Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Relationships between physico-chemical properties of the soil and rice selenium uptake in silakhor plain of lorestan province

Parvin Khosravi[1], Mahboobeh Jalali*[2], Hamid Reza Matinfar[3], Shirin Haftbaradaran Isfahani[4]

1. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: khosravi.p@fa.lu.ac.ir
2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: Jalali.mah@lu.ac.ir
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran, Email: matinfar.h@lu.ac.ir
4. Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, Email: shirin.haft@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 5, 2022

Revised: Nov. 28, 2022

Accepted: Nov. 30, 2022

Published online: Jan. 22, 2022

Keywords:
Extractable Selenium,
Rice,
Soil Characteristics,
Soil Selenium.

ABSTRACT

Selenium is one of the essential micronutrients for human health. Since the amount of selenium in the plant is related to its amount in the soil and also the physical and chemical properties of the soil affect the amount of selenium uptake by the plant, therefore it is important to study the relationship between selenium uptake by the plant and physical and chemical properties of soil. In this study, first, different methods of selenium extraction were investigated to determine selenium concentration in the soil and rice grain in Silakhor plain of Lorestan province in 2021. Then, the correlation between soil properties and soil selenium content was investigated. The results showed that the extractable selenium with phosphate had a significant correlation with selenium uptake by plant (available selenium) and 0.1 M monopotassium phosphate solution (KH2PO4) could be used as the best extractor of selenium in the plant. There was also a significant correlation between soil selenium and some soil properties such as organic carbon content (-0.547*), calcium carbonate content (0.648**), clay percentage (-0.519*) and sulfate concentration (-0.275. The regression coefficient between soil and selenium properties of soil and plant was 0.72 and 0.68, respectively. Selenium concentration of rice grain in the region was between 1.016 to 1.985 mg / kg. Also, the concentration of selenium in the soils was between 0.17 to 0.52 mg / kg, which indicates that there is no deficiency of selenium in rice -cultivated soils in the Silakhor plain of Lorestan province.

Cite this article: Khosravi, P., Jalili, M., Matinfar, H. R., Haftbaradaran Isfahani, Sh. (2023) Relationships between Physico-Chemical Properties of the Soil and Rice Selenium Uptake in Silakhor Plain of Lorestan Province, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2463-2476. https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348260.669351

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348260.669351

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۱۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و جذب سلنیوم توسط گیاه برنج در دشت سیلاخور استان لرستان

پروین خسروی[۱]، محبوبه جلالی*[۲]، حمیدرضا متین‌فر[۳]، شیرین هفت‌برادران اصفهانی[۴]
۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، ایمیل: khosravi.p@fa.lu.ac.ir
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، ایمیل: Jalali.mah@lu.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، ایمیل: matinfar44@gmail.com
۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل: shirin.haft@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

واژه‌های کلیدی:
برنج،
خصوصیات خاک،
سلنیوم قابل استخراج،
سلنیوم خاک.

چکیده

سلنیوم یکی از عناصر ضروری کم‌مصرف برای انسان است. از آنجایی که میزان سلنیوم موجود در گیاه با مقدار آن در خاک ارتباط دارد و همچنین عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک بر میزان سلنیوم جذب شده توسط گیاه در خاک تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین بررسی ارتباط بین جذب سلنیوم توسط گیاه و ویژگی¬های فیزیکی و شیمیایی خاک بسیار مهم است. در این مطالعه، ابتدا روش‌های مختلف استخراج سلنیوم جهت تعیین غلظت آن در خاک و گیاه برنج در دشت سیلاخور استان لرستان در سال ۱۴۰۰ بررسی و سپس همبستگی بین ویژگی‌های خاک و میزان سلنیوم خاک و جذب آن توسط دانه برنج مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، ارتباط بین ویژگی¬هایی از خاک که با میزان سلنیوم گیاه، همبستگی معنی‌داری داشت با میزان سلنیوم موجود در دانه بررسی شد. نتایج نشان داد که سلنیوم قابل استخراج با عصاره گیر مونو پتاسیم فسفات (KH_2PO_4) همبستگی معنی‌داری با سلنیوم قابل جذب گیاه داشت و می تواند به عنوان عصاره¬گیر برتر جهت استخراج سلنیوم قابل جذب توسط گیاه در خاک استفاده شود. همبستگی معنی‌داری بین سلنیوم خاک و برخی خصوصیات خاک مثل میزان کربن آلی (*۰/۵۴۷-)، میزان کربنات کلسیم (**۰/۶۴۸)، درصد رس (*۰/۵۱۹-) و غلظت سولفات (*۰/۲۷۵-) مشاهده شد. ضریب رگرسیون بین ویژگی‌های خاک و سلنیوم خاک و گیاه به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۶۸ بود. غلظت سلنیوم دانه برنج در منطقه بین ۱/۰۱۶ تا ۱/۹۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. همچنین غلظت سلنیوم قابل جذب در خاک‌های این منطقه بین ۰/۱۷ تا ۰/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که نشان‌دهنده این است که در خاک‌های زیر کشت برنج در دست سیلاخور استان لرستان کمبود سلنیوم وجود ندارد.

استناد: خسروی؛ پروین، جلالی؛ محبوبه، متین‌فر؛ حمیدرضا، هفت‌برادران اصفهانی؛ شیرین، (۱۴۰۱). ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و جذب سلنیوم توسط گیاه برنج در دشت سیلاخور استان لرستان، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۰)، ۲۴۷۶-۲۴۶۳.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348260.669351

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348260.669351

مقدمه

سلنیوم عنصری ضروری و مهم برای انسان و حیوان است که نقش حفاظتی در برابر آسیب‌های سلولی ناشی از رادیکال‌های آزاد دارد (Kieliszek, 2019). در انسان، حداقل ۲۵ سلنوپروتئین وجود دارد که نقش مهمی در بهبود سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، تعادل هورمونی، افزایش باروری، افزایش مقاومت در برابر عفونت‌های ویروسی و پیشگیری از سرطان دارند (Rayman, 2020). فاصله بین حد کمبود و حد سمیت سلنیوم نسبت به سایر عناصر ضروری بسیار کم بوده و بنابراین موضوع کمبود و سمیت سلنیوم در سراسر جهان نگران کننده است (Rayman, 2020). علی‌رغم ضروری بودن سلنیوم به عنوان یک عنصر ریزمغذی برای انسان (روزانه مصرف بیش از ۴۰ میکروگرم سلنیوم توصیه می‌شود) و حیوانات، این عنصر در غلظت‌های بالاتر از حد آستانه مصرف (۴۰۰ میکروگرم در روز) می‌تواند به عنوان یک عنصر سمی لحاظ شود (Vinceti *et al*., 2018). از طرف دیگر سطوح بالای سلنیوم باعث مسمومیت مزمن در حیوانات می‌شود که به آن سلونوزیز مزمن گفته می‌شود. مسمومیت سلنیوم در انسان نیز اتفاق می‌افتد که البته زیاد رایج نیست و علائم سمیت در انسان و حیوان تقریبا مشابه و شامل ریزش مو و ناخن‌های شکننده، تهوع، استفراغ و درد شکم می‌باشد (Thiry *et al*., 2013).

غلظت سلنیوم متغیر و بسیار وابسته به مکانی است که نمونه برداری از آنجا انجام می‌شود. دامنه تغییرات غلظت سلنیوم در خاک‌ها از ۰/۰۱ تا ۲ میلی‌گرم برکیلوگرم با میانگین غلظت ۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم است و در خاک‌های آهکی، مقدار سلنیوم ۰/۴ تا ۱/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Fordyce, 2013). در مناطقی که غلظت سلنیوم کل کمتر از ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم است به عنوان مناطق دارای کمبود سلنیوم دسته‌بندی می‌شوند. میزان سلنیوم موجود در زنجیره غذایی، ارتباط مستقیمی با میزان آن در خاک دارد و این میزان در مناطق مختلف جغرافیایی متفاوت است. مناسب‌ترین روش برای تعیین کمبود سلنیوم در انسان، مشخص نمودن مقدار سلنیوم در گیاهان منطقه می‌باشد (Reis *et al*., 2014). فراهمی زیستی سلنیوم در خاک‌ها، توسط واکنش‌های مختلفی مثل جذب، واجذب، انحلال، رسوب و تشکیل کمپلکس کنترل می‌شود (Alfthan *et al*., 2015). مکانیسم‌های کنترل‌کننده این فرایندها به خصوصیاتی از خاک مثل pH و پتانسیل اکسید و احیا (Fan & Zhao, 2018)، مواد آلی (Xing, 2015)، بافت خاک و کانی‌شناسی (Antoniadis *et al*., 2017)، حضور اکسیدهای آهن و آلومینیوم (Araujo *et al*., 2020) خصوصیات میکروبی خاک (Munier-Lamy *et al*., 2007)، غلظت سلنیوم (Saha *et al*., 2017)، پارامترهای توپوگرافی (Xu *et al*., 2018) و حضور آنیون‌های رقیب مثل سولفات و فسفات (Díaz-Leyva *et al*., 2017) حساس هستند. درصد کربن، رس، آهک و ظرفیت تبادل کاتیونی نقش مثبت و شوری و قلیائیت وpH ، نقش منفی بر مقدار سلنیوم جذب شده در خاک دارند (Renha, 1983).

