهد که پاسخ گیاهان به یک عنصر در شرایط محیطی مشابه می‌تواند متفاوت باشد. تفاوت بین گونه‌ها در جذب و انتقال عناصر کم مقدار به ویژگی‌های ریشه، فرایندهای انتقال غشایی، بر هم کنش عنصر با اجزای خاک و سازوکارهای تنظیم و دفاع گیاه وابسته است (Antoniadis *et al.*, 2017). در مورد گیاهان تیره حبوبات نیز تفاوت در جذب و انتقال فلزات میان گونه‌ها و اندام‌های مختلف گزارش شده است؛ بنابراین استفاده از یک ضریب انتقال ثابت برای همه گونه‌ها نمی‌تواند رفتار واقعی عناصر را در سامانه خاک- گیاه نشان دهد. یافته‌های مطالعه حاضر از نظر پایین بودن TF با برخی مطالعات انجام شده در ایران همخوانی دارد. برای مثال، Sharifi و همکاران در سال ۲۰۲۴ در مطالعه‌ای در استان کرمانشاه، انتقال عناصر سنگین از خاک به سه گونه سبزی شامل گشنیز، ریحان و تربچه را تحت منابع مختلف آبیاری بررسی کردند و نشان دادند که TF برای عناصر مختلف، از جمله Cu و Ni، در همه تیمارها کمتر از یک بود. در آن مطالعه، مقادیر TF مس و نیکل در گونه‌های مختلف عموماً در دامنه پایین قرار داشتند، اگر چه مقدار TF به نوع گیاه و منبع آبیاری وابسته بود. در مطالعه حاضر نیز TF هر دو عنصر کمتر از یک بود، اما اختلاف بین Ni و Cu بسیار بیشتر بود به طوری که TF مس در لوبیا و نخود به ترتیب ۰/۱۰۳و ۰/۱۳۹، در مقابل ۰/۰۰۰۴و ۰/۰۰۰۵۴ برای Ni به دست آمد. بنابراین، اگر چه هر دو مطالعه انتقال محدود عناصر از خاک به گیاه را نشان می‌دهند، شدت انتقال در مطالعه حاضر به ویژه برای Ni پایین‌تر بود. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت گونه‌های گیاهی، ویژگی‌های خاک، شرایط آبیاری و تفاوت در بخش گیاهی مورد اندازه‌گیری باشد. در مطالعات خارج از ایران نیز تفاوت قابل توجه در انتقال Ni و Cu از خاک به گیاه گزارش شده است. برای نمونه، در یک مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از خاک‌های مختلف در اتریش، انتقال Ni از خاک به گیاه در گونه‌های مختلف از جمله لوبیا بررسی شد و مشخص شد که مقدار TF به نوع خاک، گونه گیاهی و اندام گیاه وابسته است. همچنین، مرور داده‌های انتقال Ni نشان داده است که مقدار TF این عنصر در حبوبات می‌تواند به طور قابل توجهی با سایر گروه‌های گیاهی متفاوت باشد (Vandenhove *et al.*, 2009).

نتایج همبستگی نیز شواهد مهمی درباره ارتباط میان بخش غیر زیستی و زیستی سامانه مورد مطالعه فراهم کرد. بین غلظت Ni خاک و بافت گیاهی در لوبیا و نخود به ترتیب ضرایب همبستگی ۰/۹۹۷ و ۰/۹۷۳ و برای Cu به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۸۸ به دست آمد که همگی معنی‌دار بودند. این روابط بسیار قوی و مثبت نشان می‌دهند که تغییرات غلظت عناصر در خاک با تغییرات غلظت متناظر آنها در بافت گیاهی همراه بوده است. با این حال، این همبستگی‌ها به تنهایی اثبات کننده رابطه تعیین کننده منبع آلودگی نیستند. شدت بالای این همبستگی‌ها در مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تغییرات غلظت Ni و Cu در خاک با تغییرات غلظت متناظر در بافت گیاهی همراه بوده است. با این حال،

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

این الگو را باید در چارچوب مطالعات سامانه خاک–گیاه تفسیر کرد زیرا مطالعات مختلف نشان داده‌اند که رابطه بین غلظت کل عنصر در خاک و جذب گیاه می‌تواند تحت تأثیر فراهمی زیستی و ویژگی‌های خاک تغییر کند. Ni در برخی خاک‌ها عمدتاً در بخش‌های باقیمانده و کم تحرک قرار می‌گیرد در حالی که Cu می‌تواند ارتباط بیشتری با ماده آلی و بخش‌های اکسید شدنی خاک داشته باشد. بنابراین، همبستگی قوی مشاهده شده در مطالعه حاضر لزوماً به معنی کنترل کامل جذب گیاه توسط غلظت کل خاک نیست و اندازه‌گیری بخش زیست فراهم عناصر می‌تواند در مطالعات آینده تصویر دقیق‌تری از این رابطه ارائه کند (Wysokiński *et al.*, 2023). قابلیت انتقال عنصر به گیاه علاوه بر غلظت کل خاک، به زیست‌فراهمی، pH، ماده آلی، کانی‌شناسی و سایر ویژگی‌های خاک وابسته است (Antoniadis *et al.*, 2017). همچنین، Chojnacka و همکاران در سال ۲۰۰۵ تأکید کرده‌اند که رابطه بین غلظت کل فلز در خاک و گیاه همیشه خطی و مستقیم نیست و استفاده از TF برای پیش بینی انتقال عنصر باید با احتیاط انجام شود (Chojnacka *et al.*, 2005).

