

## بررسی اثرات سطوح مختلف یک کوپلیمر اکریلیکی بر رشد گیاه ذرت در خاک‌های آلوده به آرسنیک

طاهره منصوری<sup>۱\*</sup>، احمد گلچین<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان.

۲. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۶/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۶/۱۵)

### چکیده

کاهش غلظت اجزاء متحرک شبه‌فلز سمی آرسنیک بسیار حائز اهمیت است چرا که این اجزاء ارتباط مستقیمی با زیست‌فراهمی آن دارند. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر کوپلیمر مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید بر کاهش تحرک و فراهمی آرسنیک و رشد ذرت در خاک‌های آلوده شده به آرسنیک انجام شد. بدین منظور یک آزمایش فاکتوریل با دو فاکتور سطوح کوپلیمر اکریلیکی (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) و سطوح مختلف آرسنیک (صفر، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. از گیاه ذرت به عنوان شاخص زیستی استفاده شد و قبل از کشت آن، غلظت آرسنیک قابل جذب در خاک‌ها اندازه‌گیری شد. پس از برداشت، وزن خشک، غلظت عناصر آرسنیک و فسفر در ریشه و بخش هوایی ذرت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که آلودگی خاک به آرسنیک سبب افزایش غلظت‌های آرسنیک قابل جذب، آرسنیک ریشه و بخش هوایی، فسفر ریشه و کاهش غلظت فسفر بخش هوایی شد. کوپلیمر اکریلیکی در کلیه سطوح آرسنیک خاک، غلظت‌های آرسنیک قابل جذب و آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت را به‌طور معنی‌دار کاهش داد. این کوپلیمر با کاهش تجمع آرسنیک و فسفر در ریشه گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده شده، سبب افزایش وزن خشک آن شد و با افزایش غلظت فسفر و کاهش تجمع آرسنیک در بخش هوایی سبب افزایش وزن خشک آن شد. توصیه می‌شود این کوپلیمر اکریلیکی برای کاهش تحرک آرسنیک در خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: غیرمتحرک کردن، فسفر، وزن خشک

### مقدمه

از نظر اقتصادی مقرون به صرفه، جهت غیرمتحرک کردن آرسنیک در خاک‌ها، از جمله چالش‌هایی است که محققین محیط زیست، امروزه با آن مواجه هستند. کاهش تحرک آلاینده توسط افزودن مواد مختلف به خاک و استفاده از واکنش‌های شیمیایی تثبیت<sup>۱</sup> نام دارد (Mulligan et al., 2001). تکنیک تثبیت با کاهش تحرک و قابلیت دسترسی آلاینده خطرات آبشویی، جذب گیاه، در معرض قرار گرفتن انسان و سمیت آن را کاهش می‌دهد. در این روش غلظت کل آلاینده پس از پاک‌سازی تغییر نمی‌کند ولی به شکل‌های با سمیت کمتر و غیرفعال‌تر تبدیل می‌شود (Miretzky and Cirelli, 2010). تثبیت می‌تواند شامل چندین فرایند مختلف از جمله جذب شدن بر سطح کانی‌ها، تشکیل کمپلکس‌های پایدار با لیگاندهای آلی، تبادل یونی، رسوب به عنوان نمک و هم‌رسوبی با اکسیدهای فلزی باشد (Kumpiene et al., 2008). پلیمرها مولکول‌های طویلی متشکل از واحدهای کوچک‌تر

آرسنیک با عدد تناوبی ۳۳ و جرم اتمی ۷۴/۹۲، دارای ساختار الکترونی خارجی  $4s^2 4p^3$  بوده و متعلق به گروه پنج جدول تناوبی است. آرسنات (آرسنیک پنج ظرفیتی) و آرسنیت (آرسنیک سه ظرفیتی)، مهم‌ترین شکل‌های معدنی آرسنیک در خاک هستند، در این بین آرسنات در تمامی شرایط به غیر از شرایط احیایی شدید، غالب‌تر از آرسنیت است (Sadiq, 1997). علاوه بر عوامل زمین‌شناختی و مواد مادری خاک، فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاوی و ذوب فلزات، احتراق زغال سنگ و استفاده گسترده از ترکیبات حاوی آرسنیک مانند آفت‌کش‌ها و محافظت‌کننده‌های چوب سبب تجمع مقادیر بالای این فلز در خاک‌ها شده است (Ong et al., 2013). در ایران وجود خاک‌های آلوده به آرسنیک در استان‌های کردستان، خراسان، زنجان و آذربایجان شرقی گزارش شده است (Hosseinpur feyzi et al., 2011). Zandsalimi et al., 2007; یافته‌های اصلاح‌کننده‌ی کارا و

است (Sadiq, 1986; Babaakbari *et al.*, 2013). لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی میزان توانایی پلیمر مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید در کاهش تحرک و فراهمی آرسنیک و تأثیر آن بر رشد ذرت در خاک‌های آلوده به سطوح مختلف آرسنیک انجام شد.

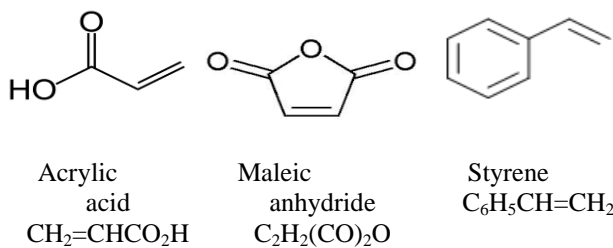
### مواد و روش‌ها

به منظور انجام این تحقیق، یک نمونه خاک مرکب از عمق ۲۰-۰ سانتی متری مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان تهیه شد. نمونه خاک در هوای آزاد خشک گردید و پس از گذراندن از الک ۲ میلی متری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از قبیل pH و EC در عصاره گل اشباع، بافت به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Nelson and Sommers, 1982)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (Nelson, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (Sumner and Miller, 1996)، نیتروژن کل خاک با استفاده از هضم کج‌دال (Bremner and Mulvaney, 1996)، فسفر قابل استفاده خاک به روش اولسن (Helmke and Spark, 1996)، پتاسیم قابل استفاده به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Helmke and Spark, 1996)، آهن، روی و منگنز قابل جذب با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)، غلظت آرسنیک قابل جذب با استفاده از سولفات آمونیوم ۰/۰۵ مولار (Wenzel *et al.*, 2001) و غلظت آرسنیک معادل کل با اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه (Hudson Edwards *et al.*, 2004) و با استفاده از روش پلاسمای جفت شده القایی-طیف‌سنجی نشر اتمی (ICP-OES, Varian Vista-MPX) تعیین شد. به منظور آلوده‌سازی خاک مقادیر مناسب از نمک آرسنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) در آب مقطر معادل ظرفیت زراعی حل شد و به نمونه‌های خاک اضافه گردید و به خوبی مخلوط شد. سطوح مختلف آلودگی عبارت بودند از: ۰، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ میلی گرم آرسنیک در کیلوگرم خاک. خاک‌های آلوده شده در داخل گلدان‌های پنج کیلوگرمی ریخته شدند و جهت رسیدن به تعادل نسبی به مدت سه ماه در گلخانه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و شدت نور ۴۰۰۰۰ لوکس و در رطوبت ظرفیت زراعی نگهداری شدند. رطوبت گلدان‌ها از طریق توزین کنترل شد. سپس کوپلیمر مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید تهیه شده از پژوهشگاه پلیمر ایران در مقادیر صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد به روش افشانه کردن به خاک‌های آلوده به سطوح مختلف آرسنیک افزوده شدند و پس از گذشت سه ماه غلظت آرسنیک قابل

