Shahid Bahonar University of Kerman
Agricultural Biotechnology Journal
Iranian Biotechnology Society
Print ISSN: 2228-6705 Online ISSN: 2228-6500

Phytoremediation of uranium-contaminated soils by wheat and sunflower plants

Seyedeh Golshan Hosseini

Master of Chemical Engineering, Biofuel & Renewable Energy Research Center, Department of Biotechnology, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail address: Golshan_ho2ir@yahoo.com

Mostafa Rahimnejad

*Corresponding author. Professor, Biofuel & Renewable Energy Research Center, Department of Biotechnology, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail address: rahimnejad@nit.ac.ir

Rosan Zokhtareh

Ph.D. Student, Biofuel & Renewable Energy Research Center, Department of Biotechnology, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail address: zokhtareh.rose67@nit.ac.ir

Abstract

Objective

Nowadays, environmental pollution and its consequences have become one of the most serious human concerns, and management of pollution caused by the entry of hazardous substances such as radionuclides, pesticides, and heavy metals into the environment is of particular importance. Advances in technology and nuclear knowledge have led to increasing of release and accumulation of nuclear waste and radionuclides in the environment. Mining, production and processing of nuclear fuels and military operations are the most important causes of nuclear waste production. Because of the possibility of transferring radionuclides to the food chain, soil contamination with these pollutants creates many hazards to human health. There are various physical and chemical methods to eliminate nuclear waste, but most of them are expensive and complex. Phytoremediation is an emerging technology that uses plants and their associated microbes to clean up the polluted environment. This process is very simple, practical, economical and environmentally friendly. In this research, wheat and sunflower plants were used to remove

uranium from soils of Saghand and Bandar Abbas mine's districts. Also, the effect of different concentrations of citric acid on the plants accessibility to this element was investigated.

Materials and methods

PH meter and X-ray fluorescence spectroscopy were used to determine the pH and constituents of the soil. Also, liquid scintillation analysis was applied to determine the concentration and amount of uranium absorption.

Results

In general, sunflower had better efficiency in absorption of uranium from soil of Saghand. In the case of uranium absorption from soil of Bandar Abbas, Wheat had better efficiency in the absence and low concentrations of citric acid, but with increasing acid concentration the accessibility of sunflower to the uranium in the soil increased.

Conclusions

In comparison to wheat sunflower had a better performance in uranium uptake from Saghand soil before and after acid addition. In the case of uranium uptake from Bandar Abbas soil, wheat had better performance in the absence of citric acid and in its low concentrations, while with increasing acid concentration, the uranium uptake by sunflower increased.

Keywords: Phytoremediation, Radionuclide, Sunflower, Uranium, Wheat

Paper Type: Research Paper.

Citation: Hosseini SG, Rahimnejad M, Zokhtareh R (2023) Phytoremediation of uranium-contaminated soils by wheat and sunflower plants. *Agricultural Biotechnology Journal* 15 (3), 57-76.

Agricultural Biotechnology Journal 15 (3), 57-76. DOI: 10.22103/jab.2023.17705.1324

Received: April 14, 2023. Received in revised form: June 07, 2023.

Accepted: June 08, 2023. Published online: September 30, 2023.

Publisher: Faculty of Agriculture and Technology Institute of Plant Production, Shahid Bahonar University of Kerman-Iranian Biotechnology Society.

© the authors

مجله بیوتکنولوژی کشاورزی
شاپا چاپی: ۶۷۰۵-۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۶۵۰۰-۲۲۲۸

گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به اورانیوم توسط گیاهان گندم و آفتاب‌گردان

سیده گلشن حسینی

دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات سوخت‌های زیستی و انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: Golshan_ho2ir@yahoo.com

مصطفی رحیم‌نژاد

*نویسنده مسئول: استاد، مرکز تحقیقات سوخت‌های زیستی و انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: rahimnejad@nit.ac.ir

رزان زختاره

دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات سوخت‌های زیستی و انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: zokhtareh.rose67@nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵ تاریخ دریافت فایل اصلاح شده نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸

چکیده

هدف: امروزه، آلودگی محیط زیست و پیامدهای آن به یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های بشر تبدیل شده است و مدیریت آلودگی ناشی از ورود مواد خطرناکی مانند رادیونوکلئیدها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیشرفت در فناوری و دانش هسته‌ای موجب افزایش رهایش و تجمع پسماندهای هسته‌ای و رادیونوکلئیدها در محیط زیست شده است. استخراج از معادن، تولید و پردازش سوخت‌های هسته‌ای و عملیات نظامی از مهمترین علل تولید پسماندهای هسته‌ای هستند. به‌دلیل امکان انتقال رادیونوکلئیدها به زنجیره‌ی غذایی، آلودگی خاک با این آلاینده‌ها خطرات بسیاری برای سلامت انسان ایجاد می‌کند. روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای زدودن پسماندهای هسته‌ای وجود دارند؛ اما اغلب آن‌ها گران‌قیمت و پیچیده هستند. گیاه‌پالایی فناوری نوظهوری است که برای پاکسازی محیط زیست آلوده از گیاهان و میکروب‌های وابسته به آن‌ها استفاده می‌کند. این فرآیند، بسیار ساده، کاربردی، مقرون‌به‌صرفه و دوست‌دار محیط زیست است. در این پژوهش از گیاهان گندم و آفتاب‌گردان برای حذف اورانیوم از خاک‌های مناطق معدنی ساغند و بندرعباس استفاده شد. همچنین، اثر غلظت‌های مختلف اسید سیتریک بر میزان دسترس‌پذیری گیاهان به این عنصر بررسی شد.

مواد و روش‌ها: برای تعیین pH و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی خاک از دستگاه pHمتر و آنالیز طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعه‌ی ایکس استفاده شد. همچنین، آنالیز سنتیلاسیون مایع برای تعیین غلظت و میزان جذب اورانیوم به‌کار گرفته شد.

نتایج: به‌طورکلی، آفتاب‌گردان در جذب اورانیوم از خاک ساغند عملکرد بهتری داشت. درمورد جذب اورانیوم از خاک بندرعباس نیز در عدم حضور اسید سیتریک و در غلظت‌های کم آن، گندم عملکرد بهتری داشت؛ اما با افزایش غلظت اسید دسترس‌پذیری آفتاب‌گردان به اورانیوم موجود در خاک افزایش پیدا کرد.

نتیجه‌گیری: درمقایسه با گندم، آفتاب‌گردان در جذب اورانیوم از خاک ساغند پیش و پس از افزودن اسید عملکرد بهتری داشت. درمورد جذب اورانیوم از خاک بندرعباس نیز در حالت عدم استفاده از اسید سیتریک و در غلظت‌های کم آن، گندم عملکرد بهتری داشت؛ درحالی‌که با افزایش غلظت اسید میزان جذب اورانیوم توسط آفتاب‌گردان افزایش پیدا کرد.

کلیدواژه‌ها: آفتاب‌گردان، اورانیوم، رادیونوکلئید، گندم، گیاه‌پالایی.

نوع مقاله: پژوهشی.

استناد: حسینی سیده گلشن، رحیم‌نژاد مصطفی، زختاره رزان (۱۴۰۲) گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به اورانیوم توسط گیاهان گندم و آفتاب‌گردان. *مجله بیوتکنولوژی کشاورزی*، ۱۵(۳)، ۵۷-۷۶.

Publisher: Faculty of Agriculture and Technology Institute of Plant Production, Shahid Bahonar University of Kerman-Iranian Biotechnology Society.

