



بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف اورانیوم بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مقدار کلروفیل در گیاهان آفتابگردان و سویا

سعید باقریفام*^۱، امیر لکزبان^۱، سیدجواد احمدی^۲، امیر فتوت^۱، محمدفرهاد رحیمی^۱

۱- گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی: ۱۱۶۳، مشهد- ایران

۲- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

چکیده: اورانیوم عنصری است رادیوآکتیو که به طور گسترده در پوسته زمین پراکنده شده است. معمولاً غلظت آن به علت فعالیت‌های انسانی در بعضی مناطق زمین به بالاتر از حد مجاز رسیده و این امر سبب آلودگی خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی گردیده است. به منظور بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف اورانیوم ۲۳۸ بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و میزان کلروفیل گیاهان آفتابگردان و سویا مطالعه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل (دو نوع گیاه و شش غلظت اورانیوم ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. گیاهان بعد از یک دوره ۴۰ روزه و قبل از ورود به مرحله زایشی برداشت شدند. طول ریشه و ساقه، وزن خشک ریشه و ساقه، زیست توده، سطح برگ و غلظت کلروفیل a، b و غلظت کل آن اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که افزایش غلظت اورانیوم در خاک به طور معنی‌داری بر روی ویژگی‌های مورد مطالعه تأثیر داشت. افزایش غلظت اورانیوم سبب افزایش درجه بازدارندگی رشد (GGI) و کاهش شاخص تحمل (TI) در گیاهان سویا و آفتابگردان گردید. تولید زیست توده زیاد در غلظت‌های بالای اورانیوم نشان‌دهنده مقاومت بالاتر این گیاه به تنش سمیت اورانیوم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اورانیوم ۲۳۸، درجه ممانعت از رشد، شاخص تحمل، گل‌های آفتابگردان، دانه‌های سویا

The Effect of Different Uranium Concentrations on Physiological Characteristics and Chlorophyll Contents in Sunflower and Soy Bean

S. Bagherifam^{*1}, A. Lakzian¹, S.J. Ahmadi², A. Fotovat¹, M.F. Rahimi¹

1- Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, P.O.Box: 1163, Mashhad - Iran
2- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 11365-8486, Tehran-Iran

Abstract: Uranium as a natural radioactive heavy metal, widely disperses throughout the earth's crust. In many cases, the natural abundance has been re-distributed due to anthropogenic activities, resulting in radionuclide contamination in groundwater and surface soil. A pot experiment had been conducted in the Agricultural College Research Greenhouse, at the Ferdowsi University of Mashhad under the controlled condition. The effect of six levels of uranium (0, 50, 100, 250, 500 and 1000 mg U kg⁻¹) on physiological characteristics and chlorophyll contents in sunflower and soy bean were studied in a completely randomized design as a factorial experiment with three replications. Plants were harvested after 40 days and before the reproductive stages. Root and stem length, root dry weight, stem dry weight, biomass and chlorophyll contents were determined. The shoot and root length, fresh and dry mass as well as leaf area and chlorophyll contents showed a significant negative correlation with the applied uranium concentrations. The influence on plant growth was also measured in terms of tolerance index TI and grade of growth inhibition GGI. The results showed that TI increased and GGI decreased with the applied uranium concentration. Biomass and tolerance of sunflower during the experiment on higher uranium concentrations showed that sun flower is more resistant against uranium toxicity.

Keywords: Uranium, Grade of Growth Inhibition, Tolerance Index, Sunflowers, Soybeans

