A Comparative Analysis of the Impact of Various Acrylic Polymers on Mitigating the Mobility of Select Heavy Metals in a Contaminated Soil

Ali Barikloo [1] Parisa Alamdari[2*] Ahmad Golchin[3]

1, 2 and 3- |PhD. Graduated and Associated and Professorof Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Respectively

Introduction

These days, heavy metals such as lead, aluminum, mercury, copper, cadmium, nickel, and arsenic are found in most parts of the world. The two most hazardous heavy metals that have the potential to seriously harm both the environment and human health are cadmium and lead. Cleaning soils contaminated with organic and inorganic contaminants is one of the most significant and fundamental problems facing society today. One suitable method for soil purification is to extract or immobilize the contaminant from the soil.

Materials and methods

It is unclear how water-soluble polymers contribute to the immobilization of heavy metals. The purpose of this study is to examine how various polymers affect the immobilization of lead, zinc, and cadmium in the soil near a lead and zinc mine in the province of Zanjan. With three replications, factorial experiment (three factors) in the form of randomized complete block design was created using a completely randomized design. One kind of soil and three different kinds of acrylic polymers (cationic, nonionic, and anionic) at four different levels (zero, 0.05, 0.1, and 0.2) were included in the experimental treatments. Lead, zinc, and cadmium absorbable amounts were tested at various periods after polymers were sprayed on soil samples. After that, SAS statistical software was used to examine the data. To do this, the Duncan multiple range test was used to compare the means. The necessary tables and graphs were then created using Excel.

Results and Discussion

The findings demonstrated that, at the 1% probability level, the kind of polymer had a considerable impact on the amount of lead, zinc, and cadmium that may be absorbed in the soil. The average concentration of soil-absorbable lead for the different types of polymers employed was 239.8, 260.15, and 267.65 mg/kg; anionic polymer had the lowest concentration. Stated differently, anionic polymer decreases the capacity to absorb lead and stabilizes more lead in the soil than the other two forms of polymer. Anionic polymers most likely have a stronger impact on soil granulation. Additionally, at the 1% probability level, the impact of acrylic polymer intake on the amount of lead, zinc, and cadmium absorbable in the soil was considerable. With an increase in the amount of polymer utilized in the soil, the greatest absorbable lead concentration (301.58 mg/kg) in the control treatment dropped to the lowest absorbable lead concentration (0.2). It was possible to determine the polymer percentage and the lead concentration, which came out to be 205.9 mg/kg of soil. Zinc concentration dropped as acrylic polymer consumption increased; in the control treatment, absorbable zinc

concentrations ranged from 0.2 to 83.5 mg/kg of soil, with 0.2 being the highest concentration. At the 1% probability level, the impact of the polymer's contact time with the soil on the amount of lead, zinc, and cadmium that the soil may absorb was significant. As a result, the tested soil had 414.52 mg of these elements at the initial stage of polymer treatment. The quantity of absorbable lead in the soil became 66% immobilized after a month, and after 720 hours, the amount of absorbable lead dropped to 141.83 mg/kg. As the polymer's contact time with the soil increased, so did the concentration of absorbable zinc in the soil. At the 1% probability level, there was a strong correlation between the kind and amount of acrylic polymers and the amount of lead, zinc, and cadmium that may be absorbed in the soil. The ingestion of 0.2% anionic polymer resulted in the largest amount of lead immobilization, lowering the soil's absorbable lead concentration from 300 to 192 mg/kg of soil. A higher amount of anionic polymer immobilized the lead, and both cationic and non-ionic polymers were positioned after it. Additionally, anionic polymer was more prevalent than cationic polymer. It caused the non-ionic polymer's absorbable zinc to become immobile. Following 720 hours of polymer treatment, the soil's absorbable zinc element was immobilized to a greater extent by the anionic polymer (20%) than by the cationic and non-ionic polymers (26%), respectively. In comparison to the original concentration, the largest amount of immobilization by anionic polymer after one month was 78%, and the lowest amount of immobilization by nonionic polymer was 61%. Anionic polymer was 27% more effective than non-ionic polymer, 18% more effective than cationic polymer, and stabilized more cadmium.

Conclusion

The results of this study showed that with increasing the duration of contact of polymers used with the soil, the amount of mobility of heavy metals in the soil decreased and also with increasing the amount of polymer consumption, the rate of metal stabilization in the soil increased. Anionic polymers immobilize more lead, zinc and cadmium in soil. To reduce the mobility of lead, zinc and cadmium and improve the stability and increase aggregation in soil, the use of acrylic polymer in contaminated soil is recommended.

Keywords: Anionic polymer, Cationic polymer, Nonionic polymer, Heavy metal stabilization

مقایسه اثر چند پلیمر اکریلیکی در کاهش تحرک برخی فلزات سنگین در یک خاک آلوده

علی باریکلو[1]، پریسا علمداری*[2]، احمد گلچین[3]

گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

***: p_alamdari@znu.ac.ir**

چکیده

یکی از مسایل مهم و اساسی در دنیای امروز پاکسازی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های آلی و معدنی می‌باشد و بر این اساس، خارج نمودن آلاینده از خاک (استخراج) و یا غیر متحرک‌سازی آن یکی از راهکارهای پالایش خاک می‌باشد. این پژوهش برای بررسی تأثیر پلی‌مرهای مختلف در غیر متحرک کردن فلزات سرب، روی و کادمیوم در خاک اطراف معدن سرب و روی انگوران استان زنجان انجام گرفت. برای انجام این پژوهش از یک آزمایش فاکتوریل (سه فاکتوره) در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. فاکتورهای مورد بررسی را نوع پلی مر در سه سطح (کاتیونی، آنیونی و غیر یونی) مقدار پلی مر مصرفی در چهار سطح (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ گرم در کیلوگرم خاک) و مدت زمان تماس پلی مر با خاک در هفت سطح (صفر، ۳، ۹، ۷۲، ۱۶۸، ۲۳۶ و ۷۲۰ ساعت) تشکیل می دادند. نمونه‌های خاک با پلی‌مرها محلول‌پاشی و در زمان‌های مختلف غلظت قابل استخراج سرب، روی و کادمیوم اندازه‌گیری گردید. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک میزان تحرک فلزات سنگین در خاک کاهش یافت و همچنین با افزایش میزان مصرف پلی‌مر میزان تثبیت فلزات در خاک افزایش و پلی‌مر آنیونی به میزان بیش‌تری سرب، روی و کادمیوم را در خاک غیر متحرک کرد. سرب قابل استخراج به میزان ۷۶ ٪ ، روی قابل استخراج ۷۲ ٪ و کادمیوم قابل استخراج ۸۸ ٪ توسط پلی‌مر آنیونی غیر متحرک گردید. توصیه می شود این پلیمر اکریلیکی برای کاهش تحرک فلزات سنگین از قبیل سرب، روی و کادمیوم مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: پلی‌مر آنیونی، پلی‌مر کاتیونی، پلی‌مر غیریونی، تثبیت فلزات سنگین.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین سیاست‌های زیست محیطی در کشورهای صنعتی و در حال توسعه، پالایش خاک‌ها و آب‌های آلوده به عناصر سنگین است. امروزه مناطق وسیعی از دنیا تحت تأثیر آلودگی عناصر سنگین قرار گرفته‌اند که توسعه صنعتی در کشورها را می‌توان یکی از عوامل مهم این فرآیند برشمرد. منابع فلزات سمی در محیط زیست، سوخت‌های فسیلی، منابع استخراج معادن، فاضلاب‌های شهری و دفع زباله‌ها در محیط زیست است. همچنین محیط زیست می‌تواند به‌دلیل استفاده از سموم کشاورزی، آفت کش‌ها، علف کش‌ها و کودها به فلزات سنگین آلوده شود. این فلزات به‌دلیل تجزیه ناپذیر بودن در محیط پایدارند و وارد زنجیره غذایی می شوند (Cherfi *et al.*, 2014). کادمیم و سرب از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی محسوب می‌شوند و در فهرست سازمان محیط زیست آمریکا به‌عنوان خطرناک‌ترین فلزات سنگین معرفی شده‌اند (Sparks, 2003). راه‌های پالایش خاک‌های آلوده به آلاینده‌های آلی و معدنی بر یکی از دو اصل خارج نمودن آلاینده از خاک (استخراج) و یا غیر متحرک سازی آن استوارند. روش‌های غیر متحرک‌سازی شامل جامدسازی یا تثبیت است. کاهش تحرک آلاینده توسط افزودن مواد مختلف به خاک و استفاده از واکنش‌های شیمیایی تثبیت 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 غیر فعال‌تر تبدیل می‌شود (Miretzky *et al.*, 2010). برخی از اصلاح کننده‌های مورد بررسی شامل مواد افزودنی مانند آهک (Geebelen *et al.*, 2002)، ماده آلی، کمپوست و کود (Farfel *et al.*, 2005) و همچنین محصولات صنعتی مانند زئولیت‌ها (Friesl *et al.*, 2003و Hamidpour *et al.*, 2017)، بریسنایت (Mench *et al.*, 2000) و برینگایت (Boisson *et al.*, 1999) می‌باشند. پلیمرها مواد سودمندی برای بهبود ساختمان خاک هستند. بیش از ۵۰ سال است که انواع مختلف پلیمر برای اصلاح ساختمان خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. پلیمرهای آبدوست فراهمی زیستی فلزهای سمی را در نتیجه کلاته کردن و برقراری پیوند یونی و کوالانسی با فلزات کاهش می‌دهند و باعث بهبود کیفیت خاک و رشد گیاهان می شوند. دیمان و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که استفاده از پلی اکریل امید تحرک فلزات سنگین را در خاک کاهش می دهد و از جذب آن توسط گیاه سیب زمینی کم می کند. وارنس و همکاران (Varennes *et al.*, 2009) بیان کردند که در یک خاک آلوده، مقدار مس و روی قابل استخراج با آب به‌ترتیب ۲/۸ و ۲ برابر بیشتر از زمانی بود که آن خاک با پلی‌مر پلی‌اکریلات تیمار شده بود. پلیمرهای محلول در آب در بهبود بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند افزایش ظرفیت نگه‌داری آب، افزایش نفوذپذیری خاک و بهبود پایداری خاکدانه‌ها، مؤثر هستند (Al-Khashman, 2007). تشکیل خاکدانه سبب کاهش سطح ویژه ذرات خاک شده و سطحی از فاز جامد که در معرض محلول خاک قرار می‌گیرد را کاهش می‌دهد. این امر با کاهش آزاد سازی عناصر از فاز تبادلی غلظت آنها را در محلول خاک کاهش داده و درنتیجه از زیست فراهمی آنها کاسته می شود (Aram abd Golchin, 2015). فلزات سنگین می توانند از طریق خاک و جذب توسط گیاه وارد زنجیره غذایی شده و باعث ایجاد مشکلات عصبی، گوارشی و تنفسی در انسان و حیوانات

