بررسی شرایط ژئوشیمیایی برخی فلزات سنگین و تغییرات عمقی آن‌ها در خاک‌های شالیزار منطقه طارم استان زنجان

علی افشاری[۱]، پریسا علمداری[۱*]، احمد گلچین[۱]، محمدصادق عسکری[۱]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

*مسئول مکاتبه، پست الکترونیکی، p_alamdari@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۹

DOI: 10.30470/jsp.2026.735617

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک، غلظت کل، قابل‌استخراج با DTPA و جزءبندی شیمیایی برخی فلزات‌سنگین و تغییرات عمقی آن‌ها در خاک‌های شالیزاری منطقه طارم استان زنجان به‌انجام رسید. بالاترین غلظت کل و قابل استخراج با DTPA فلزات سنگین سرب، روی، مس و کادمیم در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری مشاهد گردید که با افزاش عمق از غلظت این عناصر کاسته شد. این روند برای فلزات نیکل، کروم، کبالت، منگنز و آهن برعکس بوده و کمترین غلظت مربوط به لایه سطحی بوده که با افزایش عمق بر غلظت این عناصر افزوده شد. همچنین غلظت ماده‌آلی، CEC، رس و سیلت در لایه سطحی نسبت به عمق‌های پایین‌تر دارای فراوانی بیشتری نسبت به عمق بود. سایر ویژگی‌ها روند معکوس داشته و یا از روند خاصی تبعیت نکردند. عصاره‌گیری متوالی در عناصر بیشترین سهم را مربوط به جزء باقیمانده (یا متصل به سیلیکات‌ها) نشان داد و بعد از آن در روی و نیکل جزء کاهش‌پذیر (یا متصل به اکسیدهای آهن و منگنز) و در سرب جزء تبادل‌پذیر (یا محلول در اسید یا متصل به کربنات‌ها) و در مس جزء اکسایش‌پذیر (یا متصل به ماده‌آلی و سولفیدها) به خود اختصاص دادند. در کل با توجه به نتایج، به‌نظر می‌آید منشأ فلزات سنگین مورد پژوهش، بیشتر منشأ طبیعی دارد. هر چند در بعضی از فلزات سنگین مانند روی، سرب و کادمیم می‌توان فعالیت‌های انسانی را هم در افزایش غلظت آن‌ها بی‌تأثیر ندانست.

واژه‌های کلیدی: جزءبندی شیمیایی، لایه شخم، مواد مادری، همبستگی شیمیایی

Investigating the geochemical conditions of some heavy metals and their depth changes in the paddy soils of Tarom region, Zanjan province

A. Afshari[1], P. alamdari[1*], A. Gholchin[1], M.S. Askari[1]

1.Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
*Corresponding Author, Email: p_alamdari@znu.ac.ir
Received: August 2025 Accepted: March 2026
DOI: 10.30470/jsp.2026.735617

Abstract

The purpose of this study is to examine the physicochemical characteristics, total concentration, DTPA extractable, chemical classification, and depth variations of some heavy metals in the paddy soils of the Tarom region of the province of Zanjan. Lead, zinc, copper, and cadmium heavy metal concentrations with DTPA were found to be maximum in total and extractable concentrations at a depth of 0–20 cm, and their concentrations declined as depth increased. For the metals nickel, chromium, cobalt, manganese, and iron, this pattern is reversed, with the lowest concentration being associated with the surface layer and a rising concentration of these elements with depth. Moreover, the upper layer had higher concentrations of organic matter, CEC, clay, and silt than did the lower depths. Some features followed no particular trend, while others had a distinct trend. The elements that were extracted sequentially revealed that the largest contribution was related to the residual component (or associated with silicates), followed by the reducible component (or associated with iron and manganese oxides) in zinc and nickel and the exchangeable component (either soluble in acid or bound to carbonates) in lead. Furthermore, they were allocated the oxidizable component in copper (or the component connected to organic materials and sulfides). Based on the findings, it appears that the majority of the heavy metals under investigation have a natural origin. However, it cannot be argued that human activity has no effect on the increase in abundance of certain heavy metals, like as zinc, lead, and cadmium.

Keywords: chemical correlation, fractionation, parent material, plow layer

مقدمه

فلزات سنگین پایدارترین و پیچیده‌ترین آلاینده‌ها از نظر پایش در طبیعت هستند و دارای ویژگی‌هایی نظیر منابع آلایندگی فراوان، تجمع‌پذیری زیستی در جانداران و ثبات شیمیایی بالا نسبت به تغییرات و ماهیت غیرقابل تجزیه متابولیکی، سمیت بالا، عدم تأثیر اکسیداسیون میکروبی یا شیمیایی روی آن‌ها، عدم انحلال زیاد در آب و اثرات سوء فیزیولوژیکی بر روی جانداران می‌باشد، که مجموع این عوامل سبب آلودگی‌های وسیع در خاک‌ها می‌شوند. این واقعیت، فلزات سنگین را به یکی از خطرناکترین گروه آلاینده‌های زیست‌محیطی تبدیل کرده است (Shahbazi et al., 2022 and Nozari et al., 2022).