یا مونومر هستند که توسط نیروهای کووالانسی به هم متصل شده‌اند. اگر مولکول‌های درشت حاصل از تکرار بیش از یک نوع مونومر باشند کوپلیمر نامیده می‌شوند (Sojka *et al.*, 2007). پلیمرهای آبدوست بر سرعت نفوذ آب در خاک، چگالی، ساختمان، بافت، پایداری خاکدانه‌ها (Helalia and Letey, 1989)، مقدار آب در دسترس و کارایی مصرف آب (Seyed Dorraji *et al.*, 2010) تأثیر مثبت دارند. اولین گزارش مربوط به کی‌لیت شدن عناصر کم‌مصرف توسط پلیمر پلی‌اکریلات در سال ۱۹۵۴ ارائه گردید و مربوط به فلز مس بود (Wall and Gill, 1954). (Guiwei *et al.*, 2008) گزارش کردند که پلیمرهای آبدوست فراهمی زیستی فلزات سمی را در نتیجه‌ی جذب (از طریق برقراری پیوندهای یونی و کووالانسی با فلزات) و نامحلول کردن آن‌ها کاهش می‌دهند. (De Varennes *et al.*, 2009) اظهار کردند در یک خاک آلوده، مقدار مس و روی قابل استخراج با آب به ترتیب ۲/۸ و ۲ برابر بیشتر از زمانی بود که آن خاک با پلیمر پلی‌اکریلات تیمار شده بود. همچنین آن‌ها گزارش نمودند که در خاک آلوده‌ی دی‌گری که با پلیمر پلی‌اکریلات تیمار شده بود مقدار سرب قابل استخراج با آب به ۶۳٪ و مقدار مس و روی به ۵۰٪ مقدار آن در خاک شاهد کاهش پیدا کرد. (Guiwei *et al.*, 2008) گزارش نمودند که در یک خاک شنی آلوده به سرب، مقدار سرب قابل استخراج با کلسیم کلراید به ترتیب ۶/۷-۱/۶ برابر بیشتر از خاک‌های آلوده تیمار شده با پلیمر پلی‌اکریلات در مقادیر ۰/۶-۰/۴ درصد بود. این محققان اظهار کردند که پلیمر از طریق کلاته کردن سرب منجر به کاهش در مقدار سرب قابل استخراج با کلسیم کلراید شد. (De Varennes *et al.*, 2006) گزارش کردند که غلظت فلزات سمی کادمیم، نیکل و روی محلول در خاک‌های آلوده به سطوح مختلف این فلزات که با مقدار ۰/۱ درصد پلیمر پلی‌اکریلات تیمار شده بود کمتر از خاک شاهد بود و تیمار کردن خاک‌های آلوده، با پلیمر سبب شد که غلظت کادمیم، نیکل و روی به ترتیب ۲۵-۸، ۵۰-۲۵ و ۵۳-۴۰ درصد غلظت این فلزات در محلول خاک‌های فاقد پلیمر باشد.

استفاده از پلیمرها یک راه‌کار نوین در پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است ولی تاکنون تأثیر پلیمرهای اکریلیکی بر جذب آنیون‌ها، از جمله آرسنات، مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین حضور فراوان گروه عاملی کربوکسیل در ساختار پلیمر مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل آن به عنوان یک غیرمتحرک کننده باشد. ذرت نیز از جمله غلاتی است که نقش بسیار مهمی در تغذیه انسان دارد و در تحقیقات مربوط به آرسنیک مورد توجه بوده

غلظت آرسنیک کل و قابل جذب آن قابل تشخیص نبود. در جدول (۲) خصوصیات کوپلیمر اکریلیکی مورد استفاده نشان داده شده است. در این نوع پلیمر مونومر پایه، اکریلیک اسید است که به جهت بهبود خواص و واکنش پذیری آن مونومرهای مالئیک انیدرید و استایرن در کنار آن گنجاندیده شده و سبب تشکیل کوپلیمر مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید شده-اند. لازم به ذکر است که پلیمر مورد استفاده محلول در آب است. ساختار و فرمول شیمیایی مونومرهای دخیل در تشکیل کوپلیمر اکریلیکی مورد استفاده در این مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار و فرمول شیمیایی مونومرهای تشکیل دهنده کوپلیمر اکریلیکی مورد استفاده

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مورد استفاده

| ویژگی                | واحد         | مقدار   |
|----------------------|--------------|---------|
| رس                   | (%)          | ۱۶/۴    |
| شن                   | (%)          | ۵۵      |
| سیلت                 | (%)          | ۲۸/۶    |
| بافت                 | -            | لوم شنی |
| pH                   | -            | ۷/۳     |
| EC عصاره گل اشباع    | (dS/m)       | ۰/۴۹    |
| رطوبت اشباع          | (%)          | ۳۸      |
| کربنات کلسیم         | (%)          | ۱۳/۴۵   |
| ظرفیت تبادل کاتیونی  | (cmol(+)/kg) | ۱۴/۴    |
| کربن آلی             | (%)          | ۰/۳۳    |
| نیترژن کل            | (%)          | ۰/۰۶۳   |
| غلظت فسفر قابل جذب   | (mg/kg soil) | ۱۵      |
| غلظت پتاسیم قابل جذب | (mg/kg soil) | ۲۳۲/۵   |
| غلظت آهن قابل جذب    | (mg/kg soil) | ۷/۵     |
| غلظت روی قابل جذب    | (mg/kg soil) | ۰/۹۵    |
| غلظت منگنز قابل جذب  | (mg/kg soil) | ۶       |
| غلظت آرسنیک قابل جذب | (mg/kg soil) | n.d     |
| آرسنیک معادل کل      | (mg/kg soil) | n.d     |

n.d: غیر قابل تشخیص

جذب با استفاده از سولفات آمونیوم (۰/۰۵ مولار Wenzel et al., 2001) اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی تأثیر مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید بر گیاه‌فراهمی آرسنیک، تعداد ۶ عدد بذر ذرت رقم ماکسیمیا در هر گلدان کاشته شد. پس از ظهور گیاهچه‌ها و اطمینان از استقرار آن‌ها، تعداد بوته در هر گلدان با عملیات تنک، به سه عدد کاهش یافت. گیاهان به مدت ۷۵ روز در شرایط گلخانه‌ای و تحت رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. در طول دوره رشد گیاهان، کود اوره به صورت محلول و به طور یکسان به تمام گلدان‌ها افزوده می‌شد. پس از گذشت زمان مورد نظر، بخش هوایی (ساقه و برگ) و ریشه گیاهان برداشت شدند و ابتدا با آب شهری و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند و به مدت ۷۲ ساعت در آون تهویه‌دار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین گردیدند. نمونه‌های گیاهی پس از آسیاب و الک شدن به وسیله اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه ۳۰ درصد در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد هضم شدند (Tang and Miller, 1991). در عصاره‌های به دست آمده غلظت عنصر آرسنیک با دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری شد. از آنجا که آرسنات از نظر شیمیایی شباهت زیادی به ارتوفسفات دارد و با همان مکانیسم جذبی که برای فسفات وجود دارد، وارد سلول‌های ریشه می‌شود (Meharg and Macnair, 1994) و این دو عنصر برای ورود به سلول‌های ریشه با یکدیگر رقابت می‌کنند، غلظت فسفر نیز در ریشه و بخش هوایی (به روش کالریمتری و با دستگاه اسپکتروفوتومتر S2000) UV/Vis اندازه‌گیری شد. فاکتور انتقال فسفر در گیاه از نسبت غلظت فسفر در بخش هوایی به غلظت آن در ریشه محاسبه شد. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل شامل دو فاکتور سطوح مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید کوپلیمر (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) و سطوح مختلف آرسنیک کل (صفر، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت پذیرفت. نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شدند.

## نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های خاک نشان داد که بافت خاک مورد مطالعه لوم شنی، مقدار کربن آلی آن ۰/۳۳ درصد، کربنات کلسیم معادل آن ۱۳/۴۵ درصد و

جدول ۲. خصوصیات پلیمر اکریلیکی مورد آزمایش

| نام پلیمر                                   | رنگ       | ساختار | نوع بار | وزن مولکولی<br>gmol <sup>-1</sup> | چگالی<br>gcm <sup>-3</sup> | ویسکوزیته<br>cP |
|---|-----------|--------|---------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------|
| مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید کوپلیمر | سفید شیری | خطی    | کاتیونی | ۵۵۰۰۰-۵۰۰۰۰                       | ۱/۰۴                       | ۲۵              |

### غلظت آرسنیک قابل جذب خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطوح کوپلیمر، سطوح آرسنیک کل خاک و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آرسنیک قابل جذب خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). غلظت آرسنیک قابل جذب خاک با افزایش سطح کاربرد کوپلیمر اکریلیکی کاهش و با افزایش سطح آرسنیک کل خاک افزایش یافت (شکل ۲). در سطوح بالاتر آرسنیک کل خاک، کاربرد کوپلیمر اکریلیکی تأثیر بیشتری در کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب خاک داشت، به‌طور مثال میزان کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب با کاربرد سطح ۰/۲ درصد این کوپلیمر، در سطوح ۹۶، ۴۸ و ۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک به ترتیب ۴۶/۲۳٪، ۲۹/۷۷٪ و ۸/۸۱٪ بود (شکل ۲). (De Varennes and Torres (1999) نیز گزارش کردند که مقدار مس قابل استخراج با آب در یک خاک آلوده (آلودگی طبیعی) که با پلیمر پلی‌اکریلات در مقادیر ۰/۱ درصد و ۰/۲ درصد تیمار شده بود، به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۱۷ مقدار آن در خاک آلوده‌ی فاقد پلیمر بود.

