اثر ریزوسفر بر سرعت آزاد شدن روی در برخی از خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری

حمیدرضا متقیان[1*] و علیرضا حسین‌پور[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۱۶)

چکیده

ریزوسفر ناحیه‌ای کوچک با خصوصیات شیمیایی و بیولوژیک متفاوت از توده خاک است. در این تحقیق، سرعت آزاد شدن روی در خاک‌های ریزوسفر گندم (بک‌کراس روشن) و توده ۱۰ خاک آهکی با استفاده از ریزوباکس در شرایط گلخانه بررسی شد. نمونه‌های خاک ریزوسفری و توده به روش عصاره‌گیری متوالی و با استفاده از DTPA-TEA در دمای ۱± ۲۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۱ تا ۵۰۴ ساعت عصاره‌گیری شدند. همچنین، روی قابل استفاده با عصاره‌گیرهای شیمیایی (AB-DTPA، DTPA-TEA و مهلیچ ۳) برآورد شد. نتایج نشان داد که مقدار روی قابل استفاده، مقدار روی تجمعی آزاد شده و سرعت آزادشدن روی در خاک‌های ریزوسفری به‌صورت معنی‌داری (p<۰/۰۵) بیشتر از خاک‌های توده بود. معادله تابع توانی بهترین مدل توصیف کننده آزاد شدن روی در خاک‌های ریزوسفری و توده بود. همچنین، معادلات انتشار پارابولیک، مرتبه اول و الوویچ ساده نیز توانایی توصیف سرعت آزاد شدن روی را داشتند. ضرایب همبستگی به‌دست آمده بین شاخص‌های عملکرد، غلظت و جذب روی در گندم با سرعت آزاد شدن روی نشان داد که تعداد ضرایب همبستگی معنی‌دار در خاک‌های ریزوسفری نسبت به خاک‌های توده بیشتر بود.

واژه‌های کلیدی: خاک توده، خاک ریزوسفر، سینتیک آزاد شدن

مقدمه

روی یکی از عناصر غذایی ضروری برای رشد طبیعی گیاهان، حیوانات و انسان به‌شمار می‌آید. روی نقش‌های زیادی در گیاهان از جمله شرکت در ساختمان آنزیم‌های گیاهی مانند الکل دی‌هیدروژناز، مس- روی سوپراکسید دیسموتاز، آر ان آ پلیمراز، فعال کردن آنزیم‌های گیاهی، سوخت و ساز قندها و ساخت تریپتوفان و ایندول استیک اسید ایفا می‌کند (۱). روی در بیش از ۳۰۰ آنزیم درگیر در فرایندهای متابولیسمی در انسان، دام و گیاه وجود دارد (۳). بنابراین، تأمین این عنصر به میزان کافی برای رشد طبیعی انسان‌ها نیز ضروری است.

جذب روی به‌وسیله گیاهان نیازمند آزاد شدن روی جذب شده بر سطوح ترکیبات خاک و حتی تخریب کانی‌های حاوی روی است (۳۵). عصاره‌گیرهای شیمیایی متفاوتی برای ارزیابی روی در فاز جامد خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عصاره‌گیرهای یک مرحله‌ای، روش ساده‌ای برای برآورد مقدار قابل استفاده عناصر هستند (۳۷). معمولاً برای برآورد مقدار روی قابل استفاده، از کلات‌کننده‌های DTPA و EDTA استفاده می‌شود (۱۷). این کلات‌کننده‌ها با روی کمپلکس ایجاد کرده و غلظت روی را در محلول خاک کاهش می‌دهند. بنابراین، جذب روی به‌وسیله ریشه‌ها را در دوره رشد گیاه شبیه‌سازی می‌کنند (۹). اما مقدار روی آزاد شده با زمان تغییر می‌کند. معمولاً توانایی خاک در آزادسازی عناصر فاکتور مهمی در کنترل

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hrm_61@yahoo.com

مقدار عناصر در محلول خاک و قابلیت استفاده آنها برای گیاه است. از آنجایی که برای تأمین روی در حد کفایت برای رشد گیاه، حفظ سطح عنصر در حد مورد نیاز گیاه ضروری است، بنابراین سرعت آزاد شدن روی عامل بسیار مهمی در تأمین پیوسته این عنصر غذایی در خاک است (۹). سرعت آزاد شدن روی از خاک‌ها، کانی‌های رسی و اجزای خاک توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (۱۶ و ۲۵). کو و میکلسن (۱۶) به بررسی آزاد شدن روی با استفاده از کلات کننده DTPA پرداختند. نتایج آنها نشان داد که معادله تابع توانی امکان توصیف آزاد شدن روی را دارد. ریحانی‌تبار و گیلکز (۲۵) در مطالعه‌ای روی ۱۲ نمونه خاک آهکی جمع‌آوری شده از استان‌های قزوین و تهران، به بررسی سینتیک آزاد شدن روی با استفاده از DTPA-TEA به مدت ۱۹۲ ساعت پرداختند. ایشان گزارش کردند که تابع توانی بهترین مدل توصیف‌کننده سرعت آزاد شدن روی در همه خاک‌های مورد مطالعه بود.