می شوند، همچنین فلزات سنگین باعث آلودگی آب و هوا می شوند. فلزات سنگین می توانند جذب مواد مغذی توسط گیاهان را مختل کرده و رشد گیاهان را کاهش دهند. غیر متحرک کردن فلزات سنگین می تواند به افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود تولید محصولات کشاورزی کمک کند. پاکسازی خاکهای آلوده به فلزات سنگین بسیار پرهزینه می باشد بنابراین غیر متحرک کردن فلزات سنگین می تواند به عنوان یک روش ارزان و موثر برای پاکسازی خاک های آلوده مورد استفاده قرار گیرد (Xiang *et al.*, 2021). اگرچه تحقیقات متعددی روی پلیمرهای اکریلیک در غیر متحرک کردن فلزات سنگین صورت گرفته ولی تحقیقاتی که عملکرد و راندمان پلی مرها با بار مختلف را در غیر متحرک کردن فلزات سنگین مقایسه و نشان دهد کمتر وجود دارد. با توجه به اهمیت غیر متحرک کردن فلزات سنگین در خاک این تحقیق جهت بررسی میزان تثبیت فلزات سنگین خاک با استفاده از سه نوع پلی‌مر پلی اکریلیکی محلول در آب (آنیونی، کاتیونی، غیریونی) با گذشت زمان صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام این تحقیق، یک نمونه خاک آلوده به فلزات سنگین از زمین‌های زراعی منطقه‌ای در اطراف معدن سرب و روی انگوران استان زنجان تهیه و پس از تیمارهای اولیه، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و نیز غلظت برخی عناصر اندازه‌گیری شدند. pH و EC در عصاره گل اشباع، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Walkely and Blavk, 1934)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (Nelson, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (Summer and Miller, 1996) نیتروژن کل خاک با استفاده از هضم کجلدال (Bremner and Mulvaney, 1996) فسفر قابل استفاده خاک به روش اولسن (Helmke, 1996)، پتاسیم قابل استفاده به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Helmke, 1996)، سرب، کادمیوم، روی، آهن، مس، و منگنز با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) تعیین شدند. سپس خاک‌های آلوده در نمونه-های چهار کیلویی توزیع و پس از محلول‌پاشی با پلی‌مر اکریلیکی در گلدان‌های پلاستیکی ریخته شدند و جهت رسیدن به تعادل نسبی به مدت ۳۰ روز در گلخانه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای انجام این پژوهش از یک آزمایش فاکتوریل (سه فاکتوره) در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. فاکتورهای مورد بررسی را نوع پلی مر (تهیه شده از پژوهشگاه پلیمر ایران) در سه سطح (کاتیونی، آنیونی و غیر یونی) مقدار پلی مر مصرفی در چهار سطح (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ گرم در کیلوگرم خاک) و مدت زمان تماس پلی مر با خاک در هفت سطح (صفر، ۳، ۹، ۷۲، ۱۶۸، ۲۳۶ و ۷۲۰ ساعت) تشکیل می دادند. بنابراین تعداد تیمارهای آزمایشی ۸۴ عدد و با لحاظ نمودن سه تکرار در مجموع ۲۵۲ واحد آزمایشی با گلدان چهار کیلویی خاک وجود داشت که جامعه آماری آزمایش را تشکیل می دادند. پس از اعمال تیمارهای یاد شده، میزان فلزات سنگین قابل عصاره‌گیری با کلسیم کلرید و DTPA اندازه‌گیری شد. از آنجایی‌که کلسیم کلرید عصاره‌گیر مناسبی نبود، فقط نتایج عصاره‌گیر DTPA گزارش و تجزیه آماری روی آن انجام شد. درصد فلز سنگین غیر متحرک شده نیز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند

دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد صورت پذیرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار Excel نمودارها و جدول‌های مورد نیاز رسم شد.

$$A = 1 - [(B)/(C)] \times 100$$ رابطه (۱)

که در این رابطه A برابر با درصد فلز سنگین غیر متحرک شده، B شامل غلظت فلز سنگین قابل استخراج در خاک تیمار شده و C غلظت فلز سنگین قابل استخراج با عصاره گیر در خاک بدون تیمار می‌باشد (Park *et al.*,2011).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. براساس این نتایج خاک مشکلی از نظر شوری و pH ندارد. غلظت قابل استخراج سرب، روی و کادمیوم به ترتیب ۱۷، ۳۱ و ۴/۸۵، میلی گرم در گیلوگرم و کل به ترتیب ۶۲۳، ۸۵۰ و ۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

جدول۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی – شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1: Physical and Chemical Properties of the Soil Used in the Experiment

ویژگی	ظرفیت زراعی	رس	شن	سیلت	کربن آلی	کربنات کلسیم معادل	pH	EC	ظرفیت تبادل کاتیونی	غلظت سرب قابل استخراج	غلظت سرب کل	غلظت روی قابل استخراج	غلظت روی کل	غلظت کادمیوم قابل استخراج	غلظت کادمیوم کل
	(٪)						-	(µS/cm)	(meq/100)	(mg/kg)					
مقدار	۱۹	۲۴	۴۵	۳۱	۰/۵	۳۰	۷/۷	۳۸۵	۲۸	۱۷	۶۲۳	۳۱	۸۵۰	۴/۸۵	۱۴

خصوصیات پلیمرهای اکریلیکی مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. این خصوصیات توسط پژوهشگاه پلیمر ایران اندازه گیری و گزارش شده است. پلیمرهای مورد استفاده دارای ساختار خطی بوده و محلول در آب هستند. 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 و استایرن در کنار آن گنجانده شده است و سبب تشکیل کوپلیمرهای اکریل آمید–اکریلیک اسید، مالئیک انیدرید–استایرن– اکریلیک اسید و مالئیک انیدرید–استایرن– اکریلیک اسید شده است.