فلزات سنگین می‌توانند از طریق ورود به چرخه بین خاک و محصولات غذایی، سلامت خاک، گیاه و انسان را به خطر اندازند. این عناصر کیفیت اتمسفر، پیکره‌های آبی و محصولات غذایی را کاهش می‌دهند، در نتیجه منجر به ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی در سطح سلولی و مولکولی شده و همچنین باعث غیرفعال کردن آنزیم‌ها و یا مسدود و محدود کردن فعالیت گروه‌های مولوکولی سوخت‌وساز در بدن می‌شود.

فلزات سنگین با کاهش عملکرد و بهره‌وری خاک و ایجاد سمیت برای گیاهان در غلظت‌های بالا، مانع رشد ریشه می‌شوند، که این عمل می‌تواند بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله جذب مواد مغذی را ممانعت کند و باعث انتقال فلزات سنگین به رژیم غذایی انسان از طریق تجمع در محصول و یا مصرف دامی همان محصولات که در چراگاه‌های آلوده پرورش یافته است را به دنبال داشته باشد (Solgi et al., 2020).

این پژوهش با هدف بررسی غلظت کل، قابل استخراج با DTPA، جزءبندی شیمیایی فلزات سنگین (سرب، روی، مس، کادمیم، نیکل، کروم، کبالت، منگنز و آهن) و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک شالیزار در عمق‌های مختلف به انجام رسید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در شهرستان طارم از توابع استان زنجان و با کاربری شالیزار انتخاب گردید. انتخاب این منطقه به‌خاطر شرایط طبیعی و بکر آن و دور بودن فعالیت‌های صنعتی گسترده می‌باشد. همچنین در منطقه مورد نظر مطالعات مشابهی انجام نشده بود. از هر قطعه شالیزاری متناسب با وسعت آن، خاکرخ‌های عمقی (به‌طور متوسط سه خاکرخ) حفر گردید و از سه عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر، ۲۰-۴۰ سانتی‌متر و ۴۰-۶۰ سانتی‌متر به تعداد سه نمونه مرکب برداشت گردید. نمونه‌ها بعد از خشک شدن با هم مخلوط شده و از هر عمق یک نمونه برای تهیه و آنالیزهای آزمایشگاهی انتخاب شد و به آزمایشگاه انتقال داده شد.

در نمونه‌ها، هدایت‌الکتریکی در نسبت ۱ به ۲ خاک به آب (EC) (بر حسب dS/m) و pH در نمونه‌های خاک در در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) عصاره ۱ به ۲ خاک به آب، درصد رس، سیلت و شن (روش پیپت)، کربن آلی (والکی-بلاک)، آهک (تیتراسیون معکوس)، ظرفیت تبادل کاتیونی (عصاره‌گیری با استات‌سدیم ۱ نرمال) اندازه‌گیری شد (Burt, 2004). غلظت کل فلزات سنگین به روش سلگی و سلگی (Solgi and Solgi, 2016) و برای استخراج فلزات با DTPA از روش لیندزی و نورول استفاده گردید (Lindsay and Norvell, 1978). عصاره‌گیری متوالی بر اساس روش استخراج ترتیبی (BCR)[1] روش پیشنهادی از سوی اتحادیه اروپا انجام گرفت (Rauret et al., 1999). غلظت فلزات سنگین (Fe، Mn، Co، Cr، Ni، Cd، Cu، Zn، Pb) توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin-Elmer: AAnalyst 200 در عصاره‌های نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

نتایج

[1] Bureau Communautaire de Reference

جدول ۱ میانگین مقادیر تغییرات عمقی (در برش‌های ۲۰-۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متر) خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک با کاربری شالیزار را در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، مقادیر ماده آلی از ۱/۴۵ در لایه سطحی تا ۱/۰۳ درصد در لایه سوم (عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک) متغیر بود. مقادیر اسیدیته در عمق سطحی ۲۰-۰ سانتی‌متر ۷/۳۹ و در عمق ۴۰-۲۰ سانتی‌متر ۷/۴۲ و در عمق ۶۰-۴۰ سانتی‌متر ۷/۵۸ بدست آمد که نشان داد در لایه سطحی اسیدیته مقادیر کمتری را به خود اختصاص داده بود و با افزایش عمق خاک قلیایی‌تر شده است. مقادیر EC همانند اسیدیته از سطح به عمق روند افزایشی داشته که این افزایش بسیار جزئی و محدود بود. کربنات کلسیم در لایه سطحی ۱۸/۵ و در لایه دوم ۱۹/۶ و در لایه سوم ۲۲/۸ درصد بدست آمد. درصد رس با افزایش عمق روند کاهشی داشته و در لایه سطحی مقدار آن ۲۸/۵ درصد به دست آمده است. این روند در سیلت هم مشابه بود و بالاترین درصد سیلت در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری بدست آمد. درصد شن در لایه سطحی کمترین مقدار بوده و با افزایش عمق روند آن افزایشی بود.