ریزوسفر به‌عنوان ناحیه در برگیرنده ریشه‌های فعال مؤثر بر خصوصیات شیمیایی و بیولوژیک خاک در نظر گرفته می‌شود (۶). بنابراین، خصوصیات شیمیایی و بیولوژیک خاک ریزوسفری متفاوت از خاک توده است (۳۶). خصوصیات متفاوت خاک ریزوسفری می‌تواند بر اجزای عناصر و قابلیت استفاده آنها مؤثر باشد (۱۰). گیاهان توانایی تبدیل اجزای عناصر را از طریق ترشحات ریشه یا تغییر pH در ریزوسفر دارند (۳۶). سزمیگیلسکا و همکاران (۳۲) گزارش کردند که ریشه‌های گیاه به‌صورت 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. اسیدهای آلی با وزن ملکولی کم، نقش مهمی در تأمین روی برای گیاه، بخصوص در شرایط کمبود این عنصر، دارند (۲۷).

مطالعه سینتیک آزاد شدن روی در خاک‌ها، بخصوص ریزوسفر، به‌عنوان محیطی که ریشه گیاه به‌صورت مستقیم در تماس با خاک است، می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره توانایی خاک‌ها در تأمین روی قابل استفاده در اختیار قرار دهد. بنابراین، هدف از این تحقیق، بررسی اثر ریزوسفر بر سرعت آزاد شدن روی و ارتباط این ویژگی‌ها با شاخص‌های عملکرد، غلظت و جذب روی در گندم بود.

مواد و روش‌ها

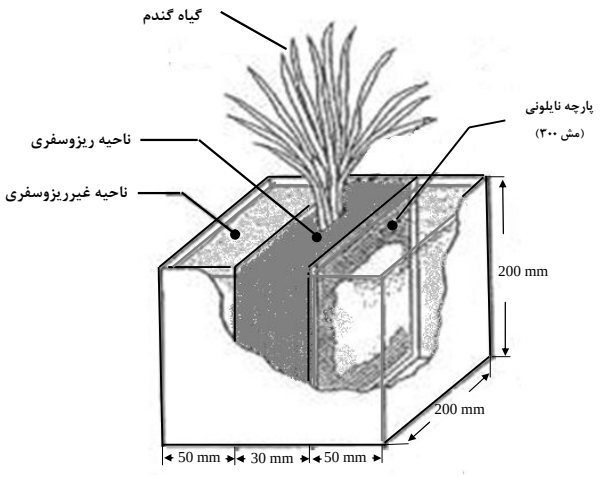
ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

این تحقیق با استفاده از ۱۰ نمونه خاک لایه سطحی (۳۰-۰ cm) استان چهارمحال و بختیاری که از نظر روی قابل استفاده، درصد رس و درصد کربنات کلسیم معادل تغییرات زیادی داشتند انجام شد. بافت خاک به‌روش هیدرومتر (۱۲)، pH خاک در سوسپانسون دو به یک آب به خاک (۳۴)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره دو به یک آب به خاک (۲۶)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون (۱۹)، گنجایش تبادل کاتیونی به‌روش استات سدیم در pH برابر با ۷ (۳۱) و ماده‌آلی به‌روش اکسیداسیون مرطوب (۲۴) تعیین شدند. مقدار روی قابل استفاده و کل روی به ترتیب با استفاده از دی‌تی‌پی‌آ - تری‌اتانول آمین (DTPA-TEA) (۱۸) و هضم با اسید نیتریک ۴ مولار (۳۰) تعیین شد.

کشت گلخانه‌ای

در این تحقیق، برای کشت گندم (*Triticum aestivum* L.)، رقم بک‌کراس روشن، از ریزوباکس (۲ و ۳۶) استفاده شد. ریزوباکس‌های مورد استفاده دارای طول ۲۰۰ میلی‌متر، عرض ۱۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر شامل سه بخش بودند. بخش مرکزی یا ناحیه ریزوسفری (دارای عرض ۳۰ میلی‌متر) با استفاده از پارچه نایلونی متخلخل (مش ۳۰۰) که امکان جابه‌جایی آب و املاح دارد، از دو بخش غیر ریزوسفری (دارای عرض ۵۰ میلی‌متر) جدا شده بود (شکل ۱).

