

## بررسی اثر سطوح مختلف پلیمرهای اکریلیکی بر رشد گیاه ذرت در خاک‌های آلوده به عناصر سنگین

علی باریکلو<sup>۱\*</sup>، عطیه طریقی<sup>۱</sup>

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

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [ali\\_barikloo@alumni.znu.ac.ir](mailto:ali_barikloo@alumni.znu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

DOI: 10.30470/jsp.2026.735617

### چکیده

کاهش دسترسی غلظت فلزات سنگین از جمله سرب، روی و کادمیوم در خاک بسیار حائز اهمیت است، چرا که ارتباط مستقیم با آلودگی خاک، آب و گیاه دارد. لذا به جهت کاهش این آلودگی‌ها، پلیمرهایی که از مواد اصلاح‌کننده خاک هستند، توسعه یافته‌اند. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر پلیمرهای مختلف محلول در آب بر کاهش تحرک و فراهمی سرب، روی و کادمیوم و رشد ذرت در خاک زراعی آلوده به فلزات سنگین پیرامون معدن سرب و روی انگوران انجام شد. بدین منظور، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با سه فاکتور نوع (کاتیونی، آنیونی و غیر یونی) و سطوح مختلف کوپلیمرهای اکریلیکی (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) و یک نوع خاک آلوده به فلزات سنگین انجام شد. از گیاه ذرت به‌عنوان شاخص زیستی استفاده شد و قبل از کاشت آن، غلظت سرب، روی و کادمیوم کل و قابل جذب در خاک اندازه‌گیری شد. پس از برداشت، وزن خشک، غلظت عناصر سنگین در ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد با افزایش مدت زمان تماس پلیمر با خاک میزان تحرک فلزات سنگین در خاک کاهش یافت. همچنین با افزایش میزان مصرف پلیمر، میزان تثبیت فلزات در خاک افزایش گردید و پلیمر آنیونی به میزان بیش‌تری سرب، روی و کادمیوم را در خاک غیر متحرک کرد. با مصرف پلیمر در خاک رشد گیاه کاهش یافت. طول و حجم ریشه و سایر صفات رویشی در خاک به‌ترتیب در خاک شاهد، پلیمر غیر یونی، پلیمر کاتیونی و پلیمر آنیونی حداکثر مقدار را دارا بودند. در نتیجه کاهش تحرک سرب، روی و کادمیوم و بهبود پایداری و افزایش خاکدانه در خاک استفاده از این ماده در خاک آلوده قابل توصیه می‌باشد ولی به دلیل تأثیر منفی پلیمر اکریلیکی بر رشد ذرت، در تثبیت فلزات سنگین در خاک‌های در حال کشت توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: پلیمر آنیونی، پلیمر غیر یونی، پلیمر کاتیونی، تثبیت فلزات سنگین

## Studying the effect of different levels of acrylic polymers on corn plant growth in soils contaminated with heavy elements

A. Barikloo<sup>1\*</sup>, A. Tarighi<sup>1</sup>

*1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

\*Corresponding Author, Email: [atieyeh.tarighi@gmail.com](mailto:atieyeh.tarighi@gmail.com)

Received: August 2025 Accepted: February 2026

DOI: 10.30470/jsp.2026.735617

### Abstract

Reducing the availability of concentration of heavy metals, including lead, zinc, and cadmium, is very important in soil, because it is directly related to soil, water, and plant pollution. Therefore, polymers, which are soil amendment materials, have been developed to reduce these pollutions. The present study aimed to investigate the effect of different water-soluble polymers on reducing the mobility and bioavailability of lead, zinc, and cadmium, as well as on corn growth in agricultural soils contaminated with heavy metals around the Anguran lead and zinc mine. For this purpose, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications, involving three factors: polymer type (cationic, anionic, and non-ionic), different levels of acrylic copolymers (0, 0.05, 0.1, and 0.2%), and one type of heavy metal-contaminated soil. Corn was used as a bioindicator, and before planting, the total and bioavailable concentrations of lead, zinc, and cadmium in the soil were measured. After harvest, the dry weight and heavy metal concentrations in the roots and shoots of the corn plants were determined. The results showed that as the contact time between the polymer and soil increased the mobility of heavy metals in the soil decreased. Additionally, with higher polymer application rates, the immobilization of metals in the soil increased, with the anionic polymer immobilizing lead, zinc, and cadmium to a greater extent. However, polymer application reduced plant growth; root length, root volume, and other vegetative traits were highest in the control soil, followed by non-ionic, cationic, and anionic polymer treatments, respectively. In conclusion, the use of these polymers in contaminated soils is recommended due to their ability to reduce the mobility of lead, zinc, and cadmium and improve soil stability and aggregate formation. However, because of the negative impact of acrylic polymers on corn growth, their application for heavy metal immobilization in cultivated soils is not advised.

**Keywords:** Anionic polymer, Cationic polymer, Heavy metal immobilization, Non-ionic polymer

## مقدمه

آلودگی خاک، آب و گیاه یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست محیطی در همه جوامع بشری می‌باشد که حیات موجودات زنده به‌ویژه انسان را با خطر جدی مواجه ساخته است (Ailincai et al., 2008) و در تبادل مواد و انرژی با اتمسفر، هیدروسفر، بیوسفر و لیتوسفر نقش حیاتی ایفا می‌کند (Micó et al., 2006). سهم آلاینده‌های ناشی از منابع انسانی بیش‌تر از بخش طبیعی می‌باشد (Nriagu and Pacyna., 1988). از مهم‌ترین آلاینده‌ها می‌توان به فلزات سنگین اشاره کرد. هر چند فلزات سنگین تعریف دقیق و مشخصی ندارند، اما از مفهوم چگالی برای تعریف آن‌ها بیشتر استفاده می‌شود. بر این اساس، فلز سنگین به عنصری اطلاق می‌گردد که چگالی آن بیش از ۴ یا ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد (FU and Wang., 2011). سلامتی انسان می‌تواند در اثر مصرف مواد غذایی آلوده به فلزات سنگین در معرض خطر قرار گیرد. بخش اعظمی از مواد غذایی آلوده را محصولاتی تشکیل می‌دهند که گیاهان تولید کننده آن‌ها در محیط و خاک آلوده رشد کرده‌اند، اگر محیط، حاوی مقادیر قابل توجهی از این فلزات باشد، گیاهان قادرند به مقدار زیاد فلزات سنگین را جذب و در شاخساره و ریشه خود ذخیره سازند. در این راستا، دقت و توجه در مصرف گیاهان علوفه‌ای آلوده توسط دام، حیوانات اهلی و همچنین فرآورده‌های کشاورزی دامی توسط انسان حائز اهمیت است (Puschenreiter et al., 2005; Misra and Chaturvedi, 2007). تلاش‌های زیادی در جهت رفع آلودگی خاک با روش‌های مختلف شیمیایی، فیزیکی و زیستی به صورت تکنیک‌های درجا و غیردرجا در حال انجام است (Ghosh and Singh, 2005). تکنیک‌های غیردرجا که از طریق جابه‌جا کردن خاک آلوده انجام می‌شوند، بسیار پرهزینه هستند. در تکنیک‌های درجا، آلودگی‌زدایی در همان محل آلوده انجام می‌شود. در این