از منظر محیط زیست، ترکیب نتایج SPI، CPI و TF نشان می‌دهد که ارزیابی آلودگی در یک سامانه خاک– گیاه نباید صرفاً بر اساس غلظت عنصر در خاک انجام شود. در مطالعه حاضر، Cu بالاترین SPI را داشت در حالی که Ni بالاترین CPI را نشان داد وCu نیز TF بالاتری نسبت به Ni داشت. این تفاوت‌ها بیانگر آن است که بار محیطی عنصر، تجمع در گیاه و قابلیت انتقال خاک به گیاه سه مؤلفه مرتبط اما متمایز از وضعیت آلودگی هستند. رویکردهای مبتنی بر شاخص‌های چند گانه نیز دقیقاً با هدف تفکیک این ابعاد و افزایش قابلیت تفسیر وضعیت آلودگی محیط توسعه یافته‌اند (Kowalska *et al.*, 2018). از سوی دیگر قرار گرفتن Ni و Cu در سامانه خاک– گیاه اهمیت پایش محیطی را افزایش می‌دهد زیرا عناصر فلزی برخلاف بسیاری از آلاینده‌های آلی در محیط تجزیه نمی‌شوند و می‌توانند در خاک باقی مانده و تحت شرایط مناسب وارد چرخه زیستی شوند. انتقال عناصر از خاک به گیاه نیز یکی از مسیرهای مهم ارتباط میان آلودگی محیط و مواجهه زیستی محسوب می‌شود (Antoniadis *et al.*, 2017). در مورد لوبیا نیز مطالعات مروری نشان داده‌اند که جذب عناصر بالقوه سمی به ویژگی‌های خاک، از جملهpH ، فسفات و ماده آلی وابسته است و تغییر این شرایط می‌تواند رفتار عناصر را در سامانه خاک– گیاه تغییر دهد (Guzmán-Mar *et al.*, 2023).

با توجه به این یافته‌ها، پایش دوره‌ای Ni و Cu در خاک و پوشش گیاهی مناطق مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود. برای تفسیر دقیق‌تر وضعیت محیطی، اندازه‌گیری غلظت کل عناصر باید در مطالعات آینده با تعیین بخش‌های قابل استخراج یا زیست فراهم آنها، به ویژه برای Cuو Ni، همراه شود. همچنین پیشنهاد می‌شود ویژگی‌های مؤثر خاک شامل pH، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و بافت خاک به طور هم زمان اندازه‌گیری تا عوامل کنترل کننده جذب و انتقال عناصر مشخص شوند. بررسی منابع احتمالی ورود عناصر، از جمله فعالیت‌های صنعتی و معدنی، رسوب جوی، آب آبیاری و سایر ورودی‌های محیطی نیز می‌تواند به شناسایی منشأ آلودگی کمک کند. در نهایت، توسعه پایش یکپارچه خاک– گیاه– آب و تکرار نمونه برداری در دوره‌های زمانی مختلف می‌تواند تصویر دقیق‌تری از پایداری و روند تغییرات آلودگی عناصر در منطقه ارائه کند. بر اساس مجموع یافته‌ها، خاک‌های مورد مطالعه از نظر Ni و Cu در وضعیت یکسانی قرار نداشتند و تفاوت میان شدت آلودگی خاک، تجمع گیاهی و قابلیت انتقال دو عنصر مشاهده شد. Cu از نظر SPI و Ni از نظر CPI شاخص برجسته‌تری داشتند، در حالی که انتقال Cu به بافت گیاهی بیشتر از Ni بود. همبستگی‌های بسیار قوی میان غلظت عناصر در خاک و گیاه نیز وجود ارتباط نزدیک میان دو بخش سامانه را نشان داد. بنابراین، ارزیابی وضعیت آلودگی Ni و Cu در منطقه نیازمند رویکردی یکپارچه مبتنی بر هم زمانی غلظت، شاخص آلودگی خاک، شاخص تجمع گیاهی و انتقال خاک– گیاه می‌باشد.