*email: saeed_bagherifam@yahoo.com



۱- مقدمه

اورانیوم عنصری از سری اکتینیدها با عدد اتمی ۹۲ است و دارای ۱۰ ایزوتوپ رادیوآکتیو می‌باشد. ایزوتوپ‌های فراوان آن در طبیعت ^{238}U (۹۹/۲۷٪)، ^{235}U (۰/۷۲٪) و ^{234}U (۰/۰۰۵۵٪) می‌باشند. ایزوتوپ اصلی ^{238}U است که به علت فعالیت اندک دارای نیمه‌عمری معادل $4/5 \times 10^9$ سال است [۱]. اورانیوم در طول ۲۰۰ سال گذشته به دلیل داشتن رنگ زرد در سفالگری و طلاسازی، همچنین به عنوان کاتالیزور در فرایندهای شیمیایی مورد استفاده بوده است. در طول جنگ جهانی دوم استفاده از آن به عنوان منبع دارای انرژی زیاد برای تولید بمب اتم مطرح بوده است. امروزه حدود ۱۶٪ از انرژی الکتریکی جهان بوسیله نیروگاههای اتمی تأمین می‌شود [۲]. خاک‌ها معمولاً در اثر گسترش صنایع هسته‌ای، آزمایشهای اتمی و کودهای فسفوری که حاوی ناخالصی‌های اورانیوم می‌باشند؛ به اورانیوم آلوده می‌شوند [۳]. غلظت متوسط اورانیوم در پوسته زمین ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. این مقدار ممکن است در اثر فعالیت‌های انسانی افزایش یابد. مقدار اورانیوم در سنگ‌های فسفا ته از ۳۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است [۴]. مطالعات مختلفی در مورد تأثیر اورانیوم بر روی پارامترهای رشدی گیاهان انجام گرفته است [۵، ۶ و ۷]. گولاتی و همکاران نشان دادند که غلظت ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم سبب می‌شود که زیست توده گیاه گوجه‌فرنگی به مقدار ۲۵٪ کاهش یابد [۷]. لاماس در مطالعه خود مشاهده کرد که ^{238}U سبب کاهش زیست توده در گیاهان ذرت و آفتابگردان می‌شود [۲]. پورهیت و جاگتیا در مطالعه‌ای نشان دادند که اورانیوم طول ریشه، ساقه و غلظت کلروفیل برگ را کاهش می‌دهد [۳]. ایری و جین مشاهده کردند که حتی مقدار ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم تعداد دانه‌های هر غلاف در گندم را ۲۵٪ کاهش می‌دهد [۸]. شپرد و همکاران در مطالعه‌ای برای سازمان جهانی ECO مقادیر حدود ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم را برای گیاهان خاکزی به عنوان مقادیر بی‌تأثیر (PNEC) معرفی کردند. شوچنکو و همکاران در مطالعه‌ای بر روی ذرت، سورگوم و چغندر قند غلظتی در حدود ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم را برای گیاه سمی دانستند [۵] در حالیکه شپرد و همکاران اعلام داشته‌اند که حتی مقادیر بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم برای گیاه سمی نمی‌باشد [۹]. به نظر می‌رسد که تفاوت در نتایج دانشمندان مختلف در مورد دامنه سمیت اورانیوم به تفاوت در

نوع و وارسته گیاهان، شرایط مطالعه و نوع خاک مربوط می‌باشد. با توجه به شرایط آهکی و pH بالای خاک‌های ایران که شرایط متفاوتی با خاک‌های اسیدی اروپا دارند، مطالعه اخیر با هدف تعیین دامنه سمیت غلظت‌های مختلف اورانیوم بر روی ریشه، ویژگی‌های اندام هوایی گیاه، تولید زیست توده و تشخیص دامنه سمیت آن برای گیاهان سویا و آفتابگردان در شرایط خاک‌های ایران انجام شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱ تهیه خاک آلوده به اورانیوم

خاک مورد استفاده در این آزمایش از محل پردیس دانشگاه فردوسی مشهد جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک در هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد بذره‌های سویا با رقم سحر و آفتابگردان با رقم‌های سان از مرکز تحقیقات کشاورزی گرگان بخش دانه‌های روغنی تهیه شدند. به منظور آلوده کردن نمونه خاک به غلظت‌های مختلف اورانیوم (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مقادیر مناسب از نمک نترات اورانیوم تعیین و در آب مقطر لازم حل، سپس به نمونه‌های خاک اضافه شد. با اضافه کردن هر یک از غلظت‌های فوق، مقدار رطوبت نمونه‌های خاک در ۷۰٪ ظرفیت زراعی^(۳) تنظیم شد. بمنظور تهیه یکنواخت نمونه‌های خاک و با توجه به سمی بودن اورانیوم، خاک‌ها در ظروف پلاستیکی درب‌دار قرار داده شده، با غلظت‌های موردنظر محلول پاشی و کاملاً مخلوط شدند. گلدانهای پلاستیکی با مقدار یک کیلوگرم از نمونه‌های خاک آلوده پر شده به مدت ۲ هفته در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سپس در هر گلدان تعداد ۵ دانه از بذور ضدعفونی شده قرار داده شد و سطح گلدانها با ۲۰۰ گرم ماسه شسته شده پوشیده شدند. رطوبت گلدانها در مدت آزمایش در ۷۰٪ ظرفیت زراعی ثابت نگهداری شد برای حفظ غلظت اورانیوم در نمونه‌های خاک، زه آب خروجی مجدداً به گلدانها برگردانده شد. پس از ظهور گیاهچه‌ها تعداد آنها در هر گلدان به ۲ عدد تقلیل یافت. گیاهان پس از ۴۰ روز و قبل از ورود به مرحله زایشی از ارتفاع ۱ سانتی‌متری سطح خاک برداشت شدند.

۲-۲ آماده‌سازی نمونه‌های گیاهی

ریشه‌ها و ساقه‌های جدا شده بطور کامل با آب مقطر شسته شدند. اندام هوایی به دو بخش ساقه و برگ تقسیم گردید و پس

**۲-۳ تجزیه خاک**

مقدار نیتروژن کل خاک به روش کج‌لدال اندازه‌گیری شد [۱۳]. EC به وسیله دستگاه هدایت‌سنج مدل Jenway 4310 و pH به وسیله pH متر مدل Metrohm 632 در نسبت خاک به آب ۱:۵ اندازه‌گیری گردید. فسفر قابل دسترس به روش اولسن و [۱۴] مقدار پتاسیوم قابل دسترس نمونه‌های خاک با استفاده از استات آمونیوم یک نرمال عصاره‌گیری و به وسیله دستگاه فلیم فوتمتر مدل Jenway PFP 7 اندازه‌گیری شدند [۱۵]. مقدار کربن آلی خاک به روش اکسایش با دی کرومات حساب شد [۱۶].

