مطالعه پاسخ رشدی و غلظت عناصر غذایی گیاه کلزا به تلقیح با باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه در یک خاک آلوده به آرسنیک

سیده پریسا خسروی[۱*], علی اشرف سلطانی طولارود[۲], اسماعیل گلی کلانپا[۲], محمد بابااکبری[۳]

۱*- نویسنده مسئول، دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: parisaaa.khosravi@gmail.com شماره موبایل نویسنده مسئول: ۰۹۹۰۴۱۴۳۷۷۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۱

چکیده

تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیر باکتری های محرک رشد بر ویژگیهای رشدی و مقدار عناصر غذایی گیاه کلزا در شرایط آلودگی خاک با آرسنیک انجام شد. سطوح مختلف آرسنیک (صفر، ۷/۵، ۱۵/۵، ۲۲/۵ و ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم) به خاک تزریق شده و بعد از طی ۲ماه، مایه زنی باکتری ها و کشت کلزا انجام گرفت. ۳ماه پس از کشت گیاهان برداشت و برخی شاخص‌های رشدی و غلظت منیزیم، آرسنیک و فسفر اندازه‌گیری گردید. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه از سطح آرسنیک شاهد با باکتری‌های *سودوموناس پوتیدا* و کمترین آن از سطح mg/kg ۳۰ آرسنیک با *آزوسپریلوم* به ترتیب به میزان ۲۰/۵۳ و ۱۱/۳۱ سانتی متر حاصل شد. بیشترین وزن خشک و وزن تر در سطح اول آرسنیک با باکتری‌های *سودوموناس پوتیدا* و کمترین آن‌ها در غلظت بالای آرسنیک با باکتری های *آزوسپریلوم* حاصل گردید. در بالاترین غلظت آرسنیک خاک، کمترین مقدار تراکم برگ (۸/۳۳) با *سودوموناس فلورسنس* BR1 و بیشترین آن (۳۹/۳۳) با *سودوموناس فلورسنس* BR150 بدست آمد. با افزایش مقدار آرسنیک درخاک، از میزان منیزیم و فسفر کلزا کاسته شده و در ۳۰ میلی گرم برکیلوگرم آرسنیک، به کمترین میزان خود به ترتیب (۰/۱۳ mg/kg ، ۰/۳۱۴ درصد) رسیدند.

کلمات کلیدی

تنش، فلز سنگین، شاخص های رشد، سودوموناس.

The study of concentration of nutrients in rapeseedand its growth response to inoculation with plant growth promoting bacteria in arsenic contaminated soil

Seyedeh parisa khosravi [1,*], Ali Ashraf Soltani Tularud [2], Esmaeil Goli Kalanpa[2], Mohammad BabaAkbari[3]

[1] Graduate of Soil Science Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, iran

[2] Associate Professor of Soil Science and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

[3] Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

[*]Email Address: parisaaa.khosravi@gmail.com [*] Mobile Phone: +989904143770

Abstract

The purpose of the present research was to study the impact of plant growth promoting bacteriaon characteristics of growth and the amount of nutrients in rapeseedin soil contaminated by arsenic. different levels of arsenic (0, 22.5, 15.5, 7.5 and 30 mg/kg) injected into the soil, after two months, inoculation of plant growth promoting bacteria and cultured canolara. Three months later, harvesting of rapeseed and some growth indices, magnesium, arsenic and phosphorus evaluated. The results of means comparison indicated that the maximum plant height from arsenic by Pseudomonas Putida and the minimum plant height from 30mg/kg arsenic by Azospirillum were 20.53 cm and 11.31 cm, respectively. The highest fresh and dry weightin obtained than lowest level of arsenic by Pseudomonas Putidaand. lowest fresh and dry weight in high arsenic concentration attained by Azospirillum.At the highest concentration of arsenic in the soil, the lowest leaf density by Pseudomonas fluorescence BR1 obtained to be 8.33 and the highest leaf density (39.33) by inoculated treatment of Pseudomonas fluorescence BR150 attained. With increase of arsenic in the soil, the magnesium and phosphorus in rapeseed were decreased, and with 30 mg/kg arsenic, they were reduced to the lowest level which were 0.13 mg/kg and %0.314, respectively.

Keywords

“Stress”, “Heavy metal”, “Growth Indicators”, “Pseudomonas”

۱-مقدمه

واکنش‌های بین گیاهان و ریزجانداران مفید ریزوسفر می‌تواند تولید زیست توده و تحمل گیاه به فلزات سنگین و تنش‌های محیطی را افزایش دهد، بنابراین جزء مهمی از تکنولوژی گیاه-پالایی محسوب می‌شود (وِنزِل و همکاران، ۱۹۹۹؛ گِلیک، ۲۰۰۳). در بین موجودات ریزوسفری که در واکنش گیاه با خاک اطراف دخالت دارند، باکتری‌های ریزوسفری محرّک رشد گیاه[1] و قارچ میکوریزی آربسکولار[2] بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته-اند (واروارا و همکاران، ۲۰۰۰). باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه، گروهی از باکتری‌های خاک هستند که می‌توانند از طریق مکانیسم‌های مختلف باعث تحریک و بهبود رشد و تغذیه گیاهان شوند. این ریزجانداران می‌توانند از طریق تولید و آزادسازی متابولیت‌های ثانویه از قبیل تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی یا فیتوهورمون‌ها و ترکیبات فعال بیولوژیک باعث جلوگیری یا کاهش اثرات منفی پاتوژن‌ها بر گیاه شوند و همچنین با تسهیل قابلیت فراهمی و افزایش جذب برخی عناصر می‌توانند بر رشد گیاه موثر باشند (بِلیموو و همکاران، ۲۰۰۵). توانایی تولید آنزیم ۱- آمینو سیکلو پروپان-۱-کربوکسیلاز (ACC دِآمیناز) توسط باکتری‌ها، یکی از مکانیسم‌های افزایش رشد گیاه در شرایط تنش است که دلیل آن کاهش سطح اتیلن ناشی از تنش‌هایی مثل فلزات سنگین بر اثر فعالیت این آنزیم می‌باشد (گلیک، ۱۹۹۵).