سلنیوم درخاک در چهار سطح اکسیداسیونی وجود دارد که عبارتند از: سلنات (Se^{6+})، سلنیت (Se^{4+})، سلنیوم عنصری (Se^{0}) و سلنید ارگانیک و غیرارگانیک (H_2Se). در بین این اشکال، سلنات قابل جذب‌ترین فرم سلنیوم برای گیاه است. سلنات و سلنیت توسط میکروارگانیسم‌های خاک از اشکال کمتر محلول سلنیوم تولید می‌شوند. این اشکال در خاک‌های قلیایی بسیار محلول بوده و بنابراین برای گیاهان قابل جذب‌تر هستند (Mikkelsen *et al*., 1989). بررسی ارتباط بین غلظت سلنیوم کل خاک و سلنیوم قابل دسترس خاک برای جذب توسط گیاه بسیار ضروری است. برای نشان دادن ارتباط بین سلنیوم خاک و سلنیوم قابل جذب توسط گیاه، روش‌های استخراج متفاوتی وجود دارد. از مهمترین این روش‌ها شامل روش‌های محلول در آب گرم[1] (Olson *et al*., 1942)، روش AB-DTPA (Jump & Sabey, 1989)، روش محلول پایه[2] (Jump & Sabey, 1989)، روش DTPA یا EDTA (Jump & Sabey, 1989)، فسفات[3] (Vance, 2000) و روش گل اشباع[4](Jump & Sabey, 1989) است.

گیاهان منبع اصلی سلنیوم در رژیم غذایی انسان‌ها و حیوانات هستند، از این رو، آگاهی از ترکیبات سلنیوم در گیاهان بسیار مهم است (Dumont *et al*., 2006). از آنجایی که میزان سلنیوم موجود در گیاه با مقدار آن در خاک ارتباط دارد و همچنین عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک بر میزان سلنیوم جذب شده توسط گیاه در خاک تأثیر می‌گذارد، بنابراین رابطه بین خواص فیزیکو شیمیایی خاک و غلظت سلنیوم در خاک و گیاه بسیار مهم است. با توجه به اینکه برنج از مهمترین اجزای سبد غذایی مردم ایران است و علی رغم نقش بسیار مهم این عنصر در جلوگیری از برخی بیماری‌ها مثل سرطان و با توجه به اینکه پایش دقیقی از غلظت این عنصر بسیار مهم در خاک و محصولات بسیار مهمی مثل برنج در ایران انجام نگرفته است، تعیین میزان سلنیوم در این محصول بسیار حائز اهمیت است. مطالعات

1 Water or Hot Water Soluble
2 Base Soluble
3 phosphate
4 Saturated Paste

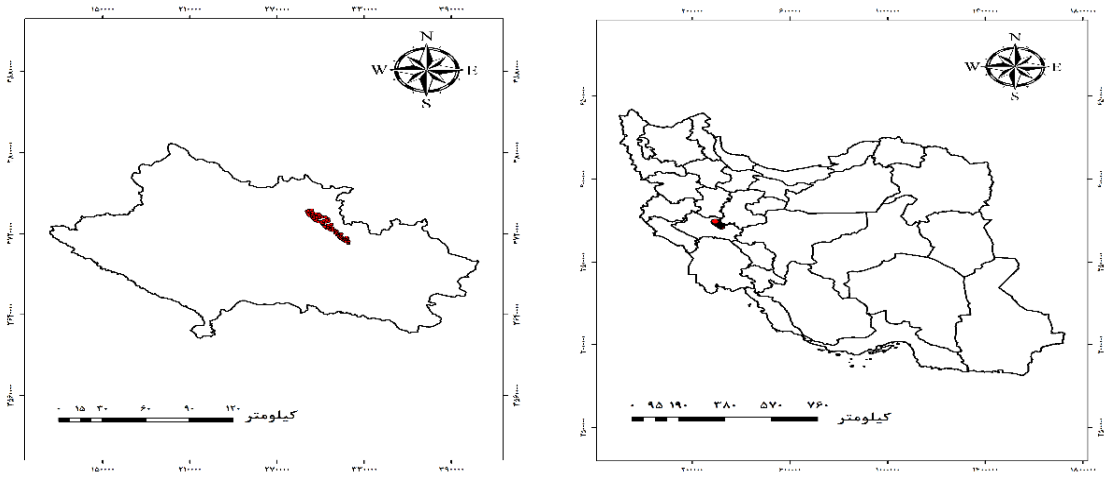
نشان داده که سلنیوم باعث افزایش مقاومت برنج به انواع تنش‌ها از جمله تنش کم آبی (Andrade *et al*., 2018)، تنش فلزات سنگین از جمله کادمیوم و افزایش میزان کلروفیل برنج (Farooq *et al*., 2022) می‌شود. بنابراین، پایش دقیقی از غلظت سلنیوم در گیاهان ضروری می‌باشد. همچنین، از آنجایی که ویژگی‌های خاک تاثیر زیادی بر غلظت سلنیوم گیاه دارد، لذا تعیین ارتباط بین این ویژگی‌ها با غلظت سلنیوم در گیاهان ضروری است. به همین خاطر، هدف از این مطالعه، بررسی ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی خاک با غلظت سلنیوم قابل دسترس در خاک و گیاه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در دشت سیلاخور استان لرستان در سال ۱۴۰۰ انجام شد. دشت سیلاخور با وسعت تقریباً ۳۷۷ کیلومتر مربع بین طول جغرافیایی ۴۸درجه و ۲۸دقیقه تا ۴۹درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳درجه و ۱۵دقیقه تا ۳۴ درجه و۱۰دقیقه شمالی در جنوب شرقی بروجرد واقع شده است. این دشت وسیع که بیشتر مساحت شهرستان‌های بروجرد و درود را در بر می‌گیرد از قطب‌های تولید گندم و برنج منطقه به شمار می‌رود.

پس از بررسی چشمی تصویر رنگی و مشاهدات میدانی،۱۳۰ نمونه خاک سطحی از تمام قسمت‌های دشت در سلول‌های هم‌اندازه و از محل تقاطع شبکه‌ها جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری به روش سیستماتیک شبکه‌ای صورت گرفت و پس از نقطه‌یابی توسط GPS، نمونه خاک مرکب سطحی (۵ نمونه فرعی) از عمق ۲۰-۰سانتی‌متر تهیه شد. موقعیت و تعداد نقاط نمونه‌گیری در منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است. سپس نمونه‌های خاک پس از خشک شدن در هوای آزاد از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند.



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده در ایران و استان لرستان

بافت خاک از روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، اسیدیته در گل اشباع با الکترود pHمتر (pHM240 pH/ion meter-Radiometer) و هدایت الکتریکی به روش عصاره اشباع با EC سنج مدلOhm-644 Metrohm AG Herisus, Switzerland (Rhoades, 1996) و کربن آلی به روش والکی–بلاک (Walkley & Black, 1934) اندازه‌گیری شد. آهک نیز با روش تیتراسیون با سود ۰/۵ نرمال (Sparks, 1996)، نیتروژن به روش کجلدال (Sparks, 1996)، غلظت فسفات (به روش رنگ‌سنجی)، سولفات، نیترات (با استفاده از روش تقطیر بخار آب) و درصد رس (به روش هیدرومتری) با روش‌های روتین آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (Sparks, 1996).

اندازه‌گیری سلنیوم قابل دسترس گیاه در خاک

در این آزمایش میزان سلنیوم خاک به‌وسیله چندین روش استخراج اندازه‌گیری شد. در مرحله اول، سلنیوم کل در نمونه‌های خاک وگیاه اندازه‌گیری شد (بعد از هضم اسید)، سپس آب گرم، کلرید پتاسیم ۰/۲۵ مولار، بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار و مونوپتاسیم فسفات ۰/۱ مولار به طور متوالی برای استخراج سلنیوم مورد استفاده قرار گرفتند.