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش‌های اولیه نمونه خاک نشان داد که بافت خاک مورد استفاده لومی شنی است. انجام آزمایش‌های شیمیایی روی نمونه خاک نشان داد که غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیوم به ترتیب ۶۱۳، ۸۶/۴۲ و ۸۲/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. هدایت هیدرولیکی ۲/۱۰ dS/m و pH خاک مورد مطالعه ۷/۲ بود. مقدار کربن آلی ۰/۶ درصد به دست آمد. غلظت‌های مختلف اورانیوم تفاوت‌های معنی‌داری را بر پارامترهای رشدی هر دو گیاه ایجاد کردند (جدول ۱). دامنه تغییر زیست توده در گیاه آفتابگردان از ۵۴/۸۷ در تیمار شاهد تا ۱/۱۹ در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم بود.

از اندازه‌گیری زیست توده، ارتفاع ساقه و ریشه، وزن تر برگ، سطح برگ و تعیین غلظت کلروفیل برگ، برای تعیین وزن خشک به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند، سپس وزن خشک هر یک از اجزای فوق با دقت ۰/۰۰۰۱ تعیین شد.

از میان شاخص‌های بیوشیمیایی تأثیر اورانیوم بر غلظت کلروفیل در گیاه انتخاب شد. برای این منظور جوانترین برگ‌های تکامل یافته، نمونه‌برداری شدند. غلظت کلروفیل با روش آرنون (۱۹۴۹) و با اندازه‌گیری به وسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر حساب شد [۱۰]. سطح برگ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ Win Dias Image Analyses System ساخت شرکت DeltaT تعیین شد. تأثیر غلظت‌های مختلف اورانیوم بر رشد ریشه گیاه با بدست آوردن شاخص تحمل (TI)^(۴) به روش بیکر [۱۱] و تأثیر آن بر وزن خشک با بدست آوردن درجه ممانعت از رشد (GGI)^(۵) به روش لیتا [۱۲] حساب شد.

شاخص تحمل: (TI)

$$\times 100 \text{ [(میانگین زیست توده تولیدی در گیاه شاهد) / (میانگین زیست توده در گیاه با تیمار اورانیوم)]}$$

درجه ممانعت از رشد: (GGI)

$$\times 100 \text{ [(وزن خشک گیاه شاهد) / (وزن خشک گیاه تیمار شده با اورانیوم - وزن خشک گیاه شاهد)]}$$
جدول ۱- مقایسه میانگین خصوصیات رشدی گیاهان سویا و آفتابگردان در غلظت‌های مختلف اورانیوم.

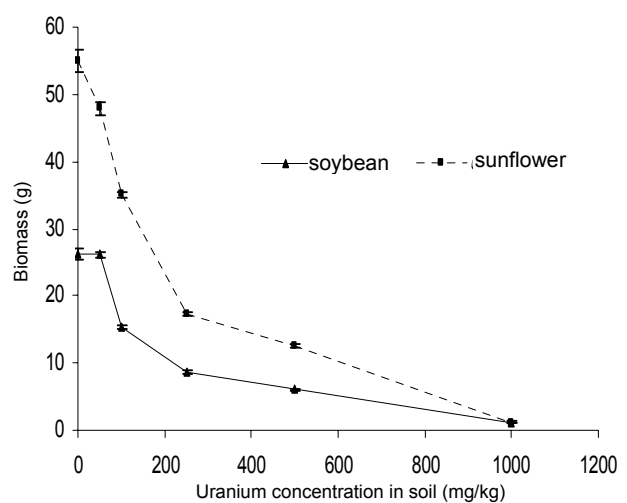
طول ریشه (cm)	طول ساقه (cm)	وزن خشک ساقه (g)	وزن خشک ریشه (g)	وزن خشک برگ (g)	وزن تر برگ (g)	غلظت اورانیوم (mg/kg)
آفتابگردان						
۲۱/۵۰ b	۳۱/۶۰ b	۳/۸۳ a	۱/۸b	۱/۲۷ c	۹/۱۶ a	۰
۲۳/۴۰ a	۳۶/۴۰ a	۴/۰۴ a	۱/۱۳c	۱/۰۳ d	۷/۶۱ b	۵۰
۱۸/۵۰ c	۲۹/۹۰ bc	۲/۸۳ b	۰/۹۷d	۰/۹۳ e	۶/۹۱ b	۱۰۰
۱۰d	۱۹/۳۰ f	۲/۶۱ bc	۰/۸۶e	۱/۰۳ de	۴/۹۵ c	۲۵۰
۷/۳۰ e	۱۴/۱۰ g	۲/۲۱ de	۰/۵۱g	۰/۶۸ f	۴/۳۴ cd	۵۰۰
۲/۵۰ f	۶/۵۰ i	۰/۲۴ h	۰/۱۱i	۰/۱۴ g	۰/۴۷ f	۱۰۰۰
سویا						
۲۱ b	۲۸/۰۳ d	۲/۴۵ cd	۲/۸۸a	۱/۸۵ a	۷/۲۶ b	۰
۲۱/۵۰ b	۲۸/۵۳ cd	۲/۳۴ cde	۲/۸۸a	۱/۹ a	۷/۳۱ b	۵۰
۱۸/۸۰ c	۲۳/۶۰ e	۲/۰۲ ef	۰/۸۵e	۱/۶۴ b	۵/۰۸ c	۱۰۰
۱۰/۱ d	۱۷/۲۰ f	۱/۷۹ f	۰/۷۱f	۱/۱ d	۳/۵ d	۲۵۰
۸/۶۰ de	۹/۵۰ h	۱/۱۶ g	۰/۳۵h	۰/۷۶ f	۲/۲۶ e	۵۰۰
۲/۰۶ f	۳/۱۰ j	۰/۱۸ h	۰/۰۹i	۰/۰۹ g	۰/۴۸ f	۱۰۰۰