در میان آلاینده‌های آلی و معدنی محیطزیست، فلزات سنگین خطرناک‌ترین نوع آلاینده‌ها بوده و نگرانی‌های زیادی در سطح دنیا در خصوص آلودگی‌های ناشی از آن‌ها وجود دارد (ادریانو، ۲۰۰۱). پالایش آلودگی ناشی از فلزات سنگین در خاک‌ها در مقایسه با انواع دیگر آلودگی‌ها مشکل‌تر است که در این میان استفاده از باکتری های ریزوسفری محرک رشد به عنوان گزینه-ای با ارزش در جهت کاهش سمیت فلزات سنگین و افزایش رشد گیاه در شرایط تنش فلزی مورد استفاده قرار گرفته است (اسلامی و نعمتی، ۱۳۹۴). کرمی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی تاثیر باکتری محرک رشد گیاه بر جذب برخی عناصرکم‌مصرف به‌وسیله ذرت در یک خاک آلوده به کادمیوم نشان دادند افزایش آلودگی خاک به کادمیم موجب کاهش وزن خشک و جذب منگنز و روی به‌وسیله گیاه شد درحالی‌که مایه‌زنی باکتری به خاک با افزایش وزن خشک اندام هوایی، و جذب کل روی موجب تعدیل اثر منفی کادمیم بر گیاه شد. سازوکارهای عمل باکتری‌های محرک رشد گیاه در تحریک رشد گیاه هنوز به-طورکامل شناخته نشده است (دی و همکاران ۲۰۰۴ ،هیات و همکاران ۲۰۱۰)، اما به‌طورکلی می‌توان به تولید آنزیم‌های حیاتی و هورمون‌های محرک رشد گیاه، آزاد سازی عوامل کلات کننده، ترشح مواد اسیدی و حل کردن فسفات، و تغییر پتانسیل رداکس و در نتیجه تأثیر بر تحرک عناصر و قابلیت دسترسی آن‌ها اشاره کرد (ابوشناب و همکاران ۲۰۰۳ ،آیدریس و همکاران ۲۰۰۴). حیدرپور و همکاران (۱۳۹۵) تاثیر معنی‌دار جدایه های محرک رشد مقاوم به آرسنیک بر ویژگی های فیزیولوژیک، رشد و تغذیه گیاه پونه در خاک آلوده به آرسنیک را گزارش نمودند و این افزایش رشد را به افزایش میزان جذب آب و عناصر غذایی، افزایش میزان فتوسنتز گیاه و افزایش تولید متابولیت های ثانویه مورد نیاز برای مقابله با شرایط تنش نسبت دادند. نعمتی و همکاران (۱۳۹۴) تاثیر کودهای زیستی ازوسپریلیوم، ازتوباکتر و مایکورایزا را بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گوجه فرنگی در یک خاک آلوده به کادمیوم را بررسی نموده و نتیجه گرفتند که کودهای زیستی حاوی ازوسپریلیوم، ازتوباکتر و مایکورایزا میزان عملکرد گوجه فرنگی را ۱۷۹/۸ درصد افزایش داد. پینتر و همکاران (۲۰۱۷) تحمل به آرسنیک گیاهان انگور رشد کرده به صورت درون شیشه ای را بواسطه کاربرد باکتری های محرک رشد بررسی نمودند و نشان دادند که تلقیح با سویه های متفاوت باکتریایی میزان رشد و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانت را افزایش داد. خداوردیلو و همکاران (۱۳۹۲) تأثیرمایه زنی میکروبی یک خاک آلوده به سرب بررشد، برخی ویژگیهای فیزیولوژیک و جذب و انتقال سرب، آهن و روی توسط گل گندم را بررسی نمودند و نشان دادند که میانگین ماده خشک شاخساره در تیمارهای باکتری های محرک رشد گیاه بیش از ۱/۲ برابر تیمارهای مشابه شاهد بود و نتیجه گرفتند که مایه زنی میکروبی موجب بهبود رشد و افزایش بردباری گیاه به سمیت سرب گردید. در میان گیاهان زراعی، کلزا با شرایط آب و هوایی مختلف سازش خوبی نشان می‌دهد و زراعت آن در مقایسه با زراعت‌های مشابه، هزینه کمتر و عملکرد بالاتری در پی دارد. کلزا دارای پتانسیل زیادی در جذب و خارج ساختن فلزات سنگین از خاک می‌باشد، زیرا علاوه بر تولید زیست‌توده زیاد، به عنوان یک گیاه بیشاندوز فلزات سنگین نیز شناخته شده استکه به علت انتقال بسیار کم فلزات سنگین به دانه، می‌توان علاوه بر پالایش خاک از روغن آن نیز استفاده کرد (مارکیول و همکاران، ۲۰۰۴؛ توران و اسرینگ، ۲۰۰۷).

[1]Plant Growth Promoting Rhizobacteria
[2]Arbuscular Mycorrhizal Fungi

از این رو تحقیق حاضر قصد دارد تاثیر باکتری های محرک رشد در افزایش شاخص های رشدی و مقدار کلروفیل و برخی عناصر غذایی گیاه کلزا در خاک های آلوده با غلظت های متفاوت آرسنیک را بررسی نماید.

۲-روش انجام تحقیق

این پژوهش در اتاقک رشد گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی با آرایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد.تیمارها شامل پنج سطح باکتری‌های PGPR (شامل سویه-های سودوموناس فلورسنس B1:R1، B2:R150، B3:R159، سودوموناس پوتیدا B4:P10 و آزوسپریلوم B5:Azo) و پنج سطح آرسنیک (به ترتیب در غلظت‌های As1:۰، As2:۷/۵، As3:۱۵، As4:۲۲/۵ و As5:۳۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) بود. برای اجرای این آزمایش از بذور گیاه کلزا رقم هایولای ۴۰۱، استفاده شد. پس از اندازه‌گیری بافت و غلظت برخی عناصر غذایی در چندین خاک تهیه شده از مزارع اطراف شهر اردبیل مطابق با روش‌های استاندارد، خاک مناسب برای اجرای آزمایش انتخاب و از الک ۴/۷۵ میلی‌متری عبور داده شد. قبل از توزیع خاک در گلدان‌های ۳ کیلویی، آلوده‌سازی خاک انجام گرفت. آلوده سازی خاک با غلظت های مختلف آرسنیک (۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) انجام گرفته و کاملا خاک مخلوط شد تا یکنواختی توزیع فلز مورد نظر در خاک یکسان باشد. پس از تلقیح بذور با تیمارهای باکتریایی که به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۸/۵ درجه سانتیگراد در انکوباتور در محیط کشت رشد کرده بودند کشت گیاه کلزا به تعداد ۶ بذر در داخل هر گلدان کاشته شد. بعد از جوانه‌زنی و رشد اولیه، در داخل هر گلدان ۴ جوانه که از لحاظ شرایط ظاهری وضعیت بهتری داشتند نگه داشته و بقیه جوانه‌ها تنک شدند تا شرایط برای تمام گلدان‌ها یکسان باشد. گلدان‌هاپس ازکشت، به گلخانه با طول دوره روشنایی ۱۴ساعت و با دمای متوسط ۲۲-۲۰ درجه سانتیگراد منتقل گردید. در طول دوره رشدگیاهان، عملیات داشت شامل آبیاری و مبارزه با علف‌های هرز، بر روی گلدان‌ها صورت گرفت. پس ازگذشت ۷۵روز از تاریخ کشت، ارتفاع گیاه و تراکم برگ اندازه گیری شد. سپس، گیاهان برداشت و وزن تروخشک اندام هوایی تعیین گردید. غلظت آرسنیک در اندام هوایی کلزا به روش اکسیداسیون تر (گوپتا، ۲۰۰۰)، منیزیم به روش کلسیمتری (رایان و همکاران، ۲۰۰۷) و مقدار فسفر گیاه به روش رنگ سنجی (اورایلی و همکاران، ۲۰۰۱) تعیین گردید. داده‌های حاصل از این آزمایش با نرم‌افزار آماری SAS 9.1 مورد تجزیه و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

۳- نتایج

نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک و تجزیه واریانس تاثیر تیمارهای باکتریایی و سطوح مختلف آرسنیک به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش

بافت خاک	کربنات کلسیم معادل	ماده آلی	نیتروژن کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم تبادلی	EC	pH
	درصد		میلی گرم در کیلوگرم			dS/m	
لومی	۲۴	۰/۹۷	۰/۱۹	۲۲	۴۶	۲/۲۹	۷/۶۵

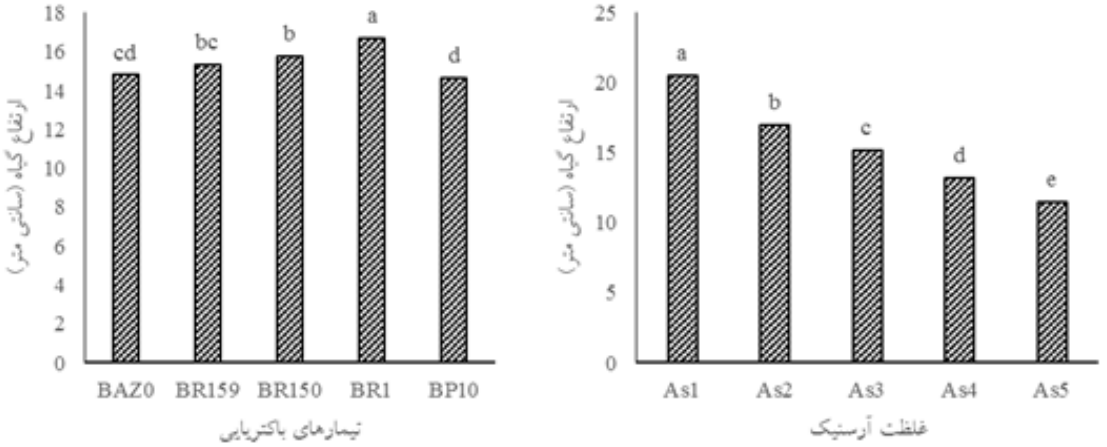
جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات آرسنیک و تیمارهای باکتریایی بر خصوصیات رشدی گیاه و عناصر منیزیم، آرسنیک و فسفر گیاه