مقدار ۴/۵ کیلوگرم خاک در سه تکرار به هر ریزوباکس منتقل شد. به هر ریزوباکس، ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن



شکل ۱. طرحی از ریزوباکس مورد استفاده در این تحقیق

از منبع اوره به‌صورت تقسیط در سه مرحله (یک سوم قبل از کشت، یک سوم ۳ هفته پس از کشت و یک سوم ۵ هفته پس از کشت)، ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک از منبع سولفات پتاسیم و ۵ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین ۱۳۸ اضافه شد. همچنین، مقدار کود فسفره پس از تعیین فسفر قابل استفاده خاک‌ها با روش اولسن به هر ریزوباکس اضافه شد. قبل از کشت، بذرهای گندم با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم ۳٪ استریل شدند. سپس درون آب مقطر قرار داده و در کاغذ صافی جوانه زدند. سه بذر در ناحیه مرکزی هر ریزوباکس کشت شد. در طول مدت رشد، مراقبت‌های لازم انجام شد و سعی گردید رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت مزرعه ثابت بماند. دمای گلخانه در روز ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس و در شب ۱۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس بود. بخش هوایی گیاهان ۸ هفته پس از جوانه‌زدن برداشت شدند. ریزوباکس‌ها باز شده و خاک بخش مرکزی (خاک ریزوسفری) با استفاده از الک کردن از ریشه‌ها جدا و در نهایت، ریشه‌های باقیمانده در خاک ریزوسفری با استفاده از انبرک برداشته شدند. همچنین، دو ناحیه غیرریزوسفری با هم مخلوط شده و هر دو نمونه (خاک ریزوسفری و توده) برای آزمایش‌های بعدی آماده شدند. بخشی از این خاک‌ها در دمای ۴ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شد. بخش‌های هوایی با آب مقطر شسته، به‌مدت ۴۸ ساعت در آون تهویه‌دار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک و سپس وزن خشک اندام هوایی تعیین شد. روی در اندام هوایی با روش خاکستر خشک عصاره‌گیری (۶) و با استفاده از دستگاه طیف سنج جذب اتمی (مدل جی بی سی، ۹۳۲) تعیین و سپس روی جذب شده توسط گیاه محاسبه شد.

در خاک‌های ریزوسفری و توده، مقدار کربن آلی محلول (DOC) و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) با استفاده از خاک‌های نگهداری شده در دمای ۴ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری مقدار کربن آلی محلول، از عصاره ۱ به ۲ خاک تازه به آب مقطر استفاده شد (۸). سپس، سوسپانسیون در دمای اتاق به مدت ۲ ساعت تکان داده شد، ۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید و محلول صاف رویی با استفاده از فیلتر پلاستیکی دارای قطر ۰/۴۵ میکرومتر جدا شد. سپس، مقدار کربن آلی محلول با استفاده از روش اکسیداسیون تر برآورد شد (۲۴). کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های ریزوسفری و توده با استفاده از روش تدخین با کلروفورم و خواباندن اندازه‌گیری شد (۱۴).

روی قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری و توده با استفاده از روش‌های عصاره‌گیری DTPA-TEA (۱۸)، AB-DTPA (۲۸) و مهلیچ ۳ (۲۳) اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. معادلات سینتیک استفاده شده

معادله	مدل	مرجع
واکنش مرتبه صفر	$(Zn_0 - Zn_t) = a - k_0 t$	۲۲
واکنش مرتبه اول	$\ln (Zn_0 - Zn_t) = a - k_1 t$	۲۲
انتشار پارابولیک	$Zn_t = a + Rt^{0.5}$	۱۳
تابع توانی	$\ln Zn_t = \ln a + b \ln t$	۱۳
الوویچ ساده	$Zn_t = a + 1/\beta \ln t$	۱۳

Zn_0: مقدار روی آزاد شده (mg/kg) بعد از ۵۰۴ ساعت، Zn_t: مقدار روی آزاد شده (mg/kg) در زمان t و K_0، K_1، R، b و $1/\beta$ ضرایب سرعت معادلات و ضریب a عرض از مبدأ معادلات هستند.