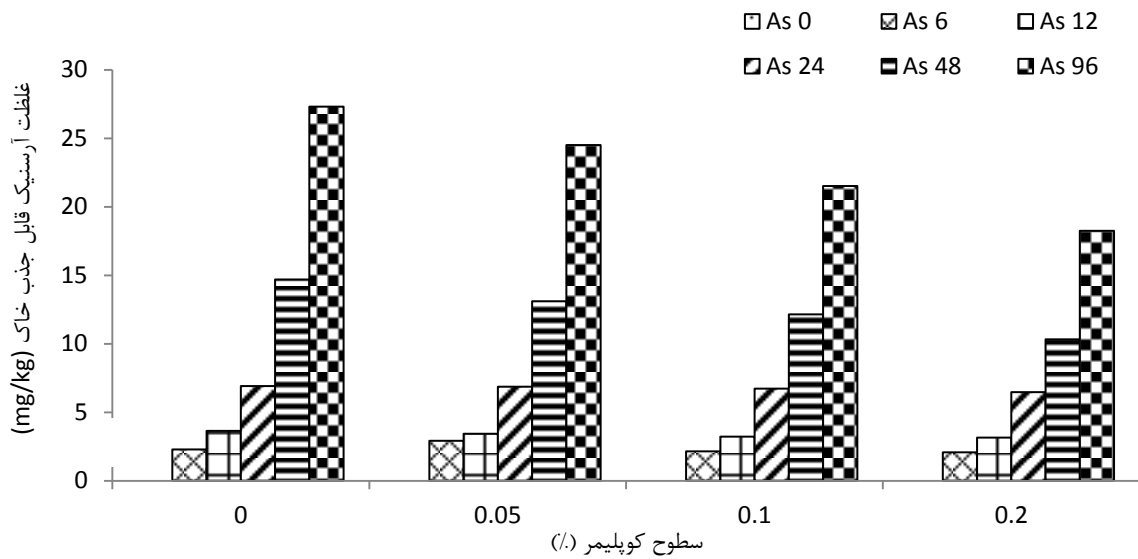
(Lentz et al. (1992) اظهار کردند که پلیمرهای اکریلیکی نیروی کوهیژن بین ذرات خاک را افزایش داده و سبب افزایش خاکدانه‌سازی می‌شوند. با افزایش خاکدانه‌سازی سطح تماس ذرات رس با محلول خاک کاهش یافته و این امر سبب کاهش

آزادسازی عناصر در محلول خاک و کاهش فرایند تبادل کاتیونی بین ذرات و محلول خاک شده و از زیست‌فراهمی فلزات از جمله فلزات سنگین کاسته می‌شود. این امر با افزایش اندازه خاکدانه‌ها تشدید می‌گردد (Cornforth, 1968). مکانیسم دیگر غیرمتحرک‌سازی عناصر توسط پلیمرهای اکریلیکی، احتمالاً از طریق برقراری پیوندهای کئوردینانسی بین آرسنات و کاتیون فلزی متصل به گروه‌های عاملی کربوکسیل و آمین موجود در زنجیر پلیمر است. گروه‌های عاملی کربوکسیل و آمین موجود در زنجیر پلیمری با کلاته کردن کاتیون‌های فلزی، از طریق تشکیل پیوندهای کووالانسی و یا الکتروستاتیک (بالاخص پیوند کووالانسی) با آن‌ها، کاتیون‌ها را به خود متصل نموده و این کاتیون‌ها به‌عنوان یک پل کاتیونی عمل نموده و سبب اتصال آرسنات به پلیمر می‌شوند. در واقع آرسنات می‌تواند در محل-های کئوردینانسی کاتیون فلزی متصل به پلیمر، قرار گرفته و با برقراری پیوندهای کئوردینانسی با کاتیون فلزی متصل به پلیمر، به پلیمر متصل شود. این امر سبب کاهش غلظت آرسنات در محلول خاک می‌گردد. (Albu et al. (2010) گزارش نمودند که واکنش کوپلیمرهای مالئیک انیدرید و مشتقات آمین با عناصر در نتیجه‌ی تشکیل پیوندهای کئوردینانسیونی است که سبب به دام افتادن و محبوس شدن عناصر در اسکلت پلیمر و فروریختن پلیمر (Collapse) می‌شود.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح کوپلیمر، سطوح آرسنیک کل خاک و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آرسنیک قابل جذب خاک و غلظت آرسنیک و فسفر

| ریشه و بخش هوایی ذرت              |            |                 |             |                  |           |                |
|-----------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------------|-----------|----------------|
| میانگین مربعات                    |            |                 |             |                  |           |                |
| منابع تغییر                       | درجه آزادی | آرسنیک قابل جذب | آرسنیک ریشه | آرسنیک بخش هوایی | فسفر ریشه | فسفر بخش هوایی |
| سطوح کوپلیمر                      | ۳          | ۱۹/۲۶**         | ۳۱۸۶/۱۵**   | ۱۲۶/۳۳**         | ۰/۰۴۲**   | ۰/۰۰۴**        |
| سطوح آرسنیک کل خاک                | ۵          | ۸۷۲/۶۰**        | ۲۰۷۷۹۴/۳۲** | ۴۹۷۷/۲۳**        | ۰/۴۶۲**   | ۰/۰۵۴**        |
| سطوح کوپلیمر × سطوح آرسنیک کل خاک | ۱۵         | ۷/۳۳**          | ۶۸۵/۲۰**    | ۱۵/۲۸**          | ۰/۰۰۱*    | ۰/۰۰۱**        |
| خطای آزمایشی                      | ۴۸         | ۰/۲۱            | ۸۸/۴۷       | ۲/۳۳             | ۰/۰۰۰۶    | ۰/۰۰۰۱         |
| ضریب تغییرات (%)                  | -          | ۵/۷۷            | ۹/۸۵        | ۷/۷۵             | ۴/۳۳      | ۵/۵۹           |

\*\* در سطح احتمال یک درصد و \* در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار می‌باشد.



شکل ۲. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک قابل جذب خاک

دلیل افزایش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک، علاوه بر افزایش غلظت آرسنیک قابل جذب اثر رقت است به طوری که کاهش بیومس گیاه (شکل‌های ۸ و ۹) سبب افزایش غلظت آرسنیک گیاه شده است. کوپلیمر اکریلیکی با کاهش غلظت آرسنیک قابل دسترس گیاه، سبب کاهش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت شد. (De Varennes *et al.* (2006). اظهار کردند که افزودن پلیمر پلی اکریلات به خاک آلوده به فلزات سمی کادمیم، نیکل و روی منجر به حفاظت از گیاهان کشت شده در این خاک در مقابل مقدار زیاد این فلزات گردید. آن‌ها بیان نمودند که با افزایش مقادیر این فلزات در خاک مقدار آن‌ها در بخش‌های هوایی گیاه افزایش می‌یافت اما میانگین این افزایش در گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با پلیمر کمتر از خاک‌های فاقد پلیمر بود. غلظت کادمیم، نیکل و روی بخش‌های هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با پلیمر به ترتیب ۲۸-۴۴، ۵۰-۲۷ و ۲۴-۶۷ درصد غلظت این فلزات در بخش‌های هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های فاقد پلیمر بود.

#### غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت

اثرات اصلی و متقابل سطوح کوپلیمر اکریلیکی و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت معنی‌دار بود (جدول ۳). در هر سطح از کوپلیمر با افزایش سطح آرسنیک کل خاک تا ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر ریشه کاهش و سپس افزایش یافت و در هر سطح از آرسنیک کل خاک با افزایش سطح کاربرد کوپلیمر اکریلیکی غلظت فسفر ریشه کاهش یافت (شکل ۵). غلظت فسفر بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک فاقد کوپلیمر اکریلیکی و

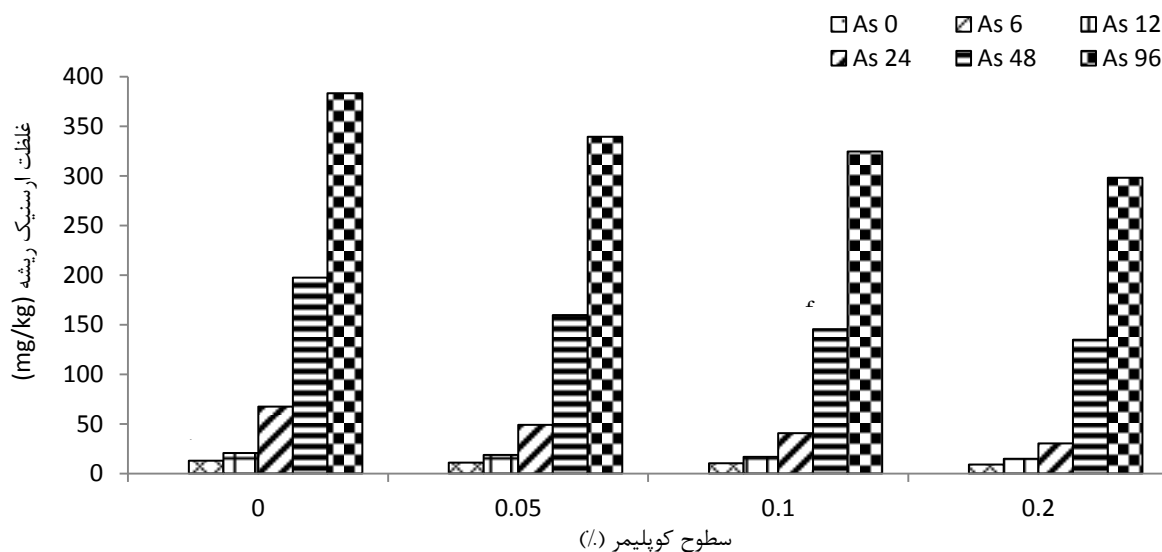
#### غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت

اثرات اصلی سطوح کوپلیمر اکریلیکی، سطوح آرسنیک کل خاک و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در هر سطح از کوپلیمر اکریلیکی، با افزایش سطح آرسنیک کل خاک، غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه افزایش یافت و در هر سطح از آرسنیک کل خاک، با افزایش سطح استفاده از کوپلیمر غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه کاهش یافت. بیشترین غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت به ترتیب ۳۸۳/۴۱ و ۵۹/۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در گیاهان کشت شده در خاک آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و فاقد کوپلیمر اندازه‌گیری شد و کمترین غلظت آن نیز مربوط به گیاهان کشت شده در خاک غیرآلوده با یا بدون کاربرد کوپلیمر بود (شکل‌های ۳ و ۴). تجمع آرسنیک در ریشه بی‌شتر از بخش هوایی بود. نتیجه مشابه را *wu et al.* (2015) گزارش نمودند.

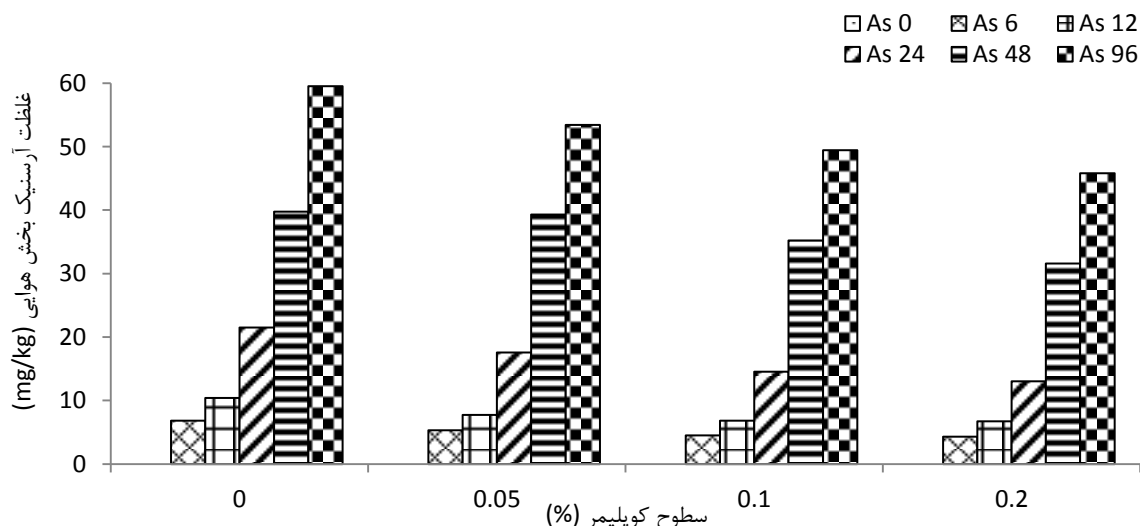
در کلیه سطوح آرسنیک کل خاک، بالاترین سطح کوپلیمر (۰/۲٪) بیشترین و پایین‌ترین سطح کوپلیمر (۰/۰۵٪) کمترین تأثیر را بر کاهش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه داشت. به عنوان مثال غلظت آرسنیک در ریشه در سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک با کاربرد ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۰۵٪ کوپلیمر در مقایسه با عدم کاربرد آن به ترتیب ۲۲/۳۰، ۱۵/۴۰ و ۱۱/۵۰٪ کاهش و در بخش هوایی ۲۳/۰۶، ۱۶/۹۹، ۱۰/۲۵٪ کاهش یافت. (Gulz *et al.* (2005). نیز گزارش نمودند که با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک، غلظت آرسنیک در ریشه گیاهان ذرت، آفتابگردان و کلزا افزایش یافت.

(شکل‌های ۵ و ۶). کاهش غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک غیرآلوده با کاربرد کوپلیمر اکریلیکی، نشان می‌دهد که این کوپلیمر فسفر را نیز جذب خود نموده و قابلیت دسترسی آن را کاهش داده است. افزایش غلظت فسفر در بخش هوایی و کاهش غلظت آن در ریشه گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده با کاربرد کوپلیمر اکریلیکی، نشان می‌دهد که این کوپلیمر انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی گیاه را افزایش داده است.

خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۰۵ درصد کوپلیمر، با افزایش سطح آرسنیک کل خاک کاهش یافت. ولی در بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۱ و ۰/۲ درصد کوپلیمر اکریلیکی، با افزایش سطح آرسنیک کل تا ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافت (شکل ۶). همچنین با افزایش سطح کاربرد کوپلیمر اکریلیکی، غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های غیرآلوده کاهش یافت ولی در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده به‌ترتیب کاهش و افزایش یافت



شکل ۳. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک ریشه ذرت



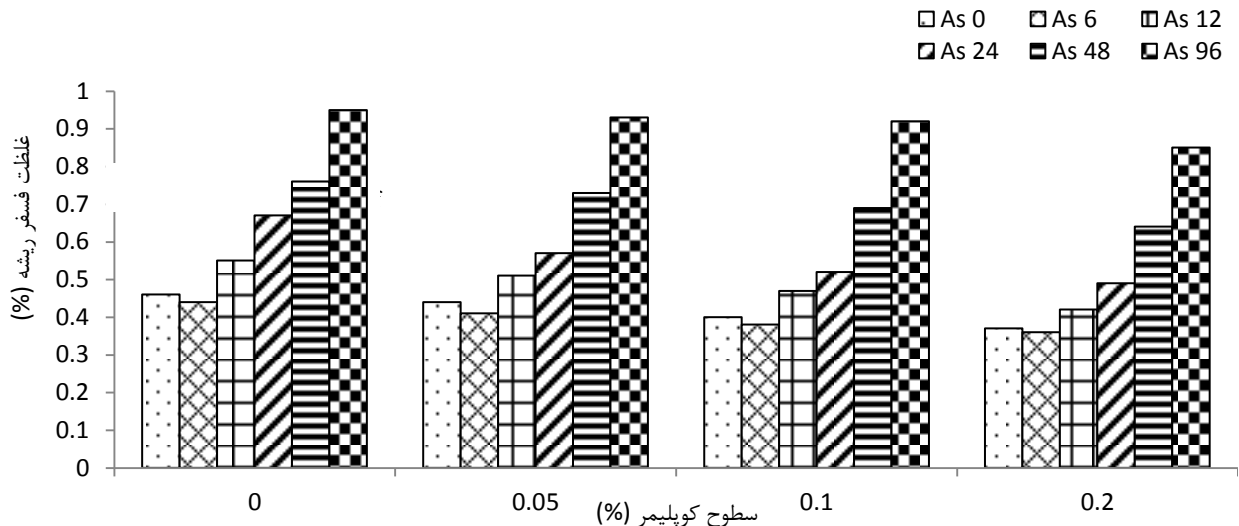
شکل ۴. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک بخش هوایی ذرت