برای اندازه‌گیری سلنیوم در خاک از محلول با نسبت ۳:۱ اسید نیتریک و اسید کلریک غلیظ استفاده شد. برای این منظور، پس از

افزودن محلول فوق، نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند و سوسپانسیون حاصل به مدت ۱ ساعت بر روی هیتر با دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد جوشانده شد. و پس از سرد شدن با کاغذ واتمن شماره 42 صاف گردیده و با اسید نیتریک ۰/۵ نرمال به حجم رسانده شد (Melaku, 2005). نمونه‌های آب صاف شده با افزودن اسید نیتریک با غلظت نهائی ۱٪ (V/V) اسیدی شده و برای سنجش سلنیوم مورد استفاده قرار گرفت (Lawson, 2001). سنجش عناصر با دستگاه اسپکتروفتومتر نشر اتمی مجهز به ICP (ICP-OESModel Varian Vista-MPX.) استفاده شد.

با توجه به منابع، ۴ روش جهت استخراج سلنیوم قابل دسترس گیاه در خاک پیشنهاد شده است (Olson *et al*., 1942; Spackman *et al*., 1994; Vance, 2000; Williams & Thompton, 1973). در این مطالعه، برای انتخاب بهترین زمان و بهترین غلظت عصاره‌گیر، سه خاک انتخاب شد. سپس در هر روش استخراج، سلنیوم بوسیله روش دی آمینو نفتالن فلورومتریک (Mikkelsen *et al*., 1982; Reuter, 1986) اندازه‌گیری شد. در این مطالعه از آب، بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار، کلرید پتاسیم ۰/۲۵ مولار و مونوپتاسیم فسفات ۰/۱ مولار، به طور جداگانه به عنوان عصاره‌گیر برای استخراج سلنیوم قابل دسترس برای مقایسه‌های بیشتر استفاده شد.

تحلیل مکانی داده‌ها به روش کریجینگ

برای انجام واسطه‌یابی به روش کریجینگ، مقادیر مربوط به انحراف آماری متغیر نسبت به نقطه کنترل، در فواصل و جهات مختلف، به صورت مجموعه‌ای از فاکتورهای وزن‌دار که حداقل خطا در تخمین مقادیر نقطه‌ای را دارند، استفاده می‌شود. درجه و میزان پیوستگی مقادیر کنترل به صورت تغییرنما ارائه می‌شود که کریجینگ اطلاعات مربوط را برای انتخاب بهینه وزن‌ها از نیم‌تغییرنما می‌گیرد. کریجینگ یک تخمین‌گر خطی ناریب با کمترین واریانس به صورت زیر است:

رابطه ۱)
$$Z*(X) = \sum_{i=1}^{n} \lambda i\, Z(xi)$$

که در این معادله Z*(X) مقدار تخمینی متغیر Z در نقطه X و μi وزن آماری اختصاص یافته به مقادیر Z در نقطه Xi است. کریجینگ نیز نظیر سایر روش‌های درون‌یابی، دارای خطا است، ولی مزیت کریجینگ این است که مناطقی را که در آن‌ها مقدار خطا بالا است را مشخص می‌نماید. در نتیجه، برای کاهش خطا نیاز است که از داده‌های بیشتری برای تخمین استفاده شود و می‌توان کاهش واریانس تخمین را به ازاء یک نمونه اضافی قبل از نمونه‌گیری تعیین نمود. در این پژوهش هدف استفاده از روش کریجینگ معمولی، تخمین ویژگی‌های مورد نظر در محل‌های نمونه‌برداری نشده توسط نقاط نمونه‌برداری شده می‌باشد. از نرم‌افزار ArcGIS برای درون‌یابی به روش کریجینگ معمولی در منطقه مطالعاتی استفاده گردید.

مدل‌سازی

در این پژوهش از مدل رگرسیون خطی چند متغیره برای مدل‌سازی سلنیوم قابل جذب خاک و غلظت سلنیوم در دانه برنج در منطقه مطالعاتی استفاده گردید.

رگرسیون خطی چند متغیره[1]

در رگرسیون خطی چند متغیره، مقادیر یک متغیر (متغیر وابسته یا y) از روی مقادیر دو یا چند متغیر دیگر (متغیرهای مستقل $X_1, X_2, \ldots, X_n$) برآورد می‌شوند. این کار از طریق ساختن یک معادله خطی به شکل عمومی زیر انجام می‌شود.

رابطه ۲)
$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \ldots + B_n X_n$$

در این معادله، پارامترهای $B_1, B_2, \ldots, B_n$ ضرایب رگرسیون تفکیکی/ جزئی هستند و مقدار عرض از مبدا (B_0) مقدار ثابت رگرسیون است. این معادله به عنوان معادله رگرسیون چند خطی چند متغیره y بر اساس $X_1, \ldots, X_n$ شناخته می‌شود. در این پژوهش غلظت سلنیوم قابل جذب توسط گیاه برنج به عنوان متغیر وابسته و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک به عنوان متغیرهای مستقل در مدل در نظر گرفته شدند، سپس از روش Enter برای مدل‌سازی رگرسیون خطی چند متغیره در منطقه مطالعاتی استفاده گردید.

ارزیابی اعتبار مدل

از معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به منظور ارزیابی و کارایی مدل رگرسیون خطی چند متغیره جهت پیش‌بینی مقادیر کربن آلی خاک استفاده شد.

---

1 Multiple Linear Regression

رابطه ۳)
$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}$$

در این رابطه، n تعداد داده‌ها، y_i مقدار اندازه‌گیری شده کربن آلی خاک، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده کربن آلی خاک می‌باشد.

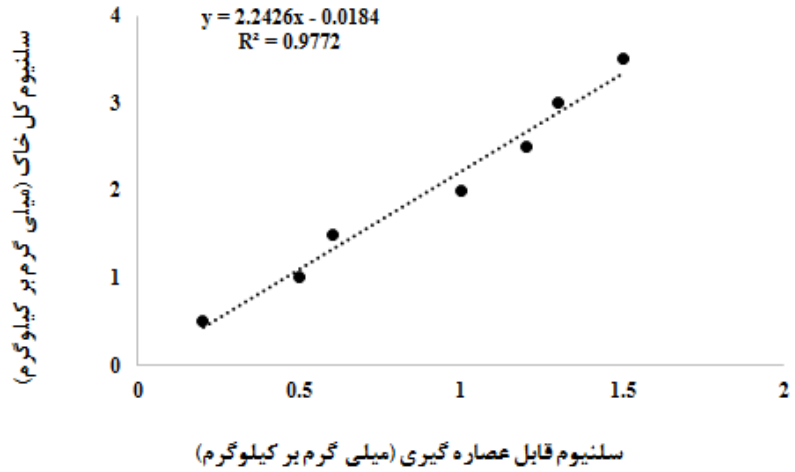
آنالیز داده‌ها

تجزیه و تحلیل چند متغیره بین سلنیوم خاک، سلنیوم قابل استخراج، سلنیوم گیاه و خصوصیات خاک بوسیله نرم افزار SPSS انجام شد. توزیع نرمال داده‌ها به کمک آزمون کولموگروف -اسمیرنوف بررسی و از تبدیل لگاریتمی برای نرمال کردن داده‌هایی که توزیع نرمال نداشتند استفاده گردید. کلیه محاسبات لازم برای استخراج مدل و همچنین تست مدل به دست آمده در محیط نرم‌افزار MATLAB 7.12.0 (R2011a) کد نویسی شد.

نتایج و بحث

سلنیوم خاک و سلنیوم قابل استخراج

در این مطالعه از آب، بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار، کلرید پتاسیم ۰/۲۵ مولار و مونوپتاسیم فسفات ۰/۱ مولار، به طور جداگانه به عنوان عصاره‌گیر برای استخراج سلنیوم قابل دسترس برای مقایسه‌های بیشتر استفاده شد. چهار روش استخراج استفاده شده در این مطالعه برای استخراج سلنیوم خاک، اطلاعات متفاوتی در مورد غلظت کل سلنیوم و سلنیوم قابل استخراج خاک نشان داد. نتایج نشان داد که سلنیوم کل خاک و کل سلنیوم قابل استخراج، ارتباط خطی بالایی با هم دارند و ضریب همبستگی آنها بزرگتر از ۰/۹۵ است (شکل ۱). به عنوان مقایسه، رابطه بین غلظت‌های مختلف سلنیوم قابل استخراج خاک و غلظت‌های سلنیوم کل خاک با تجزیه و تحلیل چند متغیره، در صورت استفاده از ضریب همبستگی ۰/۹ یا بیشتر، چندین روند پیدا کرد.



