J. of Nuclear Sci. and Tech.
64, 2013, 8-18

مجله علوم و فنون هسته‌ای
۶۴، ۱۳۹۲، ۸-۱۸

اثر قارچ مایکوریزا و مقادیر مختلف فسفر بر جذب اورانیم در گیاه آفتاب‌گردان

سعید باقریفام، امیر لکزیان*
گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی: ۴۸۹۷۸-۹۱۷۷۹، مشهد ـ ایران

چکیده: اورانیم فلزی سنگین و پرتوزا است که به طور طبیعی در پوسته‌ی زمین یافت می‌شود. فعالیت‌های انسان در برخی موارد منجر به افزایش مقدار اورانیم در برخی مناطق زمین شده است. به منظور بررسی اثر مایکوریزا و فسفر بر جذب اورانیم در گیاه آفتاب‌گردان، مطالعه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل شامل یک سطح اورانیم (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سه سطح مایکوریزا شامل شاهد، گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه و دو سطح فسفر (۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در گلخانه‌ی پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. گیاهان بعد از یک دوره‌ی ۶۰ روزه برداشت شدند. وزن خشک گیاه، مقدار اورانیم و فسفر و میزان جذب اورانیم در بخش هوایی و ریشه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مایکوریزا باعث افزایش مقدار زیست توده و بنابراین افزایش مقاومت گیاه به تنش ناشی از سمیّت اورانیم شد. هم‌چنین مایکوریزا باعث افزایش مقدار اورانیم در اندام‌های هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان شد. تیمار فسفر وزن خشک اندام‌های هوایی، وزن خشک ریشه‌ی گیاه، مقدار اورانیم در بخش هوایی گیاه آفتاب‌گردان را به طور معنی‌داری افزایش داد. نتایج هم‌چنین نشان داد که مایکوریزا مقدار اورانیم در ریشه را چندین برابر مقدار آن در بخش هوایی افزایش داده و از این‌رو می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب برای افزایش تثبیت اورانیم در خاک مورد استفاده قرار گیرد.

***کلیدواژه‌ها:** اورانیم، مایکوریزا، فسفر، گیاه آفتاب‌گردان*

Effects of Mycorrhiza Fungi and Phosphorous on Uranium Uptake by Sunflower

S. Bagherifam, A. Lakzian*
Soil Science Depatrment, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, P.O.Box: 91775-1163, Mashhad – Iran

Abstract: Uranium is a radioactive element that occurs naturally in the earth's crust. However, in some areas its natural abundance has been redistributed due to anthropogenic activities, where consequently results in high levels of contamination. In order to study the effect of mycorrhiza fungi and phosphorus on the uranium uptake by sunflower, a pot experiment is conducted under a controlled greenhouse condition. The experiment was carried out in a completely randomized design with three factors, including three species of arbuscular mycorrhizae (Glomus mosseae, Glomus intraradices, non-mycorrhizae), two levels of phosphorous (20 and 60 mg/kg), and one level of uranium (100 mg/kg). Plants were harvested after 60 days of experiment and dry weight of root and shoot as well as the uranium and phosphorus concentration in the shoot and root were determined. The results showed that mycorrhizae fungi increased the resistance of the plant against heavy metals. Also, mycorrhizae increased the uranium and phosphorous contents in the shoot and root of the sunflower plant. The dry weights of the shoot and root and also the uranium concentration in the shoot of the sunflower plant were significantly augmented by increasing phosphorus level. The results revealed that mycorrhiza symbiosis raised the uranium concentration in the root more than the shoot. Thus, it seems that arbuscular mycorrhiza has a potential for enhancing the phytostabilization of the sunflower plant.

***Keywords:** Uranium, Mycorrhizae, Phosphorous, Sunflower*

*email: alakzian@yahoo.com
تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۲/۲۰

۱. مقدمه

اورانیم فلزی سنگین و پرتوزا است که به میزان حدود ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم به طور طبیعی در پوسته‌ی زمین یافت می‌شود. این عنصر دارای ۱۰ ایزوتوپ پرتوزا است که تدریجاً از طریق واپاشی در دو زنجیره‌ی واپاشی اورانیم و اکتینیم به پایداری می‌رسد. در برخی از موارد نظیر مدیریت پس‌ماند نامناسب، آزمایش‌های تسلیحات هسته‌ای، پس‌ماندهای معادن اورانیم و استفاده از کودهای فسفری حاوی ناخالصی اورانیم در زمین‌های کشاورزی مقدار آن افزایش یافته و منجر به آلودگی خاک و آب با این عنصر می‌شود [۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶]. اورانیم می‌تواند از طریق زنجیره‌ی غذایی وارد بدن انسان شده و از طریق پرتوزایی به سرطان و ناهنجاری‌های ژنتیکی منجر شود [۴]. بنابراین اتخاذ روش‌های مناسب زیست محیطی برای کاهش زیست فراهمی آن و یا حذف آن از خاک و آب ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های مختلفی برای مدیریت و اصلاح زیستی خاک‌ها و آب‌های آلوده به اورانیم به وسیله‌ی پژوهش‌گران مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها شامل روش‌های فیزیکی و برداشت خاک آلوده، تثبیت شیمیایی و استفاده از جاذب‌های مختلف برای تثبیت عنصر آلاینده در خاک و یا حذف عنصر آلاینده از آب، در آمیختن خاک آلوده با آسفالت و استفاده از ریزجانداران مختلف برای پالایش خاک و آب آلوده است [۷]. این روش‌ها معمولاً پرهزینه بوده و نیاز به تجهیزات و ادوات خاصی دارند. در این میان روش‌های گیاه پالایی به دلیل ارزان بودن و عدم تخریب محیط زیست، مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است [۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. بنابراین شناخت عامل‌های مؤثر در استفاده‌ی مؤثر از این روش شامل نقش عامل‌های گیاهی، سطح حاصل‌خیزی و مقدار عناصر غذایی خاک و نقش ریزجانداران مختلف در جذب اورانیم به وسیله‌ی گیاه اهمیت می‌یابد.