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	تراکم برگ	منیزیم گیاه	آرسنیک گیاه	فسفر گیاه
باکتری	۴	۹/۹*	۲۴۳/۱**	۱/۰۷**	۱۹/۷**	۳/۳۵**	۰/۰۰۱**	۰/۱۳۶**
آرسنیک	۴	۱۸۹/۴**	۶۰۸۶/۲**	۴۵/۱**	۶۲۰/۷**	۰/۱۲**	۰/۰۳۱**	۰/۰۰۸**
باکتری * آرسنیک	۱۶	۱/۴ns	۱۵/۲ns	۰/۲۴**	۳/۸*	۰/۰۴ns	۰/۰۰۰۲۵**	۰/۰۰۰۶۲ns
خطا	۵۰	۰/۸۳	۸/۲۷	۰/۰۷	۲/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۶
ضریب تغییرات	-	۲۲/۰	۲۰/۸	۲۵/۶	۲۱/۵	۱۳/۲	۱۶/۸۶	۱/۷۸

***، ** به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد و ns غیر معنی دار**

ارتفاع گیاه

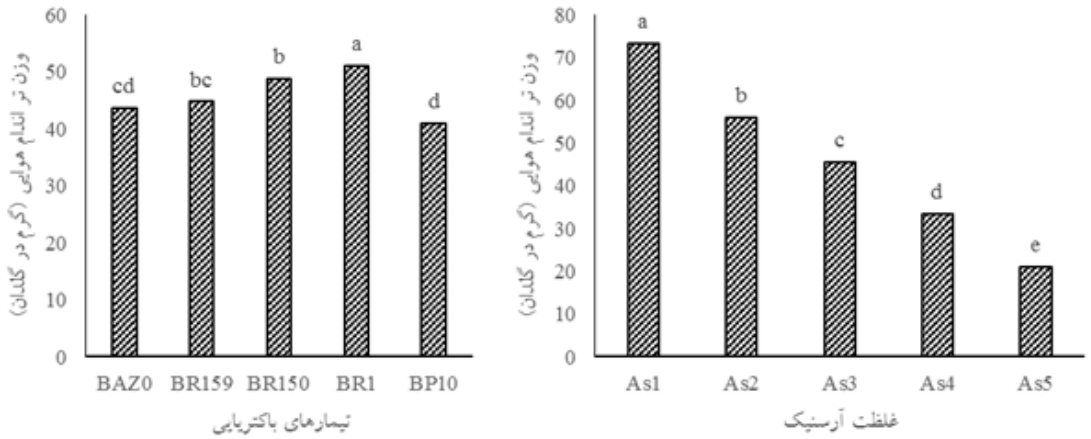
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تلقیح با باکتری های محرک رشد و سطوح مختلف آرسنیک تاثیر معنی داری بر ارتفاع گیاه کلزا داشت درحالی‌که تاثیر متقابل آن‌ها بر این صفت معنی دار نبود (جدول ۲). در این پژوهش افزایش سطوح آرسنیک سبب کاهش ارتفاع گیاه گردید. سطح صفر آرسنیک دارای بیشترین مقدار ارتفاع گیاه (۲۰/۵۳ سانتی‌متر) و بالاترین غلظت آرسنیک نیز منجر به کمترین مقدار ارتفاع گیاه (۱۱/۳۱ سانتی‌متر)گردید و مایه‌زنی گیاهان با باکتری‌های *سودوموناسپوتیدا و آزوسپریلوم* به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار ارتفاع گیاه را به خود اختصاص دادند(شکل ۱). گزارشات متعددی در خصوص اثر بازدارندگی فلزات سنگین بر رشد طولی اندام هوایی گیاهان منتشر شده است. شاندرامورسی و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که طول اندام هوایی برنج تحت تأثیر تیمار کروم کاهش یافت. در گزارشی دیگر شایسته و همکاران(۱۳۹۰) نشان دادند که گیاهان در سطوح بالای آرسنیک، علائم سمیت نظیر کاهش بیوماس ریشه و ساقه، کاهش فتوسنتز و کاهش رشد را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد کاهش ارتفاع اندام هوایی گیاه در حضور آرسنیک به علت کاهش رشد ریشه و در نتیجه کاهش انتقال آب و مواد غذایی به بخشهای هوایی گیاه است (قربانی و همکاران ۱۳۹۰). علاوه بر این انتقال آرسنیک به بخش‌های هوایی گیاه می‌تواند به علت اثر مستقیم آرسنیک بر متابولیسم سلولی اندام هوایی باشد که در نتیجه به کاهش ارتفاع گیاه می‌انجامد. بررسی پژوهش‌های انجام شده حاکی از آن است که باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه می‌توانند با بهبود شاخص‌های رشدی از قبیل میزان رشد ریشه، اندام هوایی و دیگر صفات مرفولوژیک باعث افزایش رشد گیاه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین شوند تنش های محیطی، مثل فلزات سنگین، سبب افزایش تولید اتیلن در گیاه به ویژه تجمع آن در ریشه می شود که به اتیلن تنشی مشهور است. افزایش بیش از حد اتیلن اثری بازدارنده بر رشد و نمو گیاه دارد. در نتیجه، با پایین آوردن سطح اتیلن در گیاه می تواند رشد گیاه را بهبود بخشید. احتمالا تلقیح باکتری های محرک رشد گیاه تولید اتیلن ناشی از تنش فلزات سنگین در گیاه را کاهش می دهد و موجب افزایش زیست توده گیاهی و ارتفاع گیاه می شود (ابوشنب و همکاران، ۲۰۰۶). کاظم علیلو و رسولی صدقیانی (۱۳۹۲) نیز نتایج مشابهی را گزارش نمودند. حیدرپور و همکاران (۱۳۹۵) نیز افزایش رشد گیاه گونه در خاک آلوده به آرسنیک در نتیجه تلقیح با باکتری های محرک رشد گیاه را گزارش نمودند



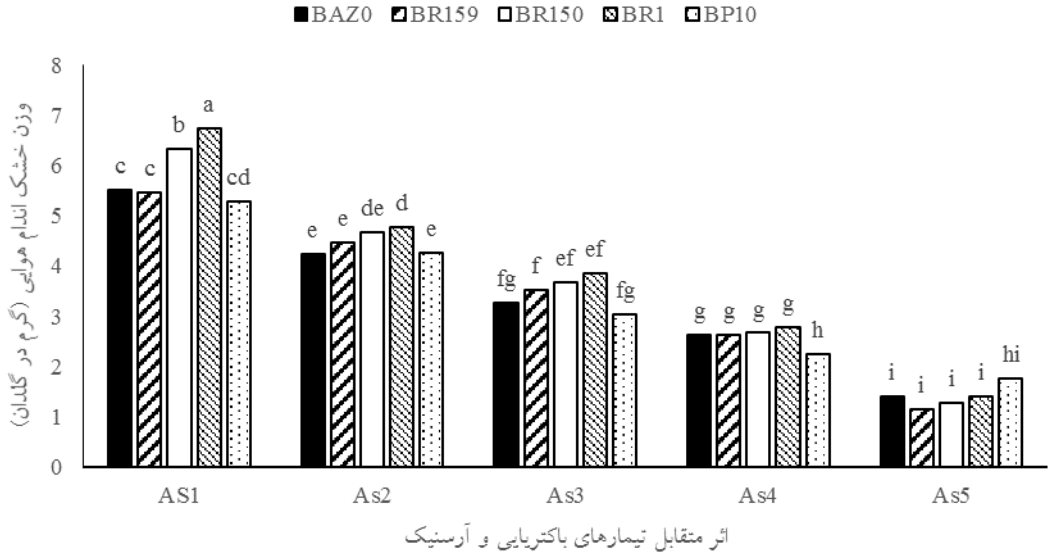
شکل ۱- مقایسه میانگین (a) اثرات تیمارهای مختلف باکتری‌های محرک رشد گیاه و (b) سطوح مختلف آرسنیک بر مقدارارتفاع گیاه کلزا(BR1: سودوموناس فلورسنس R1، BR150: سودوموناس فلورسنس BR159،R150: سودوموناس فلورسنس BP10،R159: سودوموناس پوتیدا P0، BAzo: ازوسپریلیوم؛ As1: صفر، As2: ۷/۵، As3: ۱۵، As4: ۲۲/۵ و As5: ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک)