جدول ۱- میانگین خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک شالیزار

عمق (cm)	SOM (%)	pH	EC (dS/m)	$CaCO_3$ (%)	CEC (Cmol(+)/kg)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
۰-۲۰	۱/۴۵	۷/۳۹	۰/۴	۱۸/۵	۲۸/۳	۲۸/۵	۴۷/۸	۲۳/۷
۲۰-۴۰	۱/۳۸	۷/۴۲	۰/۴۱	۱۹/۶	۲۶/۶	۲۷/۵	۴۶/۶	۲۵/۹
۴۰-۶۰	۱/۰۳	۷/۵۸	۰/۴۲	۲۲/۸	۲۱/۵	۲۴/۳	۴۴/۲	۳۱/۵

جدول ۲ میانگین غلظت کل برخی فلزات سنگین و تغییرات عمقی هر یک از آن‌ها را در خاک شالیزار منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد. غلظت سرب کل در لایه سطحی ۱۲/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در عمق‌های بعدی به‌ترتیب ۱۲/۱۰ و ۹/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. غلظت روی در لایه سطحی ۸۱/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در لایه‌های بعدی به‌ترتیب ۸۰/۷۴ و ۷۵/۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مس در لایه‌های اول تا سوم به‌ترتیب ۲۲/۷۳، ۱۹/۸۹ و ۱۸/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کادمیم به‌ترتیب ۱/۰۲، ۱/۰۱، ۰/۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم، نیکل به‌ترتیب ۳۵/۴۴، ۳۴/۷۶ و ۳۶/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کروم به‌ترتیب ۳۵/۴۹، ۳۳/۵۸ و ۳۴/۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کبالت به‌ترتیب ۱۸/۴۶، ۱۹/۳۶ و ۲۰/۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم؛ منگنز به‌ترتیب ۶۴۰/۲۵، ۶۴۰/۶۹ و ۶۴۱/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و آهن به‌ترتیب ۲۶۴۱۲، ۲۶۴۱۹ و ۲۶۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است.

جدول ۲- غلظت کل فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم) در خاک شالیزار و تغییرات عمقی آن‌ها

عمق (cm)	سرب	روی	مس	کادمیم	نیکل	کروم	کبالت	منگنز	آهن
۰-۲۰	۱۲/۶۸	۸۱/۲۷	۲۲/۷۳	۱/۰۲	۳۵/۴۴	۳۲/۴۹	۱۸/۴۶	۶۴۰/۲۵	۲۶۴۱۲
۲۰-۴۰	۱۲/۱۰	۸۰/۷۴	۱۹/۸۹	۱/۰۱	۳۴/۷۶	۳۳/۵۸	۱۹/۳۶	۶۴۰/۶۹	۲۶۴۱۹
۴۰-۶۰	۹/۴۳	۷۵/۴۹	۱۸/۶۷	۰/۸۸	۳۶/۸۹	۳۴/۷۳	۲۰/۴۹	۶۴۱/۸۹	۲۶۴۰۰

بر اساس جدول ۳ میانگین مقادیر قابل استخراج با DTPA فلزات سنگین به‌ترتیب در عمق‌های ۲۰-۰ تا ۶۰-۴۰ سانتی‌متر برای سرب ۰/۷۵، ۰/۶۸ و ۰/۳۵، روی ۴/۱۰، ۴/۰۶ و ۲/۲۴، مس ۰/۹۸، ۰/۸۷ و ۰/۴۵، نیکل ۱/۱۲، ۱/۰۸ و ۰/۶۸، کروم ۰/۹۸، ۰/۶۵ و ۰/۳۲ و کبالت ۰/۵۸، ۰/۴۱ و ۰/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد.

جدول ۳- میانگین غلظت عناصر قابل استخراج با DTPA در خاک شالیزار

عمق (cm)	Pb (DTPA)	Zn (DTPA)	Cu (DTPA)	Ni (DTPA)	Cr (DTPA)	Co (DTPA)
۲۰-۰	۰/۷۵	٤/۱۰	۰/۹۸	۱/۱۲	۰/۹۸	۰/۵۸
٤۰-۲۰	۰/٦۸	٤/۰٦	۰/۸۷	۱/۰۸	۰/٦۵	۰/٤۱
٦۰-٤۰	۰/۳۵	۲/۲٤	۰/٤۵	۰/٦۸	۰/۳۲	۰/۲۳

جدول ٤ میانگین غلظت هر یک از فلزات سنگین مورد مطالعه (روی، سرب، مس و نیکل) در جزءهای شیمیایی مختلف (با استفاده از عصاره‌گیری متوالی) را در خاک شالیزار و در عمق‌های مختلف نشان داد. بر اساس نتایج بیشترین غلظت روی در جزء باقیمانده یا متصل به سیلیکات‌ها مشاهده شد و کمترین آن در جزء اکسایش‌پذیر یا متصل به ماده آلی و سولفیدها است که این روند در عمق‌های مختلف نیز نتایج مشابهی را داشت. بیشترین غلظت سرب در جزء متصل به سیلیکات‌ها بوده و کمترین آن در عمق ۲۰-۰ و ٤۰-۲۰ سانتی‌متر مربوط به جزء کاهش‌پذیر یا متصل به اکسیدهای آهن و منگنز بوده و در عمق ٦۰-٤۰ سانتی‌متر کمترین غلظت مربوط به جزء اکسایش‌پذیر یا متصل به ماده‌آلی و سولفیدها است. بیشترین غلظت مس در جزء باقیمانده یا متصل به سیلیکات‌ها و کمترین آن در عمق‌های ٤۰-۲۰ و ۲۰-۰ سانتی‌متر در جزء کاهش‌پذیر یا متصل به اکسیدهای آهن و منگنز مشاهده شد و در عمق ٦۰-٤۰ سانتی‌متر کمترین غلظت در جزء تبادل‌پذیر یا محلول در اسید و متصل به کربنات‌ها همراه با جزء کاهش‌پذیر یا متصل به اکسیدهای آهن و منگنز مشاهده گردید. همانند عناصر دیگر، بیشترین غلظت نیکل در جزء باقیمانده یا متصل به سیلیکات‌ها مشاهده گردید و کمترین غلظت در هر سه عمق مربوط به جزء اکسایش‌پذیر یا متصل به ماده‌آلی و سولفیدها بود.