اعدادی که در هر ستون حداقل یک حرف مشترک دارند طبق آزمون LSD در سطح آماری ۰/۰۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

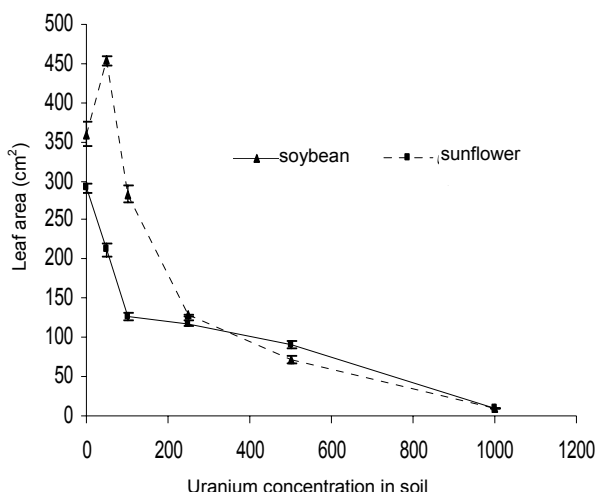


ساقه و ریشه گیاهان آفتابگردان و سویا در غلظت‌های مختلف اورانیوم تفاوت‌های معنی‌داری را نشان دادند. بیشترین طول ساقه و ریشه در سطح ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم مشاهده شد. این تفاوت را می‌توان به نمک نترات اورانیوم مورد استفاده نسبت داد که با ورود ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نترات به خاک باعث افزایش طول ریشه و ساقه می‌گردد. در منابع از آن به عنوان اثر هورمونی^(۶) نام می‌برند [۲]. در منابع علمی نتایج مختلفی در این مورد گزارش شده است، به عنوان مثال گولوتی گزارش داد که مقدار ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم سبب افزایش عملکرد شده در حالی که غلظت ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم اثرات بازدارنده بر رشد گیاه داشت. در منابع دیگر دامنه سمیت اورانیوم برای گیاهان مختلف و شاخص‌های متفاوت رشدی بسیار متنوع است [۹، ۱۹ و ۲۰]. شاید این تفاوت‌ها به نوع نمک اورانیوم مورد استفاده و ویژگی گیاهان مورد مطالعه مربوط باشد. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه نیز در این مورد بسیار تأثیرگذار است [۹ و ۲۱]. پورهیت و جاگتیا در مطالعه اثر غلظت‌های مختلف پسماند معادن اورانیوم بر خاک تغییرات طول ساقه را از ۵۰/۵ سانتی‌متر در سطح شاهد تا ۷ سانتی‌متر در سطحی که ۱۰۰ درصد پسماند دریافت کرده بود، مشاهده کردند. در این مطالعه نیز روند کاهش طول ساقه و ریشه با افزایش غلظت اورانیوم در خاک مشاهده گردید. سطوح مختلف اورانیوم به طور معنی‌داری وزن خشک ریشه و ساقه را در هر دو گیاه کاهش دادند که همانند سایر شاخص‌ها بیشترین کاهش در بالاترین غلظت اورانیوم رخ داد (جدول ۱). وزن خشک ریشه برای آفتابگردان از ۱/۶۸ به ۰/۱۱ گرم و در سویا از ۲/۸۸ تا ۰/۰۹ گرم رسید. همچنین وزن خشک ساقه نیز با روندی مشابه در آفتابگردان از ۳/۸ به ۰/۲۴ و در مورد سویا از ۲/۴۵ به ۰/۱۸ گرم کاهش یافت. فاکتورهای محیطی که رشد گیاه را محدود می‌کنند ممکن است از طریق کاهش سطح برگ باعث کاهش دریافت تابش توسط گیاه شوند یا توانایی گیاه را برای تبدیل نور دریافت شده به زیست توده کاهش دهند و یا با ترکیبی از این دو مکانیزم عمل کنند [۲۲]. مطالعات کمی در مورد تأثیر اورانیوم بر سطح برگ و وزن برگ انجام شده است. جاگتیا و پورهیت کاهش سطح برگ گیاه آفتابگردان را با افزایش غلظت اورانیوم گزارش کردند [۳]. غلظت‌های مختلف اورانیوم تفاوت‌های