سینتیک آزاد شدن روی

برای مطالعه سرعت آزاد شدن روی نمونه‌های خاک ریزوسفر و توده از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده شد. دو گرم خاک از نمونه‌ها همراه با ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره‌گیر DTPA-TEA (همراه با چند قطره تولوئن) در لوله‌های سانتریفیوژ به‌صورت جداگانه ریخته شد. نمونه‌ها در دستگاه انکوباتور در دمای ۱±۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند. پانزده دقیقه قبل از قرار دادن نمونه‌ها در انکوباتور و ۱۵ دقیقه قبل از پایان هر دوره، نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند. خاک‌ها در زمان‌های ۱، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۳۳۶ و ۵۰۴ ساعت پس از اضافه کردن محلول‌ها عصاره‌گیری شدند. بدین منظور، سوسپانسیون با دستگاه سانتریفیوژ با ۳۰۰۰ دور در دقیقه صاف، محلول رویی جدا و مقدار لازم از محلول عصاره‌گیر مجدداً اضافه و پس از ۱۵ دقیقه تکان دادن توسط دستگاه تکان‌دهنده برقی، نمونه‌ها به انکوباتور منتقل شدند.

روی موجود در محلول عصاره‌گیری شده با استفاده از دستگاه طیف سنج جذب اتمی (مدل جی بی سی، ۹۳۲) اندازه‌گیری شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، معادلات سرعت مرتبه صفر، مرتبه اول، تابع توانی، انتشار پارابولیک (سهموی) و الوویچ ساده (جدول ۱) بر داده‌های تجمعی آزاد شدن روی برازش داده شدند و بر اساس ضریب تشخیص و خطای استاندارد برآورد، بهترین مدل‌ها برای توصیف آزاد شدن روی انتخاب و ضرایب این معادلات تعیین شدند. خطای استاندارد برآورد (SE) از رابطه زیر تعیین شد:

$$SE = \left[\frac{\sum (Zn - Zn^*)^2}{(n-2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [۱]$$

در این معادله، Zn و *Zn به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده روی آزاد شده در زمان t و n تعداد مشاهدات هستند.

تجزیه و تحلیل آماری

برای تعیین معنی‌دار بودن تفاوت بین مقدار روی عصاره‌گیری شده در خاک‌های ریزوسفری و توده، از آزمون t-test (نمونه‌های جفت شده) استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون (r) بین ویژگی‌های آزاد شدن روی با مقدار روی قابل استفاده و شاخص‌های گیاه گندم در سطح احتمال ۵٪ و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17.0 تعیین شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های خاک‌ها از دامنه تغییرات وسیعی برخوردار هستند.

مقدار کربن آلی محلول و کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های ریزوسفری و توده در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که میانگین کربن آلی محلول و کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های ریزوسفری افزایش

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	رس	سیلت	کربنات کلسیم معادل	کربن آلی	pH	قابلیت هدایت الکتریکی	گنجایش تبادل کاتیونی	روی قابل استفاده *	روی کل
	(٪)					(dS/m)	($cmol_c$/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
۱	۵۵	۴۰	۲۸/۷	۰/۷۲	۷/۸	۰/۱۳	۲۰/۹	۰/۵۰	۵۷
۲	۵۳	۴۴	۳۵/۶	۰/۳۰	۸/۱	۰/۱۳	۱۹/۳	۰/۵۹	۵۴
۳	۴۹	۳۹	۲۹/۴	۰/۵۱	۷/۹	۰/۱۲	۲۲/۵	۰/۳۴	۴۵
۴	۴۶	۴۲	۲۶/۴	۰/۷۱	۷/۸	۰/۱۴	۲۱/۶	۰/۷۵	۴۵
۵	۴۱	۴۲	۳۲/۲	۰/۵۴	۸/۱	۰/۱۳	۱۶/۰	۰/۵۴	۳۷
۶	۳۷	۴۴	۳۲/۵	۰/۸۰	۷/۶	۰/۱۶	۱۵/۶	۰/۶۶	۴۴
۷	۲۵	۳۳	۴۱/۰	۰/۴۷	۷/۷	۰/۲۱	۱۱/۵	۰/۷۷	۳۴
۸	۳۸	۵۵	۲۳/۱	۱/۱۹	۸/۱	۰/۲۴	۱۷/۹	۰/۷۳	۵۸
۹	۴۸	۴۶	۱۱/۳	۱/۱۶	۷/۸	۰/۲۵	۱۸/۵	۱/۳۱	۵۴
۱۰	۴۹	۴۶	۱۴/۸	۰/۹۷	۷/۹	۰/۲۳	۱۷/۹	۰/۳۹	۵۶

*روی عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA

جدول ۳. کربن آلی محلول و کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های ریزوسفری و توده