شکل ۲. ارتباط بین غلظت سلنیوم کل خاک (Y) و سلنیوم قابل استخراج (X)

نتایج نشان داد که سلنیوم قابل استخراج توسط آب، کلرید پتاسیم، بیکربنات سدیم و مونوپتاسیم فسفات از نظر آماری دارای همبستگی با سلنیوم کل خاک هستند. با تجزیه و تحلیل‌های رگرسیونی بیشتر، نتایج نشان داد که سلنیوم قابل استخراج با مونو پتاسیم فسفات (KH_2PO_4) بیشترین همبستگی را نشان داد. در زیر معادلات مربوط به هر یک از عصاره‌گیرها به ترتیب برای آب، کلرید پتاسیم، بیکربنات سدیم و مونو پتاسیم فسفات نشان داده شده است.

رابطه ۴) $Y=0.24+0.071X3+0.931X4$ $R=0.647$

رابطه ۵) $Y=0.561+0.065X4$ $R=0.721$

رابطه ۶) $Y=0.179+0.065X3+1.066X4$ $R= 0.783$

رابطه ۷) $Y=0.411+0.0852\ X3+1.407\ X4$ $R= 0.986$

در این معادله (رابطه ۷)، Y غلظت کل سلنیوم خاک و X سلنیوم قابل عصاره‌گیری با مونو پتاسیم فسفات است. در واقع می‌توان

گفت که سلنیوم قابل عصاره‌گیری با مونو پتاسیم فسفات نسبت به سایر عصاره‌گیرها، توان بهتری در تخمین غلظت سلنیوم جذب شده توسط گیاه را دارد.

شیمی سلنیوم از بسیاری از جهات شبیه شیمی گوگرد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یک عصاره‌گیر حاوی سولفات ممکن است برای استخراج سلنیوم نیز مفید باشد. مطالعه‌ای که توسط کری و همکاران (Cary *et al*., 1967) انجام گرفت نشان داد که سلنیوم استخراج شده از خاک با سولفات پتاسیم، ارتباط معنی‌داری با غلظت سلنیوم در یونجه دارد. مشکلی که در استفاده از سولفات پتاسیم وجود دارد این است که بسیاری از خاک‌هایی که در مناطق خشک و نیمه خشک هستند دارای غلظت بالایی از سولفات هستند. اما در مناطق مرطوب، روش استفاده شده برای تعیین سولفات قابل عصاره‌گیری خاک، استفاده از محلول‌های حاوی فسفات (PO_4^{-3}) است. سلنیوم قابل استخراج با فسفات شامل هر دو گونه سلنیوم محلول در آب و سلنیوم جذب شده است. یون فسفات می‌تواند گونه‌های دو ظرفیتی سلنیوم را از مکان‌های جذبی آزاد کند. مطالعه حاضر مشخص نمود که سلنیوم عصاره‌گیری شده با فسفات دارای تغییرات کمتری نسبت به سلنیوم استخراج شده توسط آب، بی‌کربنات سدیم و کلرید پتاسیم نشان می‌دهد (Spackman *et al*., 1994). همچنین، زمان و غلظت مناسب عصاره‌گیر مونو پتاسیم فسفات در این مطالعه نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین زمان مناسب برای فرایند استخراج دو ساعت و غلظت اقتصادی عصاره‌گیر مونوپتاسیم فسفات ۰/۱ مولار است (جدول ۱ و ۲). Al-Tameemi *et al*. (2016) نیز در مطالعات خود غلظت سلنیوم خاک را ۱۳/۵–۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم با استفاده از عصاره‌گیر مونوپتاسیم فسفات به دست آوردند.

جدول ۱. تأثیر زمان استخراج بر روی سه خاک مختلف با ثابت نگه‌داشتن غلظت ۰/۱ مولار مونو پتاسیم فسفات (میانگین± انحراف معیار)

زمان استخراج (ساعت)	میزان سلنیوم قابل استخراج (میلی گرم بر لیتر)		
	خاک ۱	خاک ۲	خاک ۳
۱	۰/۰۴۸ ± ۰/۰۰۲	۰/۱۱۳ ± ۰/۰۰۳	۰/۳۱۸ ± ۰/۰۰۴
۲	۰/۰۵۱ ± ۰/۰۰۶	۰/۱۲۱ ± ۰/۰۰۳	۰/۳۲۴ ± ۰/۰۰۸
۴	۰/۰۵۵ ± ۰/۰۰۵	۰/۱۲۲ ± ۰/۰۰۷	۰/۳۳۰ ± ۰/۰۰۹
۸	۰/۰۶۲ ± ۰/۰۰۴	۰/۱۳۲ ± ۰/۰۰۵	۰/۳۳۲ ± ۰/۰۰۶
۱۶	۰/۰۶۵ ± ۰/۰۰۷	۰/۱۳۵ ± ۰/۰۰۸	۰/۳۳۶ ± ۰/۰۰۵
۲۴	۰/۰۶۳ ± ۰/۰۰۵	۰/۱۳۶ ± ۰/۰۰۶	۰/۳۴۱ ± ۰/۰۰۹

جدول ۲. تأثیر غلظت‌های مختلف مونوپتاسیم فسفات بر روی سه خاک مختلف در زمان ثابت دو ساعت

غلظت قابل استخراج (میلی‌گرم بر لیتر)	میزان سلنیوم قابل استخراج (میلی‌گرم بر لیتر)		
	خاک ۱	خاک ۲	خاک ۳
۰/۰۵	۰/۰۴۰ ± ۰/۰۰۴	۰/۱۰۳ ± ۰/۰۰۷	۰/۳۲۰ ± ۰/۰۱۰
۰/۱	۰/۰۵۱ ± ۰/۰۰۵	۰/۱۱۴ ± ۰/۰۰۴	۰/۳۳۲ ± ۰/۰۰۵
۰/۲	۰/۰۶۲ ± ۰/۰۰۲	۰/۱۲۰ ± ۰/۰۰۵	۰/۳۳۱ ± ۰/۰۰۹

ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی خاک و سلنیوم خاک

آنالیز آمار توصیفی نمونه‌های خاک منطقه مطالعاتی، در جدول ۳ نشان داده شده است. میانگین غلظت سلنیوم در این منطقه ۰/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم با حداقل و حداکثر ۰/۱۷ و ۰/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در واقع غلظت سلنیوم در تمام نمونه‌های خاک در منطقه مطالعاتی بیشتر از حد آستانه کمبود (۰/۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) گزارش شده توسط Fordyce et al., (2009) بود. در مطالعه‌ای که بر روی خاک منطقه‌هایی از شمال، مرکز و جنوب ایران انجام گرفت، میانگین غلظت سلنیوم به طور متوسط ۰/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم با حداقل و حداکثر ۰/۰۴ و ۰/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شد (Nazemi *et al*., 2012).

همچنین در جدول (۳) ضرایب همبستگی میان غلظت سلنیوم نقاط نمونه‌برداری شده و ویژگی‌های خاک همان نقاط نشان داده شده است. هدف از محاسبه ضریب همبستگی، آن است که بتوان به نوعی با در دست داشتن یکی از متغیرها، دیگری را پیش‌بینی کرد. سلنیوم قابل دسترس خاک نه تنها متأثر از سلنیوم کل خاک است بلکه به طور مؤثری تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمایی خاک است. در این مطالعه تاثیر ویژگی‌هایی مثل pH، EC، کربن آلی، کربنات، فسفات، سولفات، نیترات، درصد رس بر روی سلنیوم قابل عصاره‌گیری توسط مونو پتاسیم فسفات مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب همبستگی از بزرگ به کوچک به شرح زیر است: کربنات کلسیم

(۰/۶۴۸) > کرین آلی (۰/۵۴۷-) > درصد رس (۰/۵۱۹-) > سولفات (۰/۲۷۵-) >EC (۰/۲۴۲)> pH (۰/۲۳۲) > فسفات (۰/۱۸۶)> نیترات (۰/۱۵۴).