وزن تر و خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای تلقیح با باکتری و سطوح مختلف آرسنیک تاثیر معنی داری بر صفات وزن تر و خشک اندام هوایی کلزا داشتند ($P<0.01$) درحالی‌که تاثیر متقابل این دو تنها بر وزن خشک اندام هوایی معنی دار بود ($P<0.01$؛ جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تاثیر ساده تیمارهای مورد بررسی بر وزن تر اندام هوایی نشان داد بیشترین مقدار این شاخص مربوط به غلظت صفر آرسنیک و کمترینِ مقدار نیز در سطح ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم آرسنیک خاک به دست آمد و تیمار تلقیح با باکتری‌های *سودوموناس پوتیدا* منتج به بیشترین مقدار وزن تر اندام هوایی گردید و کمترین مقدار نیز در تیمار تلقیح با باکتری ازوسپریلیوم مشاهده شد (شکل ۲). همچنین مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای تلقیح باکتریایی و سطوح مختلف آرسنیک خاک نشان داد که بیشترین وزن خشک (۶/۷۴ گرم در گلدان) درسطح اول آرسنیک (بدون آلودگی) با تیمار باکتری‌های *سودوموناس پوتیدا* حاصل گردید. بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در سطح صفر میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک به دست آمد؛ در حالی‌که بالاترین غلظت آرسنیک دارای کمترین مقدار این صفت بود. در سطوح صفر، ۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ میلی گرم بر کیلوگرم *سودوموناس فلورسنس* نسبت به سایر جدایه ها برتری داشت در حالیکه در غلظت ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم *سودوموناسپوتیدا* برتری داشت (شکل ۳). بیوماس (وزن خشک) یکی از عوامل کلیدی نشان دهنده وضعیت سلامت گیاه و میزان مقاومت آن در برابر تنش‌های مختلف است. همچنین در بحث‌های مربوط به بر هم‌کنش فلزات سنگین و گیاهان، بیوماس نقش مهمی در بیان توانایی انباشت فلز ومقاومت گیاه در برابر آن را دارد (بیکر و همکاران، ۱۹۷۶). اساسا وزن تر و خشک گیاه نماد عملکرد گیاه است و هر عاملی که به نوعی اثر مهاری بر رشد گیاه داشته باشد باعث کاهش وزن تر و خشک گیاه می‌شود (شاندرامورسی و همکاران، ۲۰۱۰). فلزات سنگین با اثر بر رشد و فتوسنتز، به طور غیر مستقیم بیوماس گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (شانکر و همکاران،۲۰۰۵). نتایج قربانی و همکاران (۱۳۸۶) و پیروز و منوچهری (۱۳۹۱) نیز تأییدی بر کاهش وزن تر و خشک گیاه با افزایش غلظت فلز سنگین می‌باشد. باکتری های محرک رشد گیاه عموما به عنوان باکتری‌های تولیدکننده هورمون‌های گیاهی، پلی آمین‌ها و اسیدهای آمینه در محیط کشت شناخته شده است. هورمونهای گیاهی ساخته شده توسط باکتریهاروی سرعت تنفس، متابولیسم، رشد و توسعه ریشه تأثیر می‌گذارند و در نتیجه جذب آب و عناصر غذایی در گیاهان تلقیح شده را افزایش میدهد، که این عمل میتواند منجربه افزایش اجزای عملکرد و در نتیجه عملکرد شود (محمدی و همکاران، ۲۰۱۰). باشان و همکاران (۱۹۹۷) گزارش کردند باکتریهای محرک رشد میتوانند نقش کنترلکنندگی روی عوامل بیماریزای خاکزی داشته باشند. نتایج مشابه توسط ارزانش و فرجی (۱۳۹۳) گزارش شده است. در این تحقیق نتایج نشان‌دهنده ی کاهش وزن تر گیاه کلزا با افزایش غلظت آلاینده ی آرسنیک می‌باشد. قربانی و همکاران (۱۳۹۰) نشان دادند که آرسنیک باعث کاهش معنی‌دار طول ریشه، طول ساقه، وزن تر و خشک گیاهچه-های یونجه می‌شود. پیروز و همکاران (۱۳۹۱) نیز نتایج مشابهی در خصوص کاهش رشد اندام هوایی و وزن تر و خشک اندام هوایی دست یافتند. کاهش رشد عمومی گیاهان در اثر افزایش غلظت فلزات سنگین در تحقیقات متعدد تأیید شده است (پاریدا و همکاران، ۲۰۰۳). پرالاتا و همکاران (۲۰۰۳) آسیب‌های ریشه‌ای ناشی از فلزات سنگین و کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فتوسیستم یک را علت اصلی کاهش رشد اندام هوایی گیاهان پیشنهاد کردند. همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش تیمار آرسنیک در محیط رشد، بیوماس اندام هوایی کاهش یافت. چنین حالتی در مطالعه کاربونل باراچینا وهمکاران (۱۹۹۸) نیز به اثبات رسیده است.



شکل ۲- مقایسه میانگین (a) اثرات تیمارهای مختلف باکتری‌های محرک رشد گیاه و (b) سطوح مختلف آرسنیک بر مقداروزن تر اندام هوایی گیاه کلزا(BR1: سودوموناس فلورسنس R1، BR150: سودوموناس فلورسنس R150،BR159: سودوموناس فلورسنس R159،BP10: سودوموناس پوتیدا P0، BAzo: ازوسپریلیوم؛ As1: صفر، As2: ۷/۵، As3: ۱۵، As4: ۲۲/۵ و As5: ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک)



شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین تاثیر متقابل سطوح مختلف آرسنیک و تیمارهای باکتریایی بر وزن خشک اندام هوایی کلزا(BR1: سودوموناسفلورسنسR1، BR150: سودوموناسفلورسنسR150،BR159: سودوموناسفلورسنسR159،BP10: سودوموناسپوتیداP0، BAzo: ازوسپریلیوم؛ As1: صفر، As2: ۷/۵، As3: ۱۵، As4: ۲۲/۵ و As5: ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک)

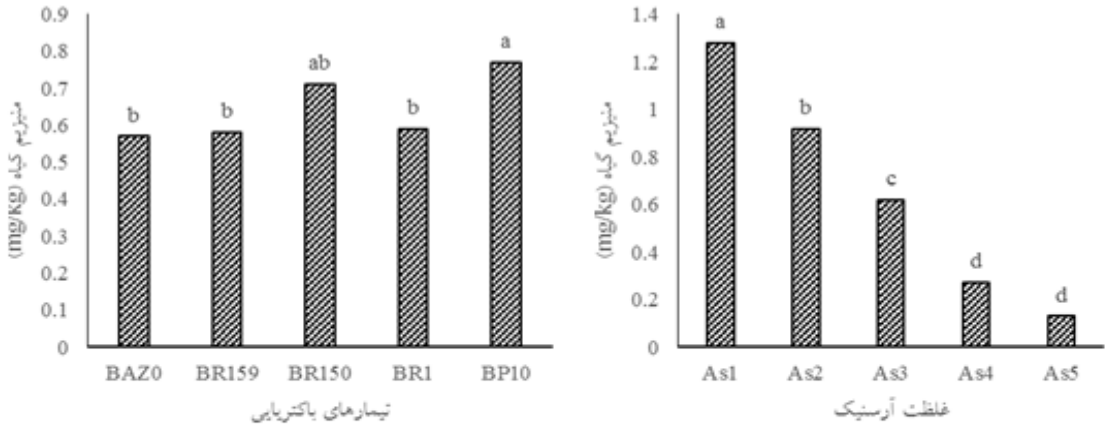
تراکم برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تلقیح با باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه و سطوح مختلف آرسنیک و تاثیر متقابل آن‌ها تاثیر معنی‌داری بر تراکم برگ گیاه کلزا داشتند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تاثیر متقابل تیمارهای باکتریایی و سطوح مختلف آرسنیک نشان داد که بیشترین مقدار تراکم برگ (۳۹/۳۳) در تیمار سطح صفر آرسنیک و تلقیح با باکتری سودوموناس فلورسنسBR150 و کمترین مقدار آن به میزان ۸/۳۳ در تلقیح با سودوموناس فلورسنس BR150 و سطح ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک مشاهده گردید (شکل ۴). در تیمار سطح ۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک، تفاوت معنی داری بین تیمارهای تلقیح باکتریایی وجود نداشت، با این حال بیشترین مقدار تراکم برگ در تیمار تلقیح با سودوموناس فلورسنس R1 به میزان ۲۸/۳ به دست آمد. در سطح ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک، تفاوت معنی داری بین تیمارهای تلقیح با ازوسپریلیوم و سودوموناس فلورسنسBR159 وجود نداشت. در بالاترین غلظت آرسنیک در خاک (۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، بیشترین مقدار تراکم برگ در تیمار تلقیح با سودوموناس فلورسنس BR1 به دست آمد که تفاوت معنی داری با تیمار سودوموناس فلورسنس BR150 نداشت (شکل ۴). در این تحقیق کاهش تعداد برگ-های گیاه کلزا با افزایش سطح آلودگی مشاهد گردید. با افزایش سطح آرسنیک، ضمن کاهش تراکم برگ، رنگ برگ‌ها متمایل به بنفش شده و حالت‌های کلروز در سطوح بالای آلودگی مشاهده شد. خطیب و همکاران (۱۳۸۷) به نتایج مشابهی برای کاهش تراکم برگ روی گیاه جعفری با افزایش سطح نیکل دست یافتند. تولید سیدروفور توسط باکتری‌های محرک رشد گیاه، و در نتیجه کمپلکس سیدروفورها به فلزات سنگین، اثر سمی فلزات سنگین را هم برای ریز موجود و هم برای گیاه کاهش داده و در نتیجه مقاومت گیاه را در شرایط تنش بالا می‌برد. حمیدی و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که تلقیح بذر ذرت علوفه‌ای با باکتری های محرک رشد گیاه باعث گسترش دوره تولید برگ در گیاه شده و تعداد برگ در هر بوته را افزایش داد. آن‌ها دلیل این امر را تأثیر باکتریها در تأمین موادغذایی برای گیاه و افزایش تولید فیتوهورمونهای محرک رشد از قبیل اکسین، سیتوکینین و جیبرلین دانستند که این هورمونهای گیاهی باعث افزایش تقسیم سلولی و رشد سلولها و همچنین تداوم رشد برگ می‌شوند. افزایش تعداد برگ گیاه گوجه فرنگی تلقیح شده با کودهای زیستی دریک خاک آلوده به کادمیوم توسط نعمتی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش شد. نتایج مشابهی در خصوص تاثیر باکتری های محرک رشد بر افزایش تعداد برگ گیاه پونه در شرایط خاک آلوده به آرسنیک توسط حیدرپور و همکاران (۱۳۹۵) نیز گزارش شده است.