جدول ۴- میانگین توزیع غلظت عناصر سنگین مورد مطالعه در اجزاء شیمیایی مختلف (جزءبندی شیمیایی) به صورت عمقی در خاک شالیزار

عمق (cm)	F1	F2	F3	F4		
۲۰-۰	۷/۳٤ (٪۹)	۱۱/٦۳ (٪۱٤/۳)	٤/۹۲ (٪٦)	۵۷/۳۸ (٪۷۱)	F4>F2>F1>F3	zn
۲۰-٤۰	٤/۰٦ (٪۸)	٦/٤۹ (٪۱۳)	۱۰/۵۱ (٪۵)	٤/۱۰ (٪۷٤)	F4>F2>F1>F3	
٤۰-٦۰	۲/۲٤ (٪٤)	۳/۰۸ (٪۱۳/۲)	۹/۹۹ (٪۳)	۲/۲۹ (٪۸۰)	F4>F2>F1>F3	
۲۰-۰	۳/۰٦ (۲٤٪)	۰/۸۸ (٪۷)	۲/۳۰ (٪۱۸)	٦/٤۳ (٪۵۱)	F4>F1>F3>F2	Pb
۲۰-٤۰	۲/٦۳ (٪۲۲)	۱/۰۱ (٪۸)	۱/۹۳ (٪۱٦)	٦/۵۳ (٪۵٤)	F4>F1>F3>F2	
٤۰-٦۰	۱/۷۱ (٪۱۸)	۱/۳۲ (٪۱٤)	۰/۹۹ (٪۱۰)	۵/٤۱ (٪۵۷)	F4>F1>F2>F3	
۲۰-۰	۲/۰٤ (٪۹)	۱/۲۷ (٪۵/٦)	۳/۹۹ (٪۱۸)	۱۵/٤۳ (٪٦۸)	F4>F3>F1>F2	Cu
۲۰-٤۰	۱/٤۸ (٪۷)	۱/۲۲ (٪٦/۱)	۳/۲۹ (٪۱۷)	۱۳/۸۹ (٪۷۰)	F4>F3>F1>F2	
٤۰-٦۰	۱/۱۸ (٪٦)	۱/۱۰ (٪۵/۹)	۲/۷۲ (٪۱۵)	۱۳/٦۷ (٪۷۳)	F4>F3>F2=F1	
۲۰-۰	۳/۹۹ (۱۱٪)	۵/۰٦ (٪۱٤)	۳/۵۰ (٪۱۰)	۲۲/۸۹ (٪٦۵)	F4>F2>F1>F3	Cu
۲۰-٤۰	۳/٤۳ (٪۱۰)	٦/۰٦ (٪۱۷)	۲/۵۹ (٪۷)	۲۲/٦۸ (٪٦۵)	F4>F2>F1>F3	
٤۰-٦۰	۲/٤۳ (٪۷)	۷/۷٤ (٪۲۱)	۱/٦۸ (٪۵)	۲۵/۰۳ (٪٦۸)	F4>F2>F1>F3	

نکته ۱: F1 (بخش تبادل‌پذیر، محلول در اسید، متصل به کربنات‌ها)، F2 (بخش کاهش‌پذیر، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز)، F3 (بخش اکسایش‌پذیر، متصل به ماده‌آلی و سولفیدها) و F4 (بخش باقیمانده، متصل به سیلیکات‌ها)، نکته ۲: اعداد داخل سلول‌های جدول نمایانگر غلظت هر بخش و اعداد داخل پرانتز نمایانگر درصد همان بخش از مقدار کل فلز سنگین مورد نظر می‌باشند.

بحث

عدم یکنواختی ویژگی‌های خاک در یک منطقه، تحت تأثیر خصوصیات ذاتی (مانند مواد مادری و عوامل خاکسازی) و عوامل غیرذاتی یا بیرونی (مانند اقدامات مدیریتی خاک و مزرعه، کوددهی و نوع محصولات کشاورزی) می‌باشند (Nabavi et al., 2020). تغییرات ماده‌آلی

