



دانشگاه محمدتقی مصباح‌مقدم

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره چهارم، ۱۳۹۸

۲۲۳-۲۲۸

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.15564.3078

## سینتیک آزادسازی روی در فراریشه در دوره کشت ذرت در یک خاک آهکی

مهدی بحرینی<sup>۱</sup>، \*امیر فتوت<sup>۲</sup>، علیرضا کریمی کارویه<sup>۳</sup>، رضا خراسانی<sup>۴</sup> و علیرضا حسین‌پور<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۲</sup>استاد گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد،

<sup>۳</sup>دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۴</sup>استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد،

<sup>۵</sup>استاد گروه خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

### چکیده

**سابقه و هدف:** روی آزادشده از خاک ریزوسفری فاکتور اصلی مؤثر در میزان فراهمی زیستی روی است. به‌منظور بررسی نحوه تأثیر فعالیت ریشه و ترشحات آن بر آزادسازی روی در یک خاک آلوده در زمان‌های مختلف برداشت گیاه، آزمایشی به‌صورت گلخانه‌ای در خاک آلوده به روی در سیستم رایزوباکس صورت گرفت.

**مواد و روش‌ها:** نمونه خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر یک خاک آهکی، از مزارع کشاورزی واقع در استان زنجان برداشت شد. به‌منظور مطالعه تأثیر ترشحات ریشه گیاه ذرت بر آزادسازی روی از رایزوباکس استفاده شد. رایزوباکس به سه بخش کلی، شامل ناحیه مرکزی برای رشد گیاه (۲۰ میلی‌متر)، ناحیه‌های نزدیک ریزوسفر (۲۰ میلی‌متر) و ناحیه‌های غیرریزوسفری (۴۰ میلی‌متر) تقسیم شد. هشت بذر در ناحیه مرکزی رایزوباکس‌ها کشت شدند و سپس به دو عدد تقلیل یافتند. گیاهان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از کاشت برداشت شدند. این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه سطح زمان (۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت) و سه ناحیه با فاصله از ریشه (ریزوسفر، نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفر) در سه تکرار انجام شد. سینتیک آزادسازی روی در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری توسط روش عصاره‌گیری متوالی با DTPA در دوره زمانی ۱ تا ۵۲۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که با افزایش زمان میزان روی تجمعی آزادشده افزایش یافت. همچنین میزان روی تجمعی آزادشده در خاک ریزوسفری در زمان ۶۰ روز پس از کشت به‌صورت معنی‌داری نسبت به خاک‌های نزدیک ریزوسفر (NR) و غیرریزوسفری (B) به‌دلیل جذب گیاه کاهش یافت. بین زمان‌های مختلف برداشت گیاه از نظر غلظت روی تجمعی اختلاف معنی‌داری در هر ناحیه ریشه‌ای وجود داشت ( $P \leq 0.05$ ). میانگین روی آزادشده از خاک ریزوسفری، متاثر از ریشه و توده‌ای ۶۰ روز پس از کشت به‌ترتیب ۲۷۸/۵، ۲۶۹/۱۸، ۲۵۹/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. مقایسه مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد تخمین (SE) نشان داد که معادله‌های تابع توانی و مرتبه اول

\* مسئول مکاتبه: [afotovat@um.ac.ir](mailto:afotovat@um.ac.ir)

واکنش‌های آزادسازی روی را به خوبی توصیف نموده است، به طوری که دارای بیش‌ترین ضریب تبیین و کم‌ترین خطای استاندارد تخمین می‌باشند. همچنین ضریب  $b$  معادله توانی در همه خاک‌ها کم‌تر از یک به دست آمد که نشان‌دهنده این است که سرعت آزاد شدن روی با زمان کاهش می‌یابد. بهترین مدل برای توصیف آزاد شدن روی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری، مدل توانی بود.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های روی ره‌اشده به برآورد پتانسیل تأمین روی در ریزوسفر ذرت کمک می‌کند که متفاوت از خاک توده‌ای می‌باشد. همچنین میزان روی آزاد شده تحت تأثیر زمان‌های مختلف دوره کشت متفاوت بوده است که نشان‌دهنده این است که در طول دوره رشد گیاه میزان آزادسازی عناصر با گذشت زمان متفاوت می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** رایزوباکس، روی، سنتیک آزادسازی، فراریشه، DTPA-TEA

### مقدمه

زیست‌فراهمی به توانایی یک عنصر برای انتقال از خاک به موجودات زنده اطلاق می‌شود (۱۴). همچنین کمپل (۱۹۹۵) بیان داشت که بخش قابل‌استفاده (زیست‌فراهم) عنصر بخشی از مقدار کل عنصر در خاک می‌باشد که بتواند توسط ریزجانداران و گیاهان برداشت و با سیستم متابولیک آن‌ها وارد واکنش شود (۴). انتقال فلزات سنگین از خاک به گیاه یک بخش مهم از چرخه شیمیایی عنصر در طبیعت محسوب می‌شود. این انتقال و جابه‌جایی بین خاک و گیاه یک فرآیند پیچیده است که عوامل متعددی مانند منشأ زمین‌شناسی، شرایط اقلیمی، بیولوژیکی و غیره آن را کنترل می‌کنند. بنابراین شرایط خاک و ریزوسفر گیاه نقش اساسی در رفتار این فلزات در خاک دارد (۹).

گیاهان از طریق مکانیسم‌های متفاوتی می‌توانند قابلیت زیست‌فراهمی عناصر خاک را مستقیماً از طریق جذب و یا به شکل غیرمستقیم از طریق مکانیسم‌های مختلف مانند ترشح ترکیبات کمپلکس‌کننده و تنفس ریشه‌ها که منجر به تغییر pH محیط می‌شود، تغییر دهند (۱۶). در بین فرآیندهای بسیاری که در ریزوسفر گیاهان رخ می‌دهند، ترشحات ریشه‌ای بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته و اثر مهمی بر

ریزجانداران خاک و نیز سرنوشت عناصر در خاک دارند (۱۲ و ۲۵). در همین زمینه پژوهشگران متعدد گزارش کردند که ریشه‌های گیاه به صورت مداوم ترکیباتی مانند قندها، اسیدهای آمینه، اسیدهای آلی با وزن ملکولی کم و ویتامین‌ها را آزاد می‌کنند که می‌توانند مورد استفاده ریزجانداران قرار گیرند و خصوصیات خاک ریزوسفری را تغییر دهند (۳۰ و ۳۱). ترکیبات ترشح‌شده از ریشه گیاهان با وزن مولکولی کم می‌توانند روی حلالیت عناصر معدنی و به همان اندازه بر روی فلزات سنگین به شکل مستقیم و غیرمستقیم از طریق تأمین انرژی برای فعالیت میکروبی در ریزوسفر تأثیر داشته باشند (۲۴). منچ و همکاران (۱۹۸۷) گزارش کردند که ترشحات ریشه گیاه می‌تواند بر اساس نوع لیگاند، نوع فاز جامد خاک و عنصر مربوطه، فلزات خاک را متحرک و با آن‌ها تشکیل پیوند دهند (۲۱). بنابراین آزادسازی اسیدهای آلی از ریشه به درون ریزوسفر جهت کاهش یا افزایش قابلیت دسترسی فلز برای گیاه صورت می‌گیرد. اسیدهای آلی با وزن ملکولی کم، نقش مهمی در تأمین روی برای گیاه، به‌خصوص در شرایط کمبود این عنصر دارند (۲۸).

جزء از فلز استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که عنصر روی عصاره‌گیری شده با DTPA همبستگی معنی‌دار و مثبتی با مقدار جذب شده در ساقه گیاه (نه در ریشه) نشان داد (۷).