شکل ٤- نتایج مقایسه میانگین تاثیر متقابل سطوح مختلف آرسنیک و تیمارهای باکتریایی بر تراکم برگ کلزا(BR1: سودوموناس فلورسنس R1، BR150: سودوموناس فلورسنس R150،BR159: سودوموناس فلورسنس R159،BP10: سودوموناس پوتیدا P0، BAzo: ازوسپریلیوم؛ As1: صفر، As2: ۷/۵، As3: ۱۵، As4: ۲۲/۵ و As5: ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک)

منیزیم

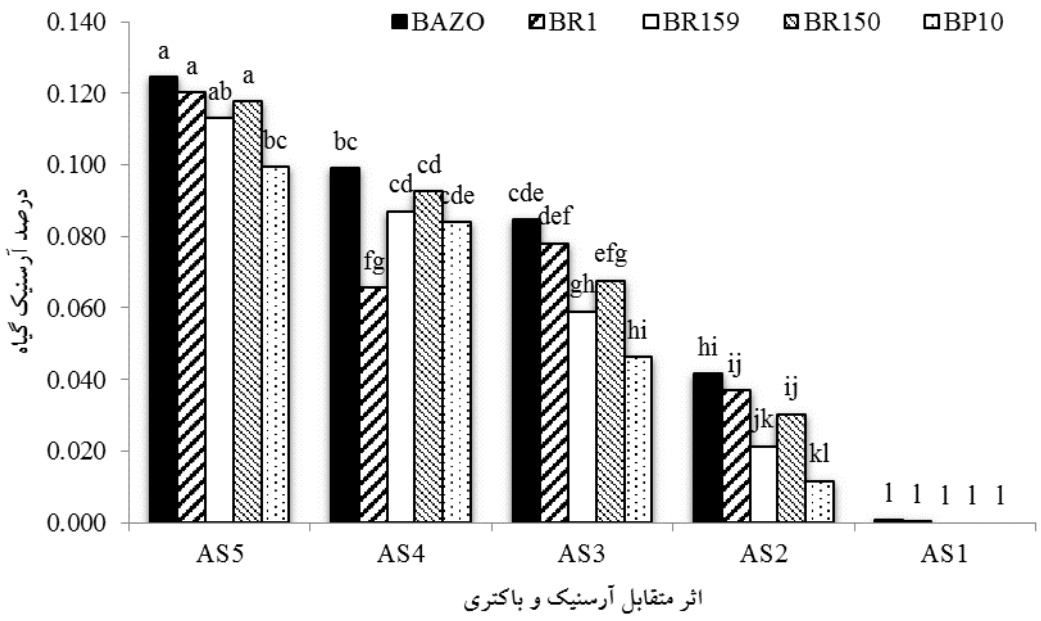
بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) تیمارهای سطوح مختلف آرسنیک ($P<0.05$) و تلقیح با باکتری‌های محرک رشد ($P<0.01$)به صورت معنی داری غلظت منیزیم اندام هوایی کلزا را تحت تاثیر قرار دادند در حالیکه اثرات متقابل آن‌ها معنی دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تاثیر سطوح مختلف آرسنیک نشان داد که با افزایش مقدار آرسنیک در خاک، از میزان منیزیم اندام هوایی کلزا نیز کاسته شده و در ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک به کمترین میزان خود (۰/۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم) رسید (شکل ۵). همچنین، نتایج نشان داد که بیشترین مقدار منیزیم در تیمار با باکتری *سودوموناس پوتیدا* (۰/۷۷ میلی گرم بر کیلوگرم) به دست آمد که تفاوت معنی داری با تیمار تلقیح با باکتری سودوموناسفلورسنسR150 (۰/۷۱ میلی گرم بر کیلوگرم) نداشت (شکل ۵). منیزیم تنها عنصر فلزی موجود در کلروفیل می‌باشد و به عنوان هسته مرکزی سازندهٔ کلروفیل معرفی می‌شود. بنابراین منیزیم بطور غیر مستقیم در متابولیسم و فتوسنتز، در فعالیت آنزیم‌ها در گیاهان نقش داشته و با شرکت در چرخهٔ اسید سیتریک به عنوان یک چرخهٔ متابولیسمی در گیاه، در تنفس گیاهان دخالت دارد (سالاردینی، ۱۳۸۷). با توجه به اینکه نتایج بیانگر کاهش مقادیر منیزیم گیاه در اثر افزایش سمیت آرسنیک است، کاهش فتوسنتز و مقادیر کلروفیل گیاه، کاهش رشد رویشی و عملکرد گیاه و ظهور زردی بین رگبرگی در تعدادی از بوته‌های کلزا تأکیدی بر این نتیجه است. کارهای وامیلا (۲۰۱۲)، کاربونل و همکاران (۱۹۹۸) نیز کاهش منیزیم گیاه را با افزایش آرسنیک تأیید می‌کند. هنگامیکه غلظت آرسنیک در محیط رشد بیش از حد باشد سبب بهم خوردن تعادل سایر عناصر غذایی شده و قابلیت دسترسی و جذب آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد (منصوری و همکاران، ۱۳۹۶). بعنوان مثال مقادیر زیاد فسفر در خاک، قابلیت دسترسی و جذب منگنز را افزایش ولی قابلیت دسترسی و جذب آهن و روی را به‌طور معناداری کاهش میدهد (جونز، ۱۹۹۸). شایبور و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که غلظت منگنز و منیزیم در ریشه و بخش هوایی گیاهان سورگوم با افزایش غلظت آرسنیک در محیط رشد، افزایش یافت. شایبور و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که با افزایش سطوح آرسنیک، غلظت پتاسیم و منیزیم اندام هوایی و ریشه برنج کاهش یافت. آنان چنین نتیجه گیری نمودند که رابطه آنتاگونیسمی بین این عناصر و آرسنیک وجود دارد. پتاسیم و منیزیم به صورت کاتیون و آرسنیک به صورت آنیون جذب می شود. در این صورت امکان دارد که رقابت مستقیمی بین جذب آرسنیک و پتاسیم و منیزیم وجود نداشته باشد، اما رابطه آنتاگونیستی بین آن‌ها دیده شده است که با اثر سمی آرسنیک بر رشد ریشه و جذب این عناصر غذایی توجیه می شود (شایبور و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۵- مقایسه میانگین (a) اثرات تیمارهای مختلف باکتری‌های محرک رشد گیاه و (b) سطوح مختلف آرسنیک بر مقدارمنیزیم اندام هوایی گیاه کلزا(BR1: سودوموناس فلورسنس R1، BR150: سودوموناس فلورسنس R150،BR159: سودوموناس فلورسنس BP10،R159: سودوموناس پوتیدا P0، BAzo: ازوسپریلیوم؛ As1: صفر، As2: ۷/۵، As3: ۱۵، As4: ۲۲/۵ و As5: ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک)