می‌تواند در اثر عوامل ذاتی (مانند نوع مواد مادری، بافت خاک، آب و هوا، اسیدیته خاک و توپوگرافی) و مدیریتی (مانند غرقاب نمودن خاک، وضعیت زهکشی اراضی، مقدار مصرف کود، عمق و تعداد دفعات شخم و سوزاندن بقایای گیاه برنج) باشد. در پژوهش حاضر بالاترین غلظت ماده آلی در لایه سطحی (۱/٤٥) مشاهده گردید که با افزایش عمق روند آن کاهشی بود. در مطالعه شاکری و همکاران (Shakeri et al., 2020) با مقایسه گروهی دو خاک شالیزاری استان فارس، نشان داده شد که اختلاف معنی‌داری بین مقدار کربن آلی خاک‌های سطحی و زیرسطحی شالیزار و غیرشالیزار وجود دارد که این اختلاف در خاک‌های شالیزار نسبت به خاک‌های غیرشالیزار بیشتر بود (Shakeri et al., 2020). در خاک‌های شالیزار بازگشت مواد آلی خاک، پویایی عناصر غذایی، نگهداشت کربن و حاصلخیزی خاک متأثر از تغییرات متناوب در شرایط رطوبتی این خاک‌ها است (Shakeri et al., 2020).

لایه سطحی نسبت به عمق‌های زیرین دارای وضعیت یا شرایط پ‌هاش نسبتاً اسیدی بوده که با افزایش عمق روند آن افزایشی بود. ریزجانداران خاک به‌عنوان کلوئیدهای آلی فعال خاک، ترکیبات آلی متنوعی، مانند اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم، کربوهیدرات‌ها و آنزیم‌ها را ترشح می‌کنند. این امر موجب می‌شود تا اسیدیته ریزوسفر نسبت به توده خاک یک تا دو واحد متفاوت باشد (Abbaszadeh-Dahaji et al., 2020). میانگین اسیدیته خاک شالیزار در لایه سطحی و عمقی نسبت به خاک‌های غیرشالیزار کمتر گزارش شده است (Shakeri et al., 2020). ظرفیت تبادل کاتیونی ارتباط مستقیمی با درصد رس دارد. بیشترین درصد رس در عمق سطحی مشاهده شد. همچنین بالاترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی در لایه سطحی می‌باشد. در مطالعه شاکری و همکاران (Shakeri et al., 2020) در خاک‌های سطحی شالیزاری نسبت به خاک‌های سطحی غیرشالیزاری میانگین درصد رس بیشتر گزارش شده است، که البته این اختلاف معنی‌دار نبوده است. در حالی که در خاک‌های زیرسطحی شالیزاری مقدار رس نسبت به خاک‌های زیرسطحی غیرشالیزاری دارای اختلاف معنی‌دار بوده است (Shakeri et al., 2020). همچنین در مطالعه شاکری و همکاران (Shakeri et al., 2020) میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی در عمق سطحی خاک‌های شالیزار نسبت به همان عمق در خاک‌های غیرشالیزار دارای اختلاف معنی‌دار گزارش شده است. این محققین مقدار بیشتر CEC در این خاک‌ها را به وجود ماده آلی بالاتر نسبت دادند. وجود رس از نوع ۱:۲ اسمکتایت و مونتموریلونایت در خاک‌های شالیزار باعث ایجاد بافت سنگین، چسبندگی، خاصیت انبساط و انقباض و جذب رطوبت بالا در این نوع خاک‌ها می‌شود (Shakeri et al., 2020). اولیایی و نجفی قیری Owliaie and Najafi Ghiri, 2013) در مطالعه خاک‌های شالیزاری یاسوج بیان نمودند که کشت طولانی مدت برنج موجب افزایش رس، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی شده است.

غلظت فلزات سنگین در لایه سطحی خاک بیشتر متأثر از مواد مادری، انتقال املاح و رسوبات از سطح خاک به اعماق پایین‌تر، مدیریت مزارع توسط کشاورز می‌باشد. این در حالی است که در لایه‌های زیرسطحی غلظت فلزات سنگین بیشتر تحت تأثیر مواد مادری می‌باشد. فلزات سنگین در لایه سطحی مقادیر بیشتری دارند. غلظت کمتر فلزات سنگین در عمق‌های پایین‌تر خاک، به‌علت پویایی کم این فلزات و در نتیجه حرکت ضعیف آن‌ها به‌سمت لایه‌های پایینی خاک می‌باشد (Solgi et al., 2020). در بیشتر خاک‌ها منشأ اصلی عناصر سنگین در خاک مواد مادری است. مواد مادری بسته به شرایط تشکیل و جنس، دارای مقادیر متفاوتی از عناصر سنگین هستند. فرآیندهای خاکسازی هم می‌توانند در جریان تشکیل خاک، باعث تهی‌شدن یا غنی‌شدن افق‌ها نسبت به برخی از عناصر شوند. در مطالعه‌ای بیشترین غلظت عناصر نیکل، کروم، روی و مس مربوط به سطح خاک گزارش شده است که با افزایش عمق روند آن‌ها کاهشی بود، البته

روند نزولی غلظت این عناصر یکسان نبوده و مدل‌های متفاوتی را نشان دادند، که این محققین با مقایسه توزیع اندازه ذرات و غلظت عناصر، تغییرات این عناصر را در اعماق مختلف خاکرخ‌ها، متأثر از تغییرات توزیع اندازه ذرات در خاکرخ‌ها نسبت دادند (Qasemzadeh et al., 2021).