تکنیک‌ها از روش‌های مختلفی مانند متصاعدسازی<sup>۱</sup>، آبشویی، شیشه کردن<sup>۲</sup>، تجزیه زیستی، گیاه‌پالایی و تثبیت شیمیایی<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. این روش‌ها علاوه بر اینکه کمترین آسیب را به اکوسیستم‌های طبیعی وارد می‌سازند، کم‌هزینه و سریع نیز هستند (Goodarzi and salami, 2015). تثبیت شیمیایی یکی از روش‌های مورد استفاده در روش درجا است. در این روش، مواد غیرسمی به خاک افزوده می‌شود که شکل‌های متحرک فلزات سنگین را به شکل‌های غیرمتحرک تبدیل کرده و از این راه ضمن کاهش جذب این فلزات توسط گیاه، از انتقال آن‌ها به آب‌های سطحی و زیرزمینی نیز ممانعت می‌شود. تثبیت آلاینده‌ها در خاک با استفاده از افزودنی‌هایی که قادر به جذب سطحی، کمپلکس کردن و رسوب دادن فلزات سنگین هستند، ممکن می‌شود. این مواد افزودنی شامل فسفات‌ها، سیلیکات‌ها، اکسیدها، مواد آلی و مواد قلیایی، کانی‌های رسی و غیره می‌شوند (Hamidpour et al., 2010; Udeigwe et al., 2011). مکانیسم غیرمتحرک کردن عمدتاً به افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته و جذب سطحی و کمپلکس کردن فلزات در خاک نسبت داده می‌شود (Houben et al., 2013). مزیت اصلی این روش، سهولت بهسازی خاک‌ها با استفاده از ابزار معمول کشاورزی (تراکتور) است، اما عیب اصلی این روش حضور محصول نهایی حاصل از تثبیت در خاک می‌باشد (Raicevic et al., 2005). در کاربرد مواد افزودنی شیمیایی به‌منظور افزایش یا کاهش قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک، باید ویژگی‌هایی از قبیل هزینه پایین، میزان سمیت، تولید ترکیبات ثانویه و عوارض جانبی بر موجودات زنده خاک را مورد توجه قرار داد (Iskandar and Kirkham., 2001; Ernst., 2005). از این رو، مطالعات زیادی در رابطه با شناسایی ترکیبات مؤثر در کاهش آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین صورت گرفته است که از جمله می‌توان به کاربرد مواد آلی

<sup>3</sup> Chemical Stabilization<sup>1</sup> Volatilization<sup>2</sup> Vitrification

کیلوگرم خاک مصرف شدند. پلی‌مر در مقادیر ذکر شده تهیه و به چهار کیلوگرم از خاک محلول‌پاشی شد. خاک‌های تیمار شده با پلیمر به داخل گلدان منتقل و به مدت ۳۰ روز خوابانیده شدند. در مدت انکوباسیون و در فواصل زمانی مشخص از گلدان‌ها نمونه‌برداری انجام و میزان غیرمتحرک شدن فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پس از اتمام دوره خوابانیدن بذره‌های ذرت در گلدان‌ها کشت و گلدان‌ها تا رسیدن به رطوبت ظرفیت مزرعه آبیاری شد. گیاهان پس از برداشت در دمای ۵۰-۶۰ درجه سلسیوس خشک و سپس آسیاب گردیده و از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شد. در نهایت، غلظت فلزات سنگین و میزان جذب آن‌ها توسط گیاه ذرت اندازه‌گیری شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه انجام شد. در این آزمایش پس از افزودن پلیمرهای اکریلیکی در مقادیر ذکر شده به نمونه‌های چهار کیلوگرمی از خاک‌های آلوده طبیعی نمونه‌ها به مدت یک ماه در گلدان‌های پلاستیکی خوابانیده شدند. سپس بذره‌های ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در گلدان‌ها کشت شدند. در هر گلدان شش بذر ذرت کاشته شد و بعد از جوانه زنی و رشد اولیه، سه گیاهچه قوی‌تر نگه داشته و بقیه گیاهچه‌ها در مرحله دو برگی تنک شدند تا شرایط برای تمام گلدان‌ها یکسان باشد. آبیاری گلدان‌ها تا رسیدن به حد ظرفیت مزرعه‌ای انجام و در تمام مراحل رشد در همین حد نگه داشته شد. آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر صورت گرفت و دمای گلخانه در حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد. پس از اتمام دوره کشت (۹۰ روز)، گیاهان برداشت شده و بخش هوایی (ساقه و برگ) و ریشه گیاهان برداشت گردید و ابتدا با آب شهری و سپس با آب مقطر شست و شو داده شدند و به مدت ۷۲ ساعت در آون تهویه‌دار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین گردید. نمونه‌های گیاهی پس از آسیاب و الک شدن به وسیله اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه ۳۰ درصد در دمای ۱۲۰ درجه

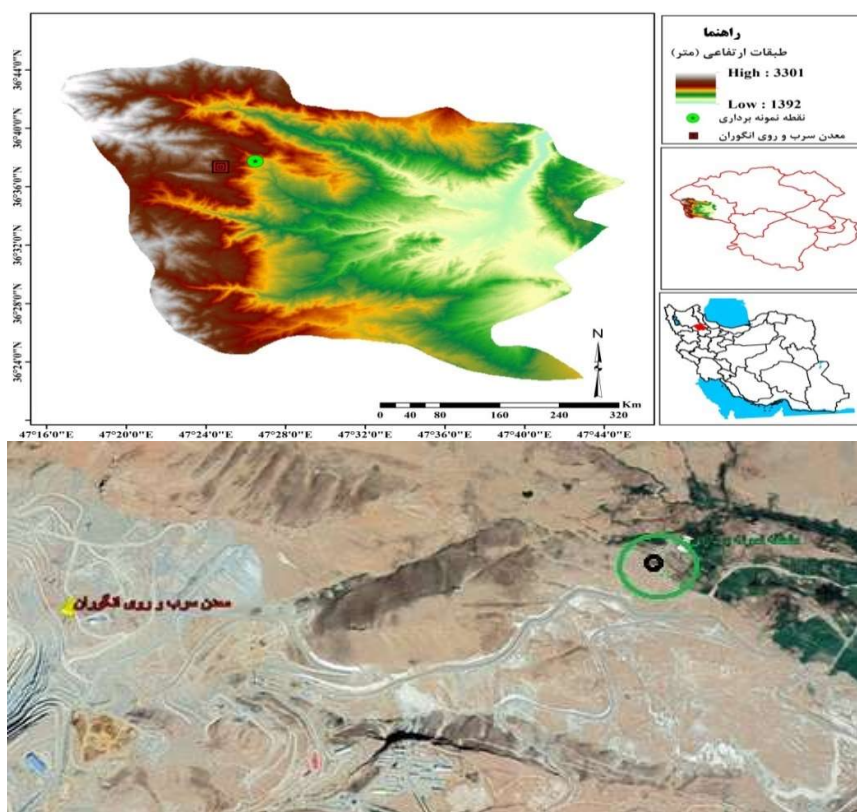
زئولیت (Basta et al., 2001; Clemente et al., 2005) (Mahabadi et al., 2007)، پلی‌مرها (Lindim et al., 2001) و غیره اشاره نمود. پلیمرهای پلی‌آکریلات بر پایه اسید اکریلیک ساخته می‌شوند و از زنجیره‌هایی با گروه‌های کربوکسیلیک منظم توزیع شده تشکیل شده‌اند:  $(-\text{CH}_2\text{CHCOOH}-)_n$ . درجه یونیزاسیون این گروه‌ها به pH بستگی دارد و بارهای منفی تشکیل شده توسط  $\text{Na}^+$ ،  $\text{K}^+$  یا  $\text{NH}_4^+$  خنثی می‌شوند. اگرچه پلیمرهای محلول در آب پلی‌اکریل امید برای تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی نقش آن‌ها در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین از جمله سرب، روی و کادمیوم به خوبی مشخص نمی‌باشد. به همین دلیل هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر این گونه پلی‌مرها در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین در خاک و تأثیر آن بر رشد گیاه ذرت در خاک‌های آلود می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش، تأثیر سه نوع پلیمر محلول در آب پلی‌اکریلیکی در سطوح مختلف بر تثبیت فلزات سنگین و میزان جذب این فلزات سنگین توسط گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بررسی شد. نمونه‌های خاک آلوده به فلزات سنگین که برای کشت گیاه مورد نیاز بود، از زمین‌های زراعی در اطراف معدن سرب و روی انگوران استان زنجان تهیه شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک گردیده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از قبیل pH و EC در عصاره گل اشباع، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder., 1986)، درصد کربن آلی به روش والکی و بلک (Nelson and Sommers., 1982)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (Nelson, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (Bower et al., 1952)، سرب، کادمیوم، روی، با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) تعیین شد. سپس سه نوع پلیمر محلول در آب آنیونی، کاتیونی و غیریونی از نوع پلی‌اکریل امید در چهار سطح صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ گرم در

مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت پذیرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار Excel نمودارها و جدول‌های مورد نیاز رسم شد.