در پژوهش‌های مختلف سنتیک آزادسازی روی در خاک ریزوسفری، گاهی اوقات نتایج متفاوتی به دست آمده است. برای نمونه، متقیان و حسین‌پور (۲۰۱۳) در بررسی آزادسازی روی از خاک در ریزوسفر گندم بیان داشتند که میزان روی عصاره‌گیری شده با روش متوالی در خاک ریزوسفری به‌طور قابل توجه‌ای بیش‌تر از خاک غیرریزوسفری بود (۲۲). در حالی که آن‌ها گزارش کردند که میانگین روی آزاد شده در خاک غیرریزوسفری نسبت به خاک ریزوسفری در گیاه لوبیا بیش‌تر بود به‌طوری‌که میانگین غلظت روی آزاد شده در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری به ترتیب برابر ۱۶/۴۷ و ۱۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد (۲۳). همچنین ری‌کیم و گری‌اون (۲۰۱۰) در بررسی ترشحات ریشه گیاه خردل هندی بر غلظت عناصر سنگین در دو خاک اسیدی و قلیایی در یک سیستم رایزوباکس بیان داشتند که غلظت کادمیم، سرب، مس و روی در ریزوسفر خاک‌های قلیایی نسبت به خاک توده افزایش یافت، در حالی که در ریزوسفر خاک‌های اسیدی نسبت به خاک توده کاهش پیدا کرد (۱۷). همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که عصاره‌گیری خاک ریزوسفری با اسیدهای آلی به خوبی با جذب روی، مس و مولیبدن به‌وسیله ذرت همبستگی دارد. آن‌ها بیان داشتند که شبیه‌سازی شرایط واقعی مزرعه در حضور گیاه و اثرات ترکیبی خاک و ریشه باید در برنامه مطالعه قابلیت دسترسی عناصر قرار گیرد (۳۵).

با این حال، تغییرات زمانی آزاد شدن روی در طول رشد گیاه ممکن است منجر به ارائه توضیح

مقدار فراهمی عنصر روی با زمان و در طول دوره رشد گیاه متفاوت است. در نتیجه، بررسی تغییرات روی با زمان در تخمین مقدار قابل استفاده این عنصر برای گیاه مفید است (۲۳). آزاد شدن روی از سطوح تبادل، مواد آلی، کانی‌ها و سایر ترکیبات حد واسط به درون محلول خاک، میزان تحرک و قابلیت استفاده روی توسط گیاه را کنترل می‌کند (۲۹). سرعت آزاد شدن روی جذب شده از خاک فاکتور بسیار مهمی در تأمین پیوسته آن برای گیاه است. پژوهشگران مختلف سرعت آزاد شدن روی در خاک‌ها و کانی‌های رسی را مورد بررسی قرار داده‌اند (۱، ۲۷، ۳۸ و ۳۹).

عصاره‌گیر دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید (DTPA) برای نخستین بار توسط لیندسی و نورول (۱۹۷۸) برای عصاره‌گیری شکل قابل دسترس فلزات روی، آهن، منگنز و مس در خاک‌های آهکی مورد استفاده قرار گرفت. امروزه پژوهشگران به وفور برای ارزیابی قابلیت زیست‌فراهمی عناصر از این عصاره‌گیر استفاده می‌کنند (۱۸). استفاده از عصاره‌گیر DTPA بیش‌تر جهت خاک‌های آهکی و نزدیک خنثی توصیه می‌شود چرا که از انحلال و آزاد شدن فلزات پیوند شده با کربنات کلسیم جلوگیری می‌کند. ترکیبات کمپلکس‌کننده قوی مانند DTPA و اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA) جزئی از فلز را که به شکل اختصاصی توسط کانی‌ها و مواد آلی جذب شده و همچنین ترکیبات پیچیده فلز با ماده آلی را عصاره‌گیری می‌کنند. فنگ و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه‌ای به بررسی قابلیت زیست‌فراهمی فلزات سنگین در ریزوسفر گیاه جو نسبت به خاک غیرریزوسفری پرداختند. در این پژوهش از چهار عصاره‌گیر EDTA، DTPA، CaCl<sub>2</sub> و NaNO<sub>3</sub> جهت انتخاب بهترین عصاره‌گیر برای استخراج این

1- Diethylenetriaminepentaacetic acid

2- Ethylenediaminetetraacetic acid

رایزوباکس استفاده شد. ابعاد رایزوباکس ۲۰۰ در ۲۰۰ در ۱۵۰ میلی‌متر به ترتیب طول، ارتفاع و عرض در نظر گرفته شد (شکل ۱). رایزوباکس به سه بخش، شامل ناحیه مرکزی یا تحت‌تأثیر ریشه (R-۲۰ میلی‌متر)، ناحیه‌های نزدیک ریزوسفر (متأثر از ترشحات ریشه) در دو طرف ناحیه مرکزی (NR-۲۰ میلی‌متر) و ناحیه‌های غیرریزوسفری یا توده خاک (B-۴۰ میلی‌متر) در دو طرف ناحیه حدوسط تقسیم شد. قسمت‌های خاک غیرریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و خاک ریزوسفری توسط صفحات مشبک نایلونی با قطر منافذ حدود ۲۵ میکرومتر (۳۰۰ مش) از همدیگر جدا شدند. در ابتدا در کف هر یک از قسمت‌ها به اندازه ۲ سانتی‌متر شن ریخته و سپس خاک به آرامی به هر یک از نواحی غیرریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و ریزوسفری اضافه شد. نظر به این‌که خاک رایزوباکس‌ها نباید از لحاظ سایر عناصر غذایی کمبودی داشته باشند، در ابتدای کشت به هر رایزوباکس ۱/۰۶ گرم سولفات پتاسیم، ۴/۰۴ گرم نترات کلسیم و مقدار ۰/۹ گرم فسفات کلسیم اضافه شد.

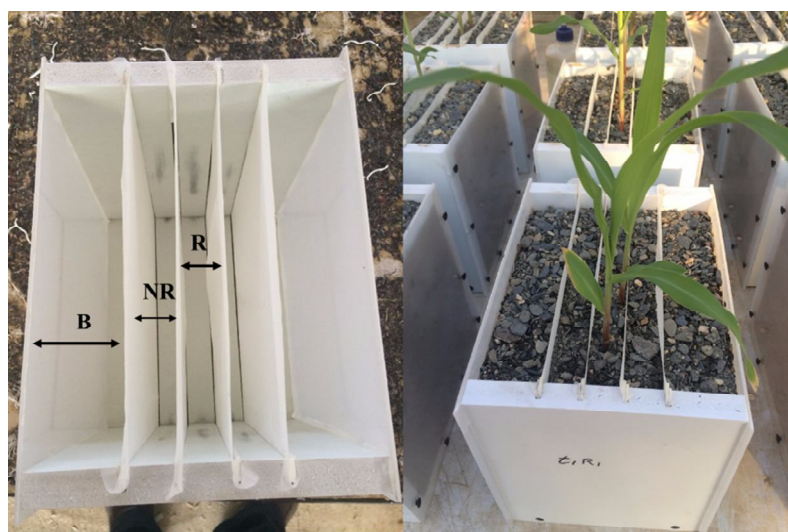
برای کشت گیاه، بذره‌های ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم به تعداد هشت بذر در ناحیه مرکزی رایزوباکس‌ها کشت شدند. در مرحله دو برگی گیاهچه‌ها، تعداد گیاهچه‌ها در هر رایزوباکس به دو عدد تقلیل یافت. در دوره رشد، مراقبت‌های لازم انجام و سعی شد رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت زراعی ثابت بماند. رایزوباکس‌ها در پایان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از رشد باز شدند و از هر رایزوباکس سه نمونه خاک، یکی از قسمت ریزوسفر، نزدیک ریزوسفر (حد وسط) و از بخش غیرریزوسفری برداشت شد.