رستمی‌نیا و همکاران (Rostaminia et al., 2020) در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان ایلام، در تمامی خاکرخ‌ها مقادیر سرب از سطح خاک به عمق را روند کاهشی گزارش کردند. البته این حالت در خاکرخ‌هایی که در نزدیکی جاده اصلی و محدوده کارخانه و در مسیر گرد و غبار خروجی قرار داشتند، بیشتر بود. در مطالعه نوذری و همکاران (Nozari et al., 2022) مربوط به نمونه‌های خاک شالیزار در استان مازندران، میزان کروم در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین ۳۵/۰۱ تا ۵۳/۷۷، مس بین ۱۶/۱۲ تا ۳۷/۹۶، روی بین ۳۹/۵۱ تا ۱۱۸/۰۵، نیکل بین ۳۲/۶۲ تا ۵۳/۷۶، آرسنیک بین ۵/۲۲ تا ۱۱/۹۲، کادمیم بین ۰/۰۷ تا ۰/۲۵، جیوه بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ و سرب بین ۹/۹۹۹ تا ۲۶/۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. در خاک‌های کشاورزی ایران میانگین وزنی غلظت کادمیم ۰/۳۷ (دامنه غیرقابل تشخیص تا ۳۶۵)، کبالت ۱۹/۹ (دامنه ۲/۴ تا ۵۱۹)، کروم ۸۸/۶ (دامنه ۰/۰۴ تا ۲۰۴۰)، مس ۲۸/۱ (دامنه صفر تا ۳۵۲/۵)، نیکل ۶۷/۷ (دامنه غیرقابل تشخیص تا ۲۱۲۵)، سرب ۳۲/۳ (دامنه غیرقابل تشخیص تا ۹۵۰۰) و روی ۸۴/۵ (دامنه ۰/۲ تا ۵۴۵۰۰) میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Shahbazi et al., 2022). مطالعه‌ای که سلگی و همکاران (Solgi et al., 2020) در اراضی کشاورزی جنوب شهر بروجرد در دو حالت خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۲۰-۴۰ سانتی‌متر) با هدف بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک‌هایی که با فاضلاب تصفیه نشده شهری آبیاری شده و خاک‌هایی که با آب چاه آبیاری شده بودند، انجام دادند. در خاک‌هایی که با فاضلاب شهری آبیاری شده بودند غلظت فلزات سرب و مس خاک زیرسطحی بیشتر از خاک سطحی و کادمیم و روی در خاک سطحی بیشتر از خاک زیرسطحی گزارش کردند. در حالی که در خاک‌هایی که با آب چاه آبیاری شده بودند غلظت سرب و مس در خاک سطحی نسبت به خاک زیرسطحی بیشتر بود. این محققان بافت سبک خاک را عامل انتقال فلزات به خاک زیرسطحی اعلام نمودند.

به‌رغم عدم اطمینان از اختصاصی بودن عصاره‌گیرها، روش عصاره‌گیری دنباله‌ای[1] اطلاعات مفیدی را در زمینه شکل‌های مختلف یک فلز و به‌طور غیرمستقیم زیست‌فراهمی آن ارائه می‌دهد. عصاره‌گیری متوالی، کمک می‌کند که توزیع فلزات سنگین در بخش‌ها، ارزیابی پویایی و سمیت فلزات در خاک آشکار شود (Sefidgar Shahkolaie et al., 2019) و این روش پیش‌بینی حرکت فلز از خاک به گیاه را بهتر از مقادیر غلظت کل ارزیابی می‌کند (Rezaei et al., 2021). با کمک تفکیک شیمیایی متوالی می‌توان منشأ عناصر را از نظر زمینی یا انسانی تعیین نمود (Behravesh et al., 2017). فلزات سنگین در اجزاء مختلف خاک با نسبت‌های متفاوتی پیوند خورده و جزء باقیمانده خاک نقش مهمی را در نگهداشت آن‌ها در خاک بازی می‌کند. جزء باقیمانده خاک، در واقع جزء ساختار کانی اولیه آن بوده و ضرورتی برای حذف آن‌ها در زمان پالایش خاک‌های آلوده وجود ندارد (Gitipour et al., 2021). فراهمی فلزات سنگین می‌تواند تحت تأثیر تغییرات اسیدیته، مقدار ماده آلی و شرایط ریداکس خاک قرار گیرد. کربنات‌ها نیز با اثر مستقیم (از طریق برهمکنش سطحی) و غیرمستقیم (از طریق اثر پهاش آن‌ها بر سایر ترکیبات خاک)، بر انحلال فلزات اثر می‌گذارند (Sefidgar Shahkolaie et al, 2019). کربنات می‌تواند باعث رسوب فلزات سنگین شده و آن را وارد ساختمان خود نماید. بیشترین تمایل برای واکنش با کربنات در مورد کبالت، کادمیم، مس، آهن، منگنز، نیکل، سرب، استرانسیم،

[1] Sequential extraction

اورانیم و روی گزارش شده است و این عناصر می‌توانند جایگزین کلسیم در کلسیت شوند. بنابراین ممکن است در آزمایش خاک مقدار کل فلز سنگین بیشتر باشد ولی این مقدار در دسترس گیاه نبوده و گیاه قادر به جذب آن نباشد (Rezaei et al., 2021).