آرسنیک گیاه

براساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) تأثیر سطوح مختلف آرسنیک و باکتری‌های اعمال شده بر مقدار آرسنیک جذب شده توسط کلزا و تاثیر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی-دار می باشد. براساس نتایج مقایسه میانگین تاثیر متقابل تیمارهای آرسنیک و باکتری های محرک، با افزایش آلاینده به خاک، میزان جذب آرسنیک گیاه نیز افزایش یافته و بیشترین نفوذ آرسنیک به گیاه در تیمارهای باکتری‌های *آزوسپریلوم* و *سودوموناس* سویه R1 و کمترین نفوذ آن در تیمار تیمارهای باکتری‌های *سودوموناس پوتیدا* مشاهده می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که *سودوموناس پوتیدا* در جذب آرسنیک توسط گیاه مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد (شکل ۶). همچنین نتایج نشان داد که در سطح ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک، تفاوت معنی داری بین سویه های باکتری سودووموناس فلورسنس R1 و R150 وجود نداشت. در کمترین غلظت آرسنیک در خاک نیز تفاوت معنی داری بین هیچکدام از سویه های مورد بررسی وجود نداشت. در همه سطوح آرسنیک نیز ازوسپریلیوم بیشترین مقدار آرسنیک در گیاه را به خود اختصاص داد (شکل ۶). در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که *سودوموناس پوتیدا* در جذب آرسنیک توسط گیاه مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. نای و همکاران (۲۰۰۲) مشاهده نمودند که مایه‌زنی گیاه کلزا کشت شده در یک خاک آلوده به سرب با دو باکتری اندوفیت Pseudomonasfluorescens سویه G10 و Microbacterium sp. سویه G16 باعث افزایش زیتوده گیاه و میزان جذب عنصر سرب گردید. در این پژوهش کاربرد جدایه‌های محرک رشد باعث افزایش معنی‌دار غلظت آرسنیک در ریشه و اندام هوایی در گیاهان تلقیح شده در مقایسه با گیاهان شاهدگردید. این نتیجه نشان می‌دهد که جدایه‌های محرک رشد استفاده شده در این پژوهش توانسته‌اند با افزایش توسعه سیستم ریشه‌ای از طریق تولید اکسین و همچنین با بهبود رشد گیاه در شرایط تنش ناشی از فلز سمی آرسنیک با مکانیسم‌هایی مانند کاهش میزان اتیلن تنشی، تولید متابولیت‌های مورد نیاز برای مقابله با تنش من جمله پرولین و افزایش میزان فتوسنتز باعث افزایش جذب این عنصر توسط گیاه گردند (حیدرپور و همکاران، ۱۳۹۵). افزایش جذب فلزات سنگین توسط گیاه در حضور باکتریهای محرک رشد توسط واسیلو و همکاران (۲۰۰۲)، کوفنر و همکاران (۲۰۰۸) و دلامیکو و همکاران (۲۰۰۸) نیز گزارش شده است.



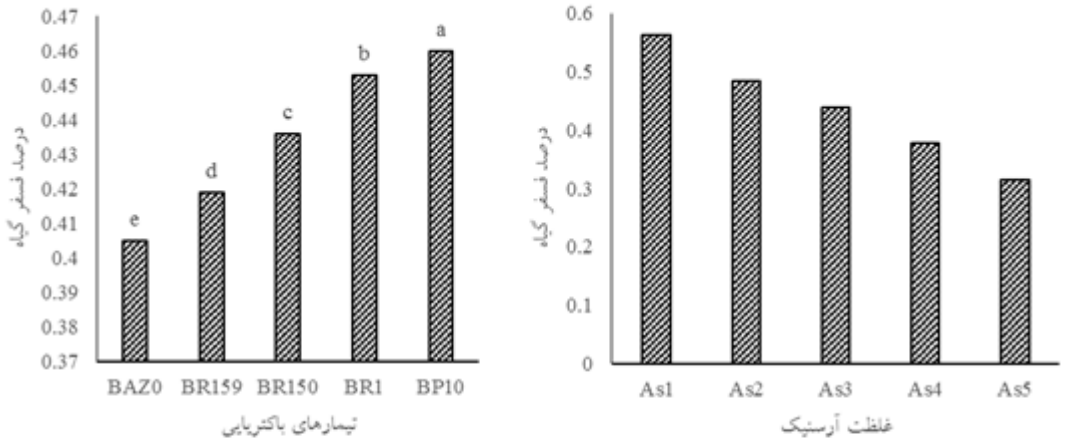
شکل ٦- نتایج مقایسه میانگین تاثیر متقابل سطوح مختلف آرسنیک و تیمارهای باکتریایی بر مقدار آرسنیک گیاه کلزا (BR1: سودوموناس فلورسنس R1، BR150: سودوموناس فلورسنس R150،BR159: سودوموناس فلورسنس R159،BP10: سودوموناس پوتیدا P0، BAzo: ازوسپریلیوم؛ As1: صفر، As2: ۷/۵، As3: ۱۵، As4: ۲۲/۵ و As5: ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک)

فسفر گیاه

براساس نتایج تجزیه واریانس ارائه شده در جدول ۲، سطوح مختلف آرسنیک به کار رفته در خاک و همچنین تلقیح گیاهان با باکتری های محرک رشد تاثیر معنی داری بر مقدار فسفر گیاه کلزا داشتند ($P<0.01$)، با این حال اثرات متقابل آن‌ها بر مقدار فسفر اندام هوایی معنی دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد با افزایش آلاینده به خاک، میزان فسفر جذب شده توسط کلزا کاهش یافته است. بیشترین درصد فسفر گیاه در تیمار صفر میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک به میزان ۰/۵۶ درصد مشاهده شد و با افزایش میزان آرسنیک در خاک از مقدار فسفر گیاه نیز کاسته شده و در سطح ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم آرسنیک به کمترین مقدار خود (۰/۳۱۴ درصد) رسید (شکل ۷). در بین تیمارهای باکتریایی نیز سودوموناس پوتیدا بیشترین مقدار فسفر گیاه (۰/۴۶ درصد) را به خود اختصاص داد و ازوسپریلیوم نیز دارای کمترین مقدار فسفر در گیاه (۰/۴۰ درصد) به دست آمد و همه تیمارهای تلقیح با باکتری های محرک رشد تفاوت معنی داری با یکدیگر داشتند (شکل ۷). کمبود غلظت فسفر در محیط رشد گیاهان تحت تنش آرسنیک منجر به فعال شدن این سیستم جذبی می‌شود که نتیجه آن افزایش جذب آرسنیک نسبت به فسفر است. همچنین افزایش غلظت فسفر در سیتوپلاسم سلول‌های گیاهی باعث افزایش رشد و بیوماس گیاه شده و از طریق اثر رقیق شدن باعث کاهش‌غلظت آرسنیک در واحد سطح سلول‌های مختلف می‌شود. البته تأثیر هر یک از این یون‌ها بر دیگری به برخی عوامل دیگر مانند محیط رشد گیاهان (خاک یا آبکشت) و حضور سایر یون‌ها درمحیط نیز بستگی دارد (تو و ما، ۲۰۰۴). در محیط‌های رشد گلدانی (خاک) به نظرمی‌رسد که تیمار غلظت‌های پایین آرسنیک باعث آزاد شدن و قابل دسترس شدن بیشتر فسفر دراطراف ریشه گیاه شده و به جذب بیشتر فسفر، افزایش رشد و بیوماس گیاه کمک کرده است (کاربونل باراچینا و همکاران، ۱۹۹۸). فسفات و آرسنات رفتار فیزیکوشیمیایی مشابهی دارند و مستقیما برای اشغال مکان‌های جذبی با یکدیگر رقابت دارند بنابراین افزایش غلظت آرسنیک در خاک سبب آزاد شدن فسفر از مکان‌های جذبی، افزایش قابلیت دسترسی و جذب آن توسط ریشه میشود (منصوری و همکاران، ۱۳۹۶؛ گائو و موسی، ۲۰۰۱). شایبور و همکاران (۲۰۰۹) نیز اظهار نمودند که آرسنیک تاثیر منفی بر انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی گیاه جو داشت. کونگ و لنا (۲۰۰۳) اظهار نمودند که افزودن فسفر به خاک تجمع آرسنات در ریشه گیاه بیشه چینی (Chinese brake) را