منطقی در ارتباط با تغییر شکل و آزادسازی روی در خاک آلوده به این عنصر و جذب گیاه شود. هدف اصلی این مطالعه، تلاش برای به‌دست آوردن درک بهتر از میزان فراهمی و متعاقباً جذب روی توسط ذرت از خاک آلوده به این عنصر در طول دوره رشد گیاه بود. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر طول دوره‌های مختلف رشد گیاه و همچنین تأثیر ریزوسفر گیاه در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی بر آزادسازی روی از خاک انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

**خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک:** برای انجام این پژوهش یک نمونه خاک سطحی آلوده (۳۰-۰ سانتی‌متر) به روی، از یک مزرعه کشاورزی در استان زنجان (X: ۳۶° ۳۷' ۵۹" و Y: ۴۸° ۲۴' ۵۵") برداشت شد. پس از هوا خشک کردن، نمونه خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منتخب به روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین شد. pH خاک در حالت گل اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (۳۳)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید سدیم (۱۹)، کربن آلی خاک به روش واکلی-بلک (۳۴) و بافت خاک به روش هیدرومتری (۸) تعیین شد. همچنین نیتروژن کل به روش کلدال، پتاسیم قابل جذب خاک به روش استات آمونیم، فسفر به روش السن، ظرفیت تبادل کاتیونی نیز به روش چاپمن (۱۹۶۵) با استفاده از استات آمونیموم اندازه‌گیری شدند (۵). غلظت کل فلز روی با اسید نیتریک ۴ نرمال و همچنین روی قابل‌استفاده با عصاره‌گیر DTPA-TEA با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل PG 900) اندازه‌گیری شد (۳).

**کشت گلخانه‌ای:** به‌منظور مطالعه تأثیر فعالیت و ترشحات ریشه گیاه ذرت بر آزادسازی روی از



شکل ۱- رایزوباکس مورد استفاده در این پژوهش (R: ریزوسفر، NR: نزدیک ریزوسفر و B: توده‌ای یا غیرریزوسفری).

Figure 1. The rhizobox used in this study (R: Rhizosphere, NR: Near Rhizosphere and B: Bulk or non- Rhizosphere).

Zn<sub>t</sub> روی رهاشده در زمان T و a و b ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند. سپس، بر اساس ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) و خطای استاندارد تخمین (SE)، بهترین مدل یا مدل‌ها برای توصیف آزاد شدن روی انتخاب و ضرایب این معادلات گزارش شد. خطای استاندارد تخمین از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$SE = [\sum(Z_{nt} - Zn^*)^2 / n-2]^{1/2} \quad (1)$$

که در آن، Zn<sub>t</sub> و Zn\* به ترتیب مقدار روی آزاد شده و برآورد شده توسط مدل در زمان t و n تعداد نقاط آزمایشی است. اثر مدت زمان دوره کشت و موقعیت ریزوسفر بر آزادسازی روی توسط تجزیه واریانس یک‌طرفه با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ بررسی شد. معنادار بودن تفاوت‌ها توسط آزمون حداقل اختلافات معنادار (LSD) و در سطح احتمال ۵ درصد مورد سنجش قرار گرفت. نمودارها و همچنین معادلات سنتتیک توسط نرم‌افزار Prism اجرا شد.

سینتتیک آزادسازی روی: بررسی آزادسازی روی با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی با DTPA، در هر کدام از بخش‌های رایزوباکس در زمان‌های متفاوت انجام شد. بدین منظور، ۲ گرم خاک از نمونه‌ها، همراه با ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره‌گیر DTPA در لوله‌های سانتریفیوژ به صورت جداگانه ریخته شد. نمونه‌ها داخل انکوباتور در دمای ۲۵±۱ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. ۱۵ دقیقه قبل از قرار دادن نمونه‌ها در انکوباتور و ۱۵ دقیقه قبل از اتمام هر دوره، نمونه‌ها به وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند (۲۳). خاک‌ها در زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۲۸۸، ۴۰۸، ۵۲۸ ساعت پس از افزودن محلول‌ها، عصاره‌گیری شدند. بدین منظور، سوسپانسیون‌ها سانتریفیوژ (۹۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه) شدند. پس از پایان دوره آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها، پنج مدل سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، الویچ ساده‌شده، پخشیدگی و تابع توانی (جدول ۱) بر مقدار تجمعی روی آزاد شده برازش و ثابت‌های معادلات برآورد شدند (۲۲). که در آن‌ها Zn<sub>0</sub> نشانگر میزان روی آزاد شده در زمان T<sub>0</sub>

جدول ۱- مدل‌های سینتیکی مورد استفاده در این مطالعه.

**Table 1. Kinetic models used in this study.**

معادله Equation	مدل سینتیک Kinetic Model
$(Zn_0 - Znt) = a - b_0 t$	واکنش مرتبه صفر (Zero-order Reaction)
$\ln(Zn_0 - Znt) = a - b_1 t$	واکنش مرتبه اول (First-order Reaction)
$Znt = a + b t^{0.5}$	پخشیدگی (Parabolic Diffusion)
$\ln Znt = \ln a + b \ln t$	تابع توانی (Power Function)
$Znt = a + b \ln t$	الویچ ساده شده (Simplified Elovich)

مورد مطالعه جز خاک‌های آهکی محسوب می‌شود. همچنین غلظت کل و قابل‌دسترس روی خاک قبل از کاشت به ترتیب ۱۷.۰۰۰ و ۳۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد.

### نتایج و بحث

در جدول ۲ برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی اندازه‌گیری شده در خاک مورد مطالعه نشان داده شده است. بافت خاک مورد مطالعه لوم رسی شنی، pH ۷/۴۵ و درصد کربنات کلسیم معادل آن ۲۷/۵ درصد می‌باشد که با توجه به میزان آن، خاک

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه، قبل از کشت.

**Table 2. Physicochemical properties of studied soil, before planting.**

مقادیر (Values)	واحد (Unit)	ویژگی خاک (Soil property)
24	%	رس (Clay)
28	%	سیلت (Silt)
48	%	شن (Sand)
7.45	-	اسیدیته pH
3	dS m <sup>-1</sup>	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)
35.40	Cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)
11.45	mg kg <sup>-1</sup>	فسفر قابل استفاده (Phosphorus Availability)
245.33	mg kg <sup>-1</sup>	پتاسیم قابل استفاده (Potassium Availability)
724.5	mg kg <sup>-1</sup>	نیترژن کل (Total N)
27.49	%	کربنات کلسیم معادل (Calcium Carbonate Equivalent)
0.56	%	کربن آلی (Organic Carbon)
17000	mg kg <sup>-1</sup>	غلظت روی کل (Total Zn Concentration)
350	mg kg <sup>-1</sup>	غلظت روی به روش DTPA (DTPA extractable Zn concentration)

نسبتاً بالاتر نسبت به بخش تبدلی و بخش‌های شیمیایی دیگر در تعادل دینامیکی با شکل قابل تبادل رخ می‌دهد (۱۵).