میزان بار پلی‌مرهای اکریلیک آنیونی و کاتیونی به عوامل مختلفی بستگی دارد، از جمله به ساختار شیمیایی پلیمر، روش سنتز و عموما بار پلی‌مرهای آنیونی بیشتر از بار پلی‌مرهای کاتیونی است. بار پلی‌مرهای اکریلیک آنیونی معمولا در حدود ۱– تا ۲– مول بر کیلوگرم و بار پلی‌مر اکریلیک کاتیونی در حدود ۱+ تا ۲+ مول بر کیلوگرم است. اما این مقادیر ممکن است با تغییرات در شرایط فرایند و خصوصیات پلیمر تغییر کند.

جدول۲- خصوصیات پلیمرهای اکریلیکی مورد آزمایش

Table 2: Properties of Acrylic Polymers Used in the Experiment

نسخه پیش انتشار

تأثیر نوع پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

	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	۵۵۰۰۰-۵۰۰۰۰	۵۵۰۰۰-۵۰۰۰۰	۵۵۰۰۰-۵۰۰۰۰
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

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع پلی‌مرها بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). میانگین غلظت سرب قابل استخراج خاک برای انواع پلی‌مرهای مصرفی ۲۳۹/۸ (معنی دار در سطح احتمال یک درصد) ۲۶۰/۱۵ (معنی دار در سطح احتمال یک درصد) و ۲۶۷/۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (معنی دار در سطح احتمال یک درصد) بود که کم‌ترین غلظت مربوط به پلی‌مر آنیونی و بیش‌ترین غلظت مربوط به پلی‌مر غیریونی بود. به‌عبارتی پلی‌مر آنیونی نسبت به دو نوع پلی‌مر دیگر سرب بیشتری در خاک تثبیت کرده و از قابلیت جذب سرب کاسته است (شکل ۱الف). پلی‌مر آنیونی به‌دلیل داشتن بار منفی قادر است کاتیون‌ها را کلاته و غیر قابل استخراج کند در نتیجه میزان غلظت قابل استخراج کاهش بیشتری نسبت به پلی‌مر کاتیونی داشته است. (Comforth, 1968; Lentz, 1992).

غلظت روی قابل استخراج خاک‌های تیمار شده با پلی‌مر آنیونی، کاتیونی و غیریونی به‌ترتیب ۵۹/۳، ۶۱/۷ و ۶۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود که پلی‌مر آنیونی بیش‌تر از دو پلی‌مر دیگر روی را در خاک غیر متحرک کرده بود (شکل ۱ب). خاک تیمار شده با پلی‌مر آنیونی کم‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج به میزان ۱/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و پلی‌مر غیریونی بیش‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج به میزان ۱/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک را دارا بودند (شکل ۱ج). وارنس و همکاران (Varens *et al.*, 2006) گزارش کردند که غلظت فلزهای سمی کادمیوم، نیکل و روی محلول در خاک‌های آلوده تیمار شده با مقدار ۰/۱درصد پلی‌مر پلی‌اکریلات کم‌تر از خاک شاهد بود و تیمار کردن خاک‌های آلوده با پلی‌مر سبب شد که غلظت کادمیوم، نیکل و روی به‌ترتیب ۲۵-۸، ۵۰-۲۵ و ۵۳-۴۰ درصد غلظت این فلزها در محلول خاک‌های فاقد پلیمر باشد. مکانیسم غیرمتحرک‌سازی عناصر سنگین توسط پلیمرهای اکریلیکی، احتمالاً از طریق برقراری پیوندهای کئوردینانسی بین فلزات سنگین و کاتیون فلزی متصل به گروه‌های عاملی کربوکسیل و آمین موجود در زنجیره پلیمر است.

پلیمرها با خاکدانه‌سازی و ایجاد پوشش بر سطح خاکدانه‌ها از سطح تماس ذرات رس با محلول خاک کاسته و با کاهش فرآیند تبادل کاتیونی بین ذرات و محلول خاک از زیست‌فراهمی فلزات سنگین می‌کاهند. بعلاوه مولکول‌های پلیمر با کلاته‌کردن و رسوب دادن فلزات سنگین در محلول خاک از قابلیت جذب آنها توسط گیاه می‌کاهند (Aram and Golchin, 2015). منصوری و همکاران (Mansouri *et al.*, 2017) جهت بررسی کاهش تحرک آرسنیک در خاک با استفاده از نانو ذرات هماتیت و پلیمرهای اکریلیکی بیان داشتند که کاربرد کوپلیمر آکریل آمید-اکریلیک اسید و

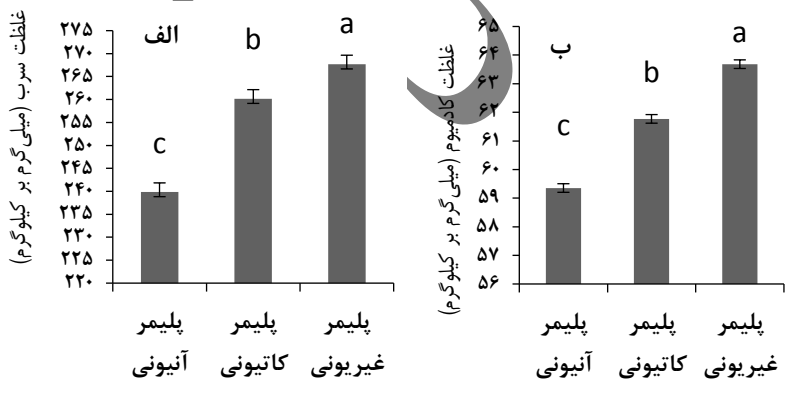
کوپلیمرهای مالئیک انیدرید–استایرن–اکریلیک اسید غلظت آرسنیک فراهم، جذب شده به‌صورت اختصاصی در خاک و غلظت مجموع آرسنیک فراهم و آرسنیک جذب شده به‌صورت اختصاصی در خاک را به طور مؤثری کاهش داد و کاربرد ۰/۲ درصد از این پلیمرها در کاهش غلظت آرسنیک خاک را مؤثر دانستند.