جدول ۳. ویژگی‌های آماری و ضریب همبستگی خصوصیات خاک با میزان سلنیوم خاک

شاخص‌های آماری	سلنیوم خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	pH	EC (دسی زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)	آهک (درصد)
میانگین	۰/۳۶	۷/۸۹	۰/۴۹	۱/۴۱	۲۰/۳۷
انحراف معیار	۳/۲۶	۰/۲۴۶	۰/۳۷۶	۰/۶۴	۵/۶۴
چولگی	۰/۳۷	۰/۴۵۴	۰/۱۹۵	۰/۸۷	۱/۸۷
کشیدگی	-۰/۷۶	۰/۷۵۹	-۰/۵۵	۱/۷۴	۰/۹۹
کمینه	۰/۱۷	۷/۶۲	۰/۲۷	۰/۷۰	۱۰/۵
بیشینه	۰/۵۲	۸/۳۳	۰/۷۵	۲/۱۸	۳۸
ضریب همبستگی	-	۰/۲۳۲	۰/۲۴۲	-۰/۵۴۷*	۰/۶۴۸**

شاخص‌های آماری	سولفات (میلی‌اکی والان در لیتر)	نیترات (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	فسفات (میلی گرم بر کیلوگرم)	رس (درصد)
میانگین	۱۱/۰۸	۱۵/۶	۲/۶۶	۱۸/۰۶
انحراف معیار	۱/۲۴	۲/۸۲	۰/۵۸	۱۰/۵
چولگی	۰/۴۵	۱/۲۳	۰/۷۳	-۰/۲۴
کشیدگی	۰/۸۳	۱/۴۴	-۰/۸۴	-۰/۳۱
حداقل	۶/۷۶	۳/۶	۰/۹۳	۳/۶۸
حداکثر	۱۵/۴۲	۲۴/۵	۵/۰۹	۵۱/۳۶
ضریب همبستگی	-۰/۲۷۵*	۰/۱۵۴	۰/۱۸۶	-۰/۵۱۹*

***و ** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد و ns معنی‌دار نمی‌باشد.**

نتایج حاصل از جدول شماره ۳ نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین سلنیوم خاک و برخی ویژگی‌های خاک مثل کربن آلی ($p<0.005$)، کربنات کلسیم ($p<0.001$)، رس ($p<0.005$) و سولفات ($p<0.005$) وجود دارد. همچنین نتایج نشان داد که کربنات کلسیم بیشترین تأثیر مثبت را بر غلظت سلنیوم قابل دسترس خاک دارد. در واقع کربنات کلسیم می‌تواند سلنیوم را به وسیله نیروی بین مولکولی بر روی سطوح خود جذب کند. بعد از کربنات کلسیم، ماده آلی و رس خاک بیشترین تأثیر منفی را بر میزان سلنیوم قابل دسترس خاک دارند. مواد آلی و ذرات رس از طریق جاذبه الکترواستاتیک قادر به جذب سلنیوم هستند. در واقع این جذب زیاد سلنیوم بر روی اکسی هیدروکسیدها و کانی‌های رسی به دلیل بار منفی بر روی این سطوح در pHهای بالا است (Lopes *et al.*, 2017). در مطالعات دیگر نیز ارتباط بالایی بین میزان سلنیوم خاک و درصد رس مشاهده شد (Uygur *et al.*, 2010).

در واقع می‌توان گفت آهک‌دهی یک راهکار عملی برای افزایش غلظت سلنیوم در خاک‌های دارای کمبود سلنیوم است (Masscheleyn *et al.*, 1991). مطالعات قبلی نشان داده‌اند که حلالیت سلنیوم در آب و در نتیجه جذب آن توسط گیاهان در خاک‌های قلیایی بسیار بیشتر از خاک‌های اسیدی است. Nazemi *et al.*, (2012) نشان دادند که غلظت سلنیوم در خاک‌های جنوب مرکز ایران بیشتر از شمال و جنوب ایران است که یکی از دلایل عمده این موضوع وجود آهک بیشتر در خاک‌های مرکز ایران است. در مطالعه‌ای، ازکان و همکاران (Ozkan *et al.*, 2022) نشان دادند که همبستگی معنی‌داری بین سلنیوم کل خاک و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک به شرح زیر وجود دارد: کلسیم (*۰/۱۹۱)، سدیم (**۰/۱۹۹)، پتاسیم (**۰/۲۳۶)، EC (**۰/۳۰۸)، کربنات کلسیم (*۰/۱۷۹)، درصد رس (*۰/۱۴۷) و شن (**۰/۲۵۰). در مطالعه‌ای دیگر همبستگی بالایی بین غلظت سلنیوم خاک عصاره‌گیری شده با مونوپتاسیم فسفات و مواد آلی (**۰/۷۹۱)، کربنات کلسیم (**۰/۸۳۹)، ظرفیت تبادل کاتیونی (**۰/۸۹۵) و درصد رس (**۰/۸۹۴). مشاهده شد Al-Tameemi *et al.*, 2016). همچنین نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین غلظت سلنیوم کل و میزان pH ، غلظت فسفر و درصد سیلت وجود ندارد (جدول شماره ۳).

یکی از منابع مهم جذب سلنیوم در خاک ماده آلی می‌باشد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که از بین ویژگی‌های خاک، میزان ماده

آلی خاک مهمترین فاکتوری است که نقش تعیین کننده‌ای در میزان قابلیت زیستی سلنیوم دارد (Ming-Ming *et al*., 2015). با افزایش ماده آلـی در خاک فعالیت میکروارگانیسم‌ها نیز بیشتر شده و می‌توانند سلنیوم را جذب و وارد بافتهای بدن خود کنند. فرایندهایی که سلنیوم بوسیله ماده آلی بی تحرک می‌شود را می‌توان به دو گروه فرایندهای زیستی و غیر زیستی تقسیم کرد. در مورد فرایندهای زیستی مطالعات بیشتری صورت گرفته است. به عنوان مثال، تغییر شکل میکروبی سلنیوم در خاک نقش مهمی بر قابلیت فراهمی آن توسط گیاه بازی می‌کند. بسیاری از گونه‌های مختلف باکتری می‌توانند از سلنات یا سلنیت به عنوان گیرنده نهایی الکترون در متابولیسم سلنیوم برای کاهش سلنیوم به سلنیوم عنصری (شامل سلنیوم عنصری در مقیاس نانو) یا سلنیدهای فلزی استفاده کنند (Hageman *et al*., 2013). علاوه بر این به دلیل شباهت شیمیایی زیاد سلنیوم و گوگرد، سلنیوم می‌تواند جابگزین گوگرد در تعدادی آمینواسیدها (مثل متیونین و سیستئین) و برخی از آمینو اسیدهای یافت شده در محلول خاک شود (Kang *et al*., 1991).

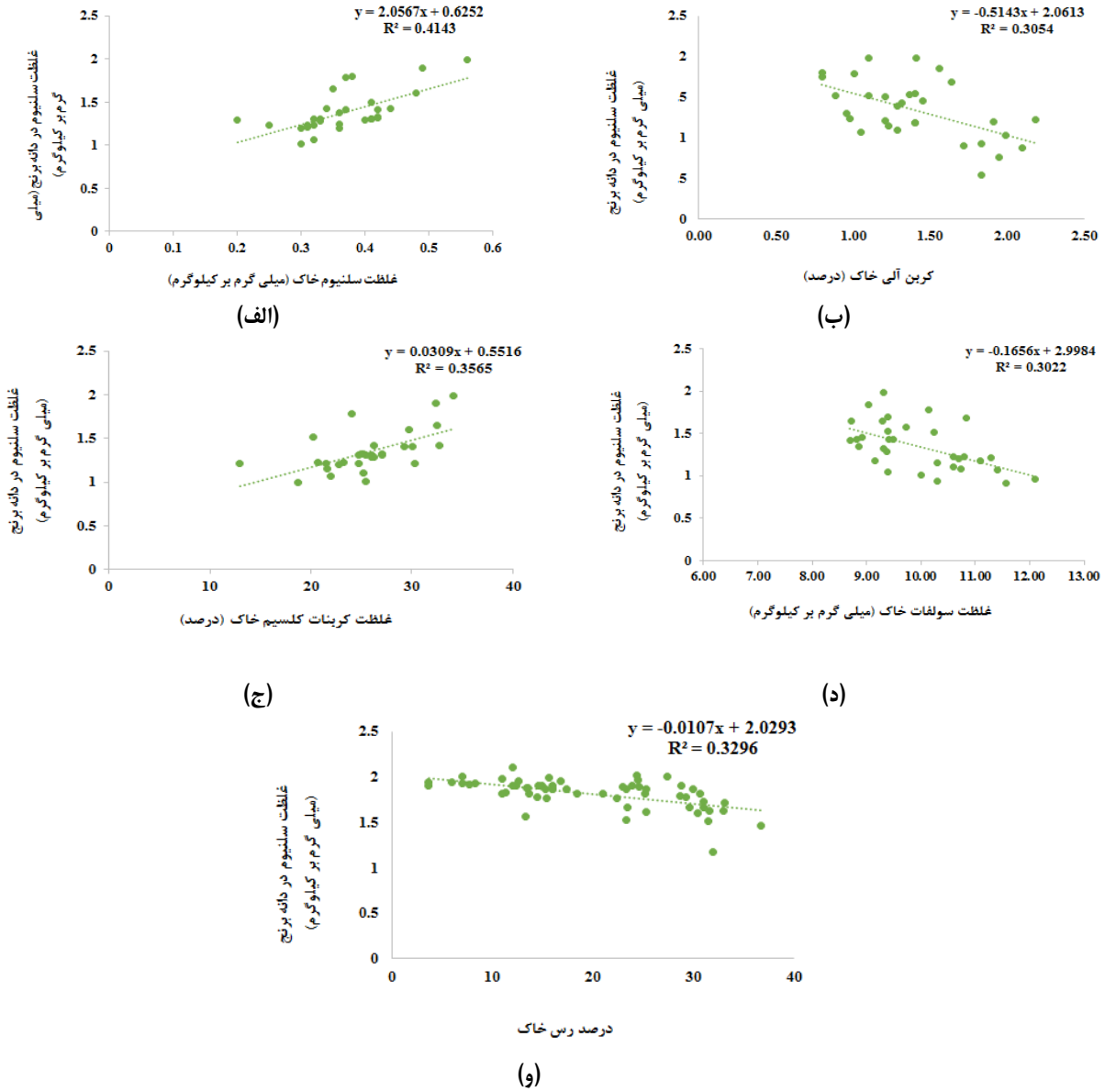
حضور آنیون‌های رقیب نیز یکی دیگر از عوامل مؤثر بر عدم جذب سلنیوم توسط ریشه گیاه است و به دلیل وجود برخی شباهت‌های شیمیایی آنیون سولفات با سلنات، این دو یون برای جذب بر روی سطوح ریشه با هم رقابت کرده که این امر سبب کاهش اینفالکس سلنات به درون ریشه گردیده و در نهایت جذب سلنیوم توسط گیاه در حضور یون سولفات کاهش می‌یابد (Kikkert *et al*., 2013). لازم به ذکر است که درخاک‌های با مشخصات خاک مورد مطالعه (اکسیدی با pH بالا)، سلنیوم خاک به فرم سلنات (SeO_4^{-2}) محلول در آب تبدیل می‌شود که در میان گونه‌های سلنیوم موجود در خاک، تحرک و زیست فراهمی بالایی را نشان می‌دهد اما از طرف دیگر خطر آب شویی این عناصر و آلوده کردن آب‌های زیر زمینی را افزایش می‌دهد.

ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و غلظت سلنیوم گیاه

غلظت سلنیوم در برنج در منطقه مورد مطالعه بین ۱/۰۱۶ تا ۱/۹۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۱/۳۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. که بسیار بالاتر از میانگین غلظت سلنیوم در دانه برنج در تایلند (۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، چین (۰/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، نیوزلند (۰/۰۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و امریکا (۰/۳۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (Reilly, 2006). همچنین غلظت سلنیوم در دانه‌های برنج شمال کشور ایران ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (لنگرود) و ۱/۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم (گنبد کاووس) بود (Nezami *et al*., 2012). با توجه به اینکه غلظت سلنیوم خاک در تمام نقاط منطقه نمونه‌برداری شده بیشتر از حد آستانه کمبود (۰/۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) گزارش شده توسط Fordyce *et al*., (2009) بود و همچنین غلظت سلنیوم در تمام نمونه‌های برنج بیشتر از ۰/۵۵ میکروگرم بر گرم بود (حد بهینه سلنیوم در گیاه ۰/۰۱ –۰/۵۵ میکروگرم بر گرم) (Dumont *et al*., 2006)، بنابراین می‌توان گفت که در منطقه مورد مطالعه کمبود سلنیوم وجود ندارد.

در شکل ۳، ارتباط بین خصوصیاتی از خاک که در مرحله قبل تاثیر معنی‌دار آنها بر غلظت سلنیوم خاک مشخص شد، با غلظت سلنیوم در دانه برنج کشت شده در آن منطقه نشان داده شده است. نمودار همبستگی بین غلظت سلنیوم در دانه برنج و غلظت سلنیوم خاک (R^2= ۰/۴۱)، کربن آلی (R^2= ۰/۳۰)، کربنات کلسیم (R^2= ۰/۳۵)، غلظت سولفات (R^2= ۰/۳۰) و درصد رس (R^2= ۰/۳۲) در شکل ۳ (الف–و) نشان داده شده است.

در واقع، علی‌رغم غلظت پایین غلظت سلنیوم در خاک‌های دشت سیلاخور، میانگین غلظت سلنیوم در دانه برنج در این منطقه بالا بود. که می‌توان گفت این موضوع به دلیل فراهمی زیستی سلنیوم است. جذب سلنات نسبت به سلنیت توسط کانی‌های خاک کمتر است و بنابراین راحت‌تر توسط گیاه جذب می‌شود. در واقع می‌توان گفت که فاکتورهای خاکی تأثیر زیادی در افزایش قابلیت و بنابراین جذب سلنیوم توسط گیاه دارد. در مطالعه‌ای Ademi *et al* (2021) نشان دادند که غلظت سلنیوم در گیاه همبستگی مثبت معنی‌داری با غلظت سلنیوم خاک و غلظت منیزیم خاک و همبستگی معنی‌دار منفی با غلظت گوگرد در خاک دارد. در واقع رابطه آنتاگونیسمی سلنیوم و گوگرد به شباهت در مکانیسم‌های انتقال این دو یون از ریشه به قسمت‌های هوایی گیاه و در واقع ناقلین مشترک است (Li *et al*., 2008; Pilon-Smits *et al*., 2014). که با افزایش غلظت گوگرد به فرم سولفات، ترجیح این ناقلان برای سلنیوم کاهش می‌یابد (White *et al*., 2004).



شکل ۳. همبستگی بین غلظت سلنیوم در دانه برنج و غلظت سلنیوم خاک (الف)، کربن آلی (ب)، کربنات کلسیم (ج) و غلظت سولفات (د) و درصد رس خاک (و)

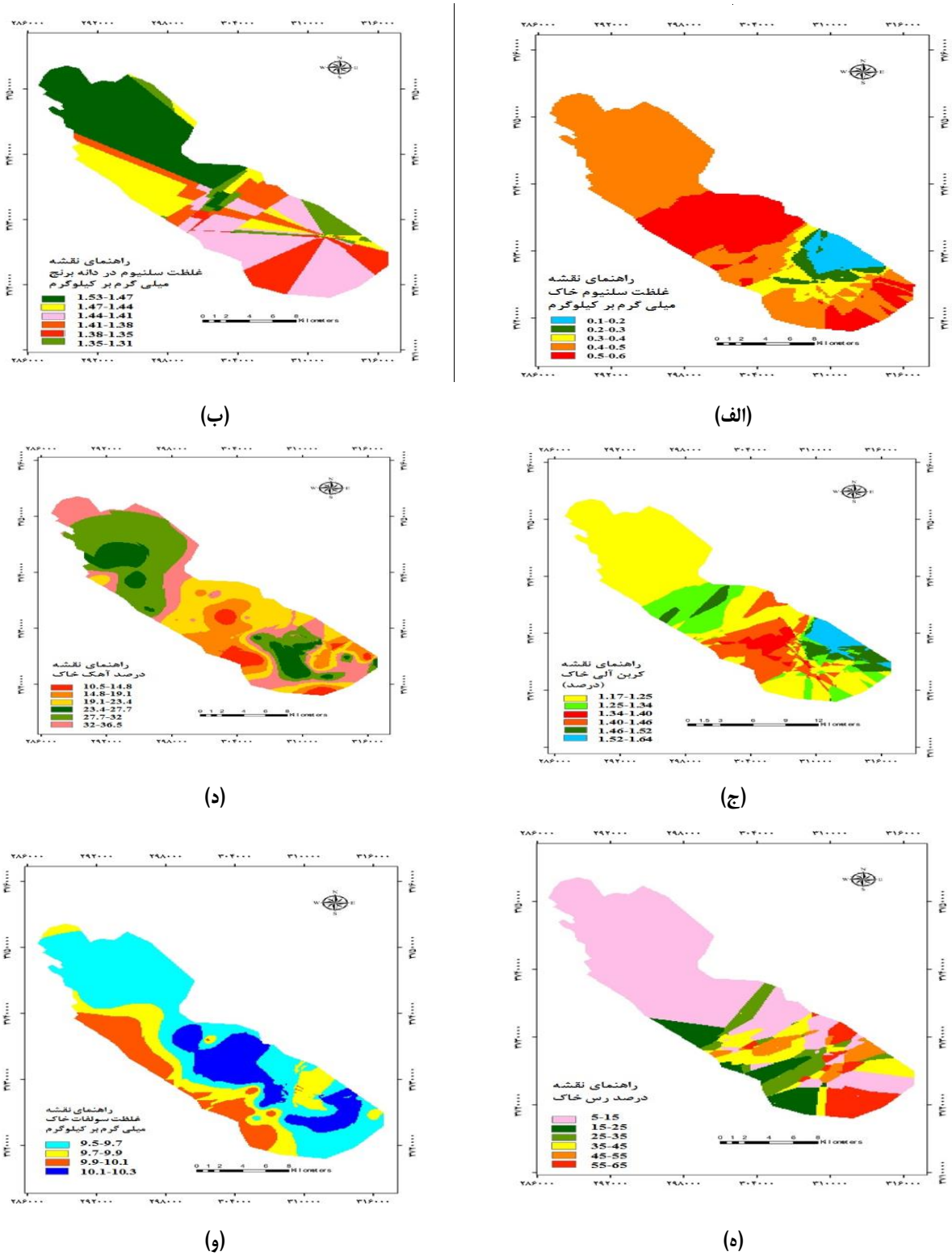
اما این نتایج برای همه گیاهان یکسان نیست. به عنوان مثال غلظت گوگرد در خاک هیچ تأثیری بر میزان غلظت سلنیوم در گیاه چمن نداشت (Uren, 2013). همچنین می‌توان یکی از دلایل همبستگی منفی بین ماده آلی خاک و میزان سلنیوم در گیاه را تاثیر ماده آلی در جذب سلنیوم مربوط دانست زیرا یکی از منابع مهم جذب سلنیوم در خاک ماده آلی می باشد. در ضمن با افزایش ماده آلی در خاک فعالیت میکروارگانیسم‌ها بیشتر شده و می‌توانند سلنیوم را جذب و وارد بافت‌های بدن خود کنند. Gissel-Nielson& Bisbjerg (1976) در یافته‌های خود به این نتیجه رسیدند که جذب سلنیوم بوسیله شبدر قرمز، جو و خردل سفید در یک خاک ماک (۱۳ درصد ماده آلی) ۱۰ برابر کمتر از بعضی از خاک‌های معدنی می‌باشد. نتایج مطالعات دیگر نیز نشان داد که با افزایش مواد آلی، جذب سلنیوم در گیاه کاهش می‌یابد (Davies & Watkinson, 2006).