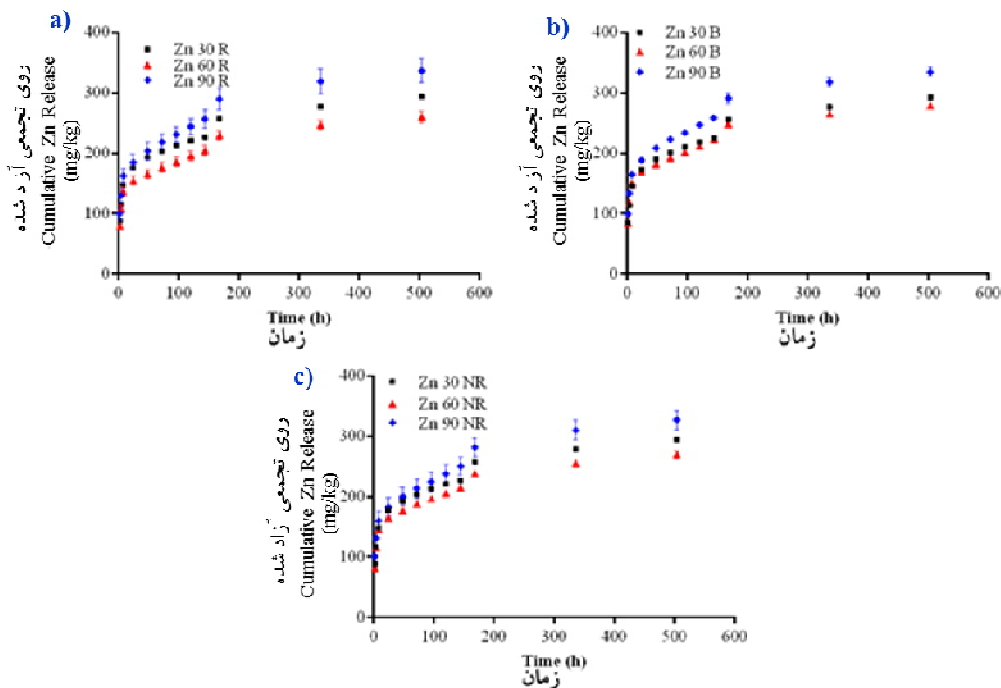
در جدول ۳ میزان روی آزاد شده در زمان‌های مختلف پس از کشت و در سه خاک ریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین میزان روی آزاد شده در زمان‌های مختلف پس از کشت در هر سه خاک غیرریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و ریزوسفری اختلاف معنی‌داری (حروف کوچک در جدول ۲) وجود دارد ( $P < 0.05$ ) در حالی که فقط در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ روز پس از کشت بین خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری اختلاف معنی‌داری (حروف بزرگ در جدول ۲) وجود دارد ( $P < 0.05$ ) و در زمان ۹۰ روز پس از کشت بین خاک‌های ریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

عوامل مختلفی، میزان روی آزاد شده از خاک ریزوسفری در زمان ۳۰ و ۶۰ روز پس از کشت را کاهش می‌دهد. جذب روی توسط گیاه احتمالاً یکی از آن‌ها است، به‌طوری‌که می‌توان بیان کرد که در زمان ۶۰ روز پس از کشت، گیاه در اوج رشد و فعالیت جذبی خود قرار دارد و سهم بیشتری در جذب روی از محیط ریشه دارد تا جایی که ریشه به مناطق دورتر نفوذ کرده و باعث کاهش میزان روی در توده خاک هم شده است. تاو و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند که میزان مس قابل‌استفاده در خاک ریزوسفری سه هفته پس از کشت گیاه ذرت افزایش یافت در حالی که ۴۰ روز پس از کشت میزان آن در خاک ریزوسفری به دلیل جذب توسط گیاه کاهش یافت (۳۲). لورنز و همکاران (۱۹۹۴) نشان دادند که غلظت روی و کادمیم در محلول خاک ریزوسفری، در طول یک دوره ۴۵ روزه کشت، در ابتدا افزایش پیدا

مقدار روی تجمعی آزاد شده از خاک ریزوسفری، خاک‌های غیرریزوسفری و نزدیک ریزوسفر در طی زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت توسط عصاره‌گیری متوالی با DTPA-TEA به‌عنوان تابعی از زمان عصاره‌گیری در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند آزاد شدن روی با گذشت زمان افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۲، روند آزاد شدن روی با زمان شامل دو بخش می‌باشد، به‌طوری‌که سرعت آزاد شدن روی از خاک‌های ریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و خاک غیرریزوسفری در مراحل اولیه سریع و سپس کند می‌باشد. سنتیک آزادسازی روی نشان داد که حدود ۵۰ درصد از کل روی آزاد شده در طی ۸ ساعت اول صورت گرفته است و پس از آن آزادسازی به‌صورت آهسته تا ۵۲۸ ساعت تا رسیدن به شرایط تعادل ادامه یافته است. به‌طور کلی فرآیند آزادسازی "دومرحله‌ای" در جاذب‌های طبیعی (۳۷) و همچنین در مطالعات رهاسازی فلزات سنگین در خاک‌ها مشاهده شده است (۲۷). در طول مراحل اولیه آزادسازی، روی نگهداشت شده در مکان‌های با انرژی فعالسازی پایین رها می‌شود این در حالی است که در طول مراحل آخر، روی نگهداشت شده در مکان‌های با انرژی فعالسازی بالا واجد می‌شود (۱). یا به‌عبارت دیگر می‌توان بیان کرد که در ابتدا روی احتمالاً از مکان‌های تبدلی (بخش قابل‌تبادل) آزاد شده، سپس انحلال کانی‌های روی و انتشار آن از درون خاکدانه‌های ریز و یا درشت به وقوع پیوسته است. نتایج مشابه توسط کاندپال و همکاران (۲۰۰۵) در ارتباط با رهاسازی عناصر سنگین از خاک‌های آلوده گزارش شده است، نتایج آن‌ها نشان داد که رهاسازی عناصر سنگین در مراحل اولیه از سایت‌های تبدلی با انرژی پیوندی پایین (بخش تبادل) صورت می‌گیرد در حالی که آزادسازی کندتر، عمدتاً از سایت‌های با انرژی پیوندی

به سایر زمان‌ها بیش‌تر است، که شاید بتوان گفت در این مرحله فعالیت ریشه‌های گیاه به حداقل رسیده و یک تعادلی بین فرم‌های مختلف روی در خاک ایجاد شده است.

کرد، به حداکثر مقدار خود در نزدیک ۳۵ روز رسید، و سپس به شدت کاهش یافت (۲۰). میزان روی تجمعی آزاد شده از خاک در هر کدام از فواصل مختلف از ریشه در زمان ۹۰ روز پس از کشت نسبت



شکل ۲- مقدار تجمعی روی آزاد شده با زمان در (a) خاک ریزوسفری (R) و (b) خاک غیرریزوسفری (B) و (c) خاک نزدیک ریزوسفر (NR) در زمان‌های مختلف.

Figure 2. The amount of cumulative Zn released with time in a) rhizosphere soil and b) non- rhizosphere soil c) near rhizosphere soil at different times.

جدول ۳- میزان روی تجمعی آزاد شده در موقعیت‌های مختلف از ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم) در زمان‌های مختلف پس از کشت.

Table 3. The amount of cumulative Zn released (mg/kg) of different positions of root at different times after planting.

۹۰ روز پس از کشت 90 days after planting	۶۰ روز پس از کشت 60 days after planting	۳۰ روز پس از کشت 30 days after planting	
334.82 <sup>Aa</sup>	278.5 <sup>Ac</sup>	300.99 <sup>Ab</sup>	غیرریزوسفری (Non- rhizosphere)
326.7 <sup>Aa</sup>	269.18 <sup>Ac</sup>	294.32 <sup>Bb</sup>	نزدیک ریزوسفر (Near Rhizosphere)
336.68 <sup>Aa</sup>	259.7 <sup>Bc</sup>	292.99 <sup>Bb</sup>	ریزوسفری (Rhizosphere)

حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف بین میانگین داده‌ها در موقعیت‌های مختلف از ریشه (B, NR و R).  
حروف کوچک نشان‌دهنده اختلاف بین میانگین داده‌ها در زمان‌های پس از کشت (۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز).

The capital letters represents the difference between means in positions of root (B, NR and R).

The small letters represents the difference between means at times after planting (30, 60 and 90 days).