مقدار ۰/۳۱ درصد از گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با ۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و ۰/۲ درصد کوپلیمر بدست آمد و بالعکس بیشترین غلظت فسفر بخش

بیشترین غلظت فسفر ریشه به مقدار ۰/۹۵ درصد از گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و فاقد کوپلیمر و کمترین غلظت آن به

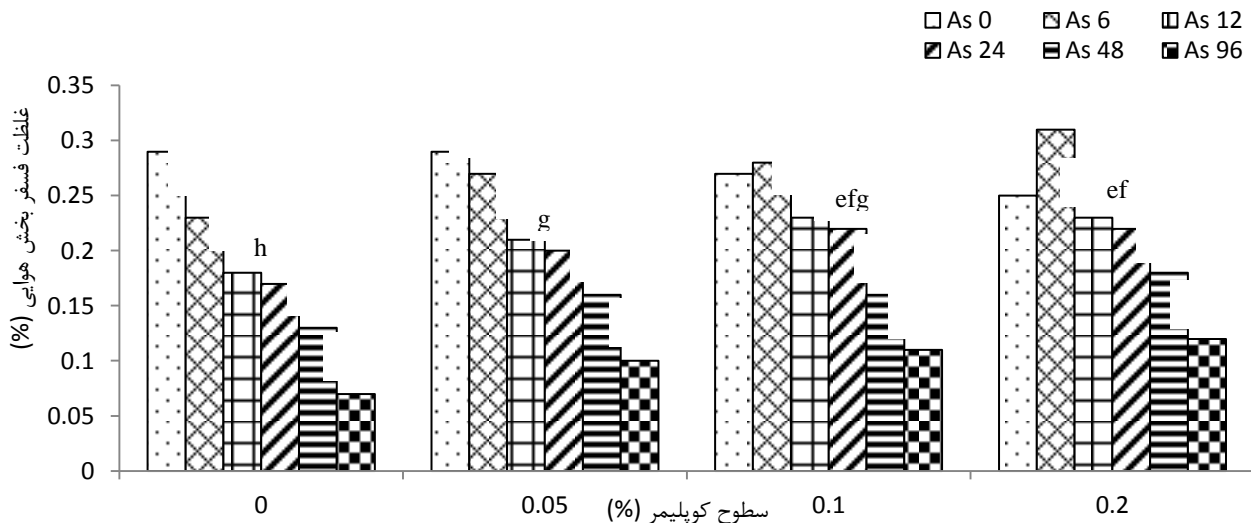
کشت شده در خاک آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و فاقد کوپلیمر بدست آمد (شکل‌های ۵ و ۶).

هوایی به مقدار ۰/۳۱ درصد در گیاهان کشت شده در خاک تیمار شده با ۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و ۰/۲ درصد کوپلیمر و کمترین غلظت آن به مقدار ۰/۰۷ درصد در گیاهان



شکل

۵. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر ریشه ذرت



شکل ۶. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر بخش هوایی ذرت

فسفر از ریشه به بخش هوایی باعث کاهش غلظت آن در ریشه و افزایش غلظت آن در بخش هوایی شده است. Shaibur *et al.* (2009) نیز اظهار نمودند که آرسنیک تأثیر منفی بر انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی گیاه جو داشت. Liu *et al.* (2012) گزارش کردند که با افزایش غلظت آرسنیک کل در خاک تا ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقدار فسفر در گیاه گندم افزایش یافت. تجمع آرسنیک در ریشه به غشای سلول‌های آن آسیب جدی وارد کرده و نفوذپذیری و گزینش‌پذیری و عملکرد آن‌ها را مختل می‌کند (Gulz *et al.*, 2005). کوپلیمر اکریلیکی با کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب، احتمالاً موجب کاهش

فسفات و آرسنات رفتار فیزیکوشیمیایی مشابهی دارند و مستقیماً برای اشغال مکان‌های جذبی با یکدیگر رقابت دارند بنابراین افزایش غلظت آرسنیک در خاک سبب آزاد شدن فسفر از مکان‌های جذبی، افزایش قابلیت دسترسی (جدول ۴) و جذب آن توسط ریشه می‌شود (Hingston *et al.*, 1971; Gao and Mucci, 2001). از طرفی آرسنیک در غلظت‌های بیش از ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، با کاهش انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی گیاه (جدول ۴)، سبب تجمع آن در ریشه و کاهش غلظت آن در بخش هوایی گیاه شده است ولی در غلظت ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تأثیر منفی بر انتقال فسفر نداشته و انتقال

کل خاک تا ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، افزایش و سپس کاهش یافت (شکل ۷). با افزایش سطح کاربرد کوپلیمر اکریلیکی متوسط ارتفاع بوته گیاهان کشت شده در خاک‌های غیرآلوده کاهش ولی در خاک‌های آلوده افزایش یافت (شکل ۷).

بیشترین ارتفاع بوته به مقدار ۸۳/۴۱ سانتی‌متر از گیاهان کشت شده در خاک‌های دارای سطح ۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک و ۰/۲ درصد کوپلیمر اکریلیکی و کمترین ارتفاع آن به مقدار ۱۹/۱۳ سانتی‌متر از گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و فاقد کوپلیمر اکریلیکی بدست آمد. در خاک‌های آلوده، بالاترین سطح کوپلیمر (۰/۲٪) بیشترین و پایین‌ترین سطح کوپلیمر (۰/۰۵٪) کمترین تأثیر را بر افزایش ارتفاع گیاه داشت. میزان افزایش ارتفاع بوته در سطوح ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک با کاربرد ۰/۲٪ کوپلیمر ۱۰/۹۹٪، ۱۲/۶۷٪، ۱۶/۹۰٪، ۳۳/۴۵٪ و ۵۴/۳۱٪ بود. Shaibur *et al.* (2009) در بررسی برهم‌کنش آرسنیک و آهن در گیاه جو در شرایط هیدروپونیک مشاهده کردند که با افزایش غلظت آرسنیک به ۳۳/۵ میکرومول در لیتر، ارتفاع بخش هوایی گیاه جو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. *Jahan et al.* (2003) اظهار نمودند که هنگامی که گیاهان در معرض مقادیر بالای آرسنیک قرار می‌گیرند علائم سمیت از جمله کاهش ارتفاع در آن‌ها بروز می‌کند.

آزادسازی فسفر از مکان‌های جذبی و متعاقباً کاهش قابلیت دسترسی و غلظت آن در ریشه می‌شوند. با کاهش غلظت آرسنیک ریشه ذرت، انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی بهتر صورت می‌گیرد و تجمع فسفر در ریشه کمتر و تجمع آن در بخش هوایی بیشتر می‌شود.

جدول ۴. تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر قابل جذب خاک و

| فاکتور انتقال فسفر در گیاه |                           |                    |
|----------------------------|---------------------------|--------------------|
| سطوح آرسنیک کل خاک         | فسفر قابل جذب خاک (mg/kg) | فاکتور انتقال فسفر |
| ۰                          | ۱۵/۰۲ d                   | ۰/۶۶ a             |
| ۶                          | ۱۶/۱۴ d                   | ۰/۶۷ a             |
| ۱۲                         | ۱۹/۰۸ c                   | ۰/۴۴ b             |
| ۲۴                         | ۲۲/۸۱ b                   | ۰/۳۷ c             |
| ۴۸                         | ۲۵/۰۰ a                   | ۰/۲۳ d             |
| ۹۶                         | ۲۶/۹۴ a                   | ۰/۱۱ e             |