مدل رگرسیون خطی میان غلظت سلنیوم در خاک و گیاه با خصوصیات خاک

درجدول (۴)، ضرایب همبستگی میان غلظت سلنیوم در خاک و گیاه با ویژگی‌های خاک نقاط نمونه‌برداری شده بوسیله مدل رگرسیون خطی چند متغیره نشان داده شده است. هدف از محاسبه ضریب همبستگی این است که بتوان با در دست داشتن یکی از متغیرها، دیگری را پیش‌بینی کرد. ضرایب رگرسیونی بین ویژگی‌های خاک و سلنیوم خاک-گیاه از معادلات بدست آمده به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۶۸ بودند.

جدول ٤. رابطه بین خصوصیات خاک با غلظت سلنیوم در خاک و گیاه توسط مدل رگرسیون خطی چند متغیره

مدل	R^2	RMSE
سلنیوم قابل جذب خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) =۰/۷۸۴-۱/۰۳OC + ۴/۴۳$CaCO_3$-۱/۱۳۲clay	۰/۷۲	۰/۰۱۳۴
غلظت سلنیوم دردانه برنج(میلی گرم بر کیلوگرم) =۹/۰۲۳+۴/۸۸ Soil selenium + ۳/۷$CaCO_3$-۱/۲۴OC - ۰/۹۱sulfate	۰/۶۸	۰/۰۱۹۶



شکل ٤. نقشه توزیع مکانی غلظت سلنیوم خاک(الف)، غلظت سلنیوم گیاه (ب)، درصد کربن آلی خاک (ج)، درصد آهک (د)، درصد رس خاک (ه) و غلظت سولفات خاک (و)

پراکنش جغرافیایی غلظت سلنیوم خاک، گیاه و ویژگی‌های خاک

روش اصلی در این پژوهش برای برآورد و پیش‌بینی غلظت سلنیوم قابل جذب خاک و غلظت سلنیوم در دانه برنج روش رگرسیون خطی چند متغیره بود؛ اما به‌منظور مقایسه نقشه‌ها از روش کریجینگ معمولی نیز استفاده شد. در نقشه کریجینگ، با استفاده از نقاطی که غلظت سلنیوم و ویژگی‌های خاک در آن‌ها اندازه‌گیری شده می‌توان این ویژگی‌ها را در نقاط اندازه‌گیری نشده بدست آورد. بر اساس نقشه خروجی حاصل از روش کریجینگ معمولی، بیش‌ترین مقدار غلظت سلنیوم خاک ۰/۶ و کم‌ترین مقدار آن ۰/۱ درصد تخمین زده شد که این میزان با مقادیر اندازه‌گیری شده در منطقه دارای تفاوت اندکی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، سلنیوم استخراج شده توسط عصاره‌گیر مونو پتاسیم فسفات۰/۱ مولار، نتایج دقیق‌تری از غلظت سلنیوم در خاک و گیاه را ارائه می‌دهد. با توجه به اینکه میانگین غلظت سلنیوم در این منطقه ۰/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم با حداقل و حداکثر ۰/۱۷ و ۰/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در واقع غلظت سلنیوم در تمام نمونه‌های خاک در منطقه مطالعاتی بیشتر از حد آستانه کمبود (۰/۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) گزارش شده توسط Fordyce et al., (2009) بود وهمچنین غلظت سلنیوم در تمام نمونه‌های برنج بیشتر از ۰/۵۵ میکروگرم بر گرم بود (حد بهینه سلنیوم در گیاه ۰/۱ ۰ –۰/۵۵ میکروگرم بر گرم) (Dumont *et al*., 2006)، بنابراین می‌توان گفت که در منطقه مورد مطالعه کمبود سلنیوم وجود ندارد. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت سلنیوم خاک و درصد آهک در خاک، غلظت سلنیوم درگیاه نیز افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که بین غلظت سلنیوم در دانه برنج و میزان ماده آلی، درصد رس و غلظت سولفات در خاک ارتباط منفی معنی‌داری وجود دارد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه جز مناطق دارای کمبود سلنیوم می‌باشد، لذا استفاده از کودهای سلنیومی برای غنی‌سازی محصولات این منطقه الزامی می‌باشد. همچنین برآورد و پیش‌بینی غلظت سلنیوم قابل جذب خاک و غلظت سلنیوم در دانه برنج از روش کریجینگ معمولی نیز نشان داد که سامانه اطلاعات جغرافیایی در کنار سایر اطلاعات می‌تواند ابزار قدرتمندی برای برآورد ویژگی‌های خاک باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Ademi, A., Singh, B.R., Bernhoft, A., & Bytyqi, H. (2021). Concentration of selenium and other minerals and their relationship in soils and fodder plants in Kosovo. *Preprints*, 2021040030.

Alfthan, G., Eurola, M., Ekholm, P., Venäläinen, E.R., Root, T., Korkalainen, K., & Aro, A. (2015). Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 31, 142-147.

Al-Tameemi, H.J., Yassen, M.M., & Al-Amiri, N.J. (2016). Forms of selenium in some southern Iraqi Calcareous soils. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 2 (4), 767-760.

Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S.M., Ok, Y.S., Sebastian, A., Baum, C., & Rinklebe, J. (2017). Trace elements in the soil-plant inter-face: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation–A review. *Earth Science Reviews*, 171, 621-645.

Araujo, A. M., de Lima, Lessa, J.H., de Lima, F.R.D., Raymundo, J.F., Curi, N., Guilherme, L.R.G., & Lopes, G. (2020). Adsorption of selenite in tropical soils as affected by soil management, ionic strength, and soil properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20 (1), 139-148.

Bisbjerg, B., & Gissel-Nielson, G. (1976). The uptake of applied selenium by agricultural plants, *Plant and Soil*. 41, 287-298.

Cary, E.E., Wieczorek, G.A., & Allaway, W.H. (1967). Reactions of selenite-selenium added to soils that produce low-selenium forages. Soil Science Society of America, Proceedings, 31, 21–26.

Diaz-Leyva, C.E., Bacopulos-Mejía, E., Ruiz- Torres, N.A., Ibarra-Jiménez, L., Gonzales-Mo-rales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2017). Irradiation of tomato seeds with Uv-B and UV-C: Impact on germination, vigor and growth. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 8(1), 105-118.