© the authors

مقدمه

امروزه، آلودگی محیط زیست و پیامدهای ناشی از آن یکی از جدی‌ترین دغدغه‌های بشر است. طی دو دهه‌ی اخیر توجه گسترده‌ای به مدیریت آلودگی ناشی از مواد خطرناک ازجمله رادیونوکلئیدها[1]، فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها شده است. آلودگی رادیواکتیو[2] یکی از مهم‌ترین موارد در میان عوامل آلوده‌کننده‌ی زیست‌کره[3] است (Dubchak & Bondar 2019). رادیونوکلئیدها به‌صورت طبیعی وجود دارند و می‌توانند به‌صورت مصنوعی هم تولید شوند (Das 2012). انفجارهای هسته‌ای، تأسیسات چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، فرزکاری[4]، استخراج اورانیوم از معادن و پردازش آن و دفع پسماندهای رادیواکتیو ازجمله دلایل اصلی ورود رادیونوکلئیدها به محیط زیست هستند (Dubchak & Bondar 2019). به‌طور میانگین ٪ ۷۹ از پرتویی که انسان درمعرض آن

1. Radionuclides
2. Radioactive
3. Biosphere
4. Milling

قرار می‌گیرد از منابع طبیعی، ٪ ۱۹ از کاربردهای پزشکی و ٪ ۲ از تسلیحات و صنایع هسته‌ای نشأت می‌گیرد (Zhu & Shaw 2000). اورانیوم (U)، رادیوم (Ra)، توریوم (Th)، روبیدیوم (Rb)، سزیم (Cs)، پلوتونیم (Pu)، نپتونیوم (Np) و استرانسیم (Sr) برخی از رادیونوکلئیدهای آلاینده‌ی محیط زیست هستند. رادیونوکلئیدها در تمام نقاط جهان در منابع آبی، خاک و هوا شناسایی شده‌اند. رادیونوکلئیدهای موجود در خاک می‌توانند در منابع آبی حل شوند؛ با مواد آلی خاک ترکیب شوند یا به‌صورت جامدات خالص یا مخلوط رسوب کنند (Das 2012). عدم تحرک این عناصر پرتوزا در لایه‌ی بالایی خاک موجب بروز مشکلات محیط زیستی می‌شود. اختلالات عصبی، ناباروری، نقص‌های ژنتیکی، حالت تهوع، سوختگی پوست و سرطان‌های مختلف مانند سرطان ریه، سینه، روده، تخمدان و معده بخشی از عوارض قرار گرفتن درمعرض رادیونوکلئیدها هستند (Gbadamosi et al. 2018; Masok et al. 2016; Zhang et al. 2015). اورانیوم، سنگین‌ترین عنصر رادیواکتیو است و به‌صورت ۳ ایزوتوپ[۵] ^{234}U، ^{235}U و ^{238}U در طبیعت یافت می‌شود که ^{238}U با نیمه‌عمر[۶] ۴/۵ میلیارد سال فراوان‌ترین (٪ ۹۹/۲۷) و پایدارترین آن‌ها است. اورانیوم در کانی‌های مختلف، سنگ‌های فسفات و سنگ‌های معدنی وجود دارد و جزء عناصر کم‌مقدار پوسته‌ی زمین محسوب می‌شود. میزان جذب اورانیوم در بدن به حالت فیزیکی آن بستگی دارد و پس از جذب اغلب در استخوان‌ها، کبد و کلیه‌ها رسوب می‌کند. نارسایی کلیوی حاد، آسیب به DNA[۷] و اختلالات ژنتیکی، بیماری‌های قلبی و کبدی و ایجاد سرطان خون، کلیه، ریه و روده‌ی بزرگ ازجمله پیامدهای مسمومیت با اورانیوم هستند (Corlin et al. 2016). باتوجه به مضرات بی‌شمار رادیونوکلئیدها و خطرات آن‌ها برای محیط زیست و موجودات زنده، پاکسازی خاک از این ترکیبات امری ضروری است. روش‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی و حرارتی متعددی برای پاکسازی خاک از آلاینده‌ها وجود دارد. اگرچه پالایش خاک ازطریق روش‌های فیزیکی و شیمیایی مانند حفاری و خاک‌برداری، خاک‌شویی، اکسایش و احیا، تبادل یون، الکتروکینتیک[۸] و شیشه کردن[۹] امکان‌پذیر است، این روش‌ها به تجهیزات ویژه و افراد متخصص نیاز دارند. به‌علاوه، این روش‌ها پرهزینه هستند و موجب اختلال در ساختار خاک و آلوده شدن بخش‌های دیگر محیط زیست می‌شوند. بنابراین، ارائه‌ی روشی مطمئن که ضمن برطرف کردن آلودگی، کم‌هزینه باشد و اثرات جانبی نامطلوبی بر محیط زیست نگذارد، بسیار مهم است (Ramalingam et al. 2019; Sharma et al. 2015). گیاه‌پالایی[۱۰] یک روش زیستی نوین است که در آن از گیاهان برای زدودن انواع آلاینده‌های آلی و معدنی از خاک‌های آلوده استفاده می‌شود. این روش ساده، ارزان، درجا و سازگار با محیط زیست بوده و برای پاکسازی سطوح وسیع مناسب است. در این روش، آلاینده‌ها توسط گیاهان جذب شده و پس از برداشت گیاهان، از خاک زدوده می‌شوند. انتخاب گیاه مناسب در فرآیند گیاه‌پالایی به شرایط محیطی، نوع و میزان آلودگی، نوع خاک، میزان تحمل گیاه دربرابر آلاینده و توانایی سیستم آوندی در انتقال آلاینده‌ها بستگی دارد (Sha et al. 2019;

5. Isotope
6. Half-life
7. Deoxyribonucleic acid
8. Electrokinetic
9. Vitrification
10. Phytoremediation

Alsabbagh & Abuqudaira 2017; Sarwar et al. 2017; Mahar et al. 2016). تاکنون از گیاهان مختلفی مانند آفتاب‌گردان (Alaboudi et al. 2018)، خردل هندی (Gurajala et al. 2019; Goswami & Das 2015)، گندم (Gangola et al. 2017)، شبدر (Eskandari & Alizadeh-Amraie 2017)، یونجه (Alves et al. 2018)، ذرت (Cheng et al. 2015) و جو (Ali et al. 2017) در این فرآیند استفاده شده است. همچنین، مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزودن ترکیبات شلاته‌کننده مانند اسیدهای آلی به خاک، مانع تشکیل رسوب یا جذب سطحی آلاینده‌ها شده و میزان جذب آن‌ها توسط گیاهان را افزایش می‌دهد (Chen et al. 2018; Wiszniewska et al. 2016). برای مثال، در یک آزمایش گل‌خانه‌ای (کاشت در گلدان) مشخص شد که افزودن ترکیبات شلاته‌کننده مانند اسید سیتریک، اسید اتیلن دی آمین دی سوکسینیک و اسید اگزالیک به خاک به‌صورت مکرر، بر گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به اورانیوم توسط گیاه *ماکلیا کورداتا*[11] اثر مثبت دارد. به‌این شکل که pH خاک پس از افزودن ترکیبات شلاته‌کننده کاهش یافت و این امر به افزایش حلالیت اورانیوم در خاک‌های آلوده و افزایش چشم‌گیر غلظت اورانیوم محلول‌های خاک منجر شد. همچنین، اسید سیتریک بیشترین اثر در جذب اورانیوم را از خود نشان داد و اسید اتیلن دی آمین دی سوکسینیک و اسید اگزالیک در جایگاه‌های بعدی قرار گرفتند (Hu et al. 2019). یک آزمایش گل‌خانه‌ای دیگر نیز برای بررسی توانایی اسید سیتریک، اسید اگزالیک، نیتریلو تری استیک اسید و اتیلن دی آمین تترا استیک اسید بر گیاه‌پالایی باقی‌مانده‌های اورانیوم توسط خردل هندی انجام شد. در این مطالعه نیز اسید سیتریک بیشترین اثر را بر افزایش جذب اورانیوم داشت و اتیلن دی آمین تترا استیک اسید، اسید اگزالیک و نیتریلو تری استیک اسید به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، تجمع اورانیوم در ریشه‌ها بیشتر از شاخه‌ها بود؛ به‌طوری‌که با افزودن ۲/۵ میلی‌مول اسید سیتریک به هر کیلوگرم خاک، مقدار اورانیوم جذب‌شده در ریشه‌ها سه برابر شد (Jagetia & Sharma 2013). اثر افزودن اسید سیتریک، اسید اگزالیک و اسید اتیلن دی آمین دی سوکسینیک به‌عنوان ترکیبات شلاته‌کننده بر گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به اورانیوم و کادمیم توسط گیاه آفتاب‌گردان نیز مورد بررسی قرار گرفت. این ترکیبات دو ماه پس از رشد گیاه در غلظت‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم به خاک اضافه شدند. نتایج حاصل نشان دادند که افزایش اسید سیتریک به خاک درمقایسه با اسید اگزالیک و اسید اتیلن دی آمین دی سوکسینیک، مقدار جذب اورانیوم را به‌طور قابل توجهی افزایش داد؛ درحالی‌که درمورد کادمیم، اسید اتیلن دی آمین دی سوکسینیک بهترین عملکرد را داشت. همچنین، بیشترین مقدار جذب اورانیوم و کادمیم با افزودن اسیدها در غلظت ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم حاصل شد که به‌ترتیب ٪ ۱۷۷/۴۸ و ٪ ۱۸۱/۵۱ بیشتر از حالت عدم استفاده از ترکیبات شلاته‌کننده بودند (Chen et al. 2020). در این پژوهش، باتوجه به پتانسیل استخراج گیاهی زیاد گندم و آفتاب‌گردان و توانایی آن‌ها در حذف رادیونوکلئیدها از خاک، دردسترس بودن گیاهان، سازگاری با خاک و اقلیم مورد نظر، مقاومت گیاهان دربرابر آلودگی خاک، رشد سریع گندم و امکان رشد آفتاب‌گردان در خاک‌های مختلف از این گیاهان (رقم هیبرید آذرگل آفتاب‌گردان و مرودشت گندم) جهت کشت و گیاه‌پالایی استفاده شد (Alsabbagh &