منابع

Ahmadi Doabi, S., Karami, M., & Afyuni, M. (2019). Heavy metal pollution assessment in agricultural soils of Kermanshah province, Iran. *Environmental Earth Sciences, 78*, 70. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8093-7

Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, M. N. V., Wenzel, W. W., & Rinklebe, J. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation. *Earth-Science Reviews, 171*, 621–645. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.005

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

Chojnacka, K., Chojnacki, A., Górecka, H., & Górecki, H. (2005). Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants. *Science of the Total Environment, 337*(1–3), 175–182. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.009

Guzmán-Mar, J. L., et al. (2023). Heavy metals and metalloids accumulation in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): A review. *Chemosphere, 335*, 139010. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139010

Hu, B., Jia, X., Hu, J., Xu, D., Xia, F., & Li, Y. (2017). Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 14*(9), 1042. https://doi.org/10.3390/ijerph14091042

Kowalska, J. B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. *Environmental Geochemistry and Health, 40*(6), 2395–2420. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z

Kumar, V., Pandita, S., Singh Sidhu, G. P., Sharma, A., Khanna, K., Kaur, P., Bali, A. S., & Setia, R. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere, 262*, 127810. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810

Mingorance, M. D. (2002). *Focused microwave-assisted digestion of vegetal materials for the determination of essential mineral nutrients.* Analytical and Bioanalytical Chemistry, 373, 153–158. https://doi.org/10.1007/s00216-002-1298-7.

Shabbir, Z., Sardar, A., Shabbir, A., Abbas, G., Shamshad, S., Khalid, S., Natasha, Murtaza, G., Dumat, C., & Shahid, M. (2020). Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere, 259*, 127436. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436

Sharafi, K., Omer, A. K., Mansouri, B., Massahi, T., Soleimani, H., Moradi, M., Parnoon, K., & Ebrahimzadeh, G. (2024). Transfer of heavy metals from soil to vegetables: A comparative assessment of different irrigation water sources. *Heliyon, 10*(11), e32575. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32575

Turner, M.D. and Brooks, P.D. (1992). Evaluation of the use of H2SO4-H2O2 digestions for the elemental analysis of plant tissue by ICP spectrometry. *Communications in soil science and plant analysis*, *23*(5-6), pp.559-567. https://doi.org/10.1080/00103629209368609.

Vandenhove, H., Van Hees, M., Olyslaegers, G., & Vidal, M. (2009). Proposal for new best estimates for the soil solid–liquid distribution coefficient and soil-to-plant transfer of nickel. *Journal of Environmental Radioactivity, 100*(4), 342–347. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.12.002

Wysokiński, A., Kuziemska, B., & Łozak, I. (2023). Heavy Metal Allocation to Pea Plant Organs (*Pisum sativum* L.) from Soil during Different Development Stages and Years. *Agronomy, 13*(3), 673. https://doi.org/10.3390/agronomy13030673

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]

Assessment of Nickel and Copper Contamination and Soil–Plant Transfer in Agricultural Lands of Watersheds in Ilam Province, Iran

Khalil Amozadeh[1]
Sina Attar Roshan[1*]
Sima Sabzalipour[1]
Maryam Mohammadi Rouzbahani[1]
Seyed Keyvan Marashi[2]

1.Department of Environment, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
2.Department of Agronomy, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

[*]**Corresponding author:**
s.attarroshan@iau.ir

Received date: **August/28/2026**
Reception date: **November/16/2026**

Abstract

Potentially toxic elements are persistent environmental contaminants that can accumulate in soil and enter food pathways through soil–plant transfer. This study was conducted in 2020 to assess the contamination status of nickel (Ni) and copper (Cu) in the soil–plant system of bean and chickpea fields in Ilam Province, Iran. A total of 60 soil and corresponding plant-tissue samples were evaluated for each species, and elemental concentrations were determined using inductively coupled plasma–optical emission spectrometry (ICP-OES). The Soil Pollution Index (SPI), Crop Pollution Index (CPI), Transfer Factor (TF), and Pearson correlations between soil and plant concentrations were calculated. Ni SPI values were 1.884 and 1.265 for bean and chickpea, respectively, while Cu SPI values were 2.356 and 2.204. Ni CPI values were 1.300 and 1.077, whereas Cu CPI values were 0.675 and 0.588 for bean and chickpea, respectively. TF values for Ni were 0.00040 and 0.00054 and for Cu were 0.1033 and 0.1391 in bean and chickpea, respectively. Strong positive correlations were observed between soil and plant concentrations for both elements. The results indicate that soil contamination intensity, elemental accumulation in plant tissues, and soil–plant transfer do not necessarily follow the same pattern. Integrated monitoring of soil and vegetation, together with assessment of element bioavailability, is recommended for a more accurate evaluation of environmental contamination in the study area.

Keywords: Potentially toxic elements; nickel; copper; soil pollution index; crop pollution index; transfer factor; Ilam.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-17]