شماره خاک	کربن آلی محلول (mg C/L)		کربن زیست‌توده میکروبی (mg C/kg)	
	ریزوسفر	توده	ریزوسفر	توده
۱	۶۲ a	۴۳ b	۴۳۶ a	۱۷۲ b
۲	۳۵ a	۲۴ b	۲۲۵ a	۱۵۲ b
۳	۳۲ a	۲۶ b	۱۶۷ a	۱۱۹ b
۴	۸۲ a	۷۳ b	۳۲۷ a	۲۲۸ b
۵	۴۷ a	۲۱ b	۲۴۵ a	۱۸۸ b
۶	۴۶ a	۳۶ b	۱۳۹ a	۱۲۹ b
۷	۴۷ a	۳۹ b	۲۰۸ a	۱۲۹ b
۸	۹۹ a	۷۱ b	۳۶۶ a	۱۷۸ b
۹	۱۰۴ a	۷۶ b	۳۹۶ a	۲۸۷ b
۱۰	۹۳ a	۷۴ b	۲۸۷ a	۲۳۸ b
میانگین	۶۵ A	۴۸ b	۲۷۹ A	۱۹۲ B

حروف متفاوت برای هر ویژگی، نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ هستند.

معنی‌داری ($P<0/01$) نسبت به خاک‌های توده داشتند. ریشه گیاه مقادیر قابل توجهی ترکیبات آلی شامل ترکیبات محلول در آب (قندها، اسیدهای آلی و اسیدهای آمینه) و ترکیبات غیرمحلول در آب (سلول‌های دیواره، ترکیبات پوسته ریشه و موسیلاژ) آزاد می‌کند. بسیاری از این ترکیبات به‌وسیله ریزجانداران به‌سرعت تجزیه می‌شوند. اما آزادسازی پیوسته ترکیبات آلی منجر به افزایش ماده آلی در ریزوسفر می‌شود (۲۰). لینچ و ویپس (۲۱) گزارش کردند که کربن آلی در محیط ریزوسفر به‌دلیل ترشحات ریشه افزایش یافته و بر همین اساس کربن زیست‌توده میکروبی افزایش می‌یابد. کیم و همکاران

جدول ۴. مقادیر روی عصاره‌گیری شده (میلی‌گرم در کیلوگرم) با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف در خاک‌های ریزوسفری و توده

شماره خاک	DTPA-TEA		AB-DTPA		مهلیچ ۳	
	ریزوسفر	توده	ریزوسفر	توده	ریزوسفر	توده
۱	۰/۵۲	۰/۵۰	۱/۰۵	۱/۰۴	۲/۳۵	۲/۰۷
۲	۰/۵۱	۰/۴۵	۱/۳۶	۱/۲۳	۱/۸۶	۱/۸۷
۳	۰/۳۷	۰/۲۸	۰/۹۲	۰/۷۶	۱/۳۶	۱/۳۰
۴	۰/۶۱	۰/۵۷	۱/۴۱	۱/۲۸	۳/۱۰	۲/۶۹
۵	۰/۵۲	۰/۴۷	۱/۲۵	۰/۹۶	۱/۵۰	۱/۳۱
۶	۰/۶۵	۰/۶۰	۱/۶۹	۱/۵۴	۲/۴۳	۲/۲۰
۷	۰/۷۳	۰/۶۹	۱/۵۴	۱/۵۱	۲/۲۳	۲/۲۰
۸	۰/۸۵	۰/۸۱	۲/۱۵	۱/۹۸	۳/۲۰	۳/۱۰
۹	۱/۴۴	۱/۳۹	۲/۶۰	۲/۳۸	۳/۳۹	۳/۳۷
۱۰	۰/۵۶	۰/۵۶	۱/۳۹	۱/۳۸	۲/۲۲	۲/۰۸
میانگین	۰/۶۸[a]	۰/۶۳ [b]	۱/۵۳ [a]	۱/۴۱ [b]	۲/۳۶ [a]	۲/۲۲ [b]

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین هر عصاره‌گیر در خاک‌های ریزوسفری و توده در سطح احتمال ۵٪ هستند.