11. *Macleaya Cordata*

Abuqudaira 2017; Lee 2013; Gupta et al. 2018). همچنین، ازآنجایی‌که pH اسیدی دسترس‌پذیری خاک به رادیونوکلئیدها را افزایش می‌دهد (Zhang et al. 2017; Machekposhti et al. 2017)، از غلظت‌های مختلف اسید سیتریک برای بررسی روند و میزان جذب اورانیوم توسط گیاهان بهره گرفته شد.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی و تجهیزات: اسید کلریدریک (HCL)، اسید نیتریک (HNO_3) و اسید سیتریک ($C_6H_8O_7$) از شرکت مرک[12] (آلمان) خریداری شدند. هیدروژن پراکسید (H_2O_2) با خلوص ٪ ۳۰ از شرکت کارلو اربا[13] (ایتالیا) و Optiphase Hisafe 3 از شرکت پرکین المر[14] (آمریکا) تهیه شدند. کود NPK 20 20 20 از شرکت ایدروپلنت[15] (ایتالیا) خریداری شد. مقداری خاک از آنومالی منطقه‌ی یک معدنی ساغند در نزدیکی شهر یزد (مختصات جغرافیایی ساغند: طول جغرافیایی '۲۴۱۸ °۵۵ شرقی و عرض جغرافیایی '۵۲۹۴ °۳۲ شمالی) و مقداری خاک از بلوک ۱۰۵ منطقه‌ی معدنی بندرعباس (مختصات جغرافیایی بندرعباس: طول جغرافیایی '۲۶۶۶ °۵۶ شرقی و عرض جغرافیایی '۱۸۳۲ °۲۷ شمالی) جمع‌آوری شده و مقداری خاک گلدان نیز از گل‌فروشی تهیه شد. خاک خریداری‌شده دارای بافت لومی، pH = ۶/۵۲ و هدایت الکتریکی[16] (EC) ۰/۶۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. تجهیزات مورد استفاده نیز عبارت بودند از: ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم مدل GR300 ساخت کشور ژاپن، pHمتر مدل FE20/EL20 ساخت کشور سوئیس، حمام آب مدل NB-301 ساخت کشور کره‌ی جنوبی، همزن مغناطیسی مدل MS-S، همزن مغناطیسی همراه با گرم‌کن مدل MS-H-S و آون مدل UNB-400 ساخت کشور آلمان، کوره مدل LEF-203P / LEF-205P / LEF-215P / LEF-230P ساخت کشور آمریکا، سانتریفیوژ مدل VS-24SMTi ساخت کشور کره، دستگاه شمارنده‌ی سنتیلاسیون مایع[17] (LSC) و دستگاه طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعه‌ی ایکس[18] (XRF) مدل ED2000 ساخت کشور انگلستان.

آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌های خاک: باتوجه به بافت سنگی خاک‌های ساغند و بندرعباس، از دستگاه سنگ‌شکن برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده و درنهایت مخلوطی از اندازه‌های ۲ سانتی‌متری، کمتر از ۱ سانتی‌متری و خاک پودری حاصل شد. برای تعیین pH خاک از دستگاه pHمتر استفاده شد. ابتدا، ۱۵ میلی‌لیتر آب مقطر به ۱۵ گرم خاک افزوده شد و این ترکیب به‌مدت ۳۰ دقیقه بااستفاده از همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس، مخلوط حاصل به‌مدت ۲۴ ساعت کنار گذاشته شد تا املاح کاملاً حل شده و آنیون‌ها و کاتیون‌ها به‌طور یکنواخت توزیع شوند. پس از این مدت، pHمتر بااستفاده از دو بافر با pHهای ۴ و ۷ کالیبره شده

12. Merck
13. Carlo Erba
14. PerkinElmer
15. Idroplant
16. Electric conductivity
17. liquid scintillation counter
18. X-ray fluorescence

و با قرار دادن پروب[19] pHمتر درون گل اشباع، pH خاک اندازه‌گیری شد. برای تعیین اجزای تشکیل‌دهنده‌ی خاک نیز از آنالیز XRF استفاده شد. همچنین برای تعیین برخی از ویژگی‌ها نظیر هدایت الکتریکی، درصد مواد آلی[20] (O.M) و بعضی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها، نمونه‌های خاک به آزمایشگاه خاک منتقل شدند.

کشت گیاهان: از ۳۶ گلدان پلاستیکی برای کاشتن گیاهان استفاده شد. ۵ کیلوگرم خاک ساغند در ۱۶ گلدان، ۳ کیلوگرم خاک بندرعباس در ۱۶ گلدان و ۵ کیلوگرم خاک گلدانی در ۴ گلدان دیگر به‌عنوان نمونه‌ی شاهد برای مقایسه‌ی رشد گیاهان نسبت به دو نوع خاک مورد آزمایش قرار داده شدند. در ۸ گلدان حاوی خاک ساغند، ۸ گلدان حاوی خاک بندرعباس و ۲ گلدان حاوی خاک گلدانی، گندم کاشته شد. همین تعداد گلدان و با همین ترتیب نیز برای کاشتن آفتاب‌گردان مورد استفاده قرار گرفتند. قطر و ارتفاع گلدان‌های مورد استفاده ۲۵ سانتی‌متر بود و در گلدان‌های حاوی گندم ۲۵ بذر و در گلدان‌های حاوی آفتاب‌گردان ۱۲ بذر کاشته شد. بذرهای گیاهان در عمق ۲ سانتی‌متری خاک قرار داده شده و گلدان‌ها تا زمان جوانه زدن هرروز آبیاری شدند. همچنین، از ۳ عدد لامپ جهت شبیه‌سازی نور خورشید و بهبود رشد گیاهان استفاده شد. بعد از جوانه زدن، لامپ‌ها ۱۸ ساعت در روز (از ۲ بعدازظهر تا ۸ صبح) روشن بودند و آبیاری هر دو روز یک بار انجام شد و هر ۱۵ روز کود NPK 20 20 20 از نوع کریستالی و به‌صورت محلول در آب با غلظت ۰/۶ گرم بر لیتر به خاک گلدان‌ها اضافه شد؛ زیرا کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار بر رشد گیاه اثر مثبت دارند و موجب افزایش رشد ریشه، چگالی و تجمع رادیونوکلئیدها می‌شوند. درادامه، رشد گیاهان به‌صورت هفتگی مورد بررسی قرار گرفت و پس از گذشت یک هفته گیاهچه‌های جوان آفتاب‌گردان تنک شدند و ۵ بوته‌ی قوی‌تر در گلدان‌ها باقی ماندند. ۱ ماه بعد از رشد گیاهان گندم و آفتاب‌گردان، ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سیتریک با غلظت‌های ۰/۵، ۲/۵ و ۱۲/۵ مول بر لیتر به‌ازای هر کیلوگرم خاک به هر دو عدد از گلدان‌ها اضافه شد (دو بار در یک هفته). به گلدان‌های باقی‌مانده هیچ اسیدی اضافه نشد تا اثر اسید سیتریک در افزایش دسترس‌پذیری گیاهان به اورانیوم و درنتیجه میزان افزایش جذب این عنصر توسط گیاهان مشخص شود. پس از گذشت ۱ هفته، برداشت انجام شد. همه‌ی آزمایش‌ها ۲ بار تکرار شده و میانگین نتایج گزارش شده است.

آماده کردن گیاهان برای آنالیز: ابتدا، گیاهان از گلدان خارج شده و تمام سنگ‌ها و اجزای درشت خاک از گیاه جدا شدند. سپس برای پاکسازی کامل و زدوده شدن گل‌ولای باقی‌مانده، ریشه‌ها و ساقه‌ها ابتدا با آب و بعد از آن با آب مقطر شسته شدند. پس از آن، گیاهان به‌مدت ۷۲ ساعت داخل آون با دمای ۷۰ درجه‌ی سانتیگراد قرار داده شدند تا خشک شوند و وزن خشکشان اندازه‌گیری شد. سپس برای انجام مراحل بعدی آزمایش‌ها، گیاهان به‌مدت ۳ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتیگراد در کوره حرارت داده شدند تا کاملاً به خاکستر تبدیل شوند.