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص هم‌زیستی مایکوریزا با گیاهان مختلف برای افزایش جذب مواد مفید و فلزات سمّی به وسیله‌ی پژوهش‌گران مختلف صورت پذیرفته است [۹، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. هر کدام از این عناصر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی متفاوتی داشته و از این‌رو رفتار آن‌ها در خاک متفاوت است. از طرف دیگر، نوع قارچ هم‌زیست شده و نوع گیاه میزبان به لحاظ فیزیولوژی گیاهی، سیستم ریشه و در نهایت پاسخ گیاه به این هم‌زیستی متفاوت است؛ به طوری‌که در بسیاری از موارد پاسخ گیاه به این هم‌زیستی باعث افزایش جذب ماده‌ی سمّی در بخش هوایی و در نهایت افزایش بازده گیاه پالایی[1] و گاهی باعث افزایش جذب در ریشه و کاهش انتقال آلاینده از ریشه به بخش هوایی می‌شود که در این موارد بازده تثبیت گیاهی[2] افزایش می‌یابد. در مورد عناصر مختلف، نتایج متفاوت است، به عنوان مثال در مورد عناصر سرب و کادمیم این هم‌زیستی باعث افزایش جذب در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه می‌شود [۱۴]. نتایج در این مورد متناقض است که می‌تواند به شرایط خاک و گیاه مورد مطالعه بستگی داشته باشد. رافی‌کری و همکاران [۱۵] اثر مایکوریزا بر جذب اورانیم توسط گیاه شبدر را بررسی و گزارش کردند که مایکوریزا باعث کاهش مقدار اورانیم در بخش هوایی گیاه می‌شود. فسفر نیز نقش بسیار مهمی در هم‌زیستی مایکوریزا ایفا می‌کند. این اثرات نیز نسبت به نوع عنصر متفاوت است. چن و همکاران [۸] اثر فسفر و هم‌زیستی مایکوریزا بر جذب اورانیم در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه جو را بررسی و گزارش کردند که فسفر مقدار اورانیم در بخش هوایی گیاه جو را افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از مطالعات چن نشان داد که استفاده از مایکوریزا می‌تواند به عنوان گزینه‌ای برای تثبیت گیاهی اورانیم در خاک مورد استفاده قرار گیرد. تاکنون مطالعه‌ای در مورد اثر هم‌زیستی مایکوریزا و فسفر بر جذب اورانیم توسط گیاه آفتاب‌گردان انجام نشده است. در ارتباط با اثر نوع مایکوریزای هم‌زیست شده بر افزایش یا کاهش جذب در بخش هوایی یا ریشه‌ی گیاه نیز پژوهشی انجام نشده است. هدف از این مطالعه درک بهتر روابط هم‌زیستی مایکوریزا و گیاه آفتاب‌گردان در جذب اورانیم و پی بردن به نقش فسفر در روند جذب این عنصر بود.

۲. مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده از محل پردیس دانشگاه فردوسی مشهد جمع‌آوری شد. نمونه‌ی خاک در هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. به منظور حذف اسپورهای مایکوریزای بومی خاک، نمونه‌ی خاک با فاصله‌ی زمانی یک روز دو بار و هر بار به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت داده شد. بذر گیاه آفتاب‌گردان (رقم‌های سان) از مرکز تحقیقات کشاورزی گرگان بخش دانه‌های روغنی تهیه شد. آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل و سه تکرار انجام شد. برای آلاییدن نمونه‌ی خاک با اورانیم (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و فسفر (۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) مقادیر مناسب از $UO_2(NO_3)_2.6H_2O$ و $Ca(H_2PO_4)_2$ در آب مقطر

لازم حل و سپس به نمونه‌های خاک اضافه شد. هر یک از گلدان‌ها به کمک ۱۰۰ گرم زادمایه‌ی قارچی گونه‌های گلوموس اینترارادیسز[۳] و گلوموس موسه[۴]ی حاوی ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ اسپور مخلوط شده با خاک تیمار شد. سطوح شاهد هر کدام با مقدار ۱۰۰ گرم خاک سترون، تیمار شدند. پس از اضافه کردن هر یک از مقدارهای فوق و تیمارهای قارچی، مقدار رطوبت نمونه‌های خاک در ٪۷۰ ظرفیت زراعی تنظیم شد. گلدان‌های پلاستیکی با مقدار ۳ کیلوگرم از نمونه‌های خاک آلاییده شده پر و سپس به مدت ۴ هفته در شرایط گل‌خانه‌ای گرماگذاری شدند. پس از طی زمان یاد شده، در هر گلدان تعداد ۵ عدد از بذرهای ضدعفونی شده کشت شد. گلدان‌ها به صورت روزانه توزین و رطوبت آن‌ها در طول آزمایش در ٪۷۰ ظرفیت زراعی به طور ثابت نگه‌داری شد. پس از ظهور گیاهچه‌ها تعداد آن‌ها در هر گلدان به ۲ عدد تقلیل یافت. پس از ۶۰ روز، گیاهان از سطح خاک برداشت شدند. ریشه‌ها و ساقه‌ها جدا شده، به طور کامل به وسیله‌ی آب مقطر شسته شدند. برای تعیین وزن خشک ساقه و ریشه، گیاهان فوق به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شدند. نمونه‌ها پس از تعیین وزن خشک، آسیاب و الک شده و ۰٫۵ گرم از مواد گیاهی ریشه و ساقه به وسیله‌ی مخلوط حاوی ۸۰ درصد نیتریک اسید و ۲۰ درصد پرکلریک اسید، هضم شدند. سپس نمونه‌ها به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شده و مقدار اورانیم در نمونه‌ها به وسیله‌ی روش طیف نورسنجی با استفاده از معرف آرسنازو به عنوان عامل کمپلکس‌کننده اندازه‌گیری شد [۱۸، ۱۹]. غلظت فسفر در نمونه‌ها به وسیله‌ی روش واندومولیبدات و دستگاه طیف نورسنج تعیین شد [۲۰]. به منظور تخمین میزان آلودگی ریشه‌ها با قارچ مایکوریزا بخشی از نمونه‌ی اصلی ریشه‌ی تازه به وسیله روش فیلیپ و هیمن و با استفاده از تریپن بلو رنگ‌آمیزی شد [۲۱]. سپس نمونه‌ها مطابق روش جیوانتی و موسی برای تخمین درصد کلونی‌زایی در زیر بینوکولر با بزرگ‌نمایی ۱۰ تا ۴۰x مشاهده شد [۲۲]. نتایج حاصل به وسیله‌ی نرم‌افزار GenStat12 مورد تحلیل قرار گرفتند و جداول و نمودارها توسط نرم‌افزار Excel رسم شدند.

۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی نمونه‌ی خاک نشان داد که خاک مورد بررسی از نوع بافت لومی، pH برابر با ۸٫۱ و محتوی ٪۰٫۵ ماده‌ی آلی بود. نتایج اندازه‌گیری عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

۱.۳ تجزیه‌ی واریانس صفات مورد مطالعه برای تیمارهای آزمایشی

نتایج تجزیه‌ی واریانس صفات مورد مطالعه نشان داد که اثر سطوح میکوریزا بر روی صفات مقدار فسفر، مقدار اورانیم و میزان جذب آن در بخش‌های هوایی و ریشه، وزن خشک بخش هوایی و درصد کولونی‌زایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

پارامتر	یکای اندازه‌گیری	مقدار
بافت	–	لوم
pH	–	۸٫۱
EC	$dS\ m^{-1}$	۲
OM	٪	۰٫۵۰۰
نیتروژن کل	٪	۰٫۰۵۴
فسفر قابل استفاده	$mg\ kg^{-1}$	۹
پتاسیم قابل استفاده	$mg\ kg^{-1}$	۲۷۰
CEC	meq/۱۰۰ g soil	۱۴٫۸