افزایش داد. نشان داده شده است که آرسنات در سرخس Pteris vittata و گونه‌هایی که تاکنون مطالعه شده‌اند، از طریق سیستم انتقال فسفات جذب می‌شود. کمبود فسفر، ظرفیت ریشه گیاه درجذب همزمان فسفر و آرسنیک را افزایش میدهد به‌طوریکه با کمبود فسفر، گیاه با تولید ژنهای انتقال دهنده فسفر در ریشه باعث افزایش پروتئین‌های ناقل می‌شود و ظرفیت خود را برای جذب فسفر در پاسخ به کمبود آن با سنتز ملکول‌های انتقال دهنده افزایش میدهد و در صورتی که انتقال دهنده‌های فسفات مسئول جذب و انتقال آرسنات باشد جذب آرسنات باید در این گیاهان، هنگام کمبود فسفر افزایش یابد در نتیجه گیاهان با تمایل به جذب بالای فسفر، قابلیت جذب آرسنیک بیشتری نسبت به سایر گیاهان دارند (گالز و همکاران ۲۰۰۵).

با توجه به این نکته که باکتری‌های مورد استفاده در این تحقیق از قدرت حل کنندگی فسفات های معدنی نامحلول بالایی برخوردار می‌باشند، یکی از دلایل افزایش فسفر در نتیجه تلقیح با این باکتری ها محرک رشد می‌تواند خاصیت حل کنندگی ترکیبات نامحلول و کم محلول فسفات به وسیله آن‌ها و افزایش شکل قابل جذب این عنصر برای گیاه باشد. خان و همکاران (۲۰۰۸) نیز گزارش نمودند که کاربرد باکتریهای محرک رشد گیاه، رشد گیاه و در نهایت جذب کل فسفر به وسیله گیاه را افزایش می دهند. باکتریهای حل کننده فسفات با تولید اسیدهای آلی و ترشح پروتون یا آنزیم‌های فسفاتاز سبب تبدیل فسفاتهای نامحلول (آلی و معدنی) به فرم قابل استفاده گیاه شده و سبب بهبود تغذیه فسفر و افزایش رشد گیاه در خاک آلوده به فلزات سنگین می‌شوند (کرمی همکاران، ۱۳۹۵). برخی محققان مشاهده نمودند در رقابت میان دو آنیون آرسنات و فسفات برای اتصال به مکان‌های جذب، آرسنات سبب کاهش تجمع فسفر در گیاه شد (اولریخ و همکاران، ۱۹۸۴). جذب فسفر توسط ریشه در خاکهای آلوده به آرسنیک در صورت کاربرد و عدم کاربرد کود فسفر کاهش یافت (گولز، ۲۰۰۲). گولز (۲۰۰۲) نشان داد که با افزایش غلظت آرسنیک در خاک، غلظت فسفر در ریشه و ساقه آفتابگردان کاهش پیدا کرد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.



شکل ۷- مقایسه میانگین (a) اثرات تیمارهای مختلف باکتری‌های محرک رشد گیاه و (b) سطوح مختلف آرسنیک بر مقدار فسفر کلزا(BR1: سودوموناس فلورسنس R1، BR150: سودوموناس فلورسنس BR150،BR159: سودوموناس فلورسنس BP10،R159: سودوموناس پوتیدا P0، BAzo: ازوسپریلیوم؛ As1: صفر، As2: ۷/۵، As3: ۱۵، As4: ۲۲/۵ و As5: ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک)

٤- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که افزایش غلظت آرسنیک به وضوح رشد گیاه کلزا و میزان جذب عناصر غذایی توسط این گیاه را کاهش داد. آرسنیک غلظت عناصر غذایی منیزیم و فسفر در گیـاه کلزا را کاهش داد که احتمالا بواسطه برهمکنش این عنصر با عناصر غذایی نظیر فسفر و منگنز و کاهش رشد گیاه در تیمارهای با غلظت بالای آرسنیک می باشد. فسفات و آرسنات رفتار فیزیکوشیمیایی مشابهی دارند و مسـتقیما برای اشغال مکان‌های جذبی با یکدیگر رقابت دارند بنابراین افـزایش غلظت آرسنیک در خاک سبب آزاد شدن فسفر از مکـان‌هـای جـذبی، افزایش قابلیت دسترسی و جذب آن توسط ریشه می شود که در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است. همچنین نتایج پژوهش حاضرنشان داد که مایه‌زنی گیاه پونه باجدایه‌های برتر و باکتری های محرک رشد گیاه با افزایش شاخص‌های رشدی گیاه، افزایش چشمگیر میزان غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و همچنین افزایش میزان رشد گیاه کلزا گردید که در این خصوص باکتری‌های *سودوموناس فلورسنس* BR150 *و سودوموناس پوتیدا* توانستند به عنوان باکتری‌های موثر در شرایط تنش فلز سنگین عمل نموده و رشد و عملکرد گیاه را افزایش دهند.

منابع

- اسلامی، ا.، نعمتی، ر. ۱۳۹۴. بررسی حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی بااستفاده از فنآوری زیست پالایی(مطالعـه مـروری). ۳(۲): ۵۱-۴۳.
- پیروز،پریساسادات؛ منوچهری کلانتری، خسرو،۱۳۹۱، تأثیر فلز سنگین کروم بر میزان تجمع، عوامن رشد و القای تـنش اکسـیداتیو در اندام هوایی آفتابگردان، مجله زیست شناسی گیاهی، سال چهارم، شماره سیزدهم، ص ۱۱۴-۹۷.
- حیدرپور، ل.، سلطانی طولارود، ع.ا.، گلی کلانپا، ا. ۱۳۹۵. جداسازی، غربالگری و بررسی صفات محرک رشد گیـاهی میکروارگانیسـم های مقاوم به آرسنیک (III) و (VI) و ارزیابی تاثیر جدایه های برتر بر خصوصیات مورفولوژیک گیاه پونه و گیاه پالایی خـاک آلـوده به آرسنیک. نشریه زیست شناسی خاک، ۴(۲): ۱۵۱-۱۳۵.
- خداوردیلو، ح.، رسولی صدقیانی، م.ح.، کریمی، ا. ۱۳۹۲. تأثیر مایه زنی میکروبی یک خاک آلوده به سرب بر رشـد، برخـی ویژگیهـای فیزیولوژیک وجذب وانتقال سرب، آهن وروی توسط گل گندم. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۳(۲): ۹۳-۷۵.
- سالاردینی،ع.ا. ۱۳۸۷. حاصلخیزی خاک، انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ هشتم، ص ۲۰۰ – ۳۰۰
- کاظم علیلو، س . رسولی صدقیانی، م.ح. ۱۳۹۲. اثر آلودگی کادمیومی خاک بر برخی شاخص های فیزیولوژیک گیاه بنگدانه درحضور و عدم حضور ریزجانداران محرک رشد گیاه . نشریه دانش آب وخاک . جلد۲۲، شماره ۱: ۳۰-۴.
- کرمی، ش.، زارعی، م.، یثربی ج، کرمیان ن.ع.، موسوی، س.ع.ا. ۱۳۹۵. اثر باکتری محـرک رشـد گیـاه بـر غلظـت و جـذب عناصـر پرمصرف بهوسیله ذرت در یک خاکآهکی آلوده به کادمیم تحت تنش خشکی. نشریه آب و خاک، ۳۰(۴): ۱۱۷۹-۱۱۷۰.
- ملکوتی، م.ج.، خادمی، ز. و مهاجر میلانی، پ. ۱۳۸۲ .توصیه کودی برای کلزا در کشور، کتاب مجموعه مقالات تغذیه بهینه دانه‌هـای روغنی گامی مؤثر در نیل به خودکفایی روغن در کشور. انتشارات خانیران.
- منصوری، ط.، گلچین، ا.، بابا اکبری ساری، م. ۱۳۹۶. تأثیر آرسنیک بر غلظت‌های فسفر، آهن، روی و منگنـز در خـاک و گیـاه ذرت. نشریه آب و خاک، ۳۱(۲): ۶۴۳-۶۲۷.
- نعمتی، ا.، گلچین، ا.، و بشارتی، ح. ۱۳۹۴. بررسی اثرات کودهای زیستی بر عملکرد و اجزای گیاه گوجه فرنگی در یک خاک آلوده بـه کادمیوم. نشریه پژوهش های خاک، ۲۹(۱): ۲۳/۳۶.
-
- Abedin, M.J., Cottep-Howells, J., and Meharg, A.A. 2002. Arsenic uptake and accumulation in rice (Oryza sativa L.) irrigated with contaminated water. Plant Soil. 240: 311-319
- Abou-Shanab, R. A. Angle, J. S. and Ghaney, R. L. (2006), Bacterial inoculants affecting nickel uptake by Alyssum murale from low, moderate and high Ni soils. Soil Biology and Biochemistry, 38, 2886-2889.
- Adriano, D.C. 1986. Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, New York, 533p.
- Arzanesh M.H., H.A. Alikhani, K. Khavazi, H.A. Rahimian, Miransar, M.2009.In vitro growth of wheat (Triticum aestivumL.) seedlings, inoculated with Azosprillum sp., under drought stress. International journal of Botany 5(3): 244-249.
- Baker S., Barrentine W.L., Bowman D.H., Hoawthrone W.L., and Pettiet J.V. 1976. Crop response and arsenic uptake following soil incorporation of MSMA. Weed Science, 24: 322-326.
- Bashan, Y., Levanony, H. and Ziv-Vecht, O. 1997. The fate of field-inoculated Azospirillum brasilense Cd in wheat rhizosphere during the growing season. Can. J. Microbiol. 33: 1074–1079.