سانتی‌گراد هضم شدند (Tang and Miller., 1991). در عصاره‌های بدست آمده غلظت فلزات سرب، روی و کادمیوم اندازه‌گیری شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و جداول تجزیه واریانس تهیه شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه نمونه‌برداری

واقع در جاده تهران و خاک‌های زراعی اطراف شهرک صنعتی روی واقع در جاده بیجار به ترتیب، حدود ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بودند و خاک‌های زراعی دندی نزدیک به معدن سرب و روی انگوران دارای آلودگی بیشتر بود به طوری که سرب و روی کل به ترتیب ۶۲۳ و ۸۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. میزان کادمیوم قابل جذب هر سه خاک زراعی حدود ۴-۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که از حد مجاز غلظت این عنصر در خاک بالاتر است (Afyuni, 2013). از آنجایی که سمیت فلزات سنگین در خاک به میزان تحرک آن‌ها نیز بستگی دارد و کادمیوم نسبت به بعضی از فلزات سنگین دارای تحرک بیشتری می‌باشد و توسط گیاهان بیشتر

## بحث و نتایج

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های زراعی با آلودگی طبیعی که در پژوهش برای کشت ذرت مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۱ ارائه شده است. طبق جدول ۱ ظرفیت زراعی خاک‌های مورد پژوهش بین ۱۷-۱۹ درصد و درصد رطوبت اشباع این خاک‌ها بین ۳۱-۴۰ بود، pH هر سه خاک قلیایی و در حدود ۷/۷-۷/۹ بود و کمترین هدایت الکتریکی در خاک‌های زراعی دندی با ۲۸۶/۶۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و بیشترین آن در خاک‌های زراعی اطراف کارخانجات روی جاده بیجار با ۱۵۰۹/۰۲۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. غلظت سرب و روی کل خاک‌های زراعی اطراف کارخانه سرب و روی

جذب می‌شود، آلودگی آن بسیار خطرناک می‌باشد. واکنش‌پذیری آن مونومرهای دیگر از جمله اکریل آمید، مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید شده است. ۲ آورده شده است. در این سه نوع پلیمر، مونومر پایه اکریلیک اسید است که به جهت بهبود خواص و

واکنش‌پذیری آن مونومرهای دیگر از جمله اکریل آمید، مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید شده است. پلیمرهای مورد استفاده دارای ساختار خطی بوده و محلول در آب هستند.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

ویژگی	واحد	دندی
درصد اشباع		۳۷
رس		۲۴
شن		۴۵
سیلت	(%)	۳۱
بافت		لومی
کربن آلی		۰/۵
کربنات کلسیم معادل		۳۰/۶
ظرفیت زراعی		۱۹/۴۴
pH	-	۷/۷۸
EC	( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	۲۸۶/۶۴
ظرفیت تبادل کاتیونی	( $\text{meq}/100$ )	۲۸/۶۵
غلظت سرب قابل جذب		۱۷
غلظت سرب کل		۶۲۳
غلظت روی قابل جذب	( $\text{mg kg}^{-1}$ )	۳۱
غلظت روی کل		۸۵۰
غلظت کادمیوم قابل جذب		۴/۸۵
غلظت کادمیوم کل		۱۴

جدول ۲- خصوصیات پلیمرهای اکریلیکی مورد آزمایش

نام پلیمر	اکریل آمید-اکریلیک اسید	مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید	مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید
رنگ	سفید شیری	سفید شیری	سفید شیری
نوع بار	آنیونی	کاتیونی	غیر یونی
وزن مولکولی	۵۰۰۰-۵۵۰۰۰	۵۰۰۰-۵۵۰۰۰	۵۰۰۰-۵۵۰۰۰
اکریلیک اسید	۸۰	۶۳	۶۰
اکریل آمید	۲۰	۰	۰
مالئیک انیدرید	۰	۸	۳۵
استایرن	۰	۱۹	۵
اسیدیته	۳-۲	۷-۶	۷
چگالی	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۲
ویسکوزیته	۳۰	۲۵	۲۵

بود و با افزایش کاربرد مقدار مصرف پلی‌مرها در خاک غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک کاهش یافت. غلظت سرب خاک در تیمار حاوی پلی‌مر غیریونی به میزان ۱۶/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در تیمار حاوی پلیمر کاتیونی، به میزان ۱۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در تیمار توسط پلیمر آنیونی ۱۶/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

**تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک**  
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک مربوط به تیمار شاهد

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک، اندام‌های هوایی و ریشه گیاه نرت

عناصر	منابع تغییرات	درجه آزادی	خاک	ریشه	اندام هوایی
هضم تر					
(mg/kg)					
سرب	مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی	۳	۳/۶۳ **	۲۵۹۳۸/۸ **	۲۹۶۲۸۵/۳ **
	نوع پلیمرهای اکریلیکی	۲	۰/۲۵ **	۷۷۳۱/۰۱ **	۸۵۲۶/۶ **
	نوع پلیمرهای اکریلیکی × مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی	۶	۰/۰۴ **	۱۱۶۱/۱۵ **	۴۳۱۷/۸۳ **
	خطا	۲۴	۰/۰۰۱	۱۵/۲	۷۸/۵
روی	مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی	۳	۲۴۷/۹۴ **	۳۹۹۷۱/۸ **	۱۷۸۵/۸۶ **
	نوع پلیمرهای اکریلیکی	۲	۶۸/۳۲ **	۳۴۴/۹۷ **	۶۲/۰۲ **
	نوع پلیمرهای اکریلیکی × مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی	۶	۱۴/۵۹ **	۴۹/۸۳ **	۲۴/۴۴ **
	خطا	۲۴	۰/۱۲	۱۶/۱	۵۹/۱
کادمیوم	مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی	۳	۴۰/۶۶ **	۲۴۳۳۴/۴ **	۴۲۸/۱۲ **
	نوع پلیمرهای اکریلیکی	۲	۰/۴۶ **	۳۷/۰۴ **	۱/۴۲ **
	نوع پلیمرهای اکریلیکی × مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی	۶	۰/۱۶ **	۵/۵۹ **	۲/۵۸ **
	خطا	۲۴	۰/۰۰۳	۰/۰۹	۰/۱۸

\*\* و \* به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد می‌باشند.