جدول ۲. تجزیه‌ی واریانس صفات مورد مطالعه برای تیمارهای مورد بررسی

منابع تغییر	df	وزن خشک (گرم)		مقدار اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		جذب اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		مقدار فسفر (میلی‌گرم بر گرم)		درصد کولونیزه شدن
		بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	
مایکوریزا	۲	۰٫۵۳۸۳**	۰٫۰۰۴۲^{ns}	۱۸۲٫۲**	۴۸۵۱۲**	۰٫۰۰۰۷۹۴**	۰٫۰۰۶۱۸**	۲٫۷۸۷**	۲٫۲۳**	۷۳۶۲٫۵**
فسفر	۱	۱٫۸۴۳۲**	۰٫۰۵۷۸**	۷۳٫۲**	۴۰۳۸۴٫۸*	۰٫۰۰۲۳۱۲**	۰٫۰۰۰۶۶^{ns}	۴٫۰۶۱**	۰٫۷۸*	۸۴۰٫۵**
مایکوریزا × فسفر	۱	۱٫۸۴۳۲**	۰٫۰۵۷۸**	۷۳٫۲**	۴۰۳۸۴٫۸*	۰٫۰۰۲۳۱۲**	۰٫۰۰۰۶۶^{ns}	۴٫۰۶۱**	۰٫۷۸*	۸۴۰٫۵**
خطا	۱۰	۰٫۲۲۵۴	۰٫۰۰۳۸	۱٫۱	۱۷۷	۰٫۰۰۰۰۹۲	۰٫۰۰۰۱۶	۰٫۰۳۸	۰٫۱۰	۸۷٫۲
ضریب تغییرات (درصد)		۷	۱۸٫۸	۷٫۴	۷٫۲	۳۱٫۳	۲۱٫۳	۵٫۳	۱۳٫۵	۲۳٫۸

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

اثر مقادیر مورد مطالعه‌ی فسفر بر روی وزن خشک بخش هوایی و ریشه، مقدار اورانیم در بخش هوایی و ریشه، میزان جذب اورانیم به وسیله‌ی بخش هوایی، مقدار فسفر در بخش هوایی و درصد کولونی‌زایی، در سطح احتمال یک درصد، و بر روی مقدار فسفر در ریشه در سطح احتمال پنج درصد از لحاظ آماری معنی‌دار بود.

علاوه بر این نتایج نشان داد که، برهم‌کنش مقادیر مختلف فسفر و نوع زادمایه‌ی قارچی بر روی چهار صفت مقدار اورانیم در بخش هوایی، مقدار اورانیم در ریشه، میزان جذب اورانیم به وسیله‌ی بخش هوایی و مقدار فسفر در بخش هوایی در سطح احتمال یک درصد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. بنابراین، داده‌های به دست آمده از میزان جذب اورانیم به وسیله‌ی بخش هوایی از پراکنش بیش‌تری در مقایسه با سایر داده‌ها در اطراف میانگین جامعه برخوردار بود و این پراکندگی برای صفت مقدار فسفر در بخش هوایی کمینه بود. هم‌چنین نتایج نشان داد که این صفات با دقت قابل قبول و مناسبی اندازه‌گیری شده‌اند و تصمیم‌گیری براساس این نتایج قابل توصیه و مفید خواهد بود.

۲.۳ درصد کولونیزه شدن و آلودگی ریشه

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری بین مقادیر مختلف فسفر، مایکروریزا و درصد کولونیزه شدن در ریشه وجود دارد. طبق نتایج به دست آمده، درصد کولونیزه شدن در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان تابعی از نوع مایکروریزا و مقادیر فسفر است (جدول ۳)، به طوری که در نمونه‌ی خاک‌های شاهد هیچ اندام مایکروریزایی تشکیل نشد. درصد کولونیزه شدن در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان در تلقیح با گلوموس اینترارادیسز بیش‌تر از تلقیح با گلوموس موسه بود. به طوری‌که درصد کولونیزه شدن از ۶۷/۵ درصد در تلقیح با گلوموس اینترارادیسز تا ۵۰ درصد در تلقیح با گلوموس موسه کاهش یافت که این تغییرات در سطح آماری (P<۰/۰۱) معنی‌دار بودند (جدول ۴). نتایج هم‌چنین نشان داد که مقادیر مختلف فسفر اثر آماری معنی‌داری روی درصد کولونیزه شدن هر دو نوع مایکروریزا در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان دارد. با افزایش مقدار فسفر درصد کولونیزه شدن در تلقیح با هر دو گونه‌ی مایکروریزا به شدت کاهش یافت؛ درصد کولونیزه شدن از ۴۶ درصد در مقدار فسفر ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تا ۳۲ درصد برای مقدار فسفر ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کاهش یافت (جدول ۵) که این تغییرات در سطح آماری (P<۰/۰۱) معنی‌دار بودند.

جدول ۳. مقایسه‌ی میانگین صفات مورد مطالعه در اثرات متقابل مایکروریزا در فسفر

M	P (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	وزن خشک (گرم بر گلدان)		غلظت اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		جذب اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		مقدار فسفر (میلی‌گرم بر گرم)		درصد کولونیزه شدن
		ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	
C	۲۰	۱/۴۵ d	۰/۲۴ c	۱۱/۱۰ d	۱۰۸/۵ e	۰/۰۲۱ b	۰/۰۲۵ e	۲/۳۲ d	۱/۴۳ d	۰/۱ d
C	۶۰	۲/۱۳ b	۰/۴۰ ab	۵/۲۰ e	۷۳/۲ f	۰/۰۱۷ b	۰/۰۲۸ de	۳/۸۷ b	۲/۱۲ c	۰/۱ d
GI	۲۰	۱/۸۸ c	۰/۲۹ bc	۱۴/۲۰ c	۳۵۴/۳ a	۰/۰۲۴ b	۰/۱۰۲ a	۴/۱۹ b	۲/۸۷ ab	۷۷/۱ a
GI	۶۰	۲/۵۱ a	۰/۴۳ a	۲۴/۱۰ a	۱۸۶/۲ c	۰/۰۶۰ a	۰/۰۸۰ ab	۴/۷۱ a	۳/۱۰ a	۵۸/۱ b
GM	۲۰	۱/۵۸ d	۰/۲۹ bc	۱۰/۲۰ d	۲۳۱/۸ b	۰/۰۱۳ b	۰/۰۶۷ bc	۳/۲۳ c	۲/۰۸ c	۶۱/۱ ab
GM	۶۰	۲/۱۹ b	۰/۳۳ abc	۱۸/۳۰ b	۱۵۱/۰ d	۰/۰۴۸ a	۰/۰۴۹ cd	۴/۰۱ b	۲/۴۱ bc	۳۹/۱ c
LSD ۵٪		۰/۲۴	۰/۱۱	۱/۸۲	۲۳/۷	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	۰/۳۵	۰/۵۶	۱۶/۶

سطح تلقیح نشده با مایکروریزا: C، گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه به ترتیب GI و GM، ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح (P<۰/۰۱) ندارند.