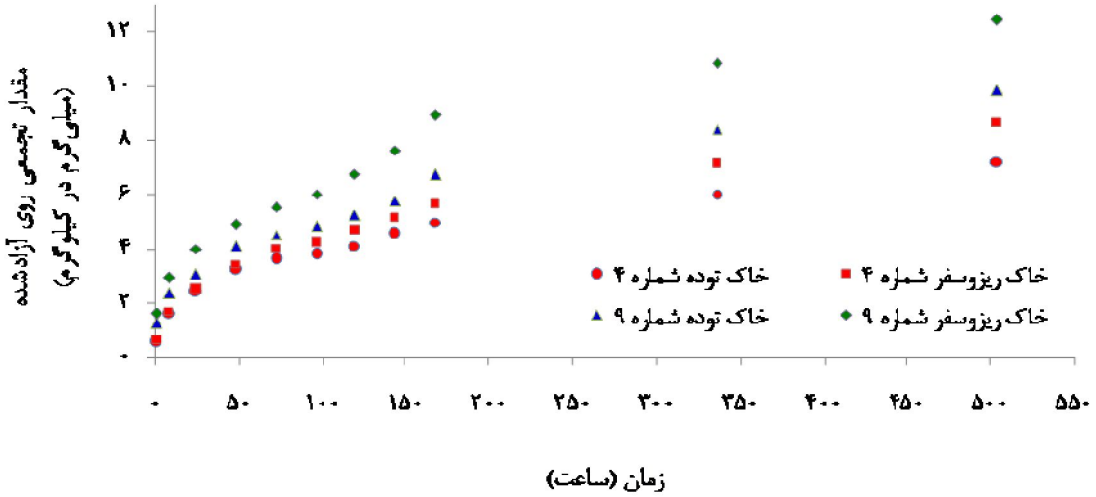
(۱۵) همبستگی معنی‌داری بین کربن آلی محلول و جمعیت باکتری‌ها در خاک ریزوسفری گزارش کردند. همچنین، مشاهده کردند که جمعیت باکتری‌ها در خاک ریزوسفری بیشتر از توده خاک بود. آنها نتیجه گرفتند که افزایش کربن آلی محلول در خاک ریزوسفر به‌دلیل ترشحات ریشه گیاه و جمعیت میکروبی بود. ضرایب همبستگی معنی‌داری در سطح ۱٪ در خاک‌های ریزوسفری (r = ۰/۷۳) و خاک‌های توده (r = ۰/۷۷) بین کربن آلی محلول و کربن زیست‌توده میکروبی به‌دست آمد.

روی قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری و توده

مقادیر روی قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری و توده در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که روی عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی در خاک‌های ریزوسفری به‌صورت معنی‌دار (P<۰/۰۱) بیشتر از خاک‌های توده است. افزایش روی عصاره‌گیری شده در خاک‌های ریزوسفری نسبت به خاک‌های توده می‌تواند به دلیل تغییر در مقادیر اجزای روی در این خاک‌ها باشد. محققین زیادی (۴، ۱۰ و ۳۳) شرایط بیولوژیک و شیمیایی متفاوت ریزوسفر نسبت به توده خاک را باعث تغییر در اجزای عناصر در خاک و در نتیجه تغییر در قابلیت استفاده عناصر برای گیاه گزارش کرده‌اند. از سوی دیگر، برنال و مک‌گراس (۴) گزارش کردند که افزایش مقدار روی قابل استفاده در ریزوسفر می‌تواند به‌دلیل ایجاد کمپلکس روی با ترکیبات آلی در محلول خاک باشد که عصاره‌گیرها توانایی استخراج آن را دارند. همچنین، دینکلاکر و همکاران (۱۱) گزارش کردند که سیترات ترشح شده در ریزوسفر گیاه در خاک آهکی، می‌تواند با ایجاد رسوب کلسیم- سیترات افزایش معنی‌داری در مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA داشته باشد. همبستگی معنی‌داری (P<۰/۰۵) بین کربن آلی با مقدار روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA (در خاک ریزوسفری r =۰/۶۷ و در خاک توده r =۰/۶۹)، AB-DTPA (در خاک ریزوسفری r =۰/۷۳ و در خاک توده r =۰/۷۵) و مهلیچ ۳ (در خاک ریزوسفری r =۰/۷۶ و در خاک توده r =۰/۷۷) به‌دست آمد.

سینتیک آزاد شدن روی

نمودار مقدار تجمعی روی آزاد شده در مقابل زمان به‌عنوان نمونه برای خاک‌های ریزوسفر و توده خاک‌های شماره ۴ و ۹ در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار روی تجمعی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری به‌صورت معنی‌دار (P< ۰/۰۵) بیشتر از



شکل ۲. مقدار روی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و توده شماره ۴ و ۹

جدول ۵. مقدار تجمعی روی آزاد شده (میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک‌های ریزوسفری و توده

شماره خاک	ریزوسفر	توده
۱	۶/۵۴ a	۶/۲۲b
۲	۷/۰۲ a	۶/۸۸ b
۳	۶/۲۱ a	۵/۸۱ b
۴	۸/۶۶ a	۷/۲۱ b
۵	۷/۶۳ a	۶/۵۷ b
۶	۷/۷۷ a	۷/۳۰ b
۷	۸/۳۷ a	۷/۵۷ b
۸	۹/۲۴ a	۸/۵۱ b
۹	۱۲/۴۳ a	۹/۸۵ b
۱۰	۸/۷۱ a	۸/۱۱ b
میانگین	۸/۲۶(۲۱)A	۷/۴۰(۱۶) B