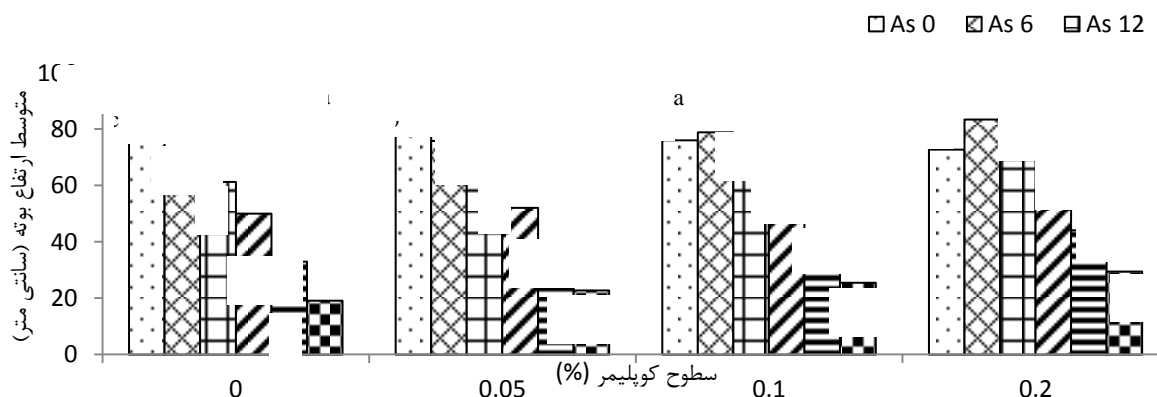
#### متوسط ارتفاع بوته

اثرات اصلی سطوح کوپلیمر اکریلیکی، سطوح آرسنیک کل خاک و اثر متقابل آن‌ها بر متوسط ارتفاع بوته گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). متوسط ارتفاع بوته گیاهان کشت شده در خاک‌های فاقد کوپلیمر اکریلیکی و خاک‌های دارای سطح ۰/۰۵ درصد این کوپلیمر، با افزایش سطح آرسنیک کل خاک کاهش یافت، ولی در خاک‌های دارای سطوح ۰/۱ و ۰/۲ درصد این کوپلیمر با افزایش سطح آرسنیک

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح کوپلیمر، سطوح آرسنیک کل خاک و اثر متقابل آن‌ها بر متوسط ارتفاع بوته و وزن خشک ریشه و بخش هوایی ذرت

| میانگین مربعات    |              |                   | درجه آزادی | منابع تغییر                       |
|-------------------|--------------|-------------------|------------|-----------------------------------|
| وزن خشک بخش هوایی | وزن خشک ریشه | متوسط ارتفاع بوته |            |                                   |
| ۱۱/۶۹ **          | ۲۶/۲۷ **     | ۱۳۵/۹۱ **         | ۳          | سطوح کوپلیمر                      |
| ۶۷۴۰/۹۵ **        | ۲۱۹۷/۰۳ **   | ۵۵۹۸/۲۵ **        | ۵          | سطوح آرسنیک کل خاک                |
| ۱۷/۲۳ **          | ۸/۱۶ **      | ۳۳/۶۹ **          | ۱۵         | سطوح کوپلیمر × سطوح آرسنیک کل خاک |
| ۴/۷۷              | ۲/۵۸         | ۱۲/۵۴             | ۴۸         | خطای آزمایشی                      |
| ۵/۵۱              | ۷/۴۷         | ۶/۳۱              | -          | ضریب تغییرات (٪)                  |

\*\* در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد



شکل ۷. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر متوسط ارتفاع بوته ذرت



غلظت فسفر و کاهش تجمع زیاد آرسنیک در بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده سبب افزایش وزن خشک این بخش شد.

(De Varennes et al. (2006) گزارش کردند که افزودن پلیمر پلی اکریلات به خاک آلوده به ۱۰۰ میلی گرم نیکل در کیلوگرم، سبب شد وزن خشک بخش هوایی گیاه perennial ryegrass از ۲/۲ گرم در گلدان به ۶/۳ گرم در گلدان افزایش یابد. De Varennes و Queda (2005) گزارش کردند که وزن خشک گیاه annual medic (*Medicago polymorpha* L.) کشت شده در خاک آلوده به ۱۰۰ میلی گرم مس در کیلوگرم و تیمار شده با پلیمر پلی اکریلات، ۳/۱ برابر بیشتر از خاک فاقد پلیمر بود.

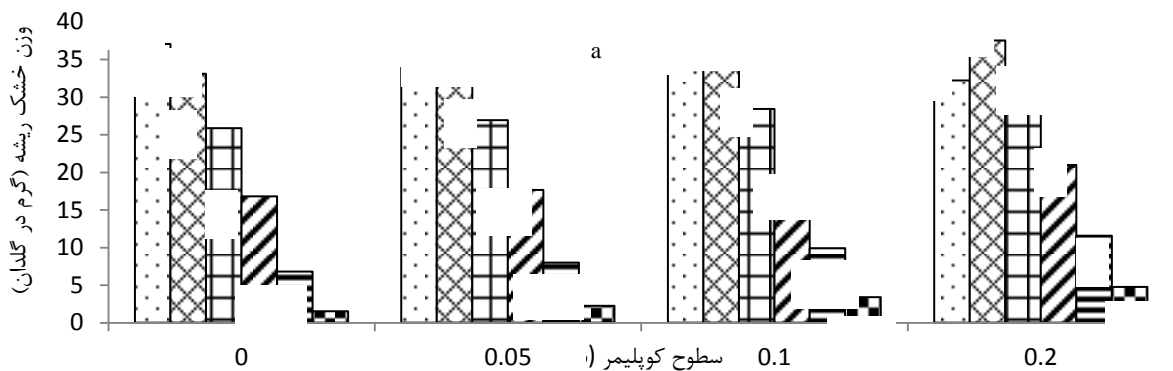
بیشترین وزن خشک ریشه و بخش هوایی به ترتیب به مقادیر ۳۷/۵۰ و ۶۶/۸۵ گرم در گلدان از گیاهان کشت شده در خاک‌های دارای سطح ۶ میلی گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و ۰/۲ درصد کوپلیمر اکریلیکی و کمترین وزن خشک آن‌ها به مقادیر ۱/۵ و ۳/۱۳ گرم در گلدان از گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده به سطح ۹۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم و فاقد کوپلیمر اکریلیکی بدست آمد.

### وزن خشک ریشه و بخش هوایی ذرت

اثرات اصلی سطوح کوپلیمر اکریلیکی، سطوح آرسنیک کل خاک و اثر متقابل آن‌ها بر وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۵). تغییرات وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در تیمارهای مختلف بدین شرح بود: در خاک‌های فاقد کوپلیمر اکریلیکی و خاک‌های دارای سطح ۰/۰۵ درصد کوپلیمر با افزایش سطح آرسنیک کل خاک کاهش یافتند، در خاک‌های دارای سطح ۰/۱ و ۰/۲ درصد کوپلیمر اکریلیکی با افزایش سطح آرسنیک کل خاک تا ۶ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش سپس کاهش یافتند (شکل‌های ۸ و ۹).

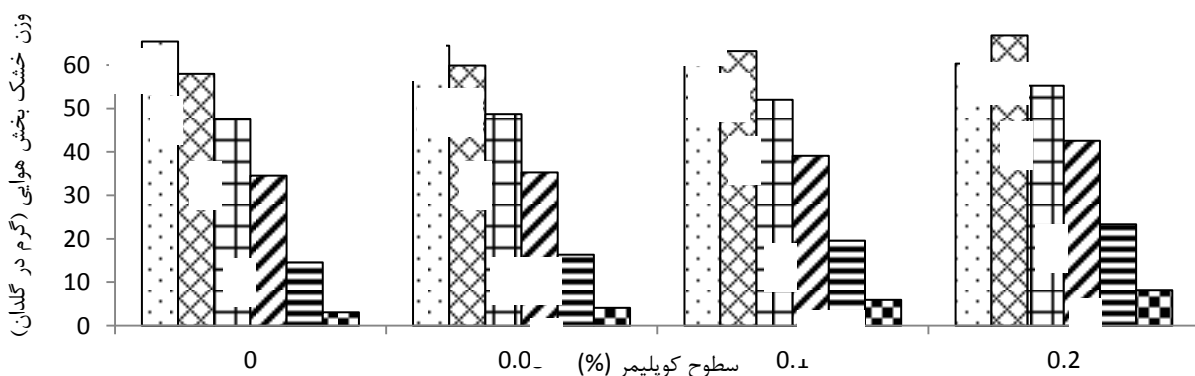
با افزایش سطح کاربرد کوپلیمر اکریلیکی وزن خشک ریشه و بخش هوایی در گیاهان کشت شده در خاک‌های غیرآلوده کاهش و در خاک‌های آلوده افزایش یافت (شکل‌های ۸ و ۹). کوپلیمر اکریلیکی با کاهش غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های غیرآلوده، وزن خشک این بخش‌ها را کاهش داد ولی با کاهش تجمع مقادیر زیاد آرسنیک و فسفر در ریشه گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده، وزن خشک ریشه را افزایش داد. همچنین با افزایش

□ As 0   ▨ As 6   ▩ As 12



شکل ۸. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر وزن خشک ریشه ذرت

□ As 0   ▨ As 6   ▩ As 12



شکل ۹. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر وزن خشک بخش هوایی ذرت

آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک بود. این امر نشان می‌دهد که تا غلظت ۴۸ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک، افزایش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی از کاهش وزن خشک این بخش‌ها بیشتر بوده و مقدار جذب که حاصل‌ضرب این دو عامل است افزایش یافته است. ولی در غلظت ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک، میزان کاهش وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه بیشتر بوده و همین امر سبب کاهش جذب این بخش‌ها شده است.