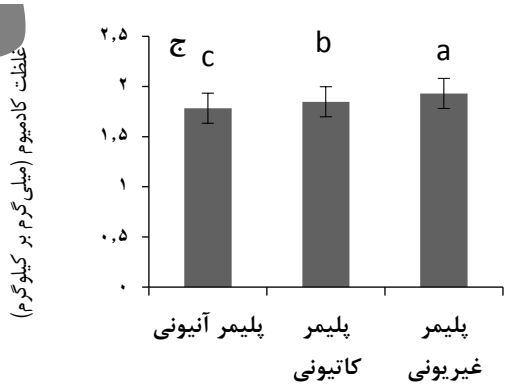
جدول۳ - نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

Table 3: Results of Analysis of Variance for the Effect of Experimental Treatments on the Extractable Concentrations of Lead, Zinc, and Cadmium

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات غلظت فلزات سنگین قابل استخراج خاک		
		سرب	روی	کادمیوم
بلوک	۲	۱۲/۰۴۳^{ns}	۰/۷۶۶۴۹^{ns}	۰/۰۰۰۲۶۹۸^{ns}
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک	۷	۲۸۶۵۹۷/۱۱۴**	۴۲۹۹/۶۴۲۷۳**	۵/۱۸۷۱۰۵۶**
مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی	۳	۱۳۰۴۳۷/۲۴۵**	۱۷۱۳۴/۹۸۰۰۳**	۱۵۰/۶۹۷۱۱۵۷**
نوع پلی‌مرهای اکریلیکی	۲	۱۹۸۹۲/۴۶۱**	۴۵۱/۶۲۵۸۷**	۰/۵۲۳۰۴۰۶**
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک× مقدار مصرف پلی‌مر-های اکریلیکی	۲۱	۳۶۷۸۳/۲۰۱**	۵۴۴/۶۷۵۱۴**	۰/۷۶۷۸۳۶۱**
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک × نوع پلی‌مر	۱۴	۲۰۷۶/۰۸۱**	۸/۱۲۱۹**	۰/۰۰۹۰۳۴۳**
مقدار مصرف پلی‌مر × نوع پلی‌مر اکریلیکی	۶	۴۲۵۵/۵۸**	۴۳/۰۹۸۰۹**	۰/۰۹۳۶۵۵**
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک × مقدار مصرف پلی‌مر × نوع پلی‌مر اکریلیکی	۴۲	۹۹۶/۸۲۴**	۲/۹۹۷۵۶**	۰/۰۰۳۰۶۶۶**
خطا	۱۹۰	۴/۷۱۷	۰/۱۹۵۴۴	۰/۰۰۰۴۰۰۷

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



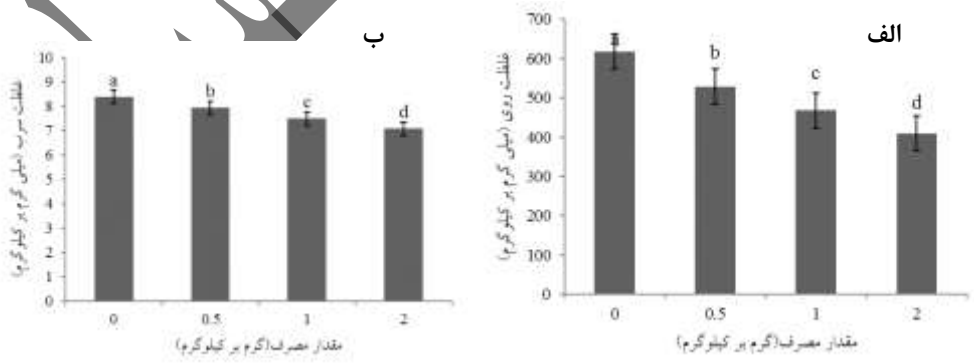


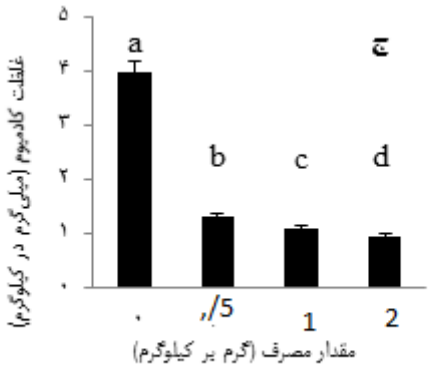
شکل ۱- مقایسه میانگین‌های تأثیر پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) قابل استخراج خاک

Figure 1: Comparison of the means of the effect of different types of acrylic polymer on the extractable concentrations of lead (a), zinc (b), and cadmium (c) in soil

تأثیر مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در مورد عنصر سرب تیمار شاهد دارای بالاترین قابل استخراج به میزان ۳۰۱/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که با افزایش مقدار پلی‌مر مصرفی در خاک غلظت سرب کاهش یافته و کم‌ترین غلظت سرب قابل استخراج با مصرف ۲ گرم بر کیلوگرم پلی مر و با غلظت ۲۰۵/۹ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (شکل ۲الف). با افزایش مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی غلظت روی و کادمیوم کاهش یافت و بیش‌ترین غلظت روی قابل استخراج در تیمار شاهد به میزان ۸۳/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین غلظت روی با مقدار مصرف ۲گرم در کیلوگرم پلی‌مر به میزان ۴۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد که در سطح احتمال یک درصد معنی دار می باشد (شکل ۲ب). بیش‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج در تیمار شاهد و کم‌ترین غلظت آن درمقدار مصرف ۲گرم در کیلوگرم پلی‌مر در خاک با غلظت ۰/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد که در سطح احتمال یک درصد معنی دار می باشد (شکل ۲ج). وارنس و همکاران (Varens *et al.*, 2009) گزارش کردند که در یک خاک آلوده که با پلی‌مر اکریلات ۲ درصد تیمار شده بود مقدار سرب قابل استخراج با آب به ۶۳٪ و مقدار مس و روی به ۵۰٪ درصد مقدار آن در خاک شاهد کاهش پیدا کرد. منصوری و همکاران (Mansouri *et al.*, 2017) در مطالعه‌ی بررسی کاهش تحرک آرسنیک در خاک به کمک نانوذرات هماتیت و پلیمرهای اکریلیکی نشان دادند که با افزایش مقدار کاربرد پلیمرهای اکریلیکی میزان کاهش غلظت آرسنیک فراهم خاک، افزایش یافت و کمترین غلظت آرسنیک فراهم خاک مربوط به مقدار ۰/۰۵ درصد پلیمر اکریلیکی غیر یونی (مالئیک انیدرید–استایرن– اکریلیک اسید) بود.





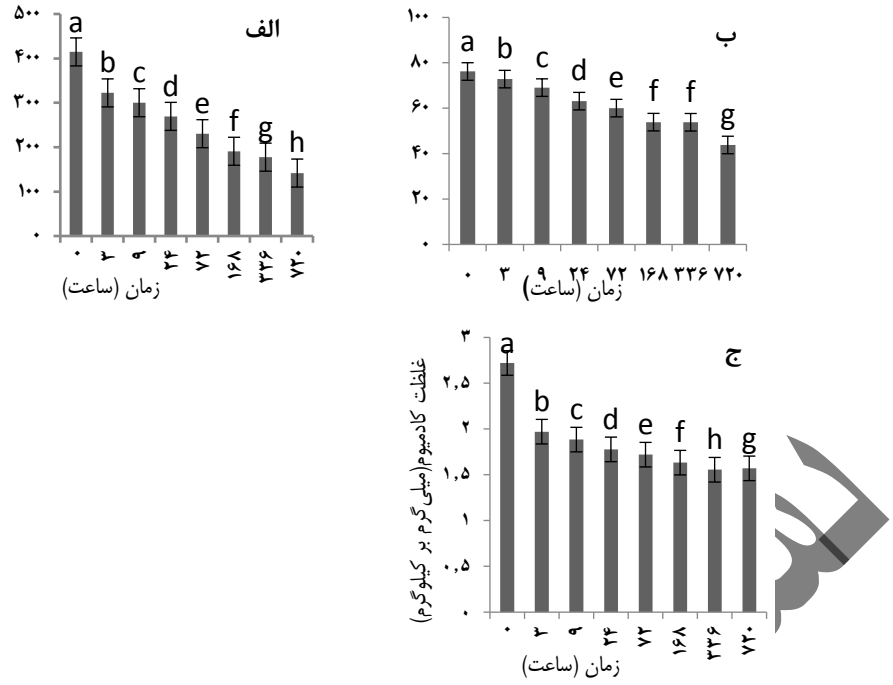
شکل۲- مقایسه میانگین‌های تأثیر مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) قابل استخراج خاک

Figure 2: Comparison of the means of the effect of acrylic polymer application rate on extractable concentrations of lead (a), zinc (b), and cadmium (c) in soil

تأثیر مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳)، طوری که خاک مورد بررسی در لحظه اول تیمار کردن با پلی‌مر دارای ۴۱۴/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب قابل استخراج بود و با گذشت زمان کاهش یافت. پس از گذشت ۷۲۰ ساعت مقدار سرب قابل استخراج به میزان ۶۶ درصد در خاک غیر متحرک شد و میزان سرب قابل استخراج پس از گذشت ۷۲۰ ساعت به ۱۴۱/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت (شکل ۳الف). غلظت روی قابل استخراج خاک نیز با افزایش مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک کاهش یافت. غلظت روی قابل استخراج در زمان صفر ۷۶/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که پس از گذشت ۷۲۰ ساعت غلظت به ۴۳/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کاهش یافت. بنابراین پس از گذشت ۷۲۰ ساعت مقدار روی قابل استخراج به میزان ۴۳/۳ درصد غیرمتحرک شد (شکل ۳ب). غلظت کادمیوم با گذشت زمان کاهش یافت. بیش‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج در زمان صفر و بعد از تیمار کردن خاک با پلی‌مر به میزان ۲/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین غلظت پس از گذشت یک ماه به میزان ۱/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۳ج).