19. Probe
20. Organic matter

هضم اسیدی گیاهان برای انجام آنالیز سنتیلاسیون مایع: ۱ میلی‌گرم از خاکستر هر گیاه در ۲۰ میلی‌لیتر از مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک با نسبت ۳ به ۱ (حجمی/حجمی) حل شده و برای هضم بهتر خاک، بشر حاوی محلول به‌مدت ۱ ساعت روی همزن مغناطیسی همراه با گرم‌کن با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه حرارت داده شد. سپس، محلول حاصل از کاغذ صافی عبور داده شد و برای حصول اطمینان از عبور کامل محلول، دیواره‌ی کاغذ با آب مقطر و چند قطره اسیدکلریدریک شست‌وشو داده شد. پس از آن، کاغذ صافی در ۲۰ میلی‌لیتر از مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک با نسبت ۳ به ۱ (حجمی/حجمی) حل شده و به‌مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. محلول رویی حاصل از سانتریفیوژ با محلول قبلی مخلوط شد و محلول نهایی بااستفاده از گرم‌کن حرارت داده شد تا اسید آن تبخیر شود. بعد از تبخیر اسید و کاهش حجم محلول به ۵ میلی‌لیتر، از هیدروژن پراکسید برای از بین بردن رنگ نمونه استفاده شد. سپس، Optiphase Hisafe 3 به‌اندازه‌ای به نمونه اضافه شده و هم زده شد تا درنهایت محلول شفاف سفیدرنگی حاصل شود. علت افزودن این ماده، ایجاد توانایی عبور دادن نور تابیده‌شده توسط دستگاه LSC در محلول و تشخیص طول موج‌ها و درنتیجه غلظت مواد بود.

نتایج و بحث

ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک: جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج، هر دو نمونه خاک حاوی مواد رادیواکتیو و فلزات سنگین هستند که بر روند رشد گیاهان اثرگذار است. همچنین، pH و هدایت الکتریکی خاک‌های ساغند و بندرعباس به‌ترتیب برابر با ۹ و ۸/۸ و ۳/۴ و ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر است. هدایت الکتریکی اغلب به‌عنوان معیاری برای شوری خاک درنظر گرفته می‌شود و شوری شاخصی برای میزان نمک‌های موجود در خاک است. اعداد مربوط به pH در هر دو نمونه خاک ساغند و بندرعباس بیان‌گر قلیایی و سدیمی بودن خاک است. همچنین، به‌نظر می‌رسد که نسبت میزان سدیم قابل جذب[۲۱] (SAR) در هر دو نمونه بیشتر از ۱۵ باشد. بنابراین، در هر دو نمونه علاوه بر pH مقدار سدیم قابل جذب نیز زیاد است؛ زیرا pH زمانی قلیایی است که خاک حاوی عناصری مانند سدیم و پتاسیم باشد. همچنین باتوجه به هدایت الکتریکی نمونه‌ها، خاک‌ها شور محسوب می‌شوند و بهتر است در مناطق حاوی این خاک‌ها از گیاهان مقاوم به شوری استفاده شود. کلسیم و سدیم کاتیون‌های غالب در هر دو نمونه خاک و سولفات‌ها آنیون غالب هستند. با وجود مشخص نشدن آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات در خاک‌ها، باتوجه به این‌که مقدار pH نمونه‌ها از ۸/۲ بیشتر است، به‌نظر می‌رسد که هر دو نمونه حاوی کربنات‌ها و بی‌کربنات‌های متعدد هستند. در این شرایط از واکنش کربنات‌ها با سدیم موجود در خاک، نمک سدیم کربنات تشکیل می‌شود. این مسأله عامل مهمی است که نشان می‌دهد هر دو نمونه خاک، قلیایی و سدیک[۲۲] هستند. همچنین

21. Sodium Adsorption Ratio
22. Sodic

مقدار ماده‌ی آلی گزارش‌شده در هر دو نمونه خاک، نشان‌دهنده‌ی کمبود مواد آلی در خاک‌ها است. به‌علاوه، سدیمی بودن خاک بر ساختار فیزیکی آن اثرگذار است و بافت سخت و سنگی بودن خاک تأییدی بر سدیمی بودن آن است. مقدار عناصر ضروری برای رشد گیاه مانند فسفر، پتاسیم و نیتروژن در خاک‌های سدیک کم است و استفاده از کود برای اصلاح ویژگی‌های این نوع خاک‌ها ضروری است.

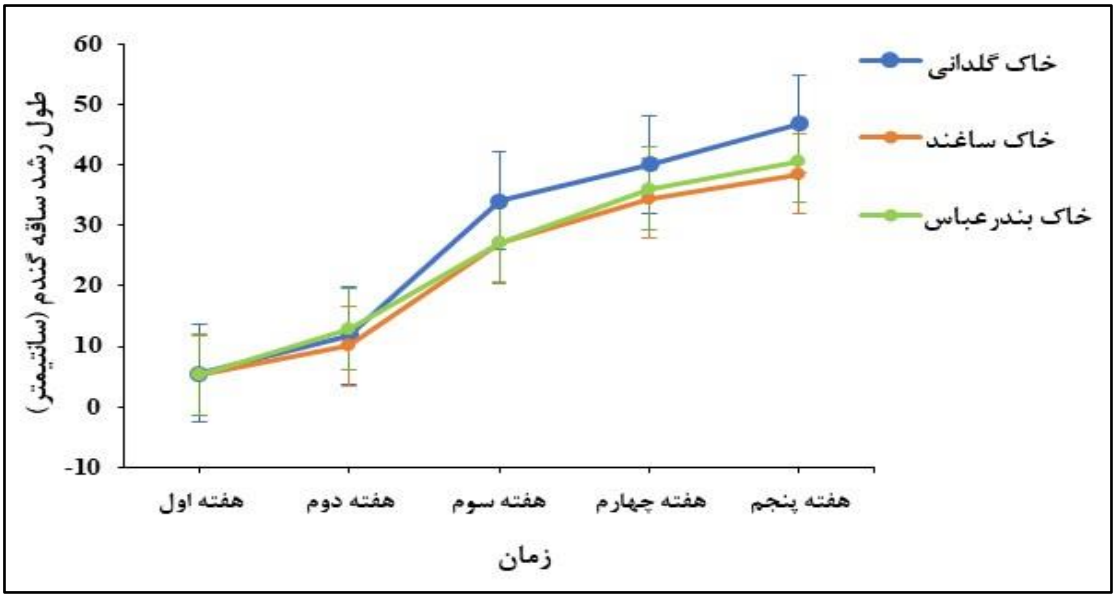
جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1. Some properties of the studied soils

Soil of Bandar Abbas خاک بندرعباس	Soil of Saghand خاک ساغند	Property ویژگی
8.8	9	pH
7.5	3.4	EC (dS/m)
0.3	0.5	O.M (%)
144	360	Mg^{2+} (ppm)
3000	1800	Ca^{2+} (ppm)
11000	7000	SO_4^{2-} (ppm)
905	940	Cl^- (ppm)
-	115	Ba (ppm)
-	522	Cr (ppm)
-	168	Co (ppm)
-	446	Ni (ppm)
800	450	U (ppm)
-	49	Th (ppm)
-	122	Sr (ppm)
215	150	Ra (ppm)

ر شد گیاهان: ر شد گیاهان گندم و آفتاب‌گردان در خاک‌های ساغند، بندرعباس و گلدانی به‌مدت ۵ هفته مورد برر سی قرار گرفت و نتایج حاصل درادامه آورده شده است.

ر شد گندم: شکل ۱ روند ر شد گیاه گندم را طی دوره‌ی انجام آزمایش‌ها نشان می‌دهد. باتوجه به شکل مشخص ا ست که ر شد گندم در خاک ساغند اندکی کمتر از خاک بندرعباس است و در نمونه‌ی شاهد پس از هفته‌ی دوم ر شد قابل توجهی نسبت به خاک‌های ساغند و بندرعباس دارد. این نتیجه ن شان می‌دهد که ر شد گیاه تحت تأثیر ح ضور اورانیوم در خاک کاهش می‌یابد؛ اما افزایش یا کاهش غلظت این عن صر اثر چندانی بر ر شد گیاه ندارد. باتوجه به شرایط محیطی آزمای شگاه مانند زاویه‌ی تابش نور و تغییرات دمایی و همچنین خصوصیات و بافت خاک‌ها و آلودگی آن‌ها، گیاهان بعد از ۱ ماه رشد مناسبی نداشتند.