جدول ٤. مقایسه‌ی میانگین صفات مورد مطالعه در سطوح مختلف مایکروریزا

مایکروریزا	وزن خشک (گرم بر گلدان)		غلظت اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		جذب اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		مقدار فسفر (میلی‌گرم بر گرم)		درصد کولونیزه شدن
	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	
شاهد	۱/۷۹۰۰ b	۰/۳۲ a	۸/۱۵۰ c	۹۰/۸۰۰ c	۰/۰۱۹۱۷ a	۰/۰۲۶۸ c	۳/۰۹۷ c	۱/۷۷۵ c	۰/۱۰ c
G.Intra	۲/۱۹۵۰ a	۰/۳۶ a	۱۹/۱۵۰ a	۲۷۰/۲۰ a	۰/۰۴۲۱۷ ab	۰/۰۹۱۰ a	۴/۴۴۸ a	۲/۹۸۵ a	۶۷/۶۰ a
G.moss	۱/۸۸۵۰ b	۰/۳۱ a	۱۴/۲۵۰ b	۱۹۱/۴۰ b	۰/۰۳۰۶۷ b	۰/۰۵۸۰ b	۳/۶۲۰ b	۲/۲۴۷ b	۵۰/۱۰ b
LSD ۵٪	۰/۱۷	۰/۰۸	۱/۲۹۰	۱۶/۷	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۶	۰/۲۵	۰/۳۹۸	۱۱/۷

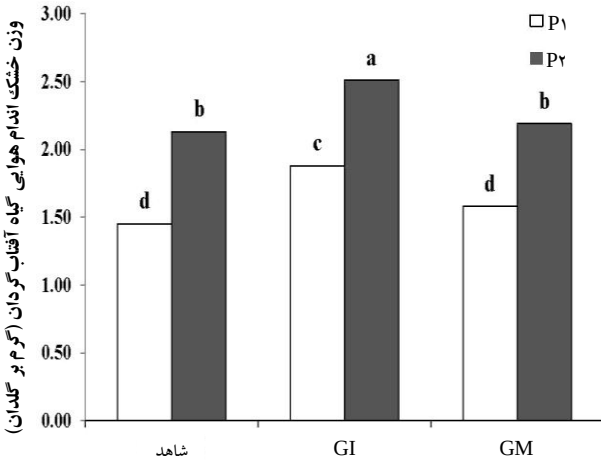
جدول ۵. مقایسه‌ی میانگین صفات مورد مطالعه در سطوح مختلف فسفر

فسفر	وزن خشک (گرم بر گلدان)		غلظت اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		جذب اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		مقدار فسفر (میلی‌گرم بر گرم)		درصد کولونیزه شدن
	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	
P۱	۱٫۶۴ b	۰٫۲۷ b	۱۱٫۸۳ b	۲۳۱٫۵ a	۰٫۰۱۹۳ b	۰٫۰۶۵ a	۳٫۲۵ b	۲٫۱۳ b	۴۶٫۱ a
P۲	۲٫۲۸ a	۰٫۳۹ a	۱۵٫۸۷ a	۱۳۶٫۸ b	۰٫۰۴۲۰ a	۰٫۰۵۳ a	۴٫۲۰ a	۲٫۵۴ a	۳۲٫۴ b
LSD ۵٪	۰٫۱۴	۰٫۰۶	۱٫۰۵	۱۳٫۷	۰٫۰۰۹۹	۰٫۰۱۳	۰٫۲۰	۰٫۳۲۵	۹٫۶

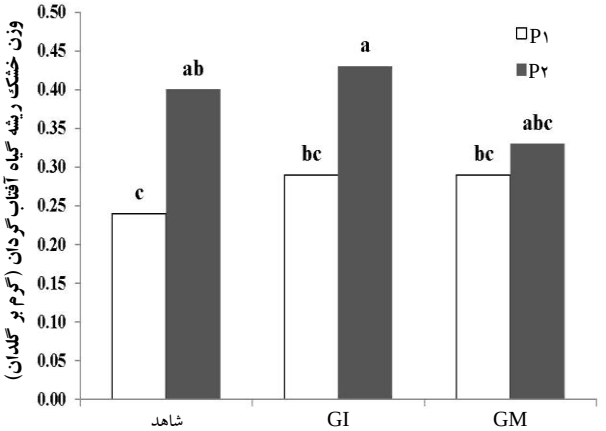
P۱ و P۲ به ترتیب مقادیر ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک.

۳.۳ رشد گیاه

نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که فسفر و مایکوریزا اثرات آماری معنی‌داری بر وزن خشک بخش هوایی (شکل ۱) و ریشه (شکل ۲) دارند، به‌طوری‌که میانگین وزن خشک بخش هوایی در سطح شاهد از ۱٫۴۵ گرم برای مقدار فسفر ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تا ۲٫۱۳ برای مقدار فسفر ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تغییر کرد. میانگین وزن خشک از ۱٫۸۸ گرم در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز برای مقدار ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک تا ۲٫۵۱ گرم برای مقدار ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک افزایش یافت. این ارقام برای خاک تلقیح شده با گلوموس موسه به ترتیب، ۱٫۵۸ و ۲٫۱۹ بودند. بالاترین وزن خشک بخش هوایی در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز و برای مقدار ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک مشاهده شد. به همان ترتیب، وزن خشک در ریشه نیز با روندی مشابه، با افزایش مقدار فسفر در خاک افزایش یافت. بالاترین میزان وزن خشک ریشه در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز و تیمار ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک مشاهده شد. نتایج مقایسه‌ی میانگین اثر مایکوریزا بر وزن خشک بخش هوایی نشان داد که پایین‌ترین میزان وزن خشک در سطح شاهد (۱٫۷۹ گرم) و بالاترین مقدار آن در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز (۲٫۱۹ گرم) تولید شده است (جدول ۲). بنابر نتایج حاصل از این مطالعه این اثرات بین سطوح مختلف مایکوریزا در سطح آماری (P<۰٫۰۱) معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه‌ی میانگین وزن خشک بخش هوایی در مقادیر مختلف فسفر نیز حاکی از آن بود که میانگین وزن خشک از ۱٫۶۴ گرم در تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک تا ۲٫۲۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک تغییر یافتند. این اثرات در سطح آماری (P<۰٫۰۱) معنی‌دار بودند (جدول ۵). مقایسه‌ی میانگین اثرات مایکوریزا



شکل ۱. اثر مقادیر مختلف فسفر و گونه‌های مایکوریزا بر وزن خشک اندام هوایی گیاه آفتاب‌گردان. (P۱ و P۲ به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی مقادیر ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک و GI و GM نشان‌دهنده‌ی گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه است. ستون‌هایی که دارای دست‌کم یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح (P<۰٫۰۱) ندارند).

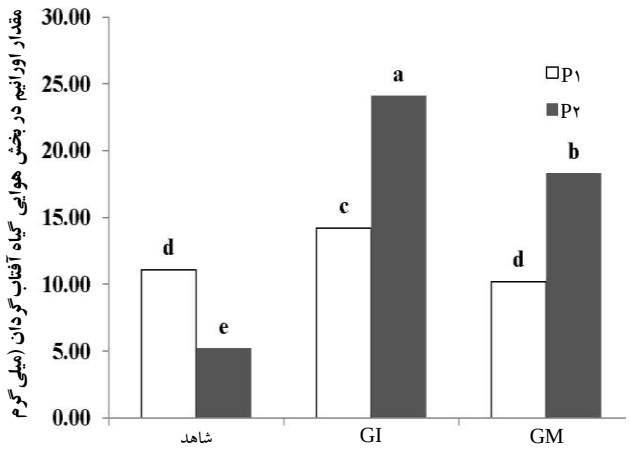


شکل ۲. اثر مقادیر مختلف فسفر و گونه‌های مایکوریزا بر وزن خشک ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان. (P۱ و P۲ به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی مقادیر ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک و GI و GM نشان‌دهنده‌ی گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه است. ستون‌هایی که دارای دست‌کم یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح (P<۰٫۰۱) ندارند).