نسخه پیش انتشار

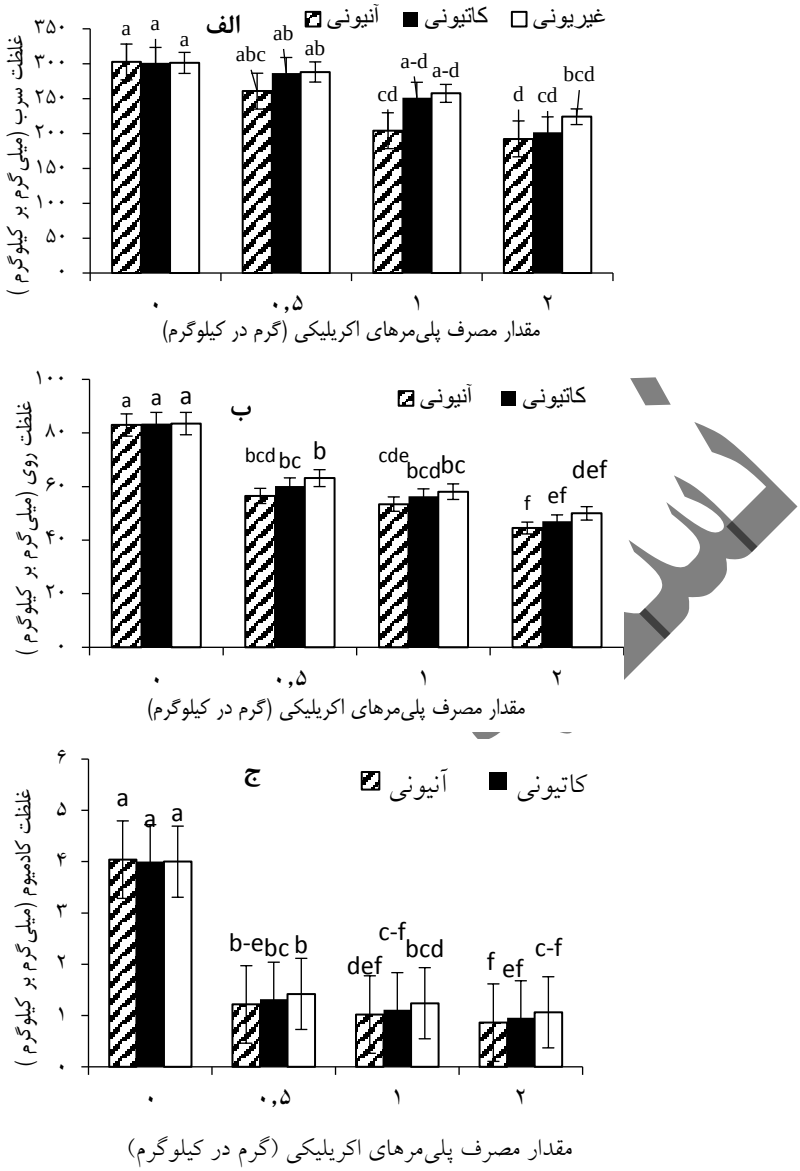


شکل۳- مقایسه میانگین‌های تأثیر مدت زمان تماس پلی‌مرهای اکریلیکی با خاک بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) قابل استخراج خاک

Figure 3:Comparison of the means of the effect of contact time of acrylic polymers on the extractable concentrations of lead (a), zinc (b), and cadmium (c) in soil.

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

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تأثیر نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار غیر متحرک شدن سرب مربوط به مقدار مصرف ۲گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی بود که غلظت سرب قابل استخراج خاک را از ۳۰۰ به ۱۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کاهش داد. مصرف ۲گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی در خاک ۳۶ درصد غلظت سرب قابل استخراج خاک را کاهش داد (شکل ۴ الف). کم‌ترین غلظت روی قابل استخراج با مقدار مصرف ۲گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی به میزان ۴۴/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک را دارا بود که نسبت به تیمار شاهد ۴۷ درصد کاهش یافته بود (شکل۴ ب). غلظت کادمیوم قابل استخراج در تیمار شاهد به میزان ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود که با افزایش مقدار مصرف پلی‌مر کاهش یافت و کم‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج خاک با مقدار مصرف ۲گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی در خاک به میزان ۰/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد که نسبت به تیمار شاهد ۲۲ درصد کاهش یافت (شکل۴ ج).



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) قابل استخراج خاک

Figure 4- Comparison of the mean effects of type and consumption of acrylic polymers with soil on the concentrations of lead (a), zinc (b) and cadmium (c) absorbable soil

اثر متقابل مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک، نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات متقابل مدت زمان تماس پلی‌مرها، نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). پلی‌مر آنیونی به میزان بیش‌تری سرب را غیر متحرک کرد و به ترتیب پلی‌مر کاتیونی و غیریونی بعد از آن قرار گرفتند. میزان تثبیت سرب نسبت به تیمار شاهد در پلی‌مر آنیونی با مصرف ۰/۵گرم بر کیلوگرم پلی‌مر ۷۲ درصد بود که با افزایش مصرف پلی‌مر ۲گرم بر کیلوگرم به ۷۶ درصد رسید. با مصرف ۰/۵گرم بر کیلوگرم پلی مر غیریونی ۶۳ درصد از سرب افزوده شده

تثبیت شد و با افزایش سطح مصرف (۲ گرم بر کیلوگرم) و زمان تماس (۷۲۰ ساعت) میزان تثبیت به ۷۱ درصد رسید (جدول ۴).

مشابه با عنصر سرب، روند اثرگذاری پلیمرها در غیر متحرک کردن عنصر روی نیز به شکل پلی‌مر غیریونی > پلی‌مر کاتیونی > پلی‌مر آنیونی بود (جدول ۵). پس از گذشت ۷۲۰ ساعت از تیمار کردن خاک با پلی‌مرها ، درصد غیرمتحرک سازی پلی مر آنیونی برای عنصر روی نسبت به پلی مر کاتیونی و غیریونی به‌ترتیب ۲۰ و ۲۶ درصد بیش‌تر بود. بیش‌ترین میزان غیر متحرک کردن روی پس از گذشت ۷۲۰ ساعت توسط پلی‌مر آنیونی به میزان ۷۸ درصد نسبت به غلظت اولیه و کم‌ترین مقدار آن به میزان ۶۱ درصد نسبت به غلظت اولیه توسط پلی مر غیریونی رخ داد (جدول ۵).