شکل ۱. مراحل رشد گیاه گندم

Figure 1. Growth stages of wheat plant

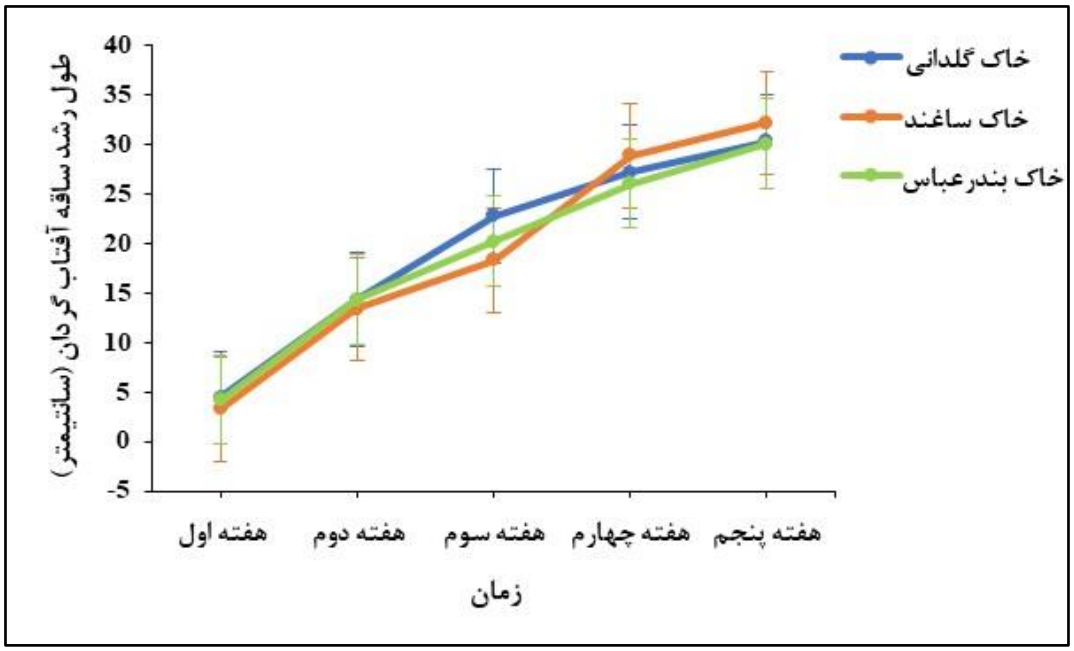
ر شد آفتاب‌گردان: شکل ۲ مراحل ر شد گیاه آفتاب‌گردان را نمایش می‌دهد. باتوجه به شکل م شخص ا ست که تا اواخر هفته‌ی سوم میزان ر شد این گیاه در خاک‌های ساغند و بندرعباس تقریباً یک سان ا ست و مانند گندم، آفتاب‌گردان نیز در نمونه‌ی شاهد پس از هفته‌ی دوم ر شد چشم‌گیری نسبت به خاک‌های ساغند و بندرعباس پیدا می‌کند. بنابراین، ر شد گیاه آفتاب‌گردان نیز دراثر ح ضور اورانیوم در خاک کاهش می‌یابد. پس از افزودن ا سید در تمام غلظت‌ها، ر شد آفتاب‌گردان در خاک ساغند ن سبت به خاک بندرعباس سیر صعودی داشت که این مسأله نشان‌دهنده‌ی اثر منفی اسید بر رشد این گیاه در خاک بندرعباس است. به‌علاوه، پس از گذشت ۱ ماه به‌دلیل آلوده بودن خاک به مواد رادیواکتیو و فلزات سنگین، دسترس‌پذیری گیاه به عناصر ضروری برای ر شد کاهش یافت و رشد آفتاب‌گردان در خاک‌های ساغند و بندرعباس با مشکل مواجه شد.

آنالیز ســنتیلاســیون مایع: در این بخش، میزان جذب اورانیوم از خاک‌های ســاغند و بندرعباس توســط گیاهان گندم و آفتاب‌گردان و تأثیر اسید سیتریک بر افزایش جذب این عناصر مورد بررسی قرار گرفته است.

گیاه گندم: همان‌گونه که پیش‌تر ا شاره شد، ا ستفاده از ا سیدهای آلی به‌عنوان ا صلاح‌کننده‌ی خاک، دفع رادیونوکلئیدها از ماتریس خاک به فاز محلول و درنتیجه ا ستخراج گیاهی را افزایش می‌دهد. شکل ۳ مقدار اورانیوم جذب‌شده از خاک ساغند توسط گیاه گندم را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل مشخص است که اسید سیتریک در افزایش جذب اورانیوم از خاک بااستفاده از این گیاه تأثیر بسزایی داشته است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، با افزایش غلظت اسید سیتریک از ۰/۵ تا ۱۲/۵ مولار میزان جذب افزایش پیدا می‌کند و در غلظت ۱۲/۵ مولار به بی شترین مقدار خود می‌ر سد (۱۶۱/۷۷ ق سمت در میلیون). بنابراین، افزایش غلظت

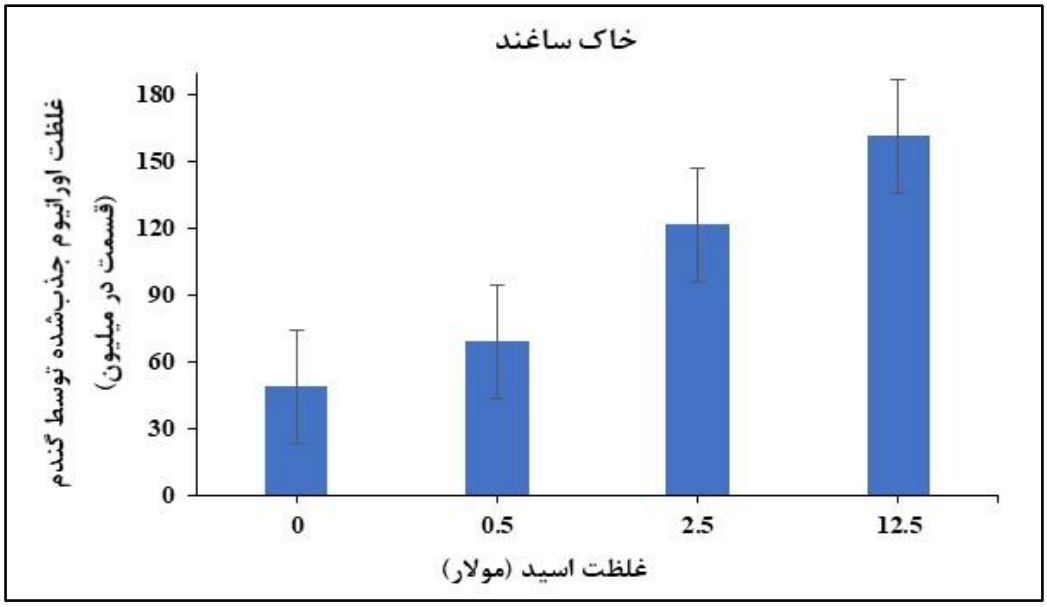
Agricultural Biotechnology Journal; Print ISSN: 2228-6705, Electronic ISSN: 2228-6500

اسید سیتریک بر میزان جذب اورانیوم از خاک اثر مثبت دارد و استفاده از اسید سیتریک ۱۲/۵ مولار در فرآیند کشت گندم می‌تواند مقدار اورانیوم موجود در خاک را از ۴۵۰ به ۲۸۸/۲۳ قسمت در میلیون کاهش دهد.



شکل ۲. مراحل رشد گیاه آفتاب‌گردان

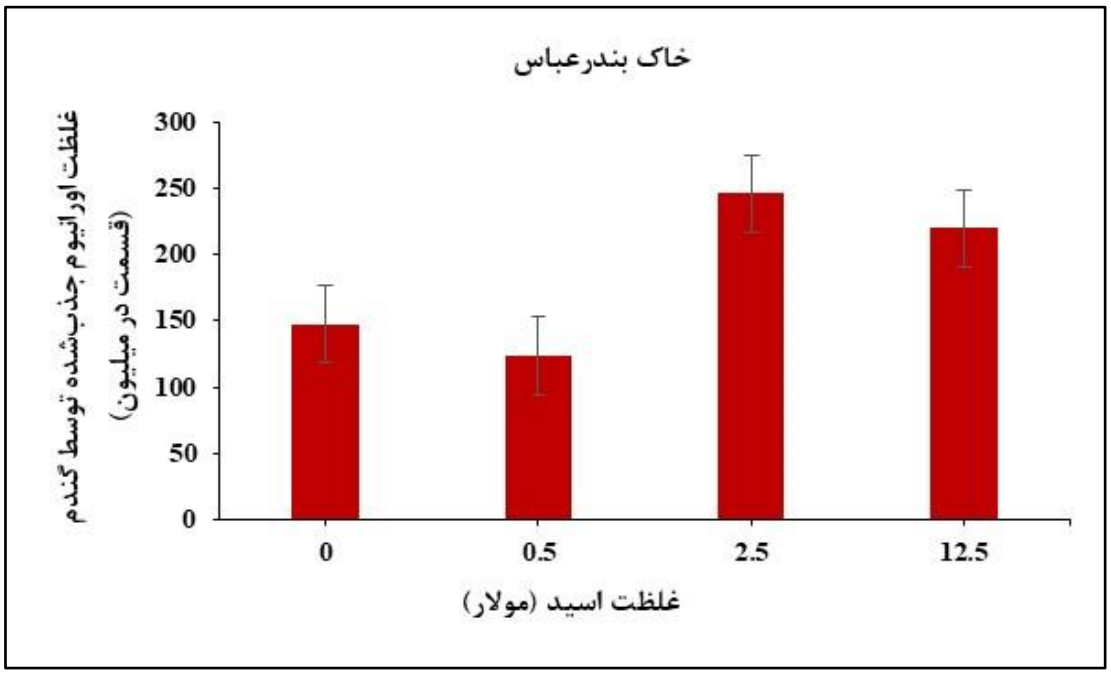
Figure 2. Growth stages of sunflower plant