با افزایش مقدار کاربرد پلیمر جذب آرسنیک ریشه و بخش هوایی تا غلظت ۲۴ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک کاهش و سپس در غلظت‌های بیشتر آرسنیک کل خاک افزایش یافت. کاربرد کopolymer غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی را کاهش (شکل‌های ۳ و ۴) ولی وزن خشک آن‌ها را افزایش داد (شکل‌های ۸ و ۹) و چون در خاک‌های آلوده با غلظت‌های ۴۸ و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک، تأثیر پلیمر بر افزایش رشد و وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه بسیار بیشتر بود، مقدار جذب آرسنیک این بخش‌ها افزایش یافت. با افزایش رشد گیاهان توانایی آن‌ها برای جذب عناصر از خاک افزایش می‌یابد (Osaki et al., 1997).

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که کopolymer مالٹیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید در کاهش تحرک آرسنیک در خاک و غلظت آرسنیک در گیاه ذرت مؤثر بود ولی مصرف آن در خاک‌های غیر آلوده غلظت فسفر در گیاه و زیست‌توده گیاه را کاهش داد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی تأثیر این کopolymer اکریلیکی بر فعالیت آنزیمی و بیومس میکروبی خاک-های آلوده به آرسنیک بررسی شده و همچنین سرعت تجزیه کopolymerهای اکریلیکی در خاک مورد مطالعه قرار گیرد.

آرسنات از نظر شیمیایی شبیه فسفات است و از عرض‌غشای پلازما از طریق سیستم انتقال فسفر عبور داده می‌شود و درون سیتوپلاسم، با فسفات در ساخت ATP رقابت نموده و ADP-As تولید می‌کند که منجر به قطع جریان انرژی در سلول‌ها و در نهایت مرگ آن‌ها می‌شود (Sneller et al., 1999). Gulz et al. (2005) اظهار نمودند که مقادیر بالای آرسنیک در خاک برای تمامی گیاهان سمی است و سبب بروز کلروز، ممانعت از رشد و در نهایت مرگ آن‌ها می‌شود. (Abedin et al., 2002) نیز کاهش قابل ملاحظه در بیومس ریشه برنج را در غلظت ۸ میلی‌گرم بر لیتر آرسنیک را گزارش نمودند. (Liu et al., 2012) گزارش نمودند که ارتفاع و وزن خشک گندم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم ۷/۸ و ۲۴/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت ولی با افزایش غلظت آرسنیک به بیش از ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم به طور معنی‌داری کاهش یافت. به طور کلی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با کاربرد کopolymer اکریلیکی غلظت آرسنیک در خاک، ریشه و بخش هوایی گیاهان کاهش یافت و این امر موجبات رشد بیشتر گیاه و افزایش وزن خشک آن‌را فراهم آورد.

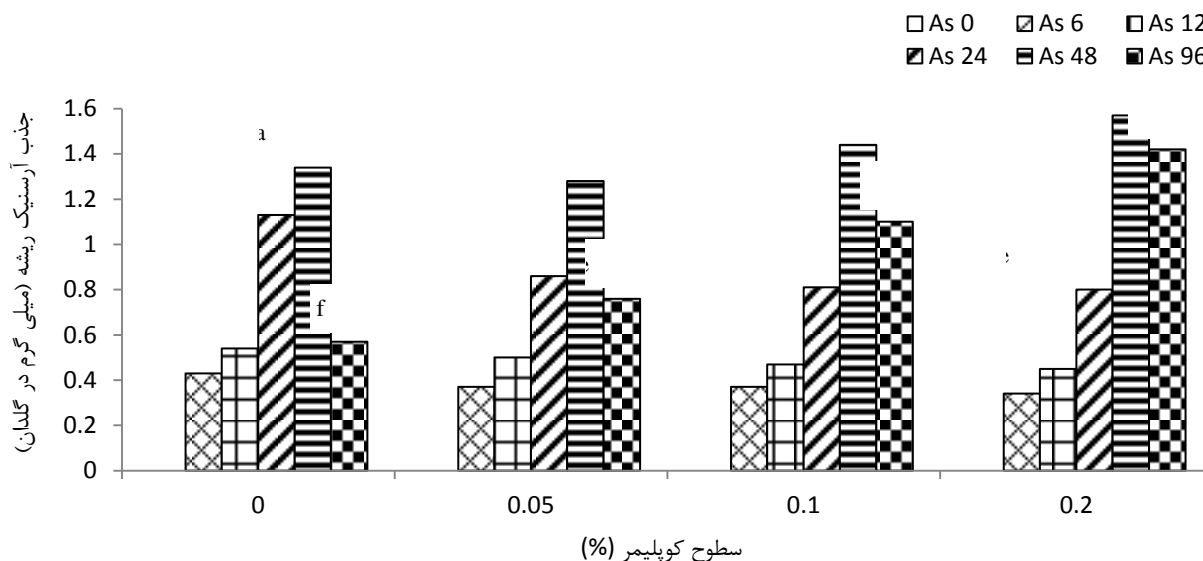
### جذب آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت

اثرات متقابل سطوح کopolymer اکریلیکی و سطوح آرسنیک کل خاک بر جذب آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). جذب آرسنیک ریشه تمامی تیمارها با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک افزایش یافت (شکل ۱۰). جذب آرسنیک بخش هوایی تیمارها نیز با افزایش غلظت آرسنیک کل تا ۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، افزایش و سپس در غلظت ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک کاهش یافت (شکل ۱۱). مقادیر جذب آرسنیک ریشه و بخش هوایی در غلظت ۴۸ و گاه‌ها در غلظت ۲۴ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک بیش از غلظت ۹۶ میلی‌گرم

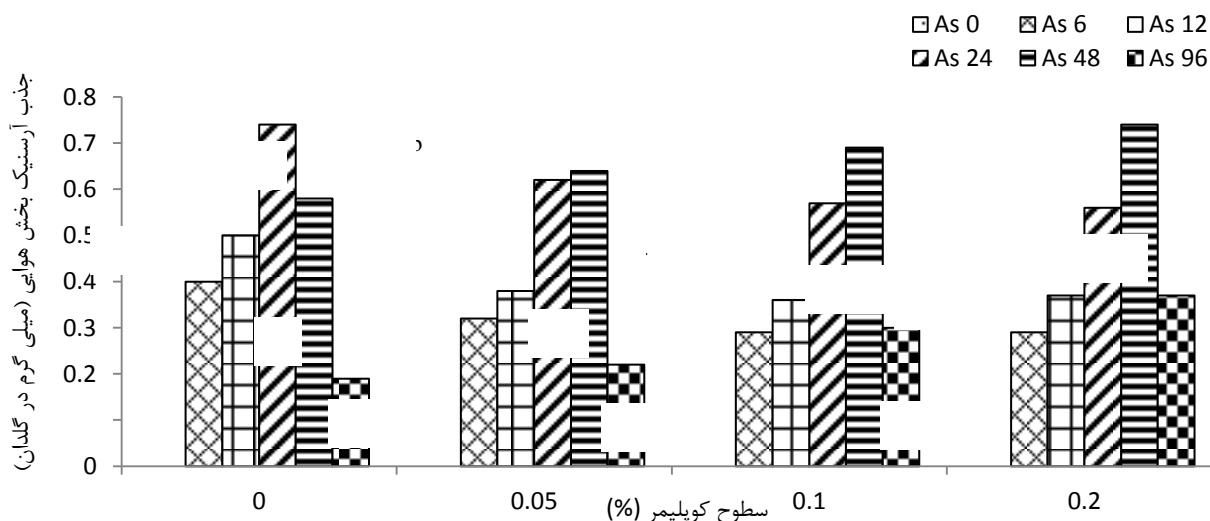
جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح کopolymer، سطوح آرسنیک کل خاک و اثر متقابل آن‌ها بر جذب آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت

| میانگین مربعات      |                      | درجه آزادی | منابع تغییر                         |
|---------------------|----------------------|------------|-------------------------------------|
| جذب آرسنیک ریشه     | جذب آرسنیک بخش هوایی |            |                                     |
| ۰/۰۵۹ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۶*               | ۳          | سطوح کopolymer                      |
| ۲/۹۹۷**             | ۰/۷۱۸**              | ۵          | سطوح آرسنیک کل خاک                  |
| ۰/۰۹۷**             | ۰/۰۱۴**              | ۱۵         | سطوح کopolymer × سطوح آرسنیک کل خاک |
| ۰/۰۲۲               | ۰/۰۰۲                | ۴۸         | خطای آزمایشی                        |
| ۲۰/۰۴               | ۱۲/۰۰                | -          | ضریب تغییرات (%)                    |

ns، \*، \*\* و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری.