فلزات موجود در بخش اکسیداسیون آلی در واقع عناصری هستند که با مواد آلی پیوند داشته و فرآیند تجزیه هوازی و بی‌هوازی می‌تواند با گذشت زمان سبب رها شدن این فلزات به آب یا سایر بخش‌های رسوب گردد (Behravesh et al., 2017). شکل آلی هر عنصر، شامل یون‌های جذب سطحی شده، کلاته شده یا کمپلکس شده با مواد آلی است، که همبستگی مثبت این شکل با کربن‌آلی را توجیه می‌کند. در پژوهش گیتی‌پور و همکاران (Gitipour et al., 2021) گزارش دادند که توالی توزیع فلزات سنگین روی و مس یکسان بوده و جزء باقیمانده > پیوند یافته با موادآلی > پیوند یافته با اکسیدهای آهن و منگنز > پیوند یافته با کربنات > تبادلی بود، ولی در مورد فلز سنگین نیکل جزء تبادلی بیشتر از جزء پیوند یافته با کربنات بود. توالی فلز سنگین سرب در جزء باقیمانده بیشتر از جزء پیوند یافته با اکسیدهای آهن و منگنز و بیشتر از جزء پیوند یافته با موادآلی و بیشتر از جزء پیوند یافته با کربنات بیشتر از جزء تبادلی، بود. در رسوبات تالاب انزلی رود تغییرات اجزاء شیمیایی فلزات سنگین مورد مطالعه به صورت مقاوم > اکسیداسیون آلی > سولفیدی > سست گزارش شده که بیشترین غلظت مربوط به بخش مقاوم و کمترین آن در جزء قابل تبادل مشاهده گردیده است (Behravesh et al., 2017).

توزیع روی در فازهای مختلف خاک به دنبال غرقاب شدن تغییر می‌کند که این امر فراهمی روی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. غلظت روی در خاک‌های غرقاب تا حد زیادی تحت تأثیر تغییر در فرم‌های مختلف آهن است. در شرایط غرقاب فرم‌هایی که قابلیت دسترسی بیشتری برای گیاهان دارند کاهش می‌یابد. توزیع روی در بین این فرم‌ها از طریق ثابت‌های تعادل واکنش‌هایی که روی در آن‌ها دخیل است مانند رسوب و انحلال، کمپلکس و دکمپلکس شدن و جذب و واجذب کنترل می‌شود (Fatehi Falahati et al., 2021). یو و همکاران (Iu et al., 1981) مشاهده کردند که در اثر غرقاب شدن، روی از فرم‌های محلول، تبادلی و آلی به فرم‌های جذب سطحی شده و اکسیدی تغییر می‌یابد. این توزیع مجدد باعث می‌شود که روی به فرم‌های با قابلیت استفاده نسبتاً کم در شالیزارها تبدیل شود. پراساد و همکاران (Prasad et al., 1995) تغییر فرم‌های مختلف روی را در خاک‌های شالیزاری بررسی و گزارش کردند که مقدار فرم‌های محلول، تبادلی، آلی و روی متصل به سزکوئی اکسیدهای بلوری بر اثر غرقاب شدن، کاهش و در مقابل مقدار فرم متصل به سزکوئی اکسیدهای بی‌شکل افزایش می‌یابد.

روی محلول و تبادلی، دسترسی کامل برای گیاه دارند اما روی جذب شده در کانی‌های اولیه و ثانویه نسبتاً غیر قابل دسترس برای گیاه است. در مطالعه فاتحی‌فلاحتی و همکاران (Fatehi Falahati et al., 2021) گزارش گردید در هر دو خاک اسیدی و قلیایی پس از غرقاب، مقدار روی قابل دسترس کاهش یافت. شرایط غرقاب منجر به کاهش معنی‌دار فرم محلول و تبادلی و فرم آلی روی شد. در حالی که در پایان دوره غرقاب، فرم کربناتی روی در خاک قلیایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در هر دو خاک اسیدی و قلیایی تغییرات چندانی در فرم روی متصل به اکسید منگنز مشاهده نشد. در حالی که مقدار روی متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل و بلوری افزایش یافته و مقدار روی باقیمانده کاهش معنی‌دار داشت (Fatehi Falahati et al., 2021). دوتا و همکاران (Dutta et al., 1989) گزارش کردند که پس از غرقاب نمودن خاک‌های اسیدی و ایجاد شرایط احیایی، مس و روی قابل استخراج با DTPA در ۲۶ نمونه خاک شالیزاری مورد مطالعه آن‌ها کاهش یافت که دلیل آن را افزایش پ‌هاش بیان نمودند. ارزیابی دقیق منشأ آلودگی

فلزات در یک منطقه بیشتر با شاخص‌های آلودگی انجام می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده، به‌نظر می‌آید منشأ فلزات سنگین مورد مطالعه، بیشتر منشأ طبیعی دارد. هر چند در بعضی از فلزات سنگین از قبیل روی، سرب و کادمیم می‌توان فعالیت‌های انسانی را هم در افزایش غلظت آن‌ها بی‌تأثیر ندانست.