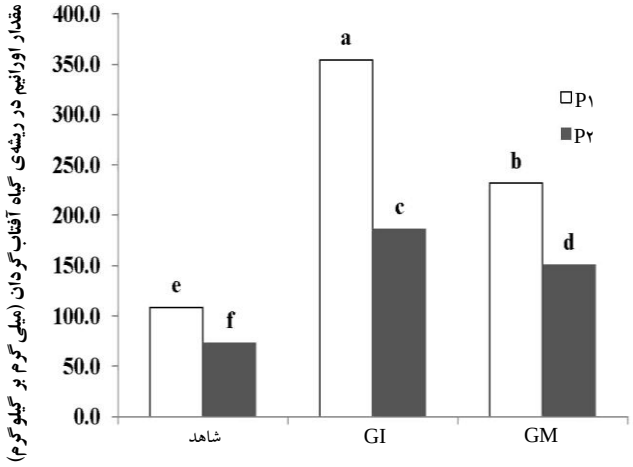
بر وزن خشک ریشه نشان داد که سطوح مختلف مایکوریزا باعث افزایش وزن خشک ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان شدند، اما این اثرات به لحاظ آماری معنی‌دار نبودند. هم‌چنین افزایش مقدار فسفر در خاک باعث افزایش وزن خشک ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان از ۰٫۲۷ گرم به ۰٫۳۹ گرم شد (جدول ۳). این اثرات به لحاظ آماری معنی‌دار بودند (جدول ۱). چن و همکاران اثر تلقیح یک خاک آلوده به اورانیم با گلوموس اینترارادیسز بر جذب اورانیم و عملکرد دو ژنوتیپ مختلف گیاه جو را بررسی نموده و نشان دادند که تیمار خاک با مایکوریزا باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه در هر دو ژنوتیپ مورد مطالعه شد [۸]. آن‌ها گزارش کردند که بالاترین مقدار وزن خشک در خاک تیمار شده با ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر روی داد. علاوه بر آن چن و همکاران اثرات متقابل فسفر و مایکوریزا بر جذب اورانیم و وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه شبدر را بررسی نموده و با نتایجی مشابه با آزمایش قبل مواجه شدند؛ به طوری‌که تیمارهای یاد شده افزایش معنی‌دار وزن خشک ساقه و ریشه‌ی گیاه یونجه را موجب شدند [۹]. رافی‌کری و همکاران در مطالعه‌ای اثرات مقادیر مختلف اورانیم و تلقیح گلوموس اینترارادیسز بر جذب اورانیم و وزن خشک بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه شبدر را بررسی و گزارش کردند که تلقیح خاک با گلوموس اینترارادیسز در تمام مقادیر اورانیم، وزن خشک بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه شبدر را بین ۱۹ تا ۳۹ درصد افزایش می‌دهد [۱۵]. نتایج مطالعه‌ی حاضر نیز حاکی از افزایش وزن خشک ساقه و ریشه در اثر افزایش فسفر با هر دو نوع مایکوریزا گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه بود. نتایج هم‌چنین نشان داد که گیاه آفتاب‌گردان در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز دارای وزن خشک بخش هوایی و ریشه‌ی بیش‌تری است که با یافته‌های سایر پژوهش‌گران هم‌آهنگی دارد.

۴.۳ مقدار اورانیم در بخش هوایی و ریشه

نتایج نشان داد که مقادیر مختلف فسفر و تلقیح خاک با هر دو نوع مایکوریزا اثرات آماری معنی‌داری بر مقدار اورانیم در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان دارد (شکل ۳ و ۴)، به طوری‌که در نمونه‌های تلقیح نشده با مایکوریزا مقدار اورانیم در بخش هوایی با افزایش مقدار فسفر در خاک کاهش یافت. بر خلاف این نتایج، در تیمارهای تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه مقدار اورانیم موجود در بخش



شکل ۳. اثر مقادیر مختلف فسفر و گونه‌های مایکوریزا بر مقدار اورانیم در بخش هوایی گیاه آفتاب‌گردان. (P۱ و P۲ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک و GI و GM نشان‌دهنده‌ی گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه است. ستون‌هایی که دارای دست‌کم یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح (P<۰٫۰۱) ندارند).



شکل ٤. اثر مقادیر مختلف فسفر و گونه‌های مایکوریزا بر مقدار اورانیم در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان. (P۱ و P۲ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک و GI و GM نشان‌دهنده‌ی گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه است. ستون‌هایی که دارای دست‌کم یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح (P<۰٫۰۱) ندارند).

هوایی گیاه با افزایش مقدار فسفر در خاک افزایش پیدا کرد. نتایج حاصل از مقایسه‌ی مقدار میانگین در سطوح مختلف مایکوریزا نشان داد سطح تلقیح نشده کم‌ترین مقدار اورانیم در بخش هوایی (۸٫۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سطح تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز بیش‌ترین مقدار اورانیم (۱۹٫۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در بخش هوایی را دارد؛ این نتایج در سطح آماری