و با مصرف ۰/۲ درصد از پلی‌مرها به ترتیب ۲۱/۶، ۱۶ و ۱۰/۲ درصد بود (جدول ۴). میزان کاهش غلظت روی در خاک با مصرف ۰/۰۵ درصد پلی‌مرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۱۶/۸، ۱۴/۴ و ۱۳/۳ درصد و با مصرف ۰/۱ درصد از پلیمرها به ترتیب ۳۳/۶، ۳۰/۹ و ۲۹/۳ درصد و با مصرف ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۶۱/۳، ۵۷/۱ و ۵۰/۱ درصد بود (جدول ۴). میزان کاهش غلظت کادمیوم در خاک با مصرف ۰/۰۵ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۲۷/۸، ۲۵/۹ و ۲۴/۶ درصد، با کاربرد ۰/۱ درصد از پلیمرها به ترتیب ۳۹/۴، ۳۶/۷ و ۳۶/۴ درصد و با کاربرد مقدار ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۵۴/۹، ۴۵/۶ و ۴۲/۱ درصد بود

### اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت سرب، روی و کادمیوم در تیمار شاهد و کمترین غلظت در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلی‌مر آنیونی در خاک مشاهده گردید. میزان کاهش غلظت سرب خاک، با مصرف ۰/۰۵ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۱۵/۸، ۷ و ۳/۴ درصد، با مصرف ۰/۱ درصد از پلی‌مرها به ترتیب ۲۱/۴، ۱۱/۹ و ۴ درصد

پیوندهای کوالانسی و یا الکتروستاتیک، سبب کاهش غلظت یون‌های فلزی در محلول خاک می‌شود (Qu, GuiWei et al., 2009). دی وارنس و تورس (Varenes and Torres, 1999) نیز گزارش کردند که مقدار مس قابل استخراج با آب در یک خاک آلوده (آلودگی طبیعی) که با پلیمر اکریلات در مقادیر ۰/۱ و ۰/۲ درصد تیمار شده بود، به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۱۷ مقدار آن در خاک آلوده‌ی فاقد پلیمر بود.

(جدول ۴). واکنش پلیمر-فلز در نتیجه تشکیل پیوندهای کئوردینانسی است که سبب محبوس شدن یون فلزی در ساختار پلیمر می‌شود و همچنین ظرفیت جذب پلیمر تحت تأثیر ماهیت لیگاندها می‌باشد. دی وارنس و همکاران (Varenes, et al., 2006) گزارش کردند که غلظت کادمیوم و روی در خاک‌های آلوده تیمار شده با پلیمر پلی اکریلات به ترتیب ۲۵ و ۵۳ درصد کاهش یافت. جذب کاتیون‌های فلزی توسط پلیمرها که از طریق تشکیل

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم خاک

غلظت (mg/kg)				عنصر	نوع پلی‌مرهای اکریلیکی
مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی (درصد)					
صفر	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲		
۱۷/۰۲a	۱۶/۶۱c	۱۵/۸۷f	۱۵/۴۱i		آنیونی
۱۷/۰۴a	۱۶/۶۷c	۱۶/۱۹e	۱۵/۶۴h	سرب	کاتیونی
۱۷a	۱۶/۹۱b	۱۶/۳۵d	۱۵/۷۷g		غیریونی
۳۱/۱۳a	۳۶/۰۷d	۲۴/۳۳e	۱۳/۰۷h		آنیونی
۳۱a	۲۹/۱۳b	۲۷/۶۷c	۲۰/۴g	روی	کاتیونی
۳۱a	۳۰/۶۷a	۲۸/۰۷c	۲۳/۲۷f		غیریونی
۴/۸۳a	۳/۸۹d	۰/۵۹g	۰/۴۵h		آنیونی
۴/۸۴a	۴/۱۰c	۱/۱۷f	۰/۵۹g	کادمیوم	کاتیونی
۴/۸۴a	۴/۳۶b	۱/۶۳e	۰/۶g		غیریونی

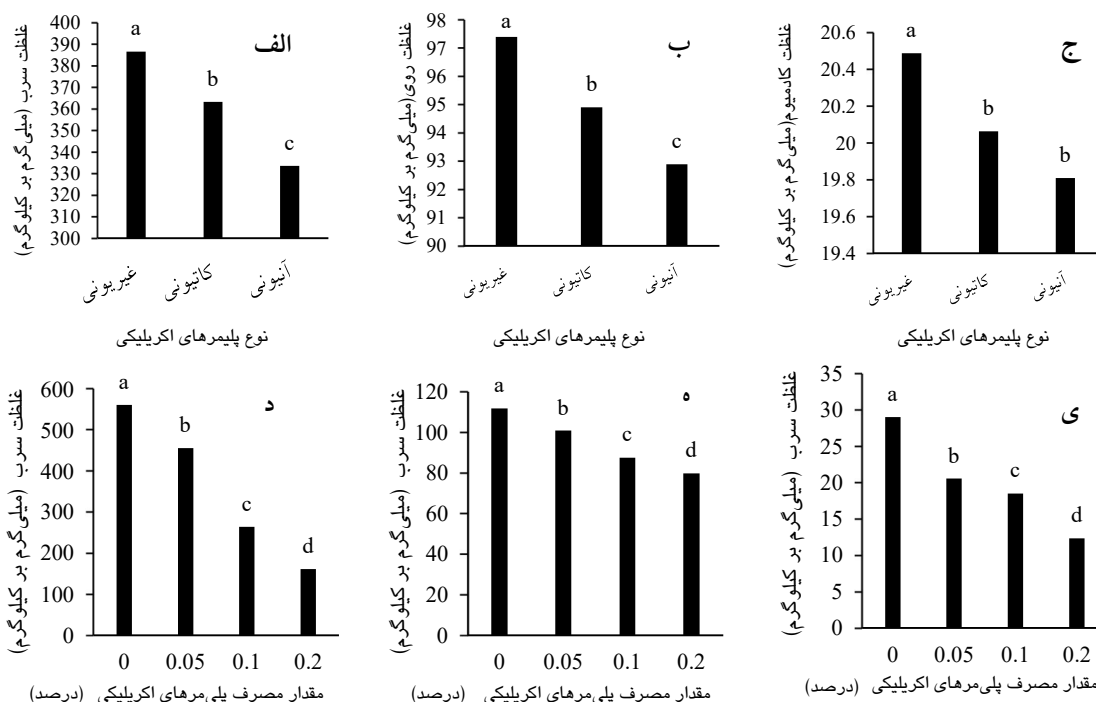
میانگین‌ها با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشند.

درصد پلی‌مر در خاک بدست آمد. غلظت سرب اندام‌های هوایی در تیمار شاهد ۵۶۱/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمرها، ۱۶۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری گردید (شکل ۵۲). غلظت روی در خاک تیمار شده توسط پلیمر غیریونی و آنیونی ۹۷/۴ و ۹۲/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۵۳). بیشترین غلظت روی اندام‌های هوایی در تیمار شاهد ۱۱۱/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین غلظت روی اندام‌های هوایی در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمر ۷۹/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۵۴). همچنین غلظت کادمیوم اندام‌های هوایی در خاک تیمار شده توسط پلیمر غیریونی ۲۰/۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری گردید (شکل ۵۵). بیشترین غلظت کادمیوم اندام‌های هوایی در تیمار شاهد بدست آمد. غلظت کادمیوم اندام‌های هوایی در تیمار شاهد ۲۹/۰۴ میلی‌گرم

تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام هوایی گیاه نرت نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه نرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین و کمترین غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام‌های هوایی به ترتیب توسط پلیمر غیریونی و پلیمر آنیونی به دست آمد و غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام‌های هوایی با افزایش مقدار کاربرد پلیمرها در خاک کاهش یافت. غلظت سرب اندام‌های هوایی در خاک تیمار شده توسط پلیمر غیریونی، کاتیونی و آنیونی به ترتیب ۲۸۶/۸، ۳۶۳/۴ و ۳۳۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۵۶). بیشترین و کمترین غلظت سرب اندام‌های هوایی به ترتیب در تیمار شاهد و مصرف ۰/۲

تشکیل کلروفیل و برخی کربوهیدرات‌ها، تبدیل نشاسته به قند و تشکیل اکسین که به تنظیم رشد و طول شدن ریشه کمک می‌کند، دخیل است (Hüve et al., 2006).