شکل ۳. مقدار اورانیوم جذب‌شده از خاک ساغند توسط گیاه گندم در غلظت‌های مختلف اسید سیتریک

Figure 3. The amount of absorbed uranium from soil of Saghand by wheat plant in different concentrations of citric acid

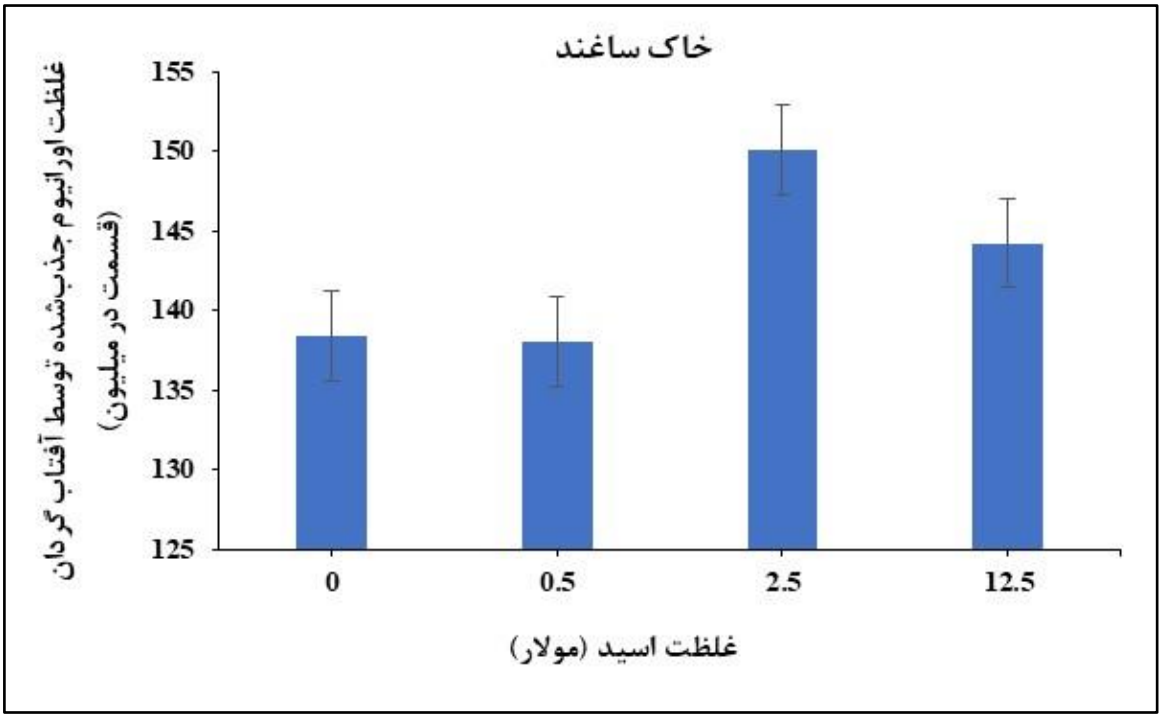
درمورد خاک بندرعباس نیز همان‌گونه که در شـکل ۴ مشـاهده می‌شـود، مقدار جذب اورانیوم از خاک در غلظت کم اسـید سیتریک (۰/۵ مولار) درمقایسه با شرایط غیر اسیدی کاهش می‌یابد؛ اما افزایش غلظت اسید میزان دسترس‌پذیری گیاه گندم به اورانیوم موجود در خاک را افزایش می‌دهد و در غلظت ۲/۵ مولار اسید، بیشترین میزان جذب حاصل می‌شود (۲۵۰/۰۵۹ قسمت در میلیون)؛ درحالی‌که با افزایش مجدد غلظت اسید سیتریک به ۱۲/۵ مولار میزان جذب نیز کاهش پیدا می‌کند و به ۲۲۵/۴۳ قسمت در میلیون می‌رسد. این نتایج اهمیت فرآیند بهینه‌سازی را در پاکسازی خاک از رادیونوکلئیدها آشکار می‌کند. بررسی مقدار اولیه‌ی اورانیوم موجود در خاک بندرعباس (جدول ۱) و مقدار اورانیوم جذب شده توسط گیاه گندم در شرایط بهینه نشان می‌دهد که مقدار اورانیوم باقی‌مانده در خاک برابر با ۵۴۹/۹۴۱ قسمت در میلیون است.



شکل ٤. مقدار اورانیوم جذب‌شده از خاک بندرعباس توسط گیاه گندم در غلظت‌های مختلف اسید سیتریک

Figure 4. The amount of absorbed uranium from soil of Bandar Abbas by wheat plant in different concentrations of citric acid

گیاه آفتاب‌گردان: شکل ۵ نتایج مربوط به جذب اورانیوم از خاک ساغند توسط گیاه آفتاب‌گردان را نشان می‌دهد. مطابق شکل، میزان جذب اورانیوم با افزودن اسید سیتریک افزایش می‌یابد و در غلظت ۲/۵ مولار به بیشترین مقدار خود می‌رسد (۱۴۹/۹ قسمت در میلیون)؛ درحالی‌که مقدار جذب در غلظت‌های ۰/۵ و ۱۲/۵ مولار به‌ترتیب برابر با ۱۳۸/۵۷ و ۱۴۴/۳۲ قسمت در میلیون است. بنابراین استفاده از اسید سیتریک با غلظت بهینه، حلالیت اورانیوم را افزایش می‌دهد و جذب آن را توسط گیاه تسهیل می‌کند و درنتیجه مقدار اورانیوم موجود در خاک به دو سوم مقدار اولیه کاهش پیدا می‌کند (۳۰۰/۱ قسمت در میلیون).



شکل ۵. مقدار اورانیوم جذب‌شده از خاک ساغند توسط گیاه آفتاب‌گردان در غلظت‌های مختلف اسید سیتریک

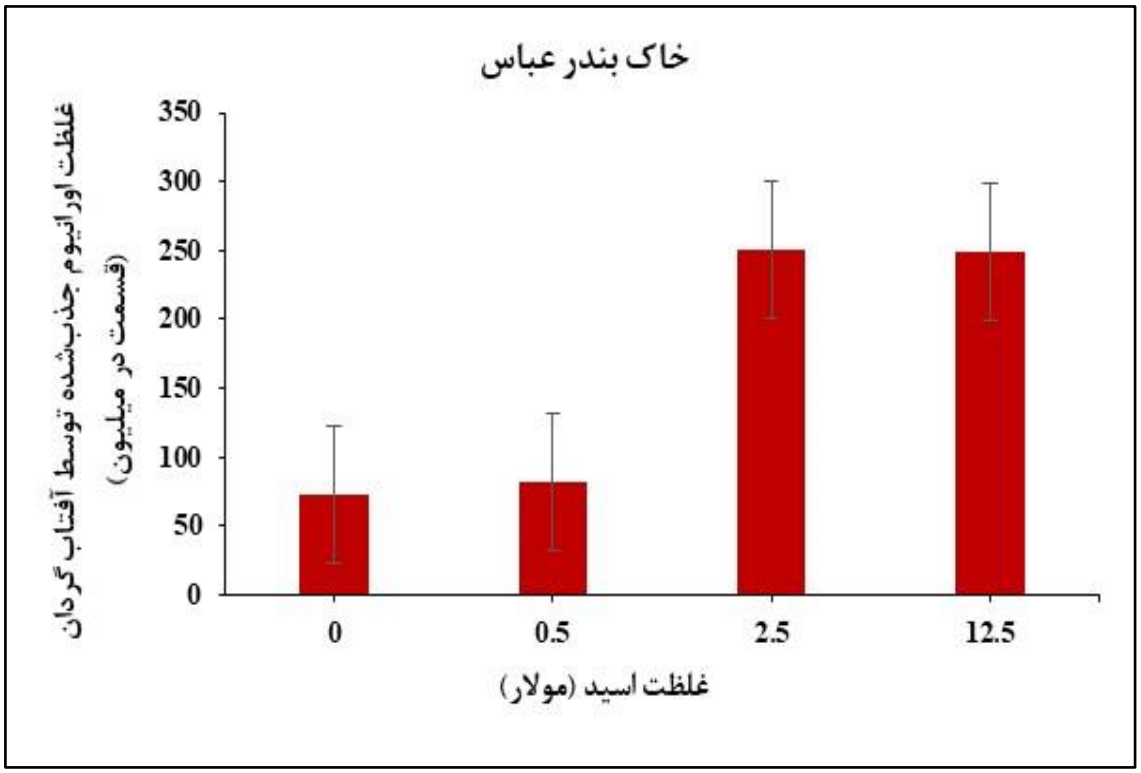
Figure 5. The amount of absorbed uranium from soil of Saghand by sunflower plant in different concentrations of citric acid