روند اثرگذاری نوع پلی‌مر در مورد عنصر کادمیوم نیز مشابه با عناصر روی و سرب بود. پلی مر آنیونی به ترتیب به میزان ۱۸ و ۳۷ درصد بیشتر از پلی مرهای کاتیونی و غیریونی در غیرمتحرک سازی کادمیوم موثر بود. مقدار مصرف ۰/۵، ۱ و ۲گرم بر کیلوگرم پلی‌مرهای اکریلیکی به ترتیب باعث کاهش۸۲، ۸۵ و ۸۷ درصدی غلظت کادمیوم قابل استخراج خاک پس از گذشت ۷۲۰ ساعت شدند (جدول ۶). برخلاف دو عنصر روی و سرب، بزرگترین درصد تثبیت کادمیوم در پلیمر آنیونی در زمان ۳۳۶ ساعت به دست آمده و در زمانهای بعدی، کاهش یافته است، فرایند واجذب یکی از عواملی است که می تواند به کاهش میزان کادمیوم غیر متحرک شده با زمان کمک کند. در این فرایند، کادمیومی که قبلا غیر متحرک شده یا به ماتریس جذبی چسبیده است، متحرک و آزاد شده و وارد آب خاک می شود. این فرایند زمانی اتفاق می افتد که مکانهای جذبی در جاذب اشباع شده باشد. عواملی مثل تغییرات pH ، شرایط اکسید و احیا یا وجود یونهای رقیب بر این فرایند تاثیر می گذارند. بنظر می رسد رقابت یون های روی و سرب که به مراتب غلظت بیشتری نسبت به کادمیوم دارند با جابجا کردن یون کادمیوم از سطح ماتریس جذبی خود بر سطح جاذب قرار می گیرند. اگر چه تغییرات کادمیوم غیر متحرک شده با زمان بسیار کم و ناچیز می باشد، ولی افزایش اندک کادمیوم قابل دسترس را می توان به حضور یونهای رقیب سرب و روی نسبت داد. علاوه بر این، کادمیوم سریعتر از روی، جذب سطحی شده و به تعادل می رسد در صورتیکه روی برای رسیدن به تعادل به زمان بیشتری نیاز دارد (Chen *et al.*, 2012) مطالعات تامسون و جاروینن (Thompson and Jarvinen, 1999) نشان داد که استفاده از پلیمرهای پلی آکریلات در خاک معدن به شدت آلوده به سرب باعث بهبود کیفیت خاک و رشد گیاهان شد. آنها این امر را ناشی از کاهش میزان قابل دسترس بودن سرب در خاک اصلاح شده دانستند. پلیمرها با خاکدانه‌سازی و ایجاد پوشش بر سطح خاکدانه‌ها از سطح تماس ذرات رس با محلول خاک کاسته و با کاهش فرآیند تبادل کاتیونی بین ذرات و محلول خاک از قابلیت جذب آنها توسط گیاه می‌کاهند.

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک، نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب قابل استخراج خاک و درصد سرب تثبیت شده

Table 4- Mean Comparison of the Interaction Effects of Polymer Contact Time, Polymer Type, and Application Rate on Extractable Lead Concentration and Immobilized Lead Percentage in Soil

مدت زمان تماس پلیمر با خاک (ساعت)	مقدار مصرف پلیمر در خاک (درصد)	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد سرب تثبیت شده توسط پلی‌مر آنیونی	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد سرب تثبیت شده توسط پلی‌مر کاتیونی	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد سرب تثبیت شده توسط پلی‌مر غیریونی
۰	۰	۲۹۳/۷s	۰b	۳۰۰r	۰b	۳۰۰r	۰b
	۰/۵	۴۴۰d	۰b	۵۷۶a	۰b	۵۲۸c	۰b
	۱	۳۷۵/۱f	۰b	۵۴۲/۳b	۰b	۵۲۵/۳c	۰b
	۲	۳۵۷/۲g	۰b	۳۵۲/۳h	۰b	۳۸۴/۳e	۰b
۳	۰	۳۰۳/۳pqr	۰b	۳۰۰r	۰b	۳۰۰r	۰b
	۰/۵	۳۲۲/۳jk	۰b	۳۴۵/۲i	۰b	۳۵۰/۸h	۰b
	۱	۳۱۴/۸n	۰b	۳۲۰/۳kl	۰b	۳۴۷i	۰b
	۲	۳۰۵/۵opq	۰b	۳۱۳/۸n	۰b	۳۴۳/۸i	۰b
۹	۰	۳۰۸/۷o	۰b	۳۰۵opq	۰b	۳۰۵opq	۰b
	۰/۵	۳۱۵n	۰b	۳۱۹klm	۰b	۳۲۵/۳j	۰b
	۱	۲۷۷u	۸/۱۵y	۳۱۲/۵n	۰b	۳۱۵/۳mn	۰b
	۲	۲۵۱vw	۱۶/۸w	۲۵۳v	۱۶/۱w	۳۱۴/۷n	۰b
۲۴	۰	۳۰۷/۳op	۰b	۳۰۴pqr	۰b	۳۰۴pqr	۰b
	۰/۵	۳۱۴n	۰b	۳۱۶lmn	۰b	۳۱۹klm	۰b
	۱	۱۷۸/۳a	۴۰/۸۹r	۲۷۷u	۸/۱۵y	۲۸۲/۳t	۶/۴z
	۲	۱۷۱/۹b	۴۳/۰۱pq	۲۱۰/۲x	۳۰/۲u	۲۴۸/۸w	۱۷/۴۹v
۷۲	۰	۳۰۲/۳qr	۰b	۳۰۰r	۰b	۳۰۰r	۰b
	۰/۵	۲۷۴u	۹/۱۵x	۲۸۲/۳t	۶/۴z	۲۹۴/۷s	۲/۲۹a
	۱	۱۶۴/۲c	۴۵/۵۶o	۱۷۲/۵b	۴۲/۸pq	۱۸۰/۲az	۴۰/۲۶r
	۲	۱۵۹d	۴۷/۲۸n	۱۶۴/۵c	۴۵/۴۵o	۱۷۰/۸b	۴۳/۳۵p
۱۶۸	۰	۲۹۹/۷r	۰b	۳۰۰r	۰b	۳۰۰r	۰b
	۰/۵	۱۷۳/۵b	۴۲/۴۷q	۱۸۰/۳az	۴۰/۲r	۱۹۳/۳y	۳۵/۸۹t
	۱	۱۳۵/۲f	۵۵/۱۷l	۱۶۳/۳c	۴۵/۸۴o	۱۷۲/۳b	۴۲/۸۶pq
	۲	۱۱۹/۷hi	۶۰/۳۲j	۱۲۰/۷h	۵۹/۹۹j	۱۳۲/۳fg	۵۶/۱۲k
۳۳۶	۰	۳۰۳/۳pqr	۰b	۳۰۰r	۰b	۳۰۰r	۰b
	۰/۵	۱۶۴/۲c	۴۵/۵۶o	۱۷۱/۳b	۴۳/۱۹pq	۱۸۳/۵z	۳۹/۱۶s
	۱	۱۰۹/۳j	۶۳/۷۵h	۱۳۱/۳g	۵۶/۴۵k	۱۴۱/۳e	۵۳/۱۳m
	۲	۱۰۱k	۶۶/۵۱g	۱۱۶/۳i	۶۱/۴۳i	۱۰۹/۵j	۶۳/۶۹h
۷۲۰	۰	۳۰۱qr	۰b	۳۰۰r	۰b	۳۰۰r	۰b
	۰/۵	۸۲/۳n	۷۲/۷c	۱۰۳k	۶۵/۸۵g	۱۱۰/۲j	۶۳/۴۷h
	۱	۷۷/۸o	۷۴/۲۱b	۹۰/۳m	۷۰/۰۷e	۹۵/۷l	۶۸/۲۸f
	۲	۷۲/۳p	۷۶/۰۱a	۸۱/۷n	۷۲/۹۲c	۸۷/۲m	۷۱/۰۹d

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر غلظت روی قابل استخراج خاک و درصد روی تثبیت شده

Table 5- Mean Comparison of Interaction Effects of Experimental Treatments on Extractable Soil Zinc Concentration and Percent Zinc Immobilization