(P<۰/۰۱) معنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه‌ی میانگین برای مقادیر مختلف فسفر هم‌چنین مشخص نمود که با افزایش مقدار فسفر از ۲۰ به ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، مقدار اورانیم در بخش هوایی از ۱۱/۸۳ به ۱۵/۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. این نتایج به لحاظ آماری در سطح (P<۰/۰۱) معنی‌دار بودند. مقدار اورانیم در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان در تیمارهای مختلف از ۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای مقدار فسفر ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تا ۳۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز تغییر یافت (شکل ۴). براساس نتایج به دست آمده، تلقیح خاک با هر دو نوع مایکوریزای گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه باعث افزایش معنی‌دار مقدار اورانیم در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان شد. نتایج حاصل از مقایسه‌ی میانگین سطوح مایکوریزا در خاک مشخص نمود که مقدار اورانیم در بخش هوایی گیاه آفتاب‌گردان در تیمارهای مختلف مایکوریزا، شاهد < گلوموس موسه < گلوموس اینترارادیسز، بوده و مقدار اورانیم در ریشه هم از همین الگو تبعیت می‌کند. این تغییرات به لحاظ آماری در سطح (P<۰/۰۱) معنی‌دار بودند (جدول ۴). به همین ترتیب، نتایج حاصل از مقایسه‌ی میانگین‌ها برای مقادیر مختلف فسفر نشان داد که با افزایش مقدار فسفر در خاک، مقدار اورانیم در بخش هوایی از ۱۱/۸۳ به ۱۵/۸۷ افزایش یافت. اما با افزایش مقادیر فسفر در خاک مقدار اورانیم موجود در ریشه از ۲۳۱/۵ به ۱۳۱/۸ کاهش یافت که هر دوی این تغییرات به لحاظ آماری در سطح (P<۰/۰۱) معنی‌دار بودند. نتایج حاکی از آن است که مقدار اورانیم در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان چندین برابر مقدار آن در بخش هوایی بود. گرچه مقدار اورانیم موجود در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان در اثر تلقیح خاک با هر دو نوع مایکوریزای گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه افزایش می‌یابد، تلقیح خاک با گلوموس اینترارادیسز مقدار اورانیم در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان را بیش‌تر تغییر می‌دهد. نتایج حاصل از مطالعات رافی‌کری و همکاران بر روی گیاه شبدر نشان داد که مقدار اورانیم در ریشه‌ی گیاه شبدر ۶۰ تا ۳۶۰ برابر بیش‌تر از مقادیر آن در بخش هوایی گیاه است [۱۵]. علاوه بر این مشخص شد که مقدار اورانیم در بخش هوایی گیاهان شبدر تلقیح نشده با مایکوریزا تقریباً ۱/۷ برابر مقادیر آن در بخش هوایی گیاهان تلقیح شده است. هم‌چنین گزارش شد که تلقیح مایکوریزایی اثر آماری معنی‌داری بر مقدار اورانیم در ریشه‌ی شبدر ندارد. تفاوت در نتایج این مطالعه با مطالعه‌ی رافی‌کری می‌تواند به تفاوت در نوع گیاه و نوع نمک اورانیم مورد استفاده مربوط باشد. چن و همکاران گزارش کردند که تلقیح خاک با مایکوریزا در یک ژنوتیپ جو مقدار اورانیم در بخش هوایی را افزایش و در یک ژنوتیپ دیگر مقدار اورانیم را کاهش داد. بنابراین نوع گیاه میزبان در پاسخ ایجاد شده از این هم‌زیستی بسیار پر اهمیت است. علاوه بر آن گزارش شد که در هر دو ژنوتیپ، تلقیح خاک با گلوموس اینترارادیسز باعث افزایش مقدار اورانیم در ریشه‌ی گیاه جو شد. هم‌چنین در اثر افزایش فسفر در خاک در تیمارهای غیرمایکوریزایی، مقدار اورانیم در بخش هوایی کاهش و در تیمارهای مایکوریزایی این مقادیر افزایش یافت. بنابراین برهم‌کنش متقابل مایکوریزا و فسفر باعث افزایش مقدار اورانیم در بخش هوایی می‌شود [۸]. نتایج مطالعه‌ی حاضر با نتایج فوق هم‌خوانی دارد. این مطالعه نشان داد که تلقیح خاک با گلوموس موسه مقدار اورانیم در بخش هوایی گیاه را نسبت به سطح تلقیح نشده (شاهد) کاهش داد اما این کاهش به لحاظ آماری معنی‌دار نبود. به همین ترتیب، تلقیح با هر دو نوع مایکوریزای گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه مقدار اورانیم در ریشه‌ی هر دو گیاه را افزایش داد. این افزایش به لحاظ آماری معنی‌دار بود. جذب اورانیم از خاک از پارامترهای مختلفی اثر می‌پذیرد که شامل ویژگی‌های خاک، روابط متقابل اورانیم و فسفر و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه میزبان است. مقادیر بسیار بالای اورانیم در هیف‌های مایکوریزایی نسبت به مقدار آن در ریشه‌ی گیاه میزبان در مطالعات سایر پژوهش‌گران گزارش شده است که این امر احتمالاً به شرایط شیمیایی حاکم بر سلول‌های هیف مرتبط است [۲۳]. این شرایط می‌تواند به مقادیر بالای فسفر و قدرت اسیدی ضعیف در سلول‌های هیف مربوط باشد که تشکیل کمپلکس‌های اورانیم و فسفات و متعاقباً تشکیل رسوب در سلول‌های هیف را موجب خواهد شد [۲۴]. سازوکارهای مرتبط با روابط فیزیولوژیکی بین قارچ‌ها و ریشه‌ی گیاه میزبان هم می‌تواند در این امر دخیل باشد. از دیدگاه مولکولی کولونیزه شدن مایکوریزایی می‌تواند باعث بیان ژن‌های پروتئین‌های ناقل در غشای پلاسمایی شده و بر جذب عناصر به وسیله‌ی گیاهان اثر بگذارد [۲۵].

۵.۳ جذب اورانیم در بخش هوایی و ریشه

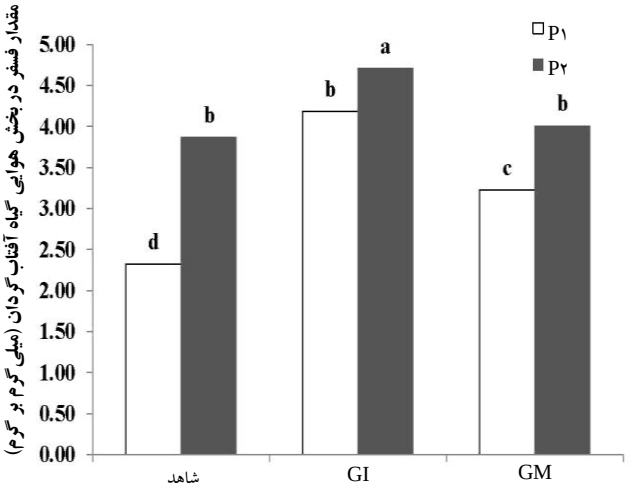
میزان جذب اورانیم از هر گلدان از حاصل‌ضرب مقدار اورانیم در بخش هوایی و ریشه در مقدار وزن خشک ساقه و ریشه برحسب (میلی‌گرم بر گلدان) محاسبه شد (جدول ۳). نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که میزان جذب اورانیم در بخش هوایی گیاه آفتاب‌گردان در تیمارهای مختلف از ۱۳ تا ۶۰ میکروگرم در هر گلدان و در ریشه از ۲۵ تا ۱۰۲ میکروگرم در هر گلدان تغییر یافت. بیش‌ترین میزان جذب اورانیم در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز و کم‌ترین آن در سطح شاهد مشاهده شد. نتایج حاصل از مقایسه‌ی میانگین سطوح مختلف مایکوریزا در خاک نشان داد که میزان جذب اورانیم در بخش هوایی گیاه آفتاب‌گردان خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز، گلوموس موسه، و در شاهد به ترتیب، ۴۲، ۱۹ و ۳۰ میکروگرم بر گلدان (جدول ۴) و در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان برای تیمارهای فوق به ترتیب، ۵۸، ۹۱ و ۲۶ میکروگرم بر گلدان بود. به همین ترتیب، نتایج حاصل از مقایسه‌ی اثر میانگین مقادیر مختلف فسفر بر جذب اورانیم به وسیله‌ی ریشه نشان داد که با افزایش مقدار فسفر در خاک میزان جذب اورانیم در ریشه از ۱۹ به ۴۲ میکروگرم بر گلدان افزایش یافت. این نتایج به لحاظ آماری در سطح ($P<۰/۰۱$) معنی‌دار بود. جذب اورانیم به وسیله‌ی ریشه با افزایش مقدار فسفر در خاک، از ۶۵ به ۵۳ میکروگرم بر گلدان کاهش یافت. این نتایج از لحاظ آماری معنی‌دار نبودند (جدول ۵). علاوه بر این نتایج حاکی از آن بود که جذب اورانیم در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان بیش‌تر از بخش هوایی آن بود. مقدار جذب در بخش هوایی و ریشه با تلقیح خاک با هر دو نوع مایکوریزای گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه افزایش یافت که این افزایش در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز بیش‌تر بود.