توصیف نموده است (جدول ۴)، به طوری که دارای بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد تخمین می‌باشند. برازش معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه اول، تابع توانی، پخشیدگی پارابولیک و الویج ساده در شکل ۳ نشان داده شده است. در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت برای خاک ریزوسفری معادله توانی در توصیف سرعت آزاد شدن روی بیشترین ضریب تبیین (به ترتیب ۰/۹۶۹، ۰/۹۵۶ و ۰/۹۵۵) و حداقل خطای استاندارد تخمین (۰/۰۶۲، ۰/۰۷۱ و ۰/۰۷۶) را داشت. همچنین معادله مرتبه اول با ضریب تبیین ۰/۹۳۵، ۰/۹۵۱ و ۰/۹۵۰ و خطای استاندارد تخمین ۰/۱۸۰، ۰/۱۶۳ و ۰/۱۶۳ به ترتیب برای زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز، توانایی توصیف سرعت آزاد شدن روی را در خاک ریزوسفری داشتند. در خاک نزدیک ریزوسفر در زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت، معادله انتشار توانی به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۶۹، ۰/۹۵۵ و ۰/۹۴۳ و خطای استاندارد ۰/۰۶۱، ۰/۰۷۱ و ۰/۰۵۱ و همچنین معادله مرتبه اول با ضرایب تبیین ۰/۹۳۴، ۰/۹۴۴ و ۰/۹۵۰ و خطای استاندارد تخمین ۰/۱۸۲، ۰/۱۷۵ و ۰/۱۶۳ توانایی توصیف آزاد شدن روی را داشتند. همچنین برای خاک غیرریزوسفری نیز معادله توانی و مرتبه اول بهترین مدل‌های توصیف‌کننده سرعت و مکانیسم آزاد شدن روی از خاک بودند (جدول ۳). بنابراین مدل توانی، بهترین مدل توصیف‌کننده آزاد شدن روی از خاک غیرریزوسفری و ریزوسفر بود. متقیان و حسین‌پور (۲۰۱۳) گزارش کردند که بهترین مدل سنتیکی برای آزاد شدن روی از خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری مدل توانی می‌باشد (۲۲). همچنین ریحانی‌تبار و گیلک (۲۰۱۰) بیان کردند که بهترین مدل سنتیکی برای شرح روی عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA معادله نمایی می‌باشد (۲۷). به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در بین مدل‌های سنتیکی مورد استفاده برای توصیف سرعت

از سوی دیگر نتایج نشان داد که بین روی آزادشده از خاک ریزوسفر و غیرریزوسفری در زمان‌های مختلف پس از کشت تفاوت وجود دارد و این تفاوت هر قدر زمان پس از کاشت بیشتر می‌شود کاهش می‌یابد؛ حداکثر تفاوت روی آزادشده از خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری در زمان ۶۰ روز پس از کشت و حداقل آن در ۹۰ روز پس از کشت مشاهده شد. به نظر می‌رسد که در مراحل اولیه رشد تأثیر ریزوسفر بر رفتار شیمیایی روی در خاک بیشتر از مراحل پایانی رشد گیاه است. افزایش میزان روی عصاره‌گیری شده از ریزوسفر احتمالاً به دلیل کمپلکس روی با ترشحات ریشه محلول در خاک ریزوسفری نسبت به خاک غیرریزوسفری و همچنین جذب کم‌تر روی توسط گیاه می‌باشد (۲). همچنین ریزجانداران موجود در ریزوسفر ممکن است در اثر ورود ترکیبات آلی از ریشه تحریک شوند و باعث افزایش حلالیت روی در خاک و در نتیجه زیاد شدن روی قابل‌استخراج گردند (۲۲). زو و همکاران (۲۰۰۷) بیان داشتند که افزایش غلظت روی در خاک ریزوسفری ناشی از افزایش ترکیبات آلی ریشه گیاه می‌باشد (۳۶). این مواد از طریق کلات کردن و انحلال موجب آزادسازی روی فعال در خاک شده و در نتیجه زیست‌فراهمی آن را افزایش می‌دهند (۳۶). به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که ترشحات ریشه از طریق کلات کردن، اُکسایش و احیا می‌توانند حلالیت، جذب، واجذب، جزءبندی و انتقال فلزات سنگین در خاک را تغییر دهند (۱۱).

مقادیر  $R^2$  و SE معادلات سنتیکی برازش شده برای داده‌های تجمعی آزاد شدن روی در خاک غیرریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و ریزوسفر در زمان‌های مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد تخمین (SE) نشان داد که معادله‌های تابع توانی و مرتبه اول واکنش‌های آزادسازی روی را به خوبی

از معادلات توانی و مرتبه اول پیروی می‌کند، به‌نظر می‌رسد آزاد شدن روی تحت تأثیر فرآیند پخشیدگی است. هاولین و همکاران (۱۹۸۵) نشان دادند که معادله توانی بیانگر کنترل فرآیند پخشیدگی است (۱۰). همچنین در پژوهش‌های دیگر، گزارش شده که در خاک‌هایی که سرعت آزاد شدن روی از معادلات مرتبه اول و پخشیدگی پارابولیکی پیروی می‌کند، آزاد شدن روی از فرآیند پخشیدگی پیروی می‌کند (۱۳ و ۲۲).

روی آزاد شده از خاک مدل توانی و مرتبه اول مدل‌های مناسب هستند در حالی که مدل الویچ ساده، پخشیدگی پارابولیک و مرتبه صفر سازگاری ضعیف‌تری برای توصیف واجذب روی از خاک نشان دادند. عملکرد خوب معادله توانی ممکن است ناشی از تبدیل لگاریتمی باشد که حساسیت داده‌های آزمایشگاهی را به حداقل می‌رساند (۲۶). یا به عبارت دیگر، معادله توانی دارای دو پارامتر قابل انعطاف است (۳۷). با توجه به این که سرعت آزاد شدن روی

جدول ۴- ضرایب تشخیص ( $R^2$ ) و خطای استاندارد برآورد (SE) مدل‌های مختلف سینتیکی برای روی آزاد شده در خاک‌های مورد مطالعه.

**Table 4. Coefficients of determination ( $R^2$ ) and standard error of the estimate (SE) of various kinetic models for Zn released in studied soils.**