شکل ۶ نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان جذب اورانیوم از خاک بندرعباس توسط گیاه آفتاب‌گردان با افزایش غلظت اسید سیتریک است. میزان جذب در غلظت ۲/۵ مولار به حداکثر مقدار خود (۲۵۰/۹۶ قسمت در میلیون) می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد؛ اما در غلظت ۱۲/۵ مولار نیز میزان جذب نسبت به شرایط عدم استفاده از اسید به‌طور قابل توجهی بیشتر است. بنابراین، غلظت بهینه‌ی اسید سیتریک در جذب اورانیوم از خاک‌های ساغند و بندرعباس توسط گیاه آفتاب‌گردان یکسان است. همچنین، با اصلاح خاک گیاه آفتاب‌گردان توسط اسید سیتریک ۲/۵ مولار و به حداکثر رسیدن مقدار جذب اورانیوم، مقدار اورانیوم باقی‌مانده در خاک بندرعباس به ۵۴۹/۰۴ قسمت در میلیون کاهش یافت. باتوجه به نمودارهای مربوط به اثر اسید سیتریک بر میزان جذب اورانیوم از خاک‌های ساغند و بندرعباس توسط دو گیاه گندم و آفتاب‌گردان درمی‌یابیم که غلظت‌های زیاد اسید برای این گیاهان سمی است و موجب کاهش روند رشد و پژمرده شدن آن‌ها و درنتیجه کاهش مقدار جذب می‌شود.

مقایسه‌ی توانایی گیاهان در جذب اورانیوم از خاک ساغند: درمورد جذب اورانیوم از خاک ساغند همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، گیاه آفتاب‌گردان در شرایط عدم استفاده از اسید و در غلظت‌های ۰/۵ و ۲/۵ مولار اسید سیتریک عملکرد

Agricultural Biotechnology Journal; Print ISSN: 2228-6705, Electronic ISSN: 2228-6500

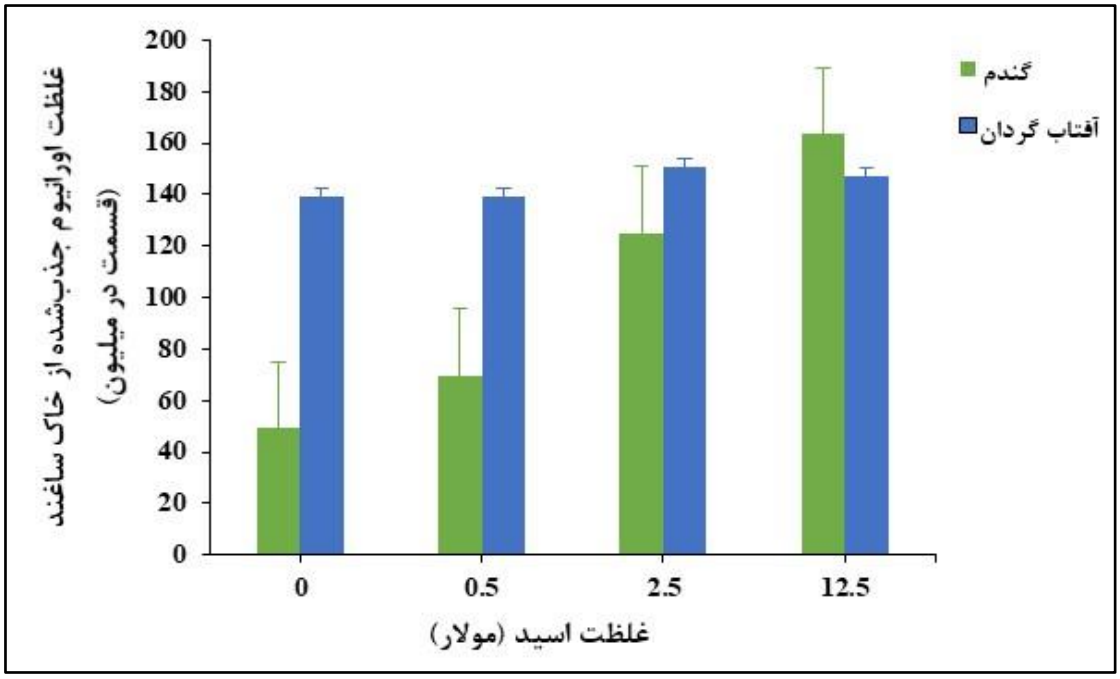
بهتری ارائه کرد؛ اما در غلظت ۱۲/۵ مولار درمقایسه با گیاه گندم میزان جذب کمتری داشت. به‌طورکلی با افزایش غلظت اسید، میزان جذب اورانیوم توسط گیاه گندم درمقایسه با آفتاب‌گردان افزایش بیشتری یافت.



شکل ٦. مقدار اورانیوم جذب‌شده از خاک بندرعباس توسط گیاه آفتاب‌گردان در غلظت‌های مختلف اسید سیتریک

Figure 6. The amount of absorbed uranium from soil of Bandar Abbas by sunflower plant in different concentrations of citric acid

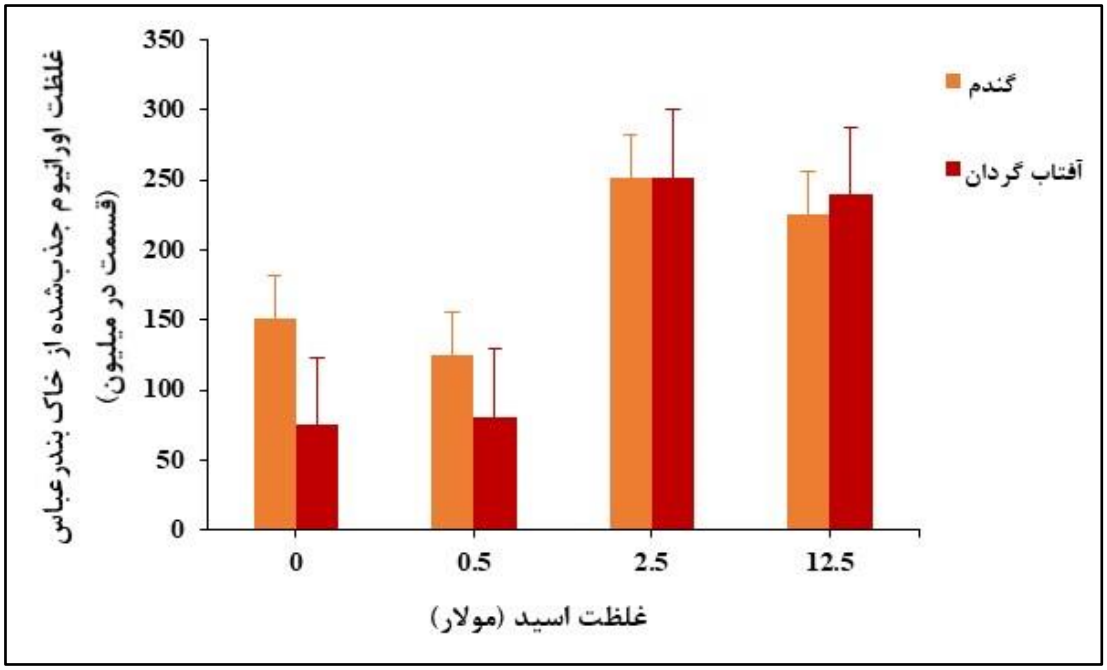
مقایسه‌ی توانایی گیاهان در جذب اورانیوم از خاک بندرعباس: شکل ۸ تفاوت در میزان جذب اورانیوم توسط گیاهان گندم و آفتاب‌گردان از خاک بندرعباس را به‌تصویر می‌کشد. همان‌گونه که مشخص است، در حالت عدم استفاده از اسید سیتریک و در غلظت ۰/۵ مولار، گندم عملکرد بهتری در جذب اورانیوم دارد؛ اما با افزایش غلظت اسید دسترس‌پذیری آفتاب‌گردان به اورانیوم موجود در خاک افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۷. مقایسه‌ی مقدار اورانیوم جذب‌شده از خاک ساغند توسط گیاهان گندم و آفتاب‌گردان در غلظت‌های مختلف اسید سیتریک