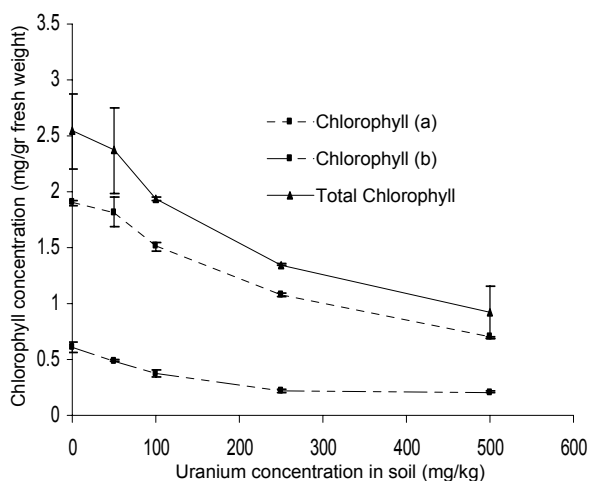
بالاترین غلظت اورانیوم بیشترین تأثیر را در زیست توده ایجاد کرد به طوری که زیست توده در این تیمار حدود ۱۱ گرم کمتر از تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم بود. در مورد گیاه سویا دامنه تغییرات زیست توده از ۲۶/۲۸ گرم در تیمار شاهد تا ۱/۱۶ گرم در سطح ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم متغیر بود. نتایج حاصل از مقایسه زیست توده تولیدی آفتابگردان نسبت به سویا تفاوت‌های معنی‌داری را در این دو گیاه نشان می‌دهد. بطوریکه در تمامی غلظت‌های اورانیوم، مقدار زیست توده آفتابگردان بیشتر از سویا بود (شکل ۱). در مطالعه لاماس و همکاران که سطوح ۱۷۳، ۳۸۵ و ۶۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم تهی شده را استفاده کرده بودند، تغییرات زیست توده در گیاه آفتابگردان از ۳/۲ گرم در سطح ۱۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم تا ۲/۵ گرم در سطح ۶۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم بود [۲]. روند تغییرات مشاهده شده همانند سایر مطالعات مشابه، کاهش زیست توده تولیدی را با افزایش غلظت اورانیوم در خاک نشان می‌دهد. تفاوت مشاهده شده در این مطالعه و مطالعات مشابه ممکن است به تفاوت نوع اورانیوم مورد استفاده، تفاوت دوران کشت گیاهی و نوع خاک مورد مطالعه مربوط باشد. گیاه آفتابگردان به دلیل تولید بیومس بالا، ساختار ریشه‌ای قوی و قدرت جذب بالای اورانیوم در منابع مختلف به عنوان گونه‌ای مناسب برای پالایش خاک‌های آلوده به عنصر اورانیوم شناخته شده است [۱۷، ۱۸ و ۱۹].



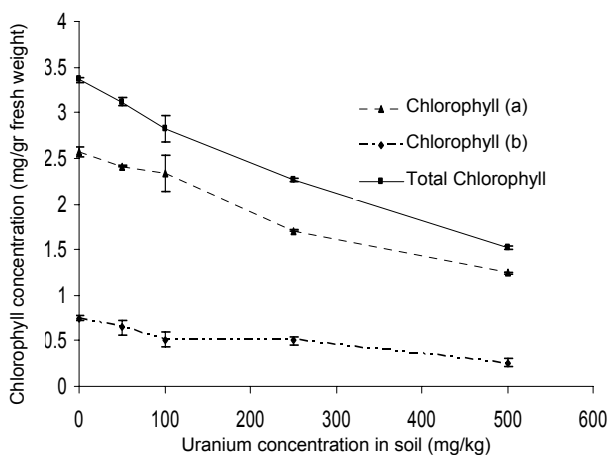
شکل ۱- تغییرات زیست توده تولیدی آفتابگردان و سویا در غلظت‌های مختلف اورانیوم.



شکل ۲- تغییرات مساحت سطح برگ با افزایش غلظت اورانیوم.



شکل ۳- تغییرات غلظت کلروفیل گیاه سویا در غلظت‌های مختلف اورانیوم.



شکل ۴- تغییرات غلظت کلروفیل گیاه آفتابگردان در غلظت‌های مختلف اورانیوم.

معنی‌داری را در سطح برگ گیاهان سویا و آفتابگردان ایجاد کردند. دامنه این تغییرات در آفتابگردان از ۲۹۰/۸ در شاهد تا ۹/۸ سانتی‌متر مربع در بالاترین غلظت اورانیوم بود (شکل ۲). همچنین سطح برگ در سویا از ۴۵۳/۳۹ تا ۸/۹۴ سانتی‌متر مربع تغییر پیدا کرد. در مطالعه جاگتیا و پورهیت این تغییرات در گیاه آفتابگردان از ۱۱/۶ تا ۳/۵ متغیر بودند که با توجه به مشابه بودن روند کاهشی و اختلاف پرتوزایی پسماند معدن اورانیوم با نمک نترات اورانیوم این تفاوت‌ها قابل توجیه‌اند.