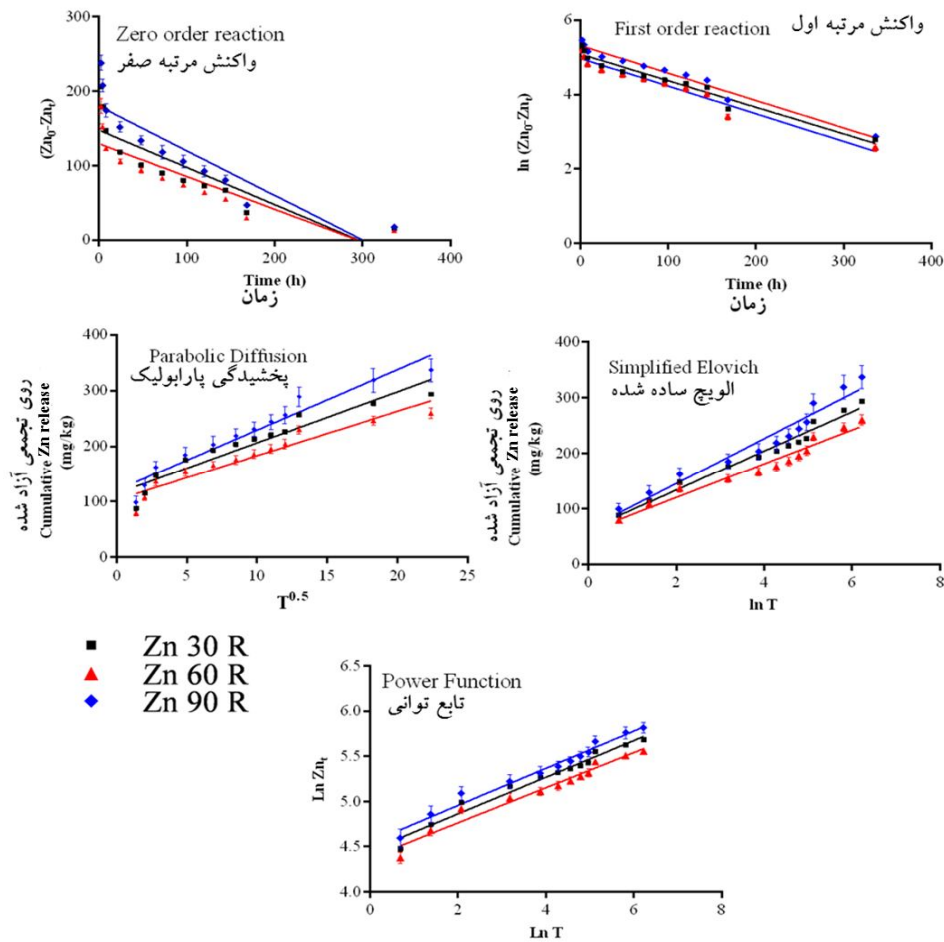
الویچ ساده Simplified Elovich		پخشیدگی Parabolic diffusion		تابع توانی Power function		واکنش مرتبه اول First-order reaction		واکنش مرتبه صفر Zero order reaction		زمان Time	خاک Soil
SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$		
11.48	0.965	19.59	0.899	0.064	0.968	0.180	0.936	29.31	0.735	30	غیرریزوسفری Bulk
10.68	0.965	18.25	0.897	0.069	0.958	0.169	0.949	27.00	0.741	60	
13.17	0.955	18.97	0.927	0.054	0.976	0.163	0.951	30.05	0.785	90	
10.03	0.967	19.46	0.898	0.061	0.969	0.182	0.934	29.20	0.732	30	نزدیک ریزوسفر Near Rhizosphere
10.09	0.966	17.99	0.892	0.071	0.955	0.175	0.944	26.50	0.730	60	
14.11	0.913	20.82	0.908	0.051	0.943	0.163	0.950	0.16	0.950	90	
10.85	0.968	21.47	0.897	0.062	0.969	0.180	0.935	29.44	0.730	30	ریزوسفر Rhizosphere
9.69	0.948	16.92	0.901	0.071	0.956	0.163	0.951	24.00	0.763	60	
14.51	0.921	17.49	0.912	0.076	0.955	0.163	0.950	29.09	0.801	90	

توانایی خاک ریزوسفری در تامین روی در زمان‌های مختلف می‌باشد. در حالی که ضریب  $a$  خاک ریزوسفری در معادله توانی برای زمان‌های مذکور به ترتیب ۴/۶۵، ۴/۳۷۹ و ۴/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آمد. ضریب  $b$  در معادله مرتبه اول شیب خط و ضریب سرعت آزاد شدن روی است. ضریب  $b$  در معادله مرتبه اول برای خاک ریزوسفری در زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت به ترتیب ۲/۱۰، ۲/۲۰۸ و ۲/۱۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد. همچنین با توجه به جدول ۵، حداکثر و حداقل ضریب  $b$  در زمان‌های ۶۰ و ۳۰ پس از کشت در

ضرایب سرعت معادلات سینتیکی مورد استفاده در بیان روی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری در جدول ۵ ارائه شده است. ضریب  $b$  در معادله توانی نشان‌دهنده سرعت آزاد شدن روی می‌باشد. این ضریب در خاک ریزوسفری برای زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت به ترتیب برابر با ۰/۱۶۶، ۰/۱۵۹ و ۰/۱۶۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت به دست آمد. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ضریب  $b$  در خاک نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفر به ترتیب در ۳۰ و ۶۰ روز پس از کشت مشاهده شد. تفاوت بین مقادیر  $b$  نشان‌دهنده تفاوت

روی برای جذب بر این سطوح است. به عبارت دیگر، افزایش مقدار ضریب  $a$  و کاهش مقدار ضریب  $b$  نشان‌دهنده افزایش سرعت آزاد شدن این عنصر در خاک‌هاست (۶). همان‌طور که بیان شد حداکثر ضریب  $a$  و حداقل ضریب  $b$  در معادله تابع توانی در هر سه خاک در زمان ۶۰ روز پس از کشت مشاهده شد که نشان‌دهنده سرعت آزاد شدن روی در خاک‌ها در ۶۰ روز پس از کشت بیش‌تر از ۳۰ و ۹۰ روز پس از کشت است. این امر را احتمالاً می‌توان به توزیع مجدد<sup>۱</sup> عنصر روی از شکل‌های لبایل به غیرلبایل این عنصر در خاک نسبت داد.

خاک نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفری مشاهده شد. در هر سه خاک، روند تغییرات نشان می‌دهد که حداقل ضریب  $b$  و حداکثر ضریب  $a$  در ۶۰ روز پس از کشت مشاهده می‌شود. همان‌طور که بیان شد ضریب  $b$  معادله توانی در همه خاک‌ها کم‌تر از یک به دست آمد که نشان‌دهنده این است که سرعت آزاد شدن روی با زمان کاهش می‌یابد. در همین زمینه ریحانی‌تبار و گلپیک (۲۰۱۰) بیان داشتند که ضریب  $a$  در معادله تابع توانی نشان‌دهنده تعداد سطوحی است که امکان آزاد شدن روی از آن‌ها وجود دارد (۲۷). همچنین ضریب  $b$  در این معادله نشان‌دهنده تمایل



شکل ۳- روی تجمعی آزاد شده توصیف شده توسط ۵ مدل ریاضی در خاک ریزوسفری.

Figure 3. The released cumulative Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) described by the five mathematical models for rhizosphere soil.

جدول ۵- پارامترهای مدل‌های استفاده شده برای تشریح سینتیک آزاد سازی روی از خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری خاک.

**Table 5. Parameters of models used to describe kinetics of Zn release in non- rhizosphere and rhizosphere soils.**

الویج ساده Simplified Elovich		پخشیدگی Parabolic Diffusion		توانی Power Function		واکنش مرتبه اول First-order reaction		واکنش مرتبه صفر Zero-order reaction		زمان Time	خاک Soil	
a	b	a	b	a×b	a	b	a	b <sub>1</sub> ×10 <sup>-3</sup>	a	b <sub>0</sub>		
62.40	28.89	121.9	4.853	0.749	4.439	0.1689	5.041	2.106	145.1	0.1480	30	توده Bulk
67.39	26.71	122.4	4.485	0.710	4.464	0.1592	4.959	2.245	132.4	0.1393	60	
69.42	32.88	135.3	5.640	0.762	4.573	0.1667	5.221	2.206	170.1	0.1750	90	
65.89	28.65	125.0	4.806	0.736	4.474	0.1646	5.030	2.106	143.6	0.1472	30	نزدیک ریزوسفر Near Rhizosphere
66.24	25.68	119.4	4.295	0.702	4.437	0.1583	4.910	2.190	132.4	0.1327	60	
69.54	31.42	131.4	5.455	0.742	4.562	0.1627	5.206	2.173	5.2	0.0021	90	
64.93	28.77	124.4	4.819	0.741	4.465	0.1660	5.028	2.103	143.6	0.1475	30	ریزوسفر Rhizosphere
60.58	24.92	111.2	4.227	0.699	4.379	0.1597	4.916	2.208	126.3	0.1311	60	
65.91	33.18	131.5	5.745	0.768	4.550	0.1689	5.253	2.169	175.3	0.1780	90	