REFERENCES

Abbaszadeh-Dahaji, P., Karimi, Z., Hamidpour, M., & Akhgar, A. (2020). Effect of Plant Growth Promoting Pseudomonas on Copper Phytoremediation by some Indigenous and Crop Plants. *Applied Soil Research, 9* (1), 41-56. (In Persian)

Behravesh, S., Pourkhabbaz, A., & Ebrahimpour, M. (2017). Study of the Potential Pollution of Heavy Metals in Sediments of Anzali Wetland Based on Sequential Extraction Technique. *Journal of Environmental Science and Technology*, *23*(7), 146-162. (In Persian)

Burt, R. (Ed.). (2004). Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Investigations, Report No. 42, Version 4.0, USDA, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE, USA.

Dutta, D., Mandal, B. & Mandal, L.N. (1989). Decrease in availability of zinc and copper in acidic to near neutral soils on submergence. *Soil Science*, *147*(3), 187-195.

Fatehi Falahati, H., Khalilirad, M., Forghani, A., & Fazeli Sangani, M. (2021). The Effect of Waterlogging on Distribution of Different Forms of Zinc in Acidic and Alkaline Soils. *Iranian Journal of Soil and Water Reserch*, *52*(6), 1500-1490. (In Persian)

Gitipour, S., AkbarPour, F., Baghdadi, M., & Mehrdadi, N. (2021). Influence of the Organic Acids on the Heavy Metals Mobility and Distribution in the Contaminated Soils. *Applied Soil Research*, *9* (4), 62-73. (In Persian)

Iu, K. L., Pulford, I. D., & Duncan, H. J. (1981). Influence of waterlogging and lime or organic matter additions on the distribution of trace metals in an acid soil: I. Manganese and iron. *Plant and Soil*, *59*(2), 317-326.

Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, *42*(3), 421-428.

Nabavi, S. F., Yaghmaeian Mahadi, N., & Mohmoudsoltani, Sh. (2020). Assessment of Soil Fertility Using Fuzzy Membership Functions and AHP in Paddy Fields (Case Study: Research Fields Goldasht, Amol). *Iranian Journal of Soil and Water Reserch*, *52*(1), 109-122. (In Persian)

Nozari, M., Esmaili Sari, A., Mashinchian Moradi, A., Bahramifar, N., & Taghavi, L. (2022). Investigation of heavy metals in soil samples before rice planting and after rice harvesting in Mazandaran province; Study of ecological risk potential and integrated pollution indexes. *Journal of Natural Environment*, *75* (4), 702-715. (In Persian)

Owliaie, H. R., & Najafi Ghiri, M. N. (2013). Effect of long-term rice cultivation on physico-chemical properties and clay mineralogy of soils in Yasouj region. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, *17* (65), 39-49.

Prasad, R., Prasad, B. L. & Sakal, R. (1995). Effect of Submergence on the Transformation of Zinc Forms in Old Alluvial Soils Growing Rice as Related to Soil Properties. Transformation of Native Soil Zinc. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, *43*(3), 368-37.

Qasemzadeh, A., Karimi, A. R., Ziyaee, A., & Fotovat, A. (2021). Pollution assessment and source of selected heavy metals in agricultural soils, southern Sabzevar, northeastern Iran. *Journal of Soil Management and Sustainable*, *11*(1), 1-26.

Rauret, G., López-Sánchez, J. F., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ure, A., & Quevauviller, P. (1999). Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of environmental monitoring*, *1*(1), 57-61.

Rezaei, M., Bazargan, K., Shahbazi, K., & Jahandideh, M. A. (2021). Comparison of Three Methods for Extracting the Available Amounts of Heavy Metals Copper, Cadmium, Lead, and Nickel for Wheat in Salt-Affected Soils of Khuzestan Province. *Iranian Journal of Soil Research*, *35*(2), 189-206. (In Persian)

Rostaminia, M., Chabok, A., Shirvani, M., and Bazgir, M. (2020). Competitive sorption of Cu, Pb, Cd and Ni on soil clay minerals adjacent to the cement factory Ilam city. *Journal of Natural Environment*, *73*(3), 501-514. (In Persian)

Sefidgar Shahkolaie, S., Barani Motlagh, M., Dordiour, E., & Khormali, F. (2019). Effects of Organic and Inorganic Amendments on Fractionation of Cadmium during Incubation Time in a Contaminated Calcareous Soil. *Applied Soil Research*, *8*(3), 14-26. (In Persian)

Shahbazi, K., Fathi-Gerdelidani, A., & Marzi, M. (2022). Investigation of the status of heavy metals in soils of Iran: A comprehensive and critical review of reported studies. *Iranian Journal of Soil and Water Reserch*, *53*(5), 1163-1210. (In Persian)

Shakeri, S., Baghernejad, M., Gholami, A., & Azadi, A. (2020). Investigation of Changes in Clay Minerals and Soil Manganese Status in the Surface and Subsurface of Paddy Soils with Long-term Rice Cultivation in Fars Province. *Iranian Journal of Soil and Water Reserch*, *52*(2), 360-345. (In Persian)

Solgi, E., Shahverdi Nik, M., & Ramezani, M. (2020). Impact of Untreated Municipal Wastewater Irrigation on Heavy Metal Accumulation in Topsoil and Subsoil. *Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(3), 317-333. (In Persian)

Solgi, I., & Solgi, M. (2016). Investigating of heavy metals concentration vineyard soils in the agricultural ecosystems of Malayer. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, *3*(7), 99-112. (In Persian)