کلروفیل‌های a و b رنگدانه‌های گیاهی هستند که در صنایع غذایی بسیار مهم می‌باشند و به عنوان شاخص‌های سودمند در مطالعه آلودگی‌های زیست محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۳]. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که افزایش غلظت اورانیوم در خاک، غلظت کلروفیل را در هر دو گیاه به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد. در این مطالعه به دلیل وزن تر تولیدی بسیار پایین در سطح ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم، اندازه‌گیری کلروفیل تا سطح ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم انجام شد. پایین‌ترین غلظت‌های کلروفیل a و b در بالاترین سطح اورانیوم مشاهده شد (شکل‌های ۳ و ۴). دامنه تغییرات برای کلروفیل کل از ۳/۳۶ تا ۱/۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن برگ تر در گیاه آفتابگردان و در مورد سویا از ۲/۵۴ تا ۰/۹۲ میلی‌گرم بر گرم وزن برگ تر بدست آمد. این نتایج در مورد کلروفیل a و b از روندی مشابه پیروی کرد. جاگتیا و پورهیت [۳] و ایری و جین [۲۴] که کاهش غلظت کلروفیل را با افزایش غلظت اورانیوم مشاهده کردند، گزارش دادند که کاهش غلظت کلروفیل ممکن است به علت جایگزینی احتمالی یون اورانیل به جای Mg^{+2} در کلروفیل باشد.

درجه مانع از رشد (GGI) شاخصی است که کاهش وزن خشک گیاه را نشان می‌دهد. افزایش این شاخص در هر دو گیاه با افزایش سطوح اورانیوم همراه بود. شاخص بازدارندگی اورانیوم در گیاه سویا در بسیاری از غلظت‌ها بالاتر از گیاه آفتابگردان است، به طوری که در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم این شاخص در آفتابگردان ۶۲/۶ و در سویا ۷۲/۷ بود. گیاهان همانند سایر موجودات دارای مکانیزم‌های تطبیقی می‌باشند که آنها را قادر می‌سازد تا به شرایط سمیت یا کمبود مواد غذایی پاسخ دهند. فلزات سنگین ممکن است موجب صدمات بیولوژیکی در گیاه شوند. آنها در بعضی موارد هم ضروری هستند و هم ممکن است باعث سمیت گردند و بعضی از آنها همانند اورانیوم برای سلول‌های زنده فقط سمی هستند. دو ترکیب پیوند دهنده اصلی در سلولهای گیاهی



نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون نشان داد که بین صفات مختلف رشدی در گیاهان سویا و آفتابگردان و سطوح اورانیوم در خاک همبستگی‌های معنی‌داری وجود دارد (جدول ۳). وجود همبستگی بالا و منفی بین سطوح اورانیوم و وزن تر و خشک ساقه و ریشه، طول ساقه و ریشه، سطح برگ، غلظت کلروفیل و شاخص‌ها مقاومت و تحمل در هر دو گیاه نشان‌دهنده سمیت بالای اورانیوم در تمامی غلظت‌ها برای این گیاهان می‌باشد. با استفاده از این معادلات رگرسیونی می‌توان با دقت مناسبی تأثیر غلظت‌های اورانیوم را بر پارامترهای رشدی مختلف گیاهان فوق بدست آورد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که همه غلظت‌های اورانیوم برای آفتابگردان و سویا سمی هستند اما با توجه به دو شاخص GGI و TI، تولید زیست توده بالا در بیشتر غلظت‌های اورانیوم و سیستم ریشه‌ای توانمند، آفتابگردان مقاومت بالاتری را به تنش حاصل از سمیت اورانیوم نشان داد.

جدول ۳- ضرایب همبستگی و معادلات رگرسیونی بین ویژگیهای رشدی و غلظت‌های اورانیوم در خاک.