مدت زمان تماس پلیمر با خاک (ساعت)	مقدار مصرف پلیمر در خاک (درصد)	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد روی تثبیت شده توسط پلیمر آنیونی	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد روی تثبیت شده توسط پلیمر کاتیونی	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد روی تثبیت شده توسط پلیمر غیریونی
۰	۰	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۷۵/۲g	۹/۷۹n	۷۸/۸e	۵/۳۸p	۷۹/۸d	۴/۱۸q
	۱	۷۰/۲kl	۱۵/۷۹j	۷۲/۲i	۱۳/۳۹l	۷۶/۷f	۷/۹۹o
	۲	۶۸/۵mn	۱۷/۷۹i	۷۰/۲kl	۱۵/۷۹j	۷۲/۳i	۱۳/۱۹l
۳	۰	۸۳/۳a	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۷۰/۸jk	۱۴/۹۹k	۷۴/۲h	۱۰/۹۹m	۷۵/۷g	۹/۱۹n
	/۱	۶۷/۳o	۱۹/۱۹h	۶۹/۸l	۱۶/۱۹j	۷۱/۳j	۱۴/۳۹k
	۲	۶۲/۵s	۲۴/۹۹d	۶۴/۸q	۲۲/۱۹f	۶۷/۲o	۱۹/۳۹h
۹	۰	۸۳ab	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۶۷/۲o	۱۹/۳۹h	۶۸/۷m	۱۷/۵۹i	۷۴/۲h	۱۰/۹۹m
	۱	۶۴r	۲۳/۱۹e	۶۶p	۲۰/۷۹g	۶۷/۷o	۱۸/۷۹h
	۲	۵۴z	۳۵/۱۹w	۵۶y	۳۲/۷۹x	۶۱/۳t	۲۶/۳۹c
۲۴	۰	۸۲/۸ab	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۶۰/۲u	۲۷/۷۹b	۶۵/۸p	۲۰/۹۹g	۶۷/۸no	۱۸/۵۹h
	۱	۵۶/۸x	۳۱/۷۹y	۵۹/۲v	۲۸/۹۹a	۶۱/۲t	۲۶/۵۹c
	۲	۴۳/۳g	۴۷/۹۹o	۴۵/۲f	۴۵/۷۹p	۴۸/۲c	۴۲/۱۹s
۷۲	۰	۸۲c	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۵۶/۵xy	۳۲/۱۹xy	۶۲/۵s	۲۴/۹۹d	۶۴/۷qr	۲۲/۳۹f
	۱	۵۳/۳z	۳۵/۹۹v	۵۸/۳w	۲۹/۹۹z	۶۰/۲u	۲۷/۷۹b
	۲	۳۶/۳k	۵۶/۳۹k	۳۸/۷i	۵۳/۵۹m	۴۱/۲h	۵۰/۵۹n
۱۶۸	۰	۸۲/۵bc	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۴۷/۸cd	۴۲/۵۹rs	۴۹/۲b	۴۰/۹۹t	۵۲/۲a	۳۷/۳۹u
	۱	۴۵/۲f	۴۵/۷۹p	۴۶/۷e	۴۳/۹۹q	۴۷/۳de	۴۳/۱۹r
	۲	۳۳/۸m	۵۹/۳۹gh	۳۶/۲k	۵۶/۵۹jk	۳۸/۷i	۵۳/۵۹m
۳۳۶	۰	۸۳ab	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۴۷/۷cd	۴۲/۷۹rs	۴۹/۲b	۴۰/۹۹t	۵۳/۵z	۳۵/۷۹vw
	۱	۴۵/۳f	۴۵/۵۹p	۴۶/۷e	۴۳/۹۹q	۴۵/۲f	۴۵/۷۹p
	۲	۳۴m	۵۹/۱۹h	۳۵/۷kl	۵۷/۱۹ij	۳۸/۸i	۵۳/۳۹m
۷۲۰	۰	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r	۸۳/۵a	۰r
	۰/۵	۲۶/۷p	۶۷/۹۹c	۳۳/۳m	۵۹/۹۹g	۳۷/۳j	۵۵/۱۹l
	۱	۲۵/۳q	۶۹/۶b	۳۱/۷n	۶۱/۹۹e	۳۵/۲l	۵۷/۷۹i
	۲	۲۳/۷r	۷۱/۶a	۲۹/۸o	۶۴/۱۹d	۳۲/۳n	۶۱/۱۹f

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند.

رساله پژوهشی

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر غلظت کادمیوم قابل استخراج خاک و درصد کادمیوم تثبیت شده

Table 6 Comparison of the means of the interaction effects of experimental treatments on the concentration of extractable cadmium in soil and the percentage of immobilized cadmium

مدت زمان تماس پلیمر با خاک (ساعت)	مقدار مصرف پلیمر در خاک (درصد)	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد کادمیوم تثبیت شده توسط پلیمر آنیونی	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد کادمیوم تثبیت شده توسط پلیمر کاتیونی	غلظت قابل استخراج عنصر از خاک توسط عصارگیر DTPA	درصد کادمیوم تثبیت شده توسط پلیمر غیریونی
۰	۰	۴/۰۵ab	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۲/۷۳f	۳۱/۹۲j	۲/۸۶e	۲۸/۶۸k	۲/۹۶d	۲۶/۲۷l
	۱	۲/۱۴i	۴۶/۷۱g	۲/۳۲h	۴۲/۱۴h	۲/۶۳g	۳۴/۳۳i
	۲	۱/۴۷m	۶۳/۳۴b	۱/۶۶k	۵۸/۶۸e	۱/۸۴j	۵۴/۱۹f
۳	۰	۴/۰۳bc	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۱/۴۱n	۶۴/۸a	۱/۵۲l	۶۲/۰۱c	۱/۶۳k	۵۹/۴۳d
	۱	۱/۱۱rs	۷۲/۳۲u	۱/۲۴p	۶۹/۰۸y	۱/۳۴o	۶۶/۵z
	۲	۱/۰۲tu	۷۴/۶۴s	۱/۱۴r	۷۱/۴۹v	۱/۲۱pq	۶۹/۸۳wx
۹	۰	۴/۰۴abc	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۱/۳۴o	۶۶/۵۸z	۱/۴۰n	۶۵/۰۱a	۱/۵۱l	۶۲/۳۴c
	۱	۱uv	۷۵/۰۶rs	۱/۰۵t	۷۳/۹t	۱/۱۹q	۷۰/۲۴w
	۲	۰/۹۷vwx	۷۵/۸۹opq	۱/۰۱u	۷۴/۹rs	۱/۱۱rs	۷۲/۳۲u
۲۴	۰	۴/۰۷a	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۱/۰۲tu	۷۴/۶۴s	۱/۱۱rs	۷۲/۳۲u	۱/۲۳p	۶۹/۳xy
	۱	۰/۹۵wxy	۷۶/۲op	۱/۰۲tu	۷۴/۶s	۱/۱۴rs	۷۱/۶v
	۲	۰/۸۷bc	۷۸/۲۲l	۰/۹۱az	۷۷/۳۱m	۱/۰۲tu	۷۴/۵s
۷۲	۰	۴/۰۴abc	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۰/۹۴xyz	۷۶/۴۸no	۰/۹۹uvw	۷۵/۳۹qr	۱/۱s	۷۲/۴۹u
	۱	۰/۹ab	۷۷/۴۸m	۰/۹۵wxy	۷۶/۲۳op	۱/۰۱tu	۷۴/۸۱rs
	۲	۰/۸۴cde	۷۸/۹۷ijk	۰/۹۱ab	۷۷/۳۹m	۰/۹۵wxy	۷۶/۲op
۱۶۸	۰	۴/۰۵ab	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۰/۸۳de	۷۹/۲ij	۰/۹۶wxy	۷۶/۱op	۱/۰۱tu	۷۴/۷s
	۱	۰/۷۵fg	۸۱/۲gh	۰/۸۴cde	۷۸/۹۶ijk	۰/۹۲ayz	۷۶/۹۷mn
	۲	۰/۶۵i	۸۳/۷cd	۰/۷۲h	۸۲/۱e	۰/۸۵cde	۷۸/۸jkl
۳۳۶	۰	۴/۰۱c	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۰/۷۲gh	۸۱/۹۶ef	۰/۸۵cde	۷۸/۷jkl	۰/۹۶wx	۷۵/۹opq
	۱	۰/۶۴i	۸۳/۹۵c	۰/۷۵fg	۸۱/۲۱gh	۰/۸۲e	۷۹/۵۵i
	۲	۰/۵۱k	۸۷/۳۶a	۰/۶۴i	۸۴/۰۴c	۰/۷۶fg	۸۱/۱۳h
۷۲۰	۰	۴/۰۴abc	۰m	۴c	۰m	۴c	۰m
	۰/۵	۰/۷۳fgh	۸۱/۷۹efg	۰/۸۶cd	۷۸/۵۵kl	۰/۹۷vwx	۷۵/۸۱pq
	۱	۰/۶۵i	۸۳/۷cd	۰/۷۵fgh	۸۱/۳۸fgh	۰/۸۶cd	۷۸/۵۵kl
	۲	۰/۵۶j	۸۶/۱۱b	۰/۶۷i	۸۳/۲۹d	۰/۷۶f	۸۰/۹۶h

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند.