شکل ۱۰. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر جذب آرسنیک ریشه ذرت



شکل ۱۱. اثر متقابل سطوح کوپلیمر و سطوح آرسنیک کل خاک بر جذب آرسنیک بخش هوایی ذرت

## REFERENCES

- Abedin, M. J., Cotter-Howells, J. and Meharg, A. A. (2002). Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa L.*) irrigated with contaminated water. *Plant and Soil*, 240, 311-319.
- Albu, A. M., Mocioi, M., Doina Mateescu, C. and Iosif, A. (2010). Maleic anhydride copolymers with ability to bind metal ions. 1. polydentate amine derivatives for Cr (III) ions' removal. *Journal of Applied Polymer Science*, 121, 1867-1874.
- Babaakbari, M., Farahbakhsh, M., Savaghebi, Gh. R. and Najafi, N. (2013). Investigation of arsenic concentration in some of the calcareous soils of ghorveh and arsenic uptake by maize, wheat and rapeseed in a natural contaminated soil. *Water and soil science*, 23(4), 1-17 (In Farsi).
- Bremner, J. M. and Mulvaney, C. S., (1996). Nitrogen – Total. In: Page, A. L., Miller, R. H. and Keeney, D. R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2. SSSA, Inc. ASA, Inc. Madison, WI, pp. 1085-1122.
- Cornforth, I. S. (1968). The effect of size of soil aggregates on nutrient supply. *The Journal of Agricultural Science*, 70, 83-85.
- De Varennes, A. and Queda, C. (2005). Application of an insoluble Polyacrylate polymer to copper-contaminated soil enhances plant growth and soil quality. *Soil Use and Management*, 21, 410-414.
- De Varennes, A. and Torres, M. O. (1999). Remediation of a long-term copper contaminated soil using a polyacrylate polymer. *Soil Use and Management*, 15, 230-232.
- De Varennes, A., Goss, M. J. and Mourato, M. (2006). Remediation of a sandy soil contaminated with

- cadmium, nickel, and zinc using an insoluble polyacrylate polymer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 1639–1649.
- De Varennes, A., Queda, C. and Ramos, A. R. (2009). Polyacrylate polymers as immobilizing agents to aid phytostabilization of two mine soils. *Soil Use and Management*, 25, 133-140.
- 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.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Physical and Mineralogical Methods. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis*, Part 1. ASA, SSSA, Madison, WI, USA, pp. 383-411.
- Guiwei, Q., De Varennes, A. and Cunha-Queda, C. (2008). Remediation of a mine soil with insoluble polyacrylate polymers enhances soil quality and plant growth. *Soil Use and Management*, 24, 350-365.
- Gulz, P. A., Gupta, S. K. and Schulin, R. (2005). Arsenic accumulation of common plants from contaminated soils. *Plant and Soil*, 272, 337–347.
- Helalia, A. M. and Letey, J. (1989). Effects of Different Polymers on Seedling Emergence, Aggregate Stability and Crust Hardness, *Soil Science*, 148, 199–203.
- Helmke, P. A. and Spark, D. L. (1996). Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium, and Cesium. In: Sparks, D. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 3. SSSA, Inc. ASA, Inc. Madison, WI, pp. 551-574.
- Hingston, F. J., Posner A. M. and Quirk, J. P. (1971). Competitive adsorption of negatively charged ligands on oxide surfaces. *Discussions of the Faraday Society*, 52, 334–342.
- Hosseinpur feyzi, M., Mosaferi, M., Dastgiri, S., Zolali, Sh., Poladi, N. and Azarfam, P. (2007). The Prevalence of Health Problems in the Qopuz Village of East Azerbaijan and Its Relation with Arsenic Levels in Drinking Water. *Iranian Journal of Epidemiology*, 3, 21-27.
- Hudson Edwards, K. A., Houghton, S. L. and Osborn, A. (2004). Extraction and analysis of arsenic in soils and sediments, *Trends in Analytical Chemistry*, 23, 745-752.
- Jahan, I., Hoque, S., Ullah, S. M. and Kibria, M. G. (2003). Effects of arsenic on some growth parameters of rice plant. *Dhaka University Journal of Biological Sciences*, 12, 71-77.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A. and Maurice, C. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review. *Waste management*, 28, 215-225.
- Lentz, R. D., Shainberg, I., Sojka, R. E. and Carter, D. L. (1992). Preventing irrigation furrow erosion with small application of polymers. *Soil Science Society of American Journal*, 56, 1926-1932.
- Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42, 421-428.
- Liu, Q. J., Zheng, C. M., Hu, C. X., Tan, Q. L., Sun, X. C. and Su, J. J. (2012). Effects of high concentrations of soil arsenic on the growth of winter wheat (*Triticum aestivum* L) and rape (*Brassica napus*), *Plant Soil and Environment*, 58 (1), 22–27.
- Meharg, A. A. and Macnair, M. R. (1994). Relationship between plant phosphorus status and the kinetics of arsenate influx in clones of *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. that differ in their tolerance of arsenate. *Plant and Soil*, 162, 99-106.
- Miretzky, P. and Cirelli, A. F. (2010). Remediation of arsenic-contaminated soils by iron amendments: a review. *Environmental Science and Technology*, 40, 93-115.
- Mulligan, C., Yong, R. and Gibbs, B. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering geology*, 60, 193-207.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E., (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. and Sumner, M. E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, pp. 539-579.
- Nelson, R. E. (1982). Chemical and Microbiological Properties. In Page, A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2. Agronomy Monograph no. 9. SSSA and ASA, Madison, WI, pp.181-196.
- Ong, G. H., Yap, C. K., Maziah, M., Suhaimi, H. and Tan, S. G. (2013). An investigation of arsenic contamination in Peninsular Malaysia based on Centella asiatica and soil samples. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 3243–3254.
- Osaki, M., Shinano, T., Matsumoto, M., Zheng, T., Tadano, T. (1997). A root-shoot interaction hypothesis for high productivity of field crops. *Soil Sci. Plant Nutrition*, 43, 1079–1084.
- Sadiq, M. (1986). Solubility relationships of arsenic in calcareous soils and its uptake by corn. *Plant and Soil*, 91, 241-248.
- Sadiq, M. (1997). Arsenic chemistry in soils: an overview of thermodynamic predictions and field observations. *Water, Air and Soil Pollution*, 93, 117–136.
- Seyed Dorraji, S., Golchin, A. and Ahmadi, Sh. (2010). The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils. *Clean – Soil, Air, Water*, 38 (7), 584-591.
- 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.
- Sneller, F. E. C., Van Heerwaarden, L. M., Kraaijeveld-Smit, F. J., Ten Bookum, W. M., Koevoets, P. L. M., Schat, H. and Verkleij, J. A. C. (1999). Toxicity of arsenate in *Silene vulgaris*,

- accumulation and degradation of arsenate-induced phytochelatins. *New Phytologist*, 144, 223-232.
- Sojka, R. E., Bjorneberg, D. L., Entry, J. A., Lentz, R. D. and Orts, W. J. (2007). Polyacrylamide in Agriculture and Environmental Land Management, *Advances in Agronomy*, 92, 75-162.
- Sumner, M. E. and Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M. E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 3. Soil Science Society of America, Inc., Madison, USA, pp. 1201-1229.
- Tang, T. and Miller, D.M. (1991). Growth and Tissue Composition of Rice Grown in Soil Treated with Inorganic Copper, Nickel, and Arsenic. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 22, 2037-2045.
- Wall, F. T. and Gill, S. J. (1954). Interaction of Cupric Ions with Polyacrylic Acid, *The Journal of physical. Chemistry*, 58, 1128-1130.
- Wenzel, W. W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E. and Adriano, D. C. (2001). Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta*, 436, 309-323.
- Wu, G. R., Hong, H. L. and Yan, C. L. (2015). Arsenic accumulation and translocation in mangrove (*Aegiceras corniculatum* L.) grown in Arsenic Contaminated Soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12 (7), 7244-7253.
- Zandsalimi, S., Karimi, N. and Kohandel, A. (2011). Arsenic in soil, Vegetation and Water of a Contaminated Region, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8 (2), 331-338.