آزادسازی روی با تابع توانی در ۱۵ خاک ورتی‌سول گزارش کردند (۶). همچنین ریحانی تبار و گلیک (۲۰۱۰) و متقیان و حسین‌پور (۲۰۱۳) مقادیر ضریب  $b$  را در مطالعه آزادسازی روی کم‌تر از یک گزارش کردند. مقدار ضرایب  $b$  در معادله توانی در همه خاک‌های مورد مطالعه کم‌تر از ۱ می‌باشد که نشان‌دهنده این است که سرعت آزاد شدن روی با زمان کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان کرد که در زمان‌های اولیه رشد، سرعت آزاد شدن روی از خاک ریزوسفری بیش‌تر از خاک غیرریزوسفری می‌باشد که می‌تواند به دلیل تغییر در شکل‌های روی در خاک ریزوسفری نسبت به غیرریزوسفری باشد (۲۲). در حالی‌که با گذشت زمان (در زمان‌های ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت) سرعت آزاد شدن از ریزوسفر خاک بسیار آهسته‌تر از خاک غیرریزوسفری می‌باشد. در معادله تابع توانی، در صورتی‌که از  $q_t = at^b$  نسبت به زمان مشتق معادله گرفته شود و  $t=1$  باشد،  $dq/dt = ab$  خواهد بود، در این حالت، پارامتر  $ab$  را می‌توان به‌عنوان سرعت آزادسازی اولیه روی در نظر گرفت (۶). بنابراین در نظر گرفتن سرعت آزادسازی روی به‌صورت  $a \times b$

از منظر دیگر با توجه به جدول ۵، روند تغییرات ضرایب  $a$  و  $b$  تابع توانی در زمان‌های مختلف پس از کشت بین خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری متفاوت است. به‌طوری‌که در زمان ۳۰ روز پس از کشت، میزان ضریب  $b$  در خاک غیرریزوسفری بیش‌تر از خاک ریزوسفری است در حالی‌که در زمان‌های ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت میزان ضریب  $b$  در خاک ریزوسفری بیش‌تر از خاک غیرریزوسفری است.

همچنین حداکثر و حداقل ضریب  $a$  تابع توانی در ۳۰ روز پس از کشت در خاک غیرریزوسفری و در زمان‌های ۶۰ و ۹۰ روز پس از کشت در خاک ریزوسفری مشاهده شد. مقدار ضریب  $b$  معادله مرتبه اول در زمان ۳۰ روز پس از کشت در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری به‌ترتیب ۲/۱۱ و ۲/۱۰ به‌دست آمد. همچنین مقدار ضریب  $b$  معادله مرتبه اول در خاک ریزوسفری، نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفری در زمان ۶۰ روز به‌ترتیب برابر با ۲/۲۴، ۲/۱۹ و ۲/۲۰۸ و در زمان ۹۰ روز به‌ترتیب برابر ۲/۲۱، ۲/۱۷ و ۲/۱۶۹ به‌دست آمد. دانگ و همکاران (۱۹۹۴) مقادیر ضریب  $a$  را بین ۰/۱۴ تا ۰/۳۶ و ضریب  $b$  را بین ۰/۱۶ تا ۰/۲۵ برای

ریزوسفیری و غیرریزوسفیری است. همچنین معادله مرتبه اول نیز توانایی توصیف مکانیسم و سرعت آزاد شدن روی را در هر دو خاک ریزوسفیری و غیرریزوسفیری داشت. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که میزان روی آزاد شده از ریزوسفر ذرت بیش‌تر از نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفر بوده است و همچنین در خاک نزدیک ریزوسفر بیش‌تر از خاک غیرریزوسفیری می‌باشد. در نتیجه خاک متصل به ریشه پس از رشد گیاه دچار تغییر می‌شود. به‌طوری‌که ویژگی‌های این بخش خاک از بخش‌های دیگر خاک متفاوت می‌باشد که می‌تواند در حاصلخیزی و پتانسیل تأمین عناصر و همچنین آلودگی خاک مورد توجه قرار گیرد. مشابه بودن نتایج مربوط به مدل‌هایی که با داده‌های مربوط به سه ناحیه برآزش بهتری دارند احتمالاً بیانگر مشابه بودن مکانیزم رهاسازی روی در این سه ناحیه بوده و به‌عبارت دیگر تفاوت فاحشی میان ریزوسفر و غیرریزوسفر مشاهده نمی‌شود.

مناسب‌تر هست. بررسی نتایج نشان داد که مقدار  $a \times b$  در خاک‌های ریزوسفیری کم‌تر از خاک‌های غیرریزوسفیری بود. میانگین ثابت سرعت تابع توانی ( $a \times b$ ) در خاک‌های ریزوسفیری و غیرریزوسفیری به‌ترتیب  $0.736$  و  $0.740$  میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت بود.

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار روی تجمعی آزاد شده از خاک ریزوسفیری و غیرریزوسفیری با گذشت زمان افزایش یافت. همچنین مقدار روی تجمعی آزاد شده از خاک ریزوسفیری به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر از خاک غیرریزوسفیری (نزدیک ریزوسفر و توده‌ای) در مراحل اولیه رشد (۳۰ روز پس از کشت) می‌باشد. بین زمان‌های پس از کشت از نظر غلظت روی تجمعی آزاد شده در هر سه خاک ریزوسفیری، نزدیک ریزوسفر و غیرریزوسفیری اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. نتایج نشان داد که مدل توانی، بهترین مدل توصیف‌کننده سرعت آزاد شدن روی از خاک

### منابع

1. Baranimotlagh, M., and Gholami, M. 2013. Time-dependent zinc desorption in some calcareous soils of Iran. *Pedosphere*. 23: 2. 185-193.
2. Bernal, M., and McGrath, S. 1994. Effects of pH and heavy metal concentrations in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *Alyssum murale* and *Raphanus sativus* L. *Plant and soil*. 166: 1. 83-92.
3. Bremner, J., and Mulvaney, C. 1965. *Methods of soil analysis, Part 2*. American Society of Agronomy. 1: 1. 62.
4. Campbell, P.G. 1995. Interactions between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model. *Metal Speciation and bioavailability*. Pp: 45-102.
5. Chapman, H. 1965. Cation-exchange capacity 1. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. (methods of soil analysis)*. Pp: 891-901.
6. Dang, Y., Dalal, R., Edwards, D., and Tiller, K. 1994. Kinetics of zinc desorption from Vertisols. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 58: 5. 1392-1399.
7. Feng, M.H., Shan, X.Q., Zhang, S.Z., and Wen, B. 2005. Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat. *Chemosphere*. 59: 7. 939-949.
8. Gee, G., and Bauder, J. 1986. Particle-size analysis In: Klute, A. (ed) *Methods of soil analysis, Part 1*. American society of Agronomy. Inc, Madison, WI.