r^2	r	معادله رگرسیون خطی	شاخص رشدی
آفتابگردان			
۰/۹۰	-۰/۹۵۱**	$Y = -۰/۰۲۳X + ۲۲/۴۱۰$	وزن تر ساقه
۰/۶۷	-۰/۸۲۱**	$Y = -۰/۰۲۵X + ۲۱/۳۹۸$	وزن تر ریشه
۰/۸۶	-۰/۹۳۲**	$Y = -۰/۰۲۸X + ۳۱/۹۲۰$	طول ساقه
۰/۸۳	-۰/۹۱۲**	$Y = -۰/۰۲۰X + ۲۰/۲۹۲$	طول ریشه
۰/۹۳	-۰/۹۶۵**	$Y = -۰/۰۰۳X + ۳/۶۶۷$	وزن خشک ساقه
۰/۸۳	-۰/۹۱۳**	$Y = -۰/۰۰۱X + ۱/۲۸۴$	وزن خشک ریشه
۰/۷۴	-۰/۸۶۱**	$Y = -۰/۰۲۲۱X + ۲۱۱/۵۲۰$	سطح برگ
۰/۷۹	-۰/۸۸۹**	$Y = -۰/۰۰۹X + ۷۹/۸۶۰$	شاخص مقاومت (TI)
۰/۷۳	۰/۹۶۵**	$Y = -۰/۰۸۹X + ۱۰/۱۹۰$	درجه ممانعت از رشد (GGI)
۰/۹۷	-۰/۹۹۶**	$Y = -۰/۰۰۲X + ۲/۵۴۴$	کلروفیل (a)
۰/۹۰	-۰/۹۷۴**	$Y = -۰/۰۰۰۹X + ۱/۶۹۰$	کلروفیل (b)
۰/۹۸	-۰/۹۹۶**	$Y = -۰/۰۰۳X + ۳/۲۶۹$	کلروفیل کل
سویا			
۰/۸۶	-۰/۹۳۰**	$Y = -۰/۰۱۰X + ۱۰/۲۷۷$	وزن تر ساقه
۰/۶۴	-۰/۸۰۴**	$Y = -۰/۰۱۳X + ۱۱/۲۵۳$	وزن تر ریشه
۰/۹۱	-۰/۹۵۷**	$Y = -۰/۰۲۵X + ۲۶/۴۵۰$	طول ساقه
۰/۸۷	-۰/۹۳۸**	$Y = -۰/۰۱۹X + ۱۹/۸۶۰$	طول ریشه
۰/۹۸	-۰/۹۹۵**	$Y = -۰/۰۰۲X + ۲/۳۶۶$	وزن خشک ساقه
۰/۵۵	-۰/۷۴۷**	$Y = -۰/۰۰۲X + ۲/۰۷۵$	وزن خشک ریشه
۰/۷۳	-۰/۸۵۸**	$Y = -۰/۰۳۹۴X + ۳۴/۳۱۰$	سطح برگ
۰/۷۴	-۰/۸۶۲**	$Y = -۰/۰۰۹۱X + ۸۱/۹۲۰$	شاخص مقاومت (TI)
۰/۷۹	-۰/۸۸۹**	$Y = -۰/۰۰۸۸X + ۱۶/۶۶۰$	درجه ممانعت از رشد (GGI)
۰/۹۵	-۰/۹۷۷**	$Y = -۰/۰۰۲X + ۱/۸۴۰$	کلروفیل (a)
۰/۷۴	-۰/۹۱۳**	$Y = -۰/۰۰۰۷X + ۱/۵۱۳$	کلروفیل (b)
۰/۹۲	-۰/۹۷۱**	$Y = -۰/۰۰۳X + ۲/۴۱۰$	کلروفیل کل

* معنی‌دار در سطح آماری ۰/۰۵.

** معنی‌دار در سطح آماری ۰/۰۰۵.

پیتیدهای کلات‌کننده (PC_S)^(۷) و متالو تیونینها (MT_S)^(۸) هستند. PC_S ممکن است فلزات را کلات کند و آنها را به واکنش منتقل نماید. متالو تیونین‌ها پروتئین‌هایی هستند که کلات سازنده فلزات سنگین می‌باشند و در مسمومیت‌زدایی فلزات سنگین در سلول‌های گیاهی نقش دارند. تحقیقات در مورد مکانیزم‌های مسئول در مقاومت گیاهان نسبت به فلز سنگین اورانیوم به طور ویژه انجام نشده است اما بطور کلی تفاوت‌ها در مقاومت گیاهان به فلزات سنگین ممکن است در ارتباط با تفاوت در تولید و کارایی پیتیدهای کلات‌کننده و متالو تیونین‌ها باشد [۱۹]. شاخص تحمل توسط بیکر به منظور بررسی جذب، تجمع زیستی و تحمل بعضی از گونه‌های گیاهی مقاوم به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفت. شاهنده و همکاران در مطالعه‌ای بر روی گیاهان مختلف مقدار این شاخص را در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم برای آفتابگردان برابر با ۹۷٪ بدست آوردند [۲۱]. در این مطالعه شاخص موردنظر از سطح شاهد تا سطح ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اورانیوم در هر دو گیاه کاهش یافت (جدول ۲). تفاوت‌ها در این مطالعه و مطالعات مشابه ممکن است به تفاوت در گونه‌های گیاهی، ارقام گیاهی و نوع خاک مورد مطالعه مربوط باشند.

جدول ۲- تأثیر غلظت‌های مختلف اورانیوم بر روی شاخص‌های TI و GGI.