نسخه پیش انتشار

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد با افزایش میزان مصرف و مدت زمان تماس پلی‌مرها در خاک، میزان تحرک فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم در خاک کاهش یافت و یا به عبارت دیگر میزان تثبیت این فلزات در خاک افزایش یافت. اثرگذاری پلی‌مر آنیونی در غیر متحرک سازی عناصر سرب، روی و کادمیوم در خاک بیش‌تر از پلیمرهای کاتیونی و غیریونی بود. بیشترین مقدار تثبیت سرب (۷۶ درصد)، روی (۶۴ درصد) و کادمیوم (۸۸ درصد) در سطح ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی و پس از گذشت زمان تماس ۷۲۰ ساعت به دست آمد. بنابراین به طور کلی به نظر می رسد که استفاده از پلیمرهای آنیونی در خاک آلوده می‌تواند باعث افزایش تثبیت این فلزات در خاک شود. پیشنهاد می شود در مطالعات آتی تاثیر این کوپلی مرهای اکریلیکی بر تثبیت سایر فلزات سنگین مانند آرسنیک مورد مطالعه قرار گیرد.

منابع

1. Al-Khashman, O. A. (2007). The investigation of metal concentrations in street dust samples in Aqaba city, Jordan. Environmental Geochemistry and Health, 29, 197-207. DOI: 10.1007/s10653-006-9065-x
2. Aram, H., & Golchin, A. (2015). The effect of different levels of water-soluble polymer and mycorrhizal fungi on cadmium of berseem clover. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 5(1), 253-262. (In Persian with English abstract) DOI: 20.1001.1.23221267.1394.5.1.17.8
3. Boisson, J., Mench, M., Vangronsveld, J., Ruttens, A., Kopponen, P., & De Koe, T. (1999). Immobilization of trace metals and arsenic by different soil additives: evaluation by means of chemical extractions. *Communications in soil science and plant analysis*, *30*(3-4), 365-387. DOI: 10.1080/00103629909370210
4. Bremner, J. M. (1996). N-total. *Methods of Soil Analysis, part 3*, 1085-1121.
5. CCME. (2010). Canadian Council of Ministers of the Environment.
6. Chen, S., Chao, L., Sun, L. N., & Sun, T. H. (2012). Competition Absorption and Desorption Dynamic Character of Cadmium, Lead and Zinc by Soil in North-East of China. *Advanced Materials Research*, *356*, 52-58.
7. Cherfi, A., Abdoun, S., & Gaci, O. (2014). Food survey: levels and potential health risks of chromium, lead, zinc and copper content in fruits and vegetables consumed in Algeria. Food and chemical toxicology, 70, 48-53. DOI:10.1016/j.fct.2014.04.044
8. Cornforth, I. S. (1968). Relationships between soil volume used by roots and nutrient accessibility. *Journal of Soil Science*, *19*(2), 291-301.
9. Dhiman, J., Prasher, S. O., ElSayed, E., Patel, R., Nzediegwu, C., & Mawof, A. (2020). Use of polyacrylamide superabsorbent polymers and plantain peel biochar to reduce heavy metal mobility and uptake by wastewater-irrigated potato plants. Transactions of the ASABE, 63(1), 11-28.
10. Hamidpour, M., Akbari, L., & Shirani, H. (2017). Effects of co-application of zeolites and vermicompost on speciation and phytoavailability of cadmium, lead, and zinc in a contaminated soil. Communications in soil science and plant analysis, 48(3), 262-273.
11. Farfel, M. R., Orlova, A. O., Chaney, R. L., Lees, P. S., Rohde, C., & Ashley, P. J. (2005). Biosolids compost amendment for reducing soil lead hazards: a pilot study of Orgro® amendment and grass seeding in urban yards. *Science of the total environment*, *340*(1-3), 81-95. DOI:10.1016/j.scitotenv.2004.08.018

12. Friesl, W., Lombi, E., Horak, O., & Wenzel, W. W. (2003). Immobilization of heavy metals in soils using inorganic amendments in a greenhouse study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 166*(2), 191-196. DOI:10.1002/jpln.200390028
13. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5*, 383-411.
14. Geebelen, W., Vangronsveld, J., Adriano, D. C., Carleer, R., & Clijsters, H. (2002). Amendment-induced immobilization of lead in a lead-spiked soil: evidence from phytotoxicity studies. *Water, air, and soil pollution, 140*, 261-277. DOI:10.1023/A:1020147901365
15. Guiwei, Q., De Varennes, A., & Cunha-Queda, C. (2008). Remediation of a mine soil with insoluble polyacrylate polymers enhances soil quality and plant growth. *Soil Use and Management, 24*(4), 350-356. DOI:10.1111/j.1475-2743.2008.00173.x
16. Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods, 5, 551-574. DOI:10.2136/sssabookser5.3.c19
17. 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.
18. Mansouri, T. (2017). Reduction of arsenic mobilization in soil by application of hematite nanoparticles and acrylic polymers. *Journal of Water and Soil Conservation, 23*(6), 79-99. (In Persian with English abstract) DOI:10.22069/JWFST.2017.10254.2473
19. Mench, M., Manceau, A., Vangronsveld, J., Clijsters, H., & Mocquot, B. (2000). Capacity of soil amendments in lowering the phytoavailability of sludge-borne zinc. *Agronomie, 20*(4), 383-397.
20. Miretzky, P., & Cirelli, A. F. (2010). Remediation of arsenic-contaminated soils by iron amendments: a review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 40(2), 93-115. DOI:10.1080/10643380802202059
21. Mulligan, C. N., Yong, R. N., & Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering geology, 60*(1-4), 193-207.
22. Nelson, D. A., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties, 9*, 539-579.
23. Park, J. H., Bolan, N. S., Chung, J. W., Naidu, R., & Megharaj, M. (2011). Environmental monitoring of the role of phosphate compounds in enhancing immobilization and reducing bioavailability of lead in contaminated soils. *Journal of Environmental Monitoring, 13*(8), 2234-2242
24. Sparks, D. L. (2003). Environmental soil chemistry: An overview. *Environmental soil chemistry, 2*, 1-42.
25. Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods, 5*, 1201-1229.
26. Thompson, J. A., & Jarvinen, G. (1999). Using water-soluble polymers to remove dissolved metal ions. *Filtration & Separation, 36*(5), 28-32.
27. 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. DOI:10.1111/j.1475-2743.2009.00208.x

28. 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. DOI:10.1080/00103620600710264
29. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, *37*(1), 29-38.
30. Xiang, Y., Li, C., Hao, H., Tong, Y., Chen, W., Zhao, G., & Liu, Y. (2021). Performances of biodegradable polymer composites with functions of nutrient slow-release and water retention in simulating heavy metal contaminated soil: Biodegradability and nutrient release characteristics. Journal of Cleaner Production, 294, 126278.

نسخه پیش انتشار