بر کیلوگرم و در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمرها ۱۲/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری گردید (شکل ۲). عنصر روی در فعال‌سازی آنزیم‌هایی که در سنتز پروتئین‌های خاص مؤثرند نقش دارد، همچنین در



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) اندام هوایی ذرت

شاهد به ترتیب ۱۴/۴، ۹/۵ و ۲/۸ درصد، با مصرف ۰/۱ درصد از پلیمرها به ترتیب ۳۵/۷، ۱۹/۸ و ۱۸/۹ درصد و با مصرف ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۶۲/۴، ۴۱/۳ و ۴۰/۲ درصد بود (جدول ۵). دی وارنس و همکاران (Varennes et al., 2009) گزارش کردند که رشد گیاه چاودار چندساله در یک خاک آلوده به سرب تیمار شده با پلی اکریلات جامد به طور معنی‌داری بیش‌تر از خاک آلوده فاقد پلی‌مر بود. این محققان حفظ گیاهان از مقادیر زیاد سرب توسط پلیمر را عامل افزایش رشد گیاه دانستند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت روی اندام‌های هوایی در تیمار شاهد و کمترین غلظت روی اندام‌های هوایی در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمر آنیونی در خاک‌ها مشاهده گردید. میزان کاهش غلظت روی اندام هوایی در خاک با مصرف ۰/۰۵ درصد

اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه ذرت در هر سه خاک مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین و کمترین غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام‌های هوایی در تیمار شاهد و تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمر آنیونی بدست آمد. میزان کاهش غلظت سرب اندام‌های هوایی با مصرف ۰/۰۵ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار

پلیمر کاتیونی و غیریونی برابر و به میزان ۸/۱ درصد اندازه‌گیری شد. میزان کاهش کادمیوم اندام‌های هوایی با مصرف ۰/۱ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۳۵/۷، ۲۶/۵ و ۱۷/۳ درصد و با مصرف ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۴۴/۹، ۳۶/۲ و ۳۵/۷ درصد بود (جدول ۵). در خاک آلوده قابلیت دسترسی ذرت به کادمیوم و روی بعد از اضافه کردن آپاتیت کاهش یافت (Usman et al., 2006).

پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۱۳/۵، ۹/۴ و ۶/۴ درصد و با مصرف ۰/۱ درصد از پلیمرها به ترتیب ۱۸/۹، ۱۶/۴ و ۱۲/۸ درصد و با مصرف ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۳۲/۵، ۲۸/۵ و ۱۹/۳ درصد بود (جدول ۵). همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت کادمیوم اندام‌های هوایی در تیمار شاهد و کمترین غلظت کادمیوم اندام‌های هوایی در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمر آنیونی به دست آمد. میزان کاهش غلظت کادمیوم اندام‌های هوایی در خاک با مصرف ۰/۰۵ درصد پلیمر آنیونی ۲۶/۵ درصد و در همین مقدار مصرف کاهش در

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع و مقدار پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه ذرت

عناصر	نوع پلیمرهای اکریلیکی	غلظت سرب اندام هوایی (mg/kg)		
		مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی (درصد)	۰/۱	۰/۲
سرب	آنیونی	۳۹۸/۴۹d	۲۵۸/۵۷g	۱۱۵/۰۵j
	کاتیونی	۵۴۰/۴۶b	۲۶۵/۴۳f	۱۷۹/۶۶i
	غیریونی	۴۳۲/۴۷c	۲۷۰/۲۱e	۱۸۹/۳h
روی	آنیونی	۹۸/۰۲c	۸۲/۳f	۷۸/۱۹g
	کاتیونی	۱۰۲/۰۹b	۸۶/۹۱e	۷۹/۵۶g
	غیریونی	۱۰۲/۶۴b	۹۳/۷۷d	۸۲/۱۹f
کادمیوم	آنیونی	۲۰/۵۸b	۱۸/۵۲c	۱۰/۶۴f
	کاتیونی	۲۰/۵۸b	۱۸/۵۲c	۱۲/۳۵e
	غیریونی	۲۰/۵۸b	۱۸/۵۲c	۱۴/۰۵d

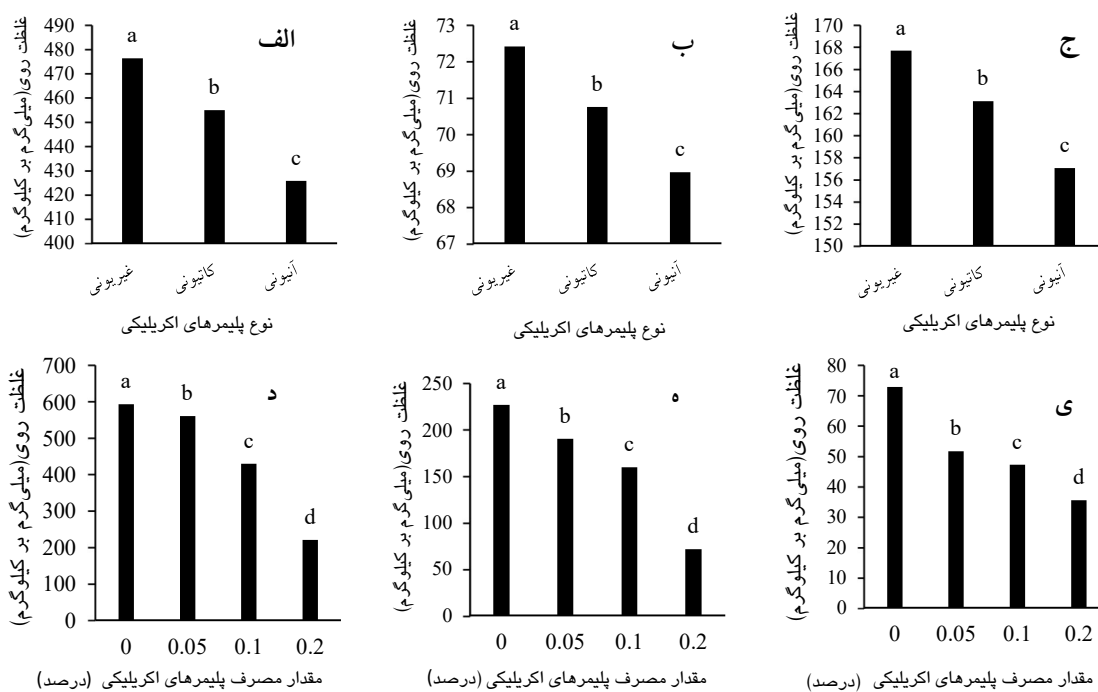
میانگین‌ها با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشند.

۴۷۶/۴، ۴۵۵/۱ و ۴۵۵/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم، اندازه‌گیری گردید (شکل ۵الف). بیشترین غلظت سرب ریشه در تیمار شاهد و کمترین غلظت سرب ریشه در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمر در خاک بدست آمد. غلظت سرب ریشه در تیمار شاهد ۵۹۵/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمر در این خاک ۲۲۱/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری گردید (شکل ۵ب). همچنین غلظت روی در خاک تیمار شده توسط پلیمر غیریونی ۱۶۷/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۵ب). بیشترین غلظت روی در تیمار شاهد ۲۲۷/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین غلظت آن در تیمار مصرف ۰/۲ درصد

تأثیر نوع و مقدار پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه گیاه ذرت  
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع و مقدار پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کمترین و بیشترین غلظت سرب و روی ریشه به ترتیب در تیمار خاک‌ها توسط پلیمر آنیونی و پلیمر غیریونی به دست آمد و غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه با افزایش غلظت پلیمر در خاک کاهش یافت. غلظت سرب ریشه توسط پلیمر غیریونی، کاتیونی و آنیونی به ترتیب

کادمیوم ریشه در خاک به میزان ۱۱/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۳). سرب باعث کاهش ارتفاع گیاه می‌شود و جلوگیری از رشد شاخساره ممکن است به دلیل کاهش فتوسنتز، اختلال در تعادل آب و مواد معدنی، تغییر وضعیت هورمونی و اثر بر نفوذپذیری و ساختار غشاء باشد (Sharma and Dubey, 2005). همچنین آلودگی سرب می‌تواند باعث کاهش حجم ریشه گردد (Gopal and Rizvi, 2008).