Figure 7. Comparison of the amount of absorbed uranium from soil of Saghand by wheat and sunflower Plants in Different Concentrations of citric acid

نتیجه‌گیری: آلودگی خاک یک معضـــل جهانی جدی اســـت که برای برطرف کردن آن باید به روش‌های پالایش نوین و کارآمد متوسل شد. طی چند دهه‌ی گذشته و با توسعه‌ی فناوری هسته‌ای، آلودگی خاک با مواد پرتوزا افزایش چشم‌گیری پیدا کرده و موجب بروز مشکلات محیط زیستی متعددی شده است. ورود رادیونوکلئیدها به زنجیره‌ی غذایی و تجمع آن‌ها در موجودات زنده پیامدهای ناگواری برای سلامت انسان به‌همراه دارد. گیاه‌پالایی، روشی سبز و سازگار با محیط زیست است که در آن از گیاهان سبز و ارتباط آن‌ها با میکروارگانیسم‌های موجود در خاک برای حذف یا کاهش آلاینده‌های خاک استفاده می شود. در این مطالعه، کاشت گیاهان گندم و آفتاب‌گردان در خاک‌های آنومالی منطقه‌ی یک ساغند و بلوک ۱۰۵ منطقه‌ی معدنی بندرعباس آشکار کرد که هر دو گیاه از توانایی رشد در این خاک‌ها و جذب اورانیوم برخوردار هستند. همچنین برای افزایش میزان جذب این عنصر توسط گیاه، اسید سیتریک با غلظت‌های مختلف به خاک اضافه شد. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، عملکرد آفتاب‌گردان در جذب اورانیوم از خاک ساغند قبل و بعد از افزودن اسید بهتر از گندم بود. درمورد جذب اورانیوم از خاک بندرعباس نیز در حالت عدم استفاده از اسید ســـیتریک و در غلظت‌های کم آن، گندم عملکرد بهتری داشـــت؛ درحالی‌که با افزایش غلظت اســـید میزان جذب اورانیوم توســـط آفتاب‌گردان افزایش پیدا کرد.



شکل ۸. مقایسه‌ی مقدار اورانیوم جذب‌شده از خاک بندرعباس توسط گیاهان گندم و آفتاب‌گردان در غلظت‌های مختلف اسید سیتریک

Figure 8. Comparison of the amount of absorbed uranium from soil of Bandar Abbas by wheat and sunflower Plants in Different Concentrations of citric acid

سپاسگزاری: نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران محترم به‌دلیل ارائه‌ی نظرات ساختاری و علمی ارزشمند سپاسگزاری نمایند.

منابع

اسکندری حمداله، عالی‌زاده امرایی اشرف (۱۳۹۶) مقایسه کارایی گندم، شبدر و کلزا در پالایش خاک از فلز سنگین کادمیوم. نشریه تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱۰(۲)، ۳۴۹-۳۴۵.

References

Alaboudi KA, Ahmed B, Brodie G (2018) Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. Ann Agric Sci 63, 123-127.

Ali MB, Salem E, Sayed MA-EA (2017) Genetic Variability of Barley (*Hordeum vulgare* L.) Genotypes in Phytoremediation of Heavy Metals-Contaminated Soil. Egypt J Agron 39, 383-399.

Alsabbagh AH, Abuqudaira TM (2017) Phytoremediation of Jordanian uranium-rich soil using Sunflower. WAT AIR AND SOIL POLL 228, 219-228.

Alves WS, Manoel EA, Santos NS, et al. (2018) Phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by cv. Crioula: A Brazilian alfalfa cultivar. Int J Phytoremediation 20, 747-755.

Chen H, Dou J, Xu H (2018) The effect of low-molecular-weight organic-acids (LMWOAs) on treatment of chromium-contaminated soils by compost-phytoremediation: Kinetics of the chromium release and fractionation. J Environ Sci 70, 45-53.

Chen L, Yang J, Wang D (2020) Phytoremediation of uranium and cadmium contaminated soils by sunflower (*Helianthus annuus* L.) enhanced with biodegradable chelating agents. J Clean Prod 263, 121491.

Cheng S-F, Huang C-Y, Lin Y-C, et al. (2015) Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land—an in-situ study and benefit assessment. Ecotoxicol Environ Saf 111, 72-77.

Corlin L, Rock T, Cordova J, et al. (2016) Health effects and environmental justice concerns of exposure to uranium in drinking water. Curr Environ Health Rep 3, 434-442.

Das N (2012) Remediation of radionuclide pollutants through biosorption–an overview. CLEAN Soil Air Water 40, 16-23.

Dubchak S, Bondar O (2019) Bioremediation and phytoremediation: Best approach for rehabilitation of soils for future use. In: Remediation measures for radioactively contaminated areas. Springer, pp. 201-221.

Eskandari H, Alizadeh-Amraie A (2017) Comparison of the ability of wheat, clover and rapeseed in phytoremediation of cadmium from soils for reducing heavy metal stress. Env Stresses Crop Sci 10, 345-349 (In Persian).

Gangola S, Kumar R, Sharma A, Singh H (2017) Bioremediation of Petrol Engine Oil Polluted Soil Using Microbial Consortium and Wheat Crop. J Pure Appl Microbiol 11, 1583-1588.

Gbadamosi M, Afolabi T, Ogunneye A, et al. (2018) Distribution of radionuclides and heavy metals in the bituminous sand deposit in Ogun State, Nigeria–a multi-dimensional pollution, health and radiological risk assessment. J Geochem Explor 190, 187-199.

Goswami S, Das S (2015) A study on cadmium phytoremediation potential of Indian mustard, Brassica juncea. Int J Phytoremediation 17, 583-588.

Gupta DK, Schulz W, Steinhauser G, et al. (2018) Radiostrontium transport in plants and phytoremediation. Environ Sci Pollut Res 25, 29996-30008.

Gurajala HK, Cao X, Tang L, et al. (2019) Comparative assessment of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) genotypes for phytoremediation of Cd and Pb contaminated soils. Environ Pollut 254, 113085-113095.

Hu N, Lang T, Ding D, et al. (2019) Enhancement of repeated applications of chelates on phytoremediation of uranium contaminated soil by *Maclaya cordata*. J Environ Radioact 199, 58-65.

Jagetia B, Sharma A (2013) Optimization of chelators to enhance uranium uptake from tailings for phytoremediation. Chemospher 91, 692-696.

Lee JH (2013) An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control. Biotechnol Bioprocess Eng 18, 431-439.

Machekposhti MF, Shahnazari A, Ahmadi MZ, et al. (2017) Effect of irrigation with sea water on soil salinity and yield of oleic sunflower. Agric Water Manag 188, 69-78.

Mahar A, Wang P, Ali A, et al. (2016) Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. Ecotoxicol Environ Saf 126, 111-121.

Masok F, Masiteng P, Mavunda R, Maleka P (2016) Health effects due to radionuclides content of solid minerals within port of Richards bay, South Africa. Int J Environ Res Public Health 13, 1180-1192.

Ramalingam M, Ponnusamy VK, Sangilimuthu SN (2019) A nanocomposite consisting of porous graphitic carbon nitride nanosheets and oxidized multiwalled carbon nanotubes for simultaneous stripping voltammetric determination of cadmium (II), mercury (II), lead (II) and zinc (II). Microchim Acta 186, 69-79.

Sarwar N, Imran M, Shaheen MR, et al. (2017) Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. Chemosphere 171, 710-721.

Sha Y-h, Hu N, Wang Y-d, et al. (2019) Enhanced phytoremediation of uranium contaminated soil by artificially constructed plant community plots. J Environ Radioact 208, 106036.

Sharma S, Singh B, Manchanda V (2015) Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. Environ Sci Pollut Res 22, 946-962.

Wiszniewska A, Hanus-Fajerska E, MUSZYŃSKA E, Ciarkowska K (2016) Natural organic amendments for improved phytoremediation of polluted soils: a review of recent progress. Pedosphere 26, 1-12.

Zhang H, Li X, Nan X, et al. (2017) Alkalinity and salinity tolerance during seed germination and early seedling stages of three alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars. Legum Res 40, 853-858.

Zhang T ,Hammack RW, Vidic RD (2015) Fate of radium in Marcellus Shale flowback water impoundments and assessment of associated health risks. Environ Sci Technol 49, 9347-9354.

Zhu YG, Shaw G (2000) Soil contamination with radionuclides and potential remediation. Chemosphere 41, 121-128.