Davies E.B., & Watkinson, J. H. (2006). Uptake of native and applied selenium by pasture species. New Zealand *Journal of Agricultural Research*, 9, 317-327.

Dumont, E., Vanhaecke, F., & Cornelis, R. (2006). Selenium speciation from food source to metabolites: a critical review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 385, 1304–1323.

Fordyce, F.M. (2013). Selenium deficiency and toxicity in the environment. *Essentials of Medical Geology*,

1(5), 375- 416.

Farooqab, M.U., Ishaaq, I., Barutcular, C., Skalicky, M., Maqbool, R., Zhu, J. (2022). Mitigation effects of selenium on accumulation of cadmium and morpho-physiological properties in rice varieties. *Plant Physiology and Biochemistry*, 170, 13-1.

Fan, J., & Zhao, G. (2018). Sorption characteristics and fraction distribution changes of Selenite in soil. *Sustainability*, 10 (7), 2491.

Fordyce, F.M., Brereton, N., Hughes, J., Reay, G., Thomas, L., Walker, A., Luo, W. & Lewis, J. (2009). The selenium content of Scottish soil and food products. *Food Standards Agency Scotland Project* S14042.

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size Analysis. In: Klute, A.(ed.). Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9 (2Ed). American Society of Agronomy, Madison, WI. 383-411.

Hageman, S.P., van der Weijden, R.D., Weijma, J., & Buisman, C.J. (2013). Microbiological selenite to selenite conversion for selenium removal. *Water Research*, 47 (7), 2118–2128.

Kikkert, J., Hale, B., & Berkelaar, E. (2013). Selenium accumulation in durum wheat and spring canola as a function of amending soils with selenite, selenate and or sulphate. *Plant and Soil*, 372, 629-641.

Kieliszek, M. (2019). Selenium—fascinating microelement, properties and sources in food. *Molecules*, 24(7), 1298.

Lawson L.M. & Mason R.P. (2001). Concentration of mercury, methylmercury, cadmium, lead, arsenic and selenium in the rain and stream water of two contrasting watersheds in western Meryland. *Water Research*, 35: 4039–4052.

Lopes, G.,A., Vila, F. W., &Guilherme, L. R. G. (2017). Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. *Cieˆncia e Agrotecnologia*, 41, 605–615.

Li, H.F, McGrath, S.P., & Zhao, F.J. (2008). Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. New Phytol. 178(1), 92-102.

Kang, Y., Yamada, H., Kyuma, K., Hattori, T., & Kigasawa, S. (1991). Selenium in soil humic acid. *Soil Science and Plant Nutrition*, 37 (2), 241–248.

Masscheleyn, P.H., Delaune, R.D., & Patrick, W.H. (1991). Arsenic and selenium chemistry as affected by sediment redox potential and pH. *Journal of Environmental Quality*, 20, 522-27.

Melaku, S., Dams, R., & Moens, L. (2005). Determination of trace elements in agricultural soil samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry: Microwave acid digestion versus aqua regia extraction. *Analytica Chemica Acta*, 543,117-123.

Mikkelsen, R.L., Page, A.L., & Bingham F.T. (1989). Factors affecting selenium accumulation by agricultural crops. *Selenium in Agriculture and the Environment*, 23, 65-94.

Ming-Ming, F., Huang, B., Meng-Meng, J., Wen-You, H., Wei-Xia, S., & Weindorf, D.C. (2015). Effect of intensive greenhouse vegetable cultivation on selenium availability in soil. *Pedosphere*, 25 (3), 343–350.

Munier-Lamy, C., Deneux-Mustin, S., Mustin, C., Merlet, D., Berthelin, J., & Leyval, C. (2007). Selenium bioavailability and uptake as affected by four different plants in a loamy clay soil with particular attention to mycorrhizae inoculated ryegrass. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97(2-3), 148-158.

Nazemi, L., Nazmara, S.H., Eshraghyan, M.R., & Shahtaheri, S.J. (2012). Selenium status in soil, water and essential crops of Iran. I*ranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 9 (1), 11.

Olson, O.E., Whitehead, E.I., & Moxon, A.L. (1942). Occurrence of soluble selenium in soils and its availability to plants. *Soil Science*, 54, 47–53.

Ozkan, A., & Uygur, V. (2022). Relationships between physico-chemical properties of the soil and selenium speciations from amik plain, turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 31, 3805-3818.

Pilon-Smits, E.A.H., Bañuelos. G.S., & Parker, D.R. (2014). Uptake, Metabolism, and Volatilization of Selenium by Terrestrial Plants. In: Chang AC and Brawer Silva D, editors. Salinity and Drainage in San Joaquin Valley, California: Science, Technology, and Policy. Dordrecht: Springer Netherlands. p. 147-164.

Rayman, M.P. (2020). Selenium intake, status, and health: a complex relationship. Hormones (Athens) 19(1):9–14.

Jump, R., & Sabey, B. (1989). Soil test extractants for predicting selenium in plants. In Selenium in agriculture and the environment. Ed. EW Jacobs. pp. 95–106 SSSA, Madison WI Special Publication No. 23. Soil Science Society of America. Inc Neubauer.

Reilly, C. (2006). Selenium in food and health. 2nd edition. New York: Springer.2006:164–165.

Rayman M.P. 2020. Selenium intake, status, and health: a complex relationship. *Hormones* (Athens), 19(1): 9–14.

Renha, S.P. (1983). Clay dispersion in relation to changes in the electrolyte composition of dialyzed red- brown earths. *Journal of Soil Science*, 34, 723-732.

Reuter, D.J., Robinson, J.B, Peverill, K.I., & Price, G.H. (1986). Guidelines for collecting, handling and analyzing plant materials. In Plant Analysis an Interpretation Manual. Eds. D J Reuter, and J B Robinson. pp. 20–35 Inkata Press, Melbourne, Australia.

Rhoades, J.D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5, 417-435.

Reis, A.R., Guilherme, L.R.G., Moraes, M.F., & Ramos, S.J. (2014). High-selenium upland rice: agronomic biofortification strategies to improve human nutrition. In: Banuelos GS, Lin Z-Q, Yin X (eds) Selenium in the environment and human health. Taylor & Francis Group, London, pp 113–114.

Saha, U., Fayiga A., & Sonon L. (2017). Selenium in the soil-plant environment: a review. *International Journal of Applied Agricultural Sciences*, 3 (1), 1-18.

Spackman, L.K., Vance, G.F., & Vicklund, L.E. (1994). Standard operating procedures for the sampling and analysis of selenium in soil and overburden/spoil material. Research Publication MP) 82, University of Wyoming, Laramie, WY pp. 71–82.

Sparks, D.L. (1996). Methods of soil analysis (SSSA, ASA Publishing: Madison).

Thiry, C., Ruttens, A., Pussemie,r L., & Schneider, V.J. (2013). An in vitro investigation of species-dependent intestinal transport of selenium and the impact of this process on selenium bioavailability. *British Journal of Nutrition*, 28 (12), 2126-34.

Uren, N.C. (2013). Cobalt and Manganese. In: Alloway BJ, editor. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Dordrecht: Springer Netherlands. p. 335-366.

Uygur, V., Irvem, A., Karanlik, S. & Akis, R. (2010) Mapping of total nitrogen, available phosphorous and potassium in Amik Plain, Tur-key. *Environmental Earth Sciences*. 59(5), 1129-1138.

Vance, G.F. (2000). Problems associated with selenium leaching from waste shale. In W L Daniels and S G.

Vinceti, M., Filippini, T., Giovane, C.D., Dennert, G., Zwahlen, M., & Brinkman, M. (2018). Selenium for preventing cancer. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 12, 26-34.

Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37 (1), 29-38.

White,P.J.,Bowen,H.C.,Parmaguru,P.,Fritz,M.,Spracklen,W.P.,& Spiby, R.E. (2004). Interactions between selenium and Sulphur nutritionin Arabidopsis thaliana. *Journal of Experimental Botany*, 55, 1927–1937.

Williams, C., & Thomton, I. (1973). The use of soil extractants to estimate plant available molybdenum and selenium in potentially toxic soils. *Plant Soil*, 39, 149–159.

Xing, K., Zhou, S., Wu, X., Zhu, Y., Kong, J., Shao, T., & Tao, X. (2015). Concentrations and characteristics of selenium in soil samples from Dashan Region, a selenium-enriched area in China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61 (6), 889-897.

Xu, Y., Li, Y., Li, H., Wang, L., Liao, X., Wang, J., & Kong, C. (2018). Effects of topography and soil properties on soil selenium distribution and bioavailability (phosphate extraction): A case study in Yongjia County, China. *Science of the Total Environment*, 633, 240-248.