میانگین خاک‌های ریزوسفری و توده دارای حروف متفاوت، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ دارند. اعداد داخل پرانتز، ضریب تغییرات (CV) هستند

خاک‌های توده بود (جدول ۵). خاک‌های ریزوسفری و توده شماره ۹ دارای بیشترین مقدار روی عصاره‌گیری شده بودند. خاک شماره ۹ دارای حداقل کربنات کلسیم معادل (۱۱/۳٪) در بین خاک‌های مورد مطالعه بود. همچنین، این خاک (بعد از خاک شماره ۸) بیشترین کربن آلی (۱/۱۶٪) را در بین خاک‌های مورد مطالعه داشت. در خاک‌های مورد مطالعه، همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح ۵٪ (۰/۶۸- در خاک‌های ریزوسفری و ۰/۶۶- در خاک‌های توده) بین مقدار روی آزاد شده با کربنات کلسیم معادل به‌دست آمد. همچنین، در خاک‌های مورد مطالعه، همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح ۵٪ (۰/۷۶ در خاک‌های ریزوسفری و ۰/۷۲ در خاک‌های توده) بین مقدار روی آزاد شده با کربن آلی مشاهده شد. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین روی آزاد شده با کربن آلی خاک به‌وسیله برومر و همکاران (۵) گزارش شده است. در خاک‌های مورد

مطالعه، افزایش روی عصاره‌گیری شده در خاک ریزوسفری می‌تواند به‌دلیل تغییر جزءبندی روی و بر همین اساس، تغییر در قابلیت استفاده آن (۳۶) و همچنین کمپلکس شدن روی با مواد آلی محلول در خاک ریزوسفری باشد (۴).

نتایج برازش معادلات سینتیک بر داده‌های تجمعی آزاد شدن روی در خاک‌های ریزوسفری و توده در جدول ۶ نشان داده شده است. مقایسه ضریب تشخیص (R^2) و خطای استاندارد برآورد (SE) نشان داد که معادلات تابع توانی، انتشار پارابولیک و مرتبه اول دارای بیشترین ضریب تشخیص و کمترین خطای استاندارد برآورد بودند و توانایی بالایی در توصیف سرعت آزاد شدن روی را داشتند.

توانایی مدل تابع توانی در توصیف آزاد شدن روی در چندین مطالعه گزارش شده است (۹، ۱۶ و ۲۵). دانگ و همکاران (۹) معادلات مختلف سینتیک را برای توصیف آزاد شدن روی در خاک‌های ورتی‌سول به‌کار بردند. نتایج آنها نشان داد که معادلات تابع توانی و انتشار پارابولیک توانایی توصیف آزاد شدن روی را دارند. اما سایر معادلات مورد استفاده در مطالعات سینتیک نیز می‌توانند در توصیف آزاد شدن روی استفاده شوند (۲۹).

ضرایب سرعت معادلات سینتیک مورد استفاده در توصیف روی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و توده در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. ضریب b در معادله تابع توانی نشان‌دهنده سرعت آزاد شدن روی است. این ضریب در خاک‌های ریزوسفری در دامنه ۰/۳۲ (خاک شماره ۹) تا ۰/۴۴ mg/kg.h (خاک شماره ۳) بود. تفاوت بین مقادیر b نشان‌دهنده تفاوت توانایی خاک‌ها در تأمین روی است. ضریب R در معادله انتشار پارابولیک ضریب پخشیدگی روی است و این ضریب در خاک‌های ریزوسفری دارای دامنه ۰/۲۷ (خاک شماره ۳) تا ۰/۵۳ $mg/kg.h^{-0.5}$ (خاک شماره ۹) بود. ضریب k_1 در معادله مرتبه اول شیب خط و نشان‌دهنده ضریب سرعت آزاد شدن روی است و دارای دامنه $۴۶/۳۰\times۱۰^{-۴}$ (خاک شماره ۳) تا $۵۵/۸۰\times۱۰^{-۴}$ $(mg/kg)^{-1}$ (خاک شماره ۹) بود. ضریب 1/β در معادله الوویچ ساده نشان‌دهنده سرعت آزاد شدن روی است. این ضریب در خاک‌های ریزوسفری در دامنه ۰/۷۸ (خاک شماره ۳) تا ۱/۴۷ mg/kg.h (خاک شماره ۳) بود. در مقابل، در خاک‌های توده، ضریب b در تابع توانی دارای دامنه ۰/۳۲ (خاک شماره ۹) تا ۰/۴۵ mg/kg.h (خاک شماره ۳) بود. ضریب R در خاک‌های توده دارای دامنه ۰/۲۴ (خاک شماره ۳) تا ۰/۴۱$mg/kg.h^{0.5}$ (خاک شماره ۹) بود. ضریب k_1 دارای دامنه $۴۳/۹۲\times۱۰^{-۴}$ (خاک شماره ۳) تا $۵۰/۹۵\times۱۰^{-۴}$ $(mg/kg)^{-1}$ (خاک شماره ۹) بود. ضریب 1/β در معادله الوویچ ساده در خاک‌های توده در دامنه ۰/۷۱ (خاک شماره ۳) تا mg/kg.h ۱/۱۳ (خاک شماره ۳) بود.