غلظت اورانیوم در خاک (mg/kg)	شاخص تحمل (TI)	درجه ممانعت از رشد (GGI)
آفتابگردان		
۰	۱۰۰	۰
۵۰	۸۷/۳	۶/۱۷
۱۰۰	۶۳/۹	۳۱
۲۵۰	۳۱/۶	۳۷
۵۰۰	۲۳	۶۲/۶
۱۰۰۰	۲/۱۷	۹۳/۶
سویا		
۰	۱۰۰	۰
۵۰	۹۹/۶	۲/۰۶
۱۰۰	۵۸/۳	۴۶/۲
۲۵۰	۳۳/۴	۵۳/۱
۵۰۰	۲۲/۹	۷۱/۷
۱۰۰۰	۴/۴۱	۹۴/۹



- ۱- DU: Depleted Uranium
 ۲- PNEC: Predicted No Effect Concentration
 ۳- Field Capacity
 ۴- TI: Tolerance Index
 ۵- GGI: Grade Of Growth Inhibition
 ۶- Hormotic Effect
 ۷- Pytochelation Peptides
 ۸- Metallothioneins

References:

1. D. Ostele, R.F. Coleman, T.K. Ball, "Uranium prospecting handbook," Institution of mining and metallurgy, London, 95-81 (1972).
2. C.M.D. Lamas, "Factors affecting the uranium availability in soils," fall agricultural research. (2005).
3. B. Jagetia, P. Purhit, "Effect of various concentration of uranium tailings on certain growth and biochemical parameters in sunflower," *Biologica Bratislava* 61(1): 103-107 (2006).
4. S.A. Murthy, P. Weinberger, M.P. Measures, "Uranium effects on growth of soy bean (clycine max (i) marr)," *Bulletine of Environmental Contamination and Toxicology*, 32: 580-586 (1984).
5. S.C. Sheppard, M.I. Sheppard, M. Gellerad, B. Sanipelli, "Derivation of ecotoxicity thresholds for uranium," *Jurnal of environmental radioactivity*. 79: 55-83 (2005).
6. R.R. Laksmanan, J. Mizera, Z. Venkateswarlu, "Uptake of uranium by vegetable and rice," *Water, Air and Soil pollution* 36: 151-155 (1998).
7. M.C. Gulati, M.C. Omswal, K.K. Nagpaul, "Assimilation of uranium by tomato and wheat plants," *plant and soil* 55: 55-59 (1980).
8. H. Vandenhove, M. Van Hees, "Phytoextraction for clean-up of low-level uranium contaminated soil evaluated," *Journal of Environmental Radioactivity* 72: 41-45 (2004).
9. M.I. Sheppard, D.H. Thibault, S.C. Sheppard, "Concentration and concentration ratios of U, As, and Co in Scots pine grown in a waste-site soil and an experimentally contaminated soil," *Water, Air, and Soil pollution*. 26: 85-94 (1984).
10. D.G. Arnon, "Copper enzyme in isolated chloroplast, polyphenol oxidase in beta vulgaris," *Plant Physiol.* 24: 1-15 (1949).
11. A.J.M. Baker, S.P. Mcgrath, C.M.D. Sidholi, R.D. Reeves, "The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops and metal-accumulating plants," *Resource. Conserve. Recycl.* 11: 41-49 (1994).
12. L. Leita, M.D.E. Nobili, C. Mondini, M.T. Garcia, "Response of leguminosae to cadmium exposure," *jurnal of plant nutrition*," 16: 2001-2012 (1993).
13. Julius, B. Cohen, "Practical Organic Chemistry," Kjeldal method to measure nitrogen (1910).
14. L. Metzger, "The effect of sewage sludge on soil structure," *Soil Science Society of America Jurnal*, 51: 346-351 (1987).
15. A. Klute, "Method of soil analysis part 1: Physical and Mineralogical methods," ASA. Soil Science Society of America Madison. Wisconsin. USA (1986).
16. A. Walkli, I.A. Black, "An examination of the degtareff method for determinating soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method," *Soil Science*, 37: 29-38 (1934).
17. A.J.M. Baker, P.L. Walter, "Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants in: Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary Aspects," 155-177 (1990).
18. J.W. Huang, M.J. Blaylock, B.D. Ensly, B.D. Ensley, Y.K. kapulink, "Phytoremediation of uranium contaminated soils," *Agronomy abstracts ASM meeting Anaheim. ca. oct.* 26-31 (1997).



- 19.I. Raskin, B.D. Ensley, "Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment," Chapter 14: 247-269 (2002).
- 20.S.A. Ibrahim, W. McLendon, T. Price, "Comparative plant uptake and environmental behavior of U-series radionuclides at uranium mine-mill," *Jurnal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 156(2): 253-267 (1992).
- 21.H. Shahandeh, L.R. Hossner, "Role of soil properties in phytoaccumulation of uranium," *Water, Air and Soil pollution*. 141: 165-180 (2002).
- 22.P. Chung, K.W. Kyoung, S. Yoshida, K. Soo-Young, "Uranium accumulation of crop plants enhanced by citric acid. *Environmental Geochemistry and Health*, 27: 529-538 (2005).
- 23.E. Ergun, B. Demirata, G. Gumus, "Simultaneous determination of chlorophyll a and chlorophyll b by derivative spectrophotometry," *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 379: 803-811 (2004).
- 24.N.C. Aery, G.S. Jain, "Effect of uranyl nitrate on seed germination and early seedling growth of *triticum aestivum*," *Biologia Bratislava*. 52: 115-119 (1997).