- Belimov A.A., Hontzeas N., Safronova V. I., Demchinskaya S. V., Piluzza G., Bullitta S., and Glick B. R. 2005. Cadmium- tolerant plant growth- promoting bacteria associated with the roots of India mustard (Brassica juncea L.). Soil Biology and Biochemistry, 37(2): 241-250.
- Carbonell-Barrachina, A.A., Aarabi, M.A., Delaune, R.D., Gambrell, R.P. and Patrick, W.H.J. 1998. Arsenic in wetland vegetation: availability, phytotoxicity uptake and effects on plant growth and nutrition. Sci. Total Environ. 217: 189-199.
- Chandrasekar, B.R., Ambrose, G. and Jayabalan, N. 2005. Influence of biofertilizers and nitrogen source level on the growth and yield of Echinochloa frumentacea (Roxb) Link. Journal of Agriculture technology 1: 223-234
- Cong T.u., and Lena Q.M. 2003. Effects of arsenate and phosphate on their accumulation by an arsenichyperaccumulator Pteris vittata L. Plant and Soil, 249: 373–382.
- Dai, J., T., Becquer, J.H., Rouiller, G., Reversat, F., Bernhard- Reversat, J., ahmani, P., Lavelle, 2004. Influence of heavy metals on C and N mineralization and microbial biomass in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soils. Applied Soil Ecology. 25, 99-109.
- Dell'Amico, E., Cavalca, L., and Andreoni, V. 2008. Improvement of Brassica napus growth under cadmium stress by cadmium-resistant rhizobacteria. Journal of Soil Biology and Biochemistry 40:74-84.
- Gao Y., and Mucci A. 2001. Acid base reactions, phosphate and arsenate complexation, and their competitive adsorption at the surface of goethite in 0.7 M NaCl solution. Geochimica et Cosmochimica Acta, 65:2361–2378.
- Glick B. R. 1995. The enhancement of plant growth by- free- living bacteria. Canadian Journal of Microbiology, 41: 109-117.
- Glick B. R. 2003. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. Biotechnology Advances, 21: 383-393.
- Gulz, P. A. (2002). Arsenic Uptake of Common Crop Plants from Contaminated Soils and Interaction with Phosphate. PhD thesiss, Dipl. Geogr., University of Munich, Zurich, pp: 108.
- Gulz PA, Gupta SK and Schulin R, 2005. Arsenic accumulation of common plants from contaminated soils. Plant and Soil 272: 337–347
- Gupta, P.K. 2000. Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis. Agrobios, New Dehli, India, 438p.
- Hayat R, Ali S, Amara U, Khalid R and Ahmed I, 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. Annals of Microbiology 60: 579–584.
- Idris R, Trifonova R, Puschenreiter M, Wenzel WW and Sessitsch A, 2004. Bacterial communities associated with flowering plants of the Ni hyperaccumulator Thlaspi goesingense. Applied and Environmental Microbiology 70: 2667–2677.
- Manio, T., E.I. Stentiford and P.A. Millner. 2003. The effect of heavy metals accumulation on the chlorophyll concentration of Typha latifolia plants, growing in substrate containing sewage sludge compost and watered with metaliferus water. Ecological Engineering. 20:65-74.
- Marchiol L., Assolari S., Sacco P., and Zerbi G. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (Brassica napus) and radish (Raphanus sativus) grown on multicontaminated soil. Environmental Pollution. 132:21-27.
- Mwamila, L.B.; 2012. Arsenic (V) and phosphate sorption to Swedish clay soils –Freundlich sorption modeling. TRITA LWR Degree Project. 12: 02, 21p.
- O'Reilly, S.E. Strawn, D.G. and Sparks, D.L. (2001). Residence Time Effects on Arsenate Adsorption/Desorption Mechanisms on Goethite. Soil Sci. Soc. Am. J, 65, 67–77.
- Pinter, J.F., Salomon, M.V., Berli, F., Bottini, R., Piccoli, P. 2017. Characterization of the as (III) tolerance conferred by plant growth promoting rhizobacteria to in vitro-grown grapevine. Applied Soil Ecology 109: 60–68.
- Prasad, M.N.V. and H. Freitas. 2003. Metal hyper accumulation in Plants-Biodiversity rospecting for phytoremediation technology. Electronic J. Biotetechnol 6:275-321.Online:http://www.ejbiotechnology.info/content/vol6/issue3/index.html.
- Ryan, J., G. Estefan and A. Rashid. 2001. Soil and Plant Analysis Laboratory Manual. 2nd ed. Int. Center for Agric. Res. in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria. p.172.
- Shaibur M.R., Kiltajima N., Huq S.M.I., and Kawai S. 2009. Arsenic–iron interaction: Effect of additional iron on arsenic-induced chlorosis in barley grown in water culture. Soil Science and Plant Nutrition, 55:739–746.

- Shaibur MR., Kitajima N., Sugawara R., Kondo T., Imamul-Huq S.M., and Kawai S. 2008b. Physiological and mineralogical properties properties of arsenic-induced chlorosis in barley seedlings grown hydroponically. Journal of Plant Nutrition, 31:333–353.
- Shaibur MR and Kawai S. 2011a. Arsenic toxicity in Akitakomachi rice in presence of Fe3+ - citrate. Advances in Environmental Biology, 5: 1411-1422.
- Turan M., and Esring A. 2007. Phytoremediation based on canola (Brassica napus L.) and Indian mustard (Brassica juncea L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn. Plant Soil Environment. 53. (1):7-15
- Varvara P. Grichko, Brendan Filby, Bernard R. Glick. 2000. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd, Co, Cu, Ni, Pb, and Zn. Journal of Biotechnology. 81(1): 45-53.
- Vassilev, A., Vangronsveld, J. and Yordanov, I. 2002. Cadmium phytoextraction: Present state, Biological Backgrounds and Research Needs. BULG. J. plant physiol, 28(3-4): 68-95.
- Wenzel W.W, Kirchbaumer N., and Prohaska T. 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. Analytical Chimica Acta, 436: 309-323.