9. Hammer, D., and Keller, C. 2002. Changes in the rhizosphere of metal-accumulating plants evidenced by chemical extractants. *J. Environ. Qual.* 31: 5. 1561-1569.
10. Havlin, J., Westfall, D., and Olsen, S. 1985. Mathematical Models for Potassium Release Kinetics in Calcareous Soils 1. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49: 2. 371-376.
11. Hosseini, H.M., and Bagheri Novair, S. 2015. Assessment of Zinc Bioavailability in the Rhizosphere of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Iran. J. Soil Res.* 29: 2. 148-162.
12. Jones, D.L., Hodge, A., and Kuzyakov, Y. 2004. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New phytologist.* 163: 3. 459-480.
13. Jopony, M., and Young, S. 1987. A constant potential titration method for studying the kinetics of  $\text{Cu}^{2+}$  desorption from soil and clay minerals. *J. Soil Sci.* 38: 2. 219-228.
14. Kabata-Pendias, A. 2010. Trace elements in soils and plants. CRC press. Pp: 199-210.
15. Kandpal, G., Srivastava, P., and Ram, B. 2005. Kinetics of desorption of heavy metals from polluted soils: Influence of soil type and metal source. *Water, Air, and Soil Pollution.* 161: 1-4. 353-363.
16. Keller, C., Hammer, D., Kayser, A., Richner, W., Brodbeck, M., and Sennhauser, M. 2003. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant and Soil.* 249: 1. 67-81.
17. Kim, K.R., Owens, G., and Kwon, S.L. 2010. Influence of Indian mustard (*Brassica juncea*) on rhizosphere soil solution chemistry in long-term contaminated soils: a rhizobox study. *J. Environ. Sci.* 22: 1. 98-105.
18. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper 1. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42: 3. 421-428.
19. Loeppert, R., and Suarez, D. 1996. Carbonate and gypsum. P 437-474. DL Sparks (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. Carbonate and gypsum. P 437-474. In DL Sparks (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
20. Lorenz, S., Hamon, R., and McGrath, S. 1994. Differences between soil solutions obtained from rhizosphere and non-rhizosphere soils by water displacement and soil centrifugation. *Europ. J. Soil Sci.* 45: 4. 431-438.
21. Mench, M., Morel, J., and Guckert, A. 1987. Metal binding properties of high molecular weight soluble exudates from maize (*Zea mays* L.) roots. *Biology and fertility of soils.* 3: 3. 165-169.
22. Motaghian, H., and Hosseinpour, A. 2013. Zinc desorption kinetics in wheat (*Triticum Aestivum* L.) rhizosphere in some sewage sludge amended soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13: 3. 664-678.
23. Motaghian, H., and Hosseinpour, A. 2014. Zinc desorption kinetics in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizosphere in sewage sludge-amended calcareous soils. *Environmental earth sciences.* 71: 2. 965-973.
24. Mucha, A.P., Almeida, C.M.R., Bordalo, A.A., and Vasconcelos, M.T.S. 2010. LMWOA (low molecular weight organic acid) exudation by salt marsh plants: natural variation and response to Cu contamination. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 88: 1. 63-70.
25. Nguyen, C. 2003. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. *Agronomie.* 23: 6-5. 35-396.
26. Pavlatou, A., and Polyzopoulos, N. 1988. The role of diffusion in the kinetics of phosphate desorption: the relevance of the Elovich equation. *J. Soil Sci.* 39: 3. 425-436.
27. Reyhanitabar, A., and Gilkes, R. 2010. Kinetics of DTPA extraction of zinc from calcareous soils. *Geoderma.* 154: 3-4. 289-293.
28. Shan, X.Q., Lian, J., and Wen, B. 2002. Effect of organic acids on adsorption and desorption of rare earth elements. *Chemosphere.* 47: 7. 701-710.
29. Singh, D., McLaren, R.G., and Cameron, K.C. 2008. Effect of pH on

- zinc sorption-desorption by soils. Communications in soil science and plant analysis. 39: 19-20. 2971-2984.
30. Strobel, B.W. 2001. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution-a review. Geoderma. 99: 3-4. 169-198.
31. Szmigielska, A.M., Van Rees, K.C., Cieslinski, G., and Huang, P. 1996. Low molecular weight dicarboxylic acids in rhizosphere soil of durum wheat. J. Agric. Food Chem. 44: 4. 1036-1040.
32. Tao, S., Chen, Y., Xu, F., Cao, J., and Li, B. 2003. Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil☆. Environmental Pollution. 122: 3. 447-454.
33. Thomas, G. 1996. Soil pH and soil acidity. P 475-490. DL Sparks (ed.) Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. Soil pH and soil acidity. P 475-490. In DL Sparks (ed.) Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
34. Walkley, A., and 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.
35. Wang, W.S., Shan, X.Q., Wen, B., and Zhang, S.Z. 2003. Relationship between the extractable metals from soils and metals taken up by maize roots and shoots. Chemosphere. 53: 5. 523-530.
36. Wei-Hong, X., Huai, L., Qi-Fu, M., and Xiong, Z.T. 2007. Root exudates, rhizosphere Zn fractions, and Zn accumulation of ryegrass at different soil Zn levels<sup>1</sup>. Pedosphere. 17: 3. 389-396.
37. Yu, J., and Klarup, D. 1994. Extraction kinetics of copper, zinc, iron and manganese from contaminated sediment using disodium ethylenediaminetetraacetate. Water, Air and Soil Pollution. 75: 3-4. 205-225.
38. Zahedifar, M., Karimian, N., and Yasrebi, J. 2010. Zinc desorption of calcareous soils as influenced by applied zinc and phosphorus and described by eight kinetic models. Communications in soil science and plant analysis. 41: 7. 897-907.
39. Zahedifar, M., Karimian, N., and Yasrebi, J. 2012. Influence of applied zinc and organic matter on zinc desorption kinetics in calcareous soils. Archives of Agronomy and Soil Science. 58: 2. 169-178.



## Kinetics of Zinc release in Corn Rhizosphere during cultivation period in a calcareous soil

M. Bahrini<sup>1</sup>, \*A. Fotavat<sup>2,3</sup>, A.R. Karimi Karouye<sup>3</sup>, R. Khorasani<sup>3</sup>  
and A.R. Hosseinpour<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad,

<sup>4</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>5</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University

Received: 08.28.2018; Accepted: 03.06.2019

### Abstract

**Background and Objectives:** Zinc-released (Zn) in the rhizosphere soil is the primary factor that affects bioavailability of Zn. To investigate the effect of root activity on Zn release in a polluted soil at different harvesting times, a greenhouse experiment was conducted using rhizobox.

**Materials and Methods:** Soil sample was collected from the 0–30 cm depth of a calcareous soil from agricultural fields located in the Zanjan province, Iran. In order to study the effect of maize root exudates on the Zn release using a rhizobox. The rhizobox was divided into three sections, including a central zone for plant growth (20 mm), near rhizosphere zones (20 mm), and non-rhizosphere zones (40 mm). Eight seeds were sown per rhizosphere zone and subsequently thinned to two plants. Plants were harvested 30, 60 and 90 days after germination. This research was conducted in a factorial design, with 3 replications, three levels of time (30, 60 and 90 day) and three zones classified based on their distance from root. The kinetics of Zn release in non-rhizosphere and rhizosphere soil was determined by successive extraction with DTPA-TEA in a period of 1 to 528 h at 25±1 C.

**Results:** The results showed that with increasing time, the cumulative released of Zn increased. Also, the amount of cumulative released of Zn in the rhizosphere soils were significantly ( $P<0.05$ ) lower than near rhizosphere and non-rhizosphere soils at 60 days after planted, due to plant uptake. There were also significant differences between harvesting times. The mean of Zn released in the bulk, near root and the rhizosphere soils were 278.5, 269.18 and 259.7 mg kg<sup>-1</sup>, respectively at 60 days after planted. Comparisons of R<sup>2</sup> and SE values indicated that the power function and first-order kinetic equations described the reaction rates fairly well, as evidenced by the high coefficients of determination and low standard error of the estimate. In addition, the parameter b in power function was <1 in all samples, indicating that the Zn released rates were decreasing with time. The best model for describing extraction data for bulk and rhizosphere soils was the power function kinetic equation.

**Conclusion:** The results of this research revealed that Zn release characteristics that are helpful to estimate the Zn supplying power of soils in the maize rhizosphere, which is different from the bulk soil. Also, the amount of zinc released has been influenced by the different times of the crop period, which indicates that during the plant growth period, the release rate of the elements varies over time.

**Keywords:** DTPA-TEA, Release Kinetics, Rhizobox, Rhizosphere, Zinc

---

\* Corresponding Author; Email: [afotovat@um.ac.ir](mailto:afotovat@um.ac.ir)