همان‌طور که نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد، ضرایب سرعت در معادلات مرتبه اول، الوویچ ساده و انتشار پارابولیک در خاک ریزوسفری بیشتر از خاک های توده بود. ضریب b در معادله تابع توانی در همه خاک‌ها کمتر از یک بود و نشان‌دهنده این است که سرعت آزاد شدن روی با زمان کاهش می‌یابد. ریحانی‌تبار و گیلکز (۲۵) بیان کردند که ضریب a در معادله تابع توانی نشان‌دهنده تعداد سطوحی است که امکان آزاد شدن روی از آنها وجود دارد. همچنین، ضریب b در این معادله نشان‌دهنده تمایل روی برای جذب بر این سطوح است. به عبارت دیگر، افزایش مقدار ضریب a و کاهش مقدار ضریب b نشان‌دهنده افزایش سرعت آزاد شدن روی در خاک‌ها است (۹). در خاک‌های ریزوسفری ضریب a افزایش و ضریب b کاهش یافته است (جدول ۷). بنابراین، سرعت آزاد شدن روی از خاک ریزوسفری بیشتر از خاک توده بود که می‌تواند به‌دلیل تغییر در شکل‌های روی در خاک ریزوسفری نسبت به توده باشد (۲). دانگ و همکاران (۹) گزارش کردند که مقدار ضریب b کمتر یا مساوی با ۰/۲۵ در تابع توانی نشان‌دهنده این است که بیش از یک سطح انتشار در آزاد شدن روی اهمیت دارد. در خاک‌های ریزوسفری و توده مورد مطالعه، ضریب b در تابع توانی بیشتر از ۰/۲۵ بود و بنابراین یک سطح انتشار آزاد شدن روی را کنترل می‌کند.

جدول ۶. ضریب تشخیص (R^2) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات مختلف مورد استفاده در توصیف روی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و توده*

خاک		مرتبه صفر		مرتبه اول		انتشار پارابولیک		الوویچ ساده		تابع توانی	
		دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین
ریزوسفر	R^2	۰/۷۵–۰/۹۲	۰/۸۳	۰/۹۴–۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۵–۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۸۳–۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۸–۰/۹۹	۰/۹۹
	SE	۰/۶۴–۱/۱۷	۰/۸۷	۰/۲۰–۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۱۶–۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۳۱–۲/۱۷	۰/۷۴	۰/۱۱–۰/۶۲	۰/۲۸
توده	R^2	۰/۷۹–۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۹۵–۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۶–۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۸۵–۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۸–۰/۹۹	۰/۹۹
	SE	۰/۵۹–۱/۰۸	۰/۷۵	۰/۲۲–۰/۴۸	۰/۴۱	۰/۲۲–۰/۵۱	۰/۲۹	۰/۳۵–۰/۸۹	۰/۵۵	۰/۱۹–۰/۳۸	۰/۲۶

* SE برحسب mg/kg و کلیه ضرایب تشخیص (R^2) در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار هستند.

جدول ۷. ضرایب سرعت معادلات سینتیکی مورد استفاده در توصیف روی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و توده

شماره خاک	مرتبه اول				انتشار پارابولیک				الوویچ ساده				تابع توانی			
	ریزوسفر		توده		ریزوسفر		توده		ریزوسفر		توده		ریزوسفر		توده	
	a	$k_1\times10^{-4}$	a	$k_1\times10^{-4}$	a	R	a	R	a	1/β	a	1/β	a	b	a	b
	mg /kg h	$(mg/kg)^{-1}$	mg /kg h	$(mg/kg)^{-1}$	mg/kg	$mg/kg.h^{0.5}$	mg/kg	$mg/kg.h^{0.5}$	mg/kg	mg/kg.h	mg/kg	mg/kg.h	mg/kg	mg/kg.h	mg /kg	kg.h/mg
۱	۱/۵۵	۴۷/۰۳	۱/۵۵	۴۴/۱۵	۰/۸۹	۰/۲۸	۰/۷۰	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۸۳	