پلیمر در این خاک ۷۱/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که توانایی پلیمرها در کاهش غلظت کادمیوم ریشه به ترتیب: آنیونی < کاتیونی < غیریونی بود. غلظت کادمیوم ریشه در خاک تیمار شده توسط پلیمر غیریونی ۷۲/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۳). بیشترین غلظت کادمیوم ریشه در تیمار شاهد و کمترین غلظت کادمیوم ریشه در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلی‌مر مشاهده شد. صرف‌نظر از مقدار مصرف پلیمرها کمترین غلظت



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) ریشه

پلیمر آنیونی در خاک‌ها بدست آمد. میزان کاهش غلظت سرب ریشه ذرت در خاک با مصرف ۰/۰۵ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۵۶/۷، ۴۳/۲ و ۳۷/۴ درصد، با مصرف ۰/۱ درصد از پلی‌مرها به ترتیب ۶۴/۷، ۵۸/۴ و ۴۷ درصد و با مصرف ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۷۱/۲، ۶۶/۴ و ۵۵/۲ درصد بود (جدول ۴-۴۲). میزان کاهش غلظت روی در خاک با مصرف ۰/۰۵ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۱۶/۲، ۱۱/۸ و ۷/۸ درصد و با

اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه گیاه ذرت نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه گیاه ذرت در خاک مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه در تیمار شاهد و کمترین غلظت آن در تیمار مصرف ۰/۲ درصد

داده شد که غلظت سرب در ریشه بیشتر از شاخساره می‌باشد (Azmat et al., 2009). دلایلی که تجمع سرب در ریشه نسبت به شاخساره بیشتر است را می‌توان جلوگیری انتقال سرب از طریق مواد پکتینی دارای بار منفی در دیواره سلولی، رسوب دادن سرب در فضاهای بین سلولی به صورت نمک‌های نامحلول سرب، انباشته کردن سرب در غشاء پلاسمایی بیان کرد (Islam et al., 2007).

مصرف ۰/۱ درصد از پلی‌مرها به ترتیب ۳۲/۲، ۱۹/۸ و ۱۵/۸ درصد و با مصرف ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۷۱/۹، ۲۷/۴ و ۲۳/۳ درصد بود (جدول ۶). میزان کاهش غلظت کادمیوم ریشه در خاک با مصرف ۰/۰۵ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۱۲/۷، ۵/۲ و ۴/۴ درصد، با کاربرد ۰/۱ درصد از پلیمرها به ترتیب ۲۱/۹، ۱۷/۳ و ۱۶/۳ درصد و با کاربرد ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۴۴/۲، ۴۳/۵ و ۳۹/۵ درصد بود (جدول ۶). در پژوهشی نشان

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه گیاه ذرت

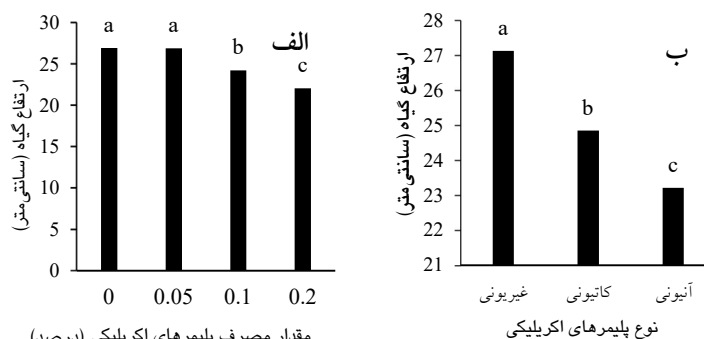
غلظت سرب، روی و کادمیوم ریشه (mg/kg)				نوع پلیمرهای اکریلیکی	عنصر
مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی (درصد)			صفر		
۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	صفر		
۱۹۶/۴۲j	۳۹۶/۴۲g	۵۱۵/۶d	۵۹۴/۹۷a	آنیونی	سرب
۲۱۳/۶۱i	۴۳۰/۰۹f	۵۸۱/۰۶c	۵۹۵/۵a	کاتیونی	
۲۵۳/۴۳h	۴۶۶/۲۹e	۵۹۰/۴۳b	۵۹۵/۵۱a	غیریونی	
۶۰/۹۲k	۱۵۴/۳۹h	۱۸۶/۸۹e	۲۲۵/۹۷ab	آنیونی	روی
۷۴/۶۶j	۱۵۷/۶۸g	۱۹۱/۷۱d	۲۲۸/۴۶a	کاتیونی	
۷۹/۱۷i	۱۶۸/۹۲f	۱۹۴/۳۸c	۲۲۸/۵a	غیریونی	
۳۳/۷۱j	۴۴/۹۴g	۴۸/۹۴e	۷۳/۲۳a	آنیونی	کادمیوم
۳۵/۸۳i	۴۶/۸۲f	۵۲/۴۳c	۷۳/۹۴a	کاتیونی	
۳۷/۴۵h	۵۰/۲۷d	۵۴/۰۲b	۷۳/۹a	غیریونی	

میانگین‌ها با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشند.

همچنین مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ذرت در تیمار شاهد بیشترین ارتفاع را داشت و با افزایش کاربرد پلیمر ارتفاع گیاه کاهش یافت و کاربرد ۰/۰۵ درصد پلیمر کاهش کمتری نسبت به کاربرد ۰/۱ درصد پلیمر ایجاد نمود و بیشترین کاهش ارتفاع گیاه در مصرف ۰/۲ درصد پلیمر مشاهده شد. کاهش ارتفاع گیاه با مصرف ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد پلی‌مر به ترتیب ۶، ۲۱ و ۲۶ درصد بود. صرف‌نظر از مقدار مصرف پلیمر بیشترین و کمترین ارتفاع گیاه در تیمار شاهد به میزان ۲۵/۹۸ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۶ب).

### تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر ارتفاع گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع و مقدار پلیمرهای اکریلیکی بر ارتفاع گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۷). مقایسه میانگین‌ها نشان دادند که ارتفاع گیاه در خاک تیمار شده با پلی‌مر غیریونی بیشتر از پلیمر کاتیونی بود و بیشترین کاهش ارتفاع در خاک تیمار شده با پلیمر آنیونی مشاهده شد. بیشترین و کمترین ارتفاع ذرت به ترتیب در تیمار شاهد و ۰/۲ درصد پلیمر اتفاق افتاد (شکل ۶الف).



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع (الف) و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر ارتفاع گیاه نرت (ب)

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر مشخصات رویشی گیاه نرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	حجم ریشه
نوع پلیمرهای اکریلیکی	۳	۴۶/۵۳ **	۲۲/۸۶ **
مقدار مصرف پلیمرها	۲	۴۹/۹۵ **	۱۸۸/۶۷ **
نوع پلیمرهای اکریلیکی × مقدار مصرف پلیمرها	۶	۷/۲۶ **	۴/۳ **
خطا	۲۴	۱/۵۸	۰/۳۳

\*\*\*، \* به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر در سطح یک درصد، پنج درصد می‌باشند.

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر مشخصات رویشی گیاه نرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک اندم هوایی	وزن خشک ریشه
نوع پلیمرهای اکریلیکی	۲	۱/۸۳ **	۰/۱۱ *
مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی	۳	۲/۲۵ **	۲/۹ **
نوع پلیمرهای اکریلیکی × مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی	۶	۰/۶۱ **	۰/۱۳ ns
خطا	۲۴	۰/۰۷	۰/۰۳

\*\*\*، \* و ns به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر در سطح یک درصد، پنج درصد و عدم معنی‌داری می‌باشند.

#### اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر ارتفاع گیاه نرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر ارتفاع گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۷). همچنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان دادند که ارتفاع گیاه در تیمار شاهد بیشتر از خاک تیمار شده با پلیمر بود و پلیمر آنیونی نسبت به پلیمرهای کاتیونی و غیریونی کاهش بیشتری در ارتفاع گیاه ایجاد نمود. همچنین با افزایش میزان کاربرد پلیمر میزان کاهش ارتفاع گیاه افزایش

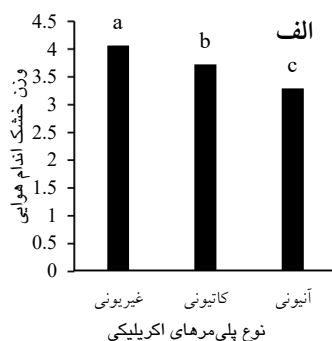
یافت. میزان کاهش ارتفاع گیاه با کاربرد ۰/۰۵ درصد پلیمرهای اکریلیکی آنیونی، کاتیونی و غیریونی نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۲۰/۲، ۱۶/۳ و ۱۱/۸ درصد، با کاربرد مقدار ۰/۱ درصد از پلیمرها به ترتیب ۱۹/۷ و ۱۲/۲ درصد و با کاربرد ۰/۲ درصد از پلیمرها به ترتیب ۳۳/۵، ۲۷/۴ و ۲۲/۵ درصد بود. کاربرد پلیمر باعث کاهش ارتفاع گیاه شد. احتمالاً تثبیت عناصر غذایی مورد نیاز گیاه توسط پلیمرها باعث کاهش ارتفاع گیاه گردیده است (Danneels et al., 1987).

جدول ۹. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر ارتفاع گیاه نرت

ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)				نوع پلیمرهای اکریلیکی
مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی (درصد)				
۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	صفر	
۲۰/۳۴e	۲۱/۲۷e	۲۴/۴۱cd	۳۰/۸۲a	آنیونی
۲۲/۲۲de	۲۴/۵۶c	۲۵/۶bc	۳۰/۵a	کاتیونی
۲۳/۷cd	۲۶/۸۶b	۲۷/۰b	۳۰/۵a	غیریونی

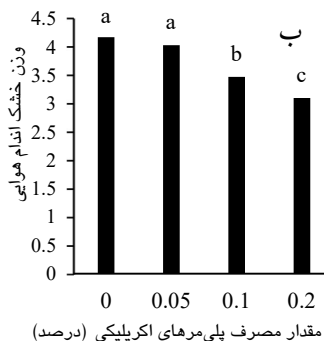
میانگین‌ها با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد می‌باشند.

هوایی به میزان ۴/۱ گرم و کمترین وزن خشک اندام‌های هوایی در میزان ۳/۴ گرم اندازه‌گیری گردید (شکل ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین وزن خشک گیاه در تیمار شاهد مشاهده شد و با افزایش مقدار کاربرد پلیمر وزن خشک اندام‌های هوایی کاهش یافت و به کمترین میزان خود در مقدار مصرف ۰/۲ درصد پلی‌مر در خاک رسید. بیشترین و کمترین وزن خشک اندام‌های هوایی به ترتیب ۴/۲ گرم مربوط به تیمار شاهد و ۳ گرم مربوط به تیمار ۰/۲ درصد پلیمر بود (شکل ۶).



### تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه نرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک اندام‌های هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۸). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کمترین و بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی به ترتیب در تیمارهای پلیمر آنیونی و غیریونی اندازه‌گیری شد. صرف نظر از نوع پلیمرها، بیشترین وزن خشک اندام‌های



شکل ۵- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع (الف) و مقدار پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه نرت (ب)

اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه نرت (جدول ۱۰). کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی، احتمالاً به این دلیل است که پلیمرهای اکریلیکی جذب انتخابی ندارد علاوه بر غیر متحرک کردن فلزات سنگین و سمی، غلظت عناصر غذایی محلول را نیز کاهش داده و در نتیجه عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاه به اندازه کافی در اختیار گیاه قرار نمی‌گیرد. به علاوه آلودگی خاک نیز به صورت بالقوه سبب کاهش رشد گیاه و کاهش وزن و عملکرد آن می‌شود. در خاک‌های تیمار شده با پلیمرهای اکریلیکی کاهش رشد گیاه شدیدتر بود. حضور فلزات سنگین در خاک بر گیاهان اثر سوء داشته و باعث کاهش وزن و حجم ریشه گیاهان می‌شوند. فلزات سنگین باعث

### اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه نرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه نرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۸). بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی در تیمار شاهد اندازه‌گیری شد که ۴/۵ گرم در گلدان بود، بیشترین کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی در بیشترین مقدار مصرف پلیمر اکریلیکی مشاهده شده با مصرف ۰/۲ درصد پلیمر آنیونی کمترین وزن خشک اندام‌های هوایی ۲/۴۱ گرم در گلدان اندازه‌گیری گردید

کاهش فعالیت آنزیمی و تخریب ساختمان پروتئینی آنزیمها و در نتیجه باعث کاهش رشد گیاه می‌گردند (Menon et al., 2007).

جدول ۱۰- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک اندام‌های هوایی

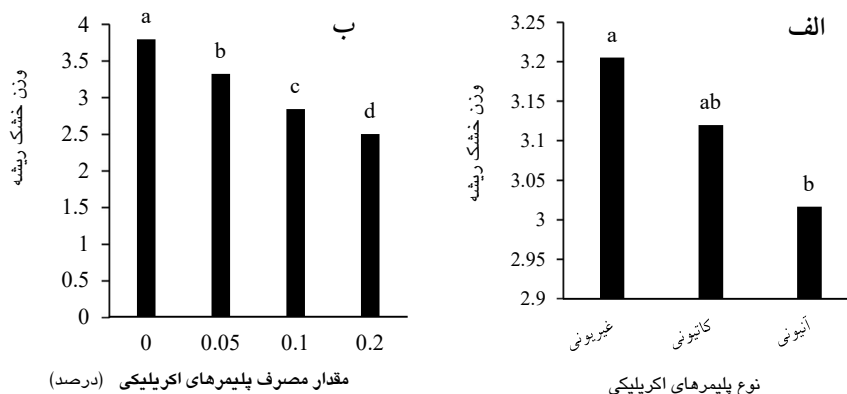
نوع پلی‌مرهای اکریلیکی	وزن خشک اندام هوایی (گرم در گلدان)			
	صفر	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲
آنیونی	۴/۵a	۳/۴۲cd	۲/۸۶e	۲/۴۱f
کاتیونی	۴/۷۲a	۳/۹۹b	۳/۷۱bc	۳/۲۱de
غیریونی	۴/۲۲ab	۴/۰۲b	۳/۸۷bc	۳/۷bc

میانگین‌ها با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد می‌باشند.

به‌ترتیب مربوط به پلیمرهای غیر یونی و آنیونی می‌باشد (شکل ۸الف). اردمان و همکاران (Erdmann et al., 1979) بیان کردند که کمبود فسفر و نیتروژن در گیاه سبب کاهش مورفولوژی گیاه و وزن ریشه گیاه شنبلیله شد. با افزایش مقدار مصرف پلی‌مر، وزن خشک ریشه کاهش یافت. بیشترین وزن خشک ریشه گیاه در تیمار شاهد به میزان ۶/۴ گرم در گلدان و کمترین وزن خشک ریشه گیاه در تیمار مصرف ۰/۲ درصد پلیمر ۲/۵ گرم در گلدان اندازه‌گیری شد و با افزایش مقدار مصرف پلیمر اکریلیکی مقدار وزن خشک کاهش یافت (شکل ۸ب)

### تأثیر نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک ریشه گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک ریشه در سطح احتمال پنج درصد و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۸). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف پلیمرهای غیر یونی، کاتیونی و آنیونی به‌ترتیب به میزان بیشتری سبب کاهش وزن خشک ریشه شدند. بیشترین و کمترین وزن خشک



شکل ۶- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع (الف) و مقدار پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک ریشه گیاه ذرت (ب)

### اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک ریشه گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف پلیمرهای اکریلیکی بر وزن خشک

غلظت این فلزات در بخش‌های هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های فاقد پلیمر بود.

#### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که پلیمرهای اکریلیکی در کاهش تحرک سرب، روی و کادمیوم در خاک و غلظت این فلزات در گیاه ذرت موثر بود. در نتیجه کاهش تحرک سرب، روی و کادمیوم و بهبود پایداری و افزایش خاکدانه در خاک استفاده از این ماده در خاک آلوده قابل توصیه می‌باشد، ولی به دلیل تأثیر منفی پلی‌مر اکریلیکی بر رشد ذرت، در تثبیت فلزات سنگین در خاک‌های در حال کشت توصیه نمی‌شود.

ریشه در هر سه خاک مورد مطالعه معنی‌دار نبود (جدول ۸). دی وارنس و همکاران (De Varennes et al., 2006) گزارش کردند که افزودن پلیمر پلی اکریلات به خاک آلوده به فلزات سمی کادمیوم، 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 کادمیوم، نیکل و روی بخش‌های هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با پلیمر به ترتیب ۲۲-۴۴، ۲۷-۵۰ و ۲۴-۶۷ درصد

#### REFERENCES

- Afyuni, M. (2013). Soil Quality Standards and its Guides. Office of Vice Human Environment, Water and Soil Office, 161p.
- Ailincăi, C., Jitareanu, G., Bucur, D., Despina, A., & Mercus, A. (2008). Effects of soil conservation works on the production and fertility of eroded soil from the Moldavian Plateau
- Azmat, R., Haider, S., Nasreen, H., Aziz, F., & Riaz, M. (2009). A viable alternative mechanism in adapting the plants to heavy metal environment. *Pak. J. Bot*, 41(6), 2729-2738.
- Basta, N. T., Gradwohl, R., Snethen, K. L., & Schroder, J. L. (2001). Chemical immobilization of lead, zinc, and cadmium in smelter-contaminated soils using biosolids and rock phosphate. *Journal of Environmental Quality*, 30(4), 1222-1230.
- Bower, C. A., Reitemeier, R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil science*, 73(4), 251-262.
- Clemente, R., Walker, D. J., & Bernal, M. P. (2005). Uptake of heavy metals and As by Brassica juncea grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): the effect of soil amendments. *Environmental pollution*, 138(1), 46-58.
- Danneels, P., Demuyne, B., Van Cotthem, W., Vervalcke, P., & Vyvey, Q. (1987). The influence of soil conditioning on the germination and plant growth on some European and African marginal soils. *Biol. Jb. Dodonaea*, 55(1), 69-85.
- De Varennes, A., & Torres, M. O. (1999). Remediation of a long-term copper-contaminated soil using a polyacrylate polymer. *Soil use and Management*, 15(4), 230-232.
- De Varennes, A., Cunha-Queda, C., & Ramos, A. R. (2009). Polyacrylate polymers as immobilizing agents to aid phytostabilization of two mine soils. *Soil Use and Management*, 25(2), 133-140.
- De Varennes, A., Goss, M. J., & 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(11-12), 1639-1649.
- Erdmann, G. G., Metzger, F. T., & Oberg, R. R. (1979). Macronutrient deficiency symptoms in seedlings of four northern hardwoods (Vol. 53). Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
- Ernst, W. H. (2005). Phytoextraction of mine wastes—options and impossibilities. *Geochemistry*, 65, 29-42.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*, 92(3), 407-418.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.

- Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Asian J Energy Environ*, 6(4), 18.
- Goodarzi, A. R., & Salimi, M. (2015). Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. *Applied Clay Science*, 108, 61-69.
- Gopal, R., & Rizvi, A. H. (2008). Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. *Chemosphere*, 70(9), 1539-1544.
- Hamidpour, M., Kalbasi, M., Afyuni, M., Shariatmadari, H., Holm, P. E., & Hansen, H. C. B. (2010). Sorption hysteresis of Cd (II) and Pb (II) on natural zeolite and bentonite. *Journal of hazardous materials*, 181(1-3), 686-691.
- Houben, D., Evrard, L., & Sonnet, P. (2013). Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere*, 92(11), 1450-1457.
- Hüve, K., Bichele, I., Tobias, M., & Niinemets, Ü. (2006). Heat sensitivity of photosynthetic electron transport varies during the day due to changes in sugars and osmotic potential. *Plant, Cell & Environment*, 29(2), 212-228.
- Iskandar, I. K., & Kirkham, M. B. (Eds.). (2001). Trace elements in soil: bioavailability, flux, and transfer. CRC Press.
- Islam, M. R., Jahiruddin, M., & Islam, S. (2007). Arsenic linkage in the irrigation water-soil-rice plant systems. Lindim, C., De Varennes, A., Torres, M. O., & Mota, A. M. (2001). Remediation of sandy soil artificially contaminated with cadmium using a polyacrylate polymer. *Communications in soil science and plant analysis*, 32(9-10), 1567-1574.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Mahabadi, A. A., Hajabbasi, M. A., Khademi, H., & Kazemian, H. (2007). Soil cadmium stabilization using an Iranian natural zeolite. *Geoderma*, 137(3-4), 388-393.
- Menon, M., Hermle, S., Günthardt-Goerg, M. S., & Schulin, R. (2007). Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem. *Plant and Soil*, 297(1), 171-183.
- Micó, C., Recatalá, L., Peris, M., & Sánchez, J. (2006). Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere*, 65(5), 863-872.
- Misra, V., & Chaturvedi, P. K. (2007). Plant uptake/bioavailability of heavy metals from the contaminated soil after treatment with humus soil and hydroxyapatite. *Environmental Monitoring and Assessment*, 133(1), 169-176.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579.
- Nelson, R. E. (1982). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, 181-197.
- Nriagu, J. O., & Pacyna, J. M. (1988). Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, 333(6169), 134-139.
- Puschenreiter, M., Horak, O., Friesl, W., & Hartl, W. (2005). Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer into the food chain—a review. *Plant soil environ*, 51(1), 1-11.
- Qu GuiWei, Q. G., Amarilis de Varennes, A. D. V., & Yi YanLi, Y. Y. (2009). Effect of insoluble polyacrylate polymers on soil microbial number and soil enzymatic activity in mine soil contaminated by heavy metal for a long term (II).
- Raicevic, S., Kaludjerovic-Radoicic, T., & Zouboulis, A. I. (2005). In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: theoretical prediction and experimental verification. *Journal of Hazardous Materials*, 117(1), 41-53.
- Sharma, P., & Dubey, R. S. (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian journal of plant physiology*, 17(1), 35-52.
- Tang, T., & Miller, D. M. (1991). Growth and tissue composition of rice grown in soil treated with inorganic copper, nickel, and arsenic. *Communications in soil science and plant analysis*, 22(19-20), 2037-2045.
- Udeigwe, T. K., Eze, P. N., Teboh, J. M., & Stietiya, M. H. (2011). Application, chemistry, and environmental implications of contaminant-immobilization amendments on agricultural soil and water quality. *Environment international*, 37(1), 258-267.

Usman, A. R., Kuzyakov, Y., Lorenz, K., & Stahr, K. (2006). Remediation of a soil contaminated with heavy metals by immobilizing compounds. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(2), 205-212.