۶.۳ غلظت فسفر

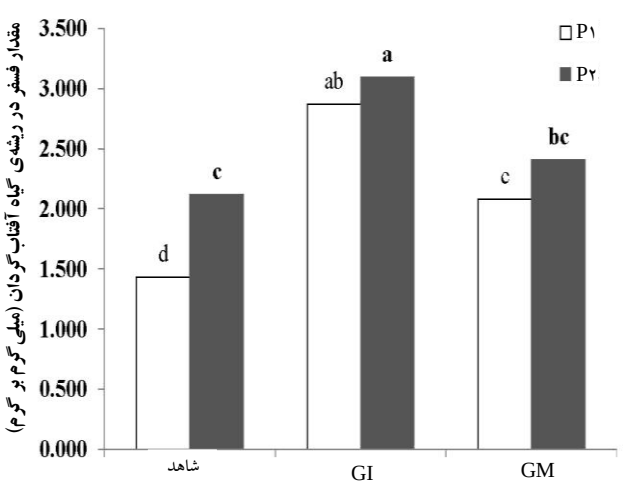
نتایج نشان داد که میانگین مقدار فسفر در بخش هوایی گیاه آفتاب‌گردان در مقادیر مختلف فسفر و مایکوریزا از ۲/۳۱ میلی‌گرم بر گرم در تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک شاهد (تلقیح نشده) تا ۴/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز تغییر کرد (شکل ۵). به همین ترتیب، غلظت فسفر در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان از ۱/۴۳ تا ۳/۱۰ میلی‌گرم بر گرم در تیمارهای یاد شده با روندی مشابه افزایش یافت (شکل ۶). علاوه بر این مشخص شد که تلقیح خاک با هر دو نوع مایکوریزا مقدار فسفر در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از مقایسه‌ی میانگین سطوح مختلف مایکوریزا نشان داد که مقدار فسفر در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان، شاهد < گلوموس موسه < گلوموس اینترارادیسز، است. این تغییرات برای بخش هوایی و ریشه در سطح آماری ($P<۰/۰۵$) معنی‌دار بودند. به همین ترتیب، نتایج حاصل از مقایسه‌ی میانگین مقادیر مختلف فسفر نشان داد که با افزایش مقدار فسفر از ۲۰ به ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، مقدار فسفر در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان به ترتیب از ۳/۲۵ و ۲/۱۳ به ۴/۲۰ و ۲/۵۴ میلی‌گرم بر گرم افزایش یافت. این تغییرات به لحاظ آماری در سطح ($P<۰/۰۱$) معنی‌دار بودند (جدول ۵). چن و همکاران اثر دو تیمار ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر بر جذب اورانیم به وسیله‌ی گیاه آفتاب‌گردان، جذب فسفر و وزن خشک گیاه را برای خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش مقدار فسفر در خاک، مقدار فسفر در بخش هوایی و ریشه گیاه جو افزایش یافت [۸]. البته این نتایج برای دو نوع ژنوتیپ جو آزمایش شده تا حدودی متفاوت بودند. آن‌ها هم‌چنین گزارش کردند که تلقیح خاک با مایکوریزا باعث افزایش جذب فسفر توسط گیاه جو شد. نتایج مطالعه‌ی حاضر با نتایج مطالعه‌ی چن و همکاران هم‌آهنگی خوبی دارد.

۷.۳ مطالعات همبستگی

نتایج حاصل از مطالعات همبستگی بین صفات مورد بررسی نشان داد که همبستگی بالایی بین برخی صفات مورد مطالعه وجود دارد (جدول ۶). بالاترین این همبستگی‌ها بین پارامتر درصد کولونیزه شدن و مقدار اورانیم در ریشه با مقدار ۰/۸۸ و کم‌ترین آن‌ها بین درصد کولونیزه شدن و بخش هوایی با مقدار ۰/۱۸۷ وجود داشت. این همبستگی‌ها به لحاظ آماری در سطح آماری ($P<۰/۰۵$) معنی‌دار بودند. به همین ترتیب همبستگی‌های بالایی بین مقدار فسفر در بخش هوایی و ریشه و وزن خشک بخش هوایی و ریشه وجود داشت. نتایج حاصل از مطالعات همبستگی هم‌چنین نشان داد که بین پارامترهای درصد کولونیزه شدن قارچی و مقدار فسفر در بخش هوایی و ریشه همبستگی‌های بالایی وجود داشت که به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۶۸ بودند. این همبستگی‌ها به لحاظ آماری به ترتیب در سطوح ($P<۰/۰۵$) و ($P<۰/۰۱$) معنی‌دار بودند.



شکل ۵. اثر مقادیر مختلف فسفر و گونه‌های مایکوریزا بر مقدار فسفر در بخش هوایی گیاه آفتاب‌گردان. (P۱ و P۲ به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی مقادیر ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک و GI و GM نشان‌دهنده‌ی گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه است. ستون‌هایی که دارای دست‌کم یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح (P<۰٫۰۱) ندارند.)



شکل ٦. اثر مقادیر مختلف فسفر و گونه‌های مایکوریزا بر مقدار فسفر در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان. (P۱ و P۲ به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی مقادیر ۲۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک و GI و GM نشان‌دهنده‌ی گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه است. ستون‌هایی که دارای دست‌کم یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح (P<۰٫۰۱) ندارند.)

جدول ٦. ضریب‌های همبستگی بین صفات مورد بررسی

صفت	وزن خشک (گرم بر گلدان)		مقدار اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		مقدار اورانیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		مقدار فسفر (میلی‌گرم بر گرم)	
	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه
وزن خشک ریشه (گرم)	۰٫۷۴۳**							
مقدار اورانیم در بخش هوایی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰٫۵۷۶**	۰٫۲۶۷ns						
مقدار اورانیم در ریشه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	−۰٫۰۷۵ns	−۰٫۲۰۰ns	۰٫۲۷۷ns					
جذب اورانیم در بخش هوایی (میلی‌گرم بر گلدان)	۰٫۴۸۰*	۰٫۳۴۲ns	۰٫۵۵۷*	۰٫۴۱۹ns				
جذب اورانیم در ریشه (میلی‌گرم بر گلدان)	۰٫۲۶۳ns	۰٫۲۵۰ns	۰٫۴۸۷*	۰٫۸۸۲**	۰٫۶۲۴**			
مقدار فسفر در بخش هوایی (میلی‌گرم بر گرم)	۰٫۸۲۴**	۰٫۵۷۳*	۰٫۵۴۹*	۰٫۳۰۹ns	۰٫۳۳۵ns	۰٫۵۲۴*		
مقدار فسفر در ریشه (میلی‌گرم بر گرم)	۰٫۶۴۷**	۰٫۴۰۶ns	۰٫۵۷۰*	۰٫۵۱۳*	۰٫۴۶۴*	۰٫۶۹۵**	۰٫۸۴۴**	
درصد کولونیزه شدن	۰٫۱۸۷ns	۰٫۰۲۴ns	۰٫۵۰۵*	۰٫۸۷۵**	۰٫۵۳۱*	۰٫۸۸۵**	۰٫۵۲۲*	۰٫۶۸۴**

٤. نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که میزان جذب اورانیم در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان در اثر تلقیح خاک با هر دو نوع مایکوریزا گلوموس اینترارادیسز و گلوموس موسه افزایش یافت. به همین ترتیب، افزایش مقدار فسفر در خاک باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان در تمام تیمارهای مورد استفاده، شد. بیش‌ترین میزان جذب اورانیم در بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان در خاک تلقیح شده با گلوموس اینترارادیسز و برای مقادیر فسفر به ترتیب برابر با ۶۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. بنابر نتایج این آزمایش غلظت اورانیم در ریشه‌ی گیاه آفتاب‌گردان بیش از ۱۰ برابر مقدار آن در بخش هوایی بود. لذا، گیاه آفتاب‌گردان می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب برای پالایش گیاهی خاک‌های آلوده به اورانیم مورد استفاده قرار گیرد. بنابر نتایج این مطالعه استفاده از گلوموس اینترارادیسز به عنوان کود زیستی در هنگام استفاده از گیاه آفتاب‌گردان برای پالایش گیاهی خاک‌های آلوده به اورانیم مناسب‌تر است.

پی‌نوشت‌ها:

۱. Phyto Extraction

۲. Phyto Stabilization

۳. *Glomus Intraradices*

۴. *Glomus Mosseae*

مرجع‌ها:

1. R. J. Fellows, C. C. Ainsworth, C. J. Driver, D. A. Cataldo, Dynamics and transformations of radionuclides in soils and ecosystem health, Soil chemistry and ecosystem health, Soil Sci. Soc. Am. J, 52 (1998) 85-112.

2. J. A. N. Entray, C. Vance, M. A. Hamilton, M. A. Zabowask, D. Zabowask, L. S Watrud, D. C. Adrino, Phytoremediartion of soil contaminated with low concentrations of radionuclides, Water, Soil and Air pollution, 88 (1996) 167-176.

3. E. S. Schnug, C. Haneklause, L. C. Schnier, S. Scholten, Issues of natural radioactivity in phosphates, Communication in soil science and plant analysis, 27 (1996) 829-841.

4. UNEP II. Depleted uranium in Kosovo, Post-conflict environmental assessment (2001).

5. B. Jagetia, P. Purhit, Effect of various concentration of uranium tailings on certain growth and biochemical parameters in sunflower, Biologica Bratislava 61(1) (2006) 103-107.

6. R. Tadarovsky, I. Koler, On the uranium content in some technogenic products potential environmental pollutions, Journal of radioanalytical and Nuclear Chemistry, letters 176(5) (1993) 405-41.

7. D. L. Sparks, Environmental Soil Chemistry, CRC Boca Raton USA (1995).

8. B. Chen, Y. Zhu, G. Zhang, X. I. Jakobsen, The influence of mycorrhiza on uranium and phosphorus uptake by barley plants from field contaminated soil, Environ Sci & Pollut Res 12 (2005) 325-331.

9. B. Chen, Y. Zhu, GX. Zhang, X. I. Jakobsen, Effects of mycorrihizal fungus Glomus intradices on uranium uptake and accumulation by Medicago truncatula L. from uranium-contaminated soil, Plant and Soil 275 (2005) 349-359.

10. V. Ultra, U. Tanaka, S. Sakurai, K. Iwasaki, Effects of arbuscular mycorrhiza and phosphorus application on arsenic toxicity in sunflower (Helianthus annuus L.) and on the transformation of arsenic in the rhizosphere 290 (2007) 29-41.

11. S. Mangkoedihardjo, R. Ratnawati, N. Alfianti, Phytoremediation of Hexavalent Chromium Polluted Soil Using Pterocarpus indicus and Jatropha curcas L., World Applied Sciences Journal, 4 (2008) 338-342.

12. V. Estaun, A. Cortes, K. Velianos, A. Camprubi1, C. Calvet, Effect of chromium contaminated soil on arbuscular mycorrhizal symbiosis of roots and metal uptake by Plantago lanceolata, Spanish Journal of Agricultural Research 8, (2010) 109-115.

13. F. T. Davies, J. D. Jeffrey, J. Ronald, Mycorrhizal fungi enhance accumulation and tolerance of chromium in sunflower (Helianthus annuus), Journal of Plant Physiology, 158 (2001) 777-786.

14. M. B. Adewole, O. O. Awotoye, M. O. Ohiembor, A. O. Salami, Influence of mycorrhizal fungi on phytoremediating potential and yield of sunflower in Cd and Pb polluted soils, Journal of Agricultural Sciences, 55 (2010) 17-28.

15. G. Rufyikiria, L. Huysmansa, J. Wannijna, M. Van Heesa, C. Leyvalb, I. Jakobsenc, Arbuscular mycorrhizal fungi can decrease the uptake of uranium by subterranean clover grown at high levels of uranium in soil, Environmental Pollution, 130 (2004) 427-436.

16. F. A. Solis-Dominguez, A. L. Valentin-Vargas, J. Chorover, R. M. Maier, Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant biomass and the rhizosphere microbial community structure of mesquite grown in acidic lead/zinc mine tailings, Science of the Total Environment, 409 (2011) 1009-1016.

17. J. W. Huang, M. J. Blaylock, Y. Kapulnik, B.D. Ensley, Phytoremediation of uranium-contaminated soils: role of organic acids in triggering uranium hyperaccumulation in plants, Environmental Science and Technology, 32 (13) (1998) 2004-2008.

18. S. B. Sawin, Analytical. use of Arsenazo III determination of Thorium, Zirconium, Uranium and rare earth elements, Talanta, 8 (1961) 673-685.

19. S. Bagherifam, A. Lakzian, S. J. Ahmadi, M. F. Rahimi, A. Halajnia, Uranium removal from aqueous solutions by wood powder and wheat straw, J Radioanal Nucl Chem, 283 (2010) 289-296.

20. W. C. Hanson, The photometric determination of phosphorus in fertilizers using the phosphovanado-molybdate complex, J Sci Food Agr, 1 (1950) 172-173.

21. J. M. Phillips, D. S. Hayman, Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular–arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection, Trans Br Mycol Soc, 55 (1970) 158-161.

22. M. Giovanetti, B. Mosse: An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots, New Phytol, 84 (1980) 489-500.

23. I. M. Weiersbye, C. J. Straker, W. J. Przybylowicz, Micro-PIXE mapping of elemental distribution in arbuscular mycorrhizal roots of the grass, Cynodon dactylon, from gold and uranium mine tailings, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B158 (104) (1999) 335-343.

24. J. S. Nielsen, E. J. Joner, S. Declerck, S. Olsson, I. Jakobsen, Phospho-imaging as a tool for visualization and noninvasive measurement of P transport dynamics in arbuscular mycorrhizas, New Phytologist 154 (3) (2002) 809-820.

25. S. H. Burleigh, I. E. Bechmann, Plant nutrient transporter regulation in arbuscular mycorrhizas, Plant and Soil, 244 (1-2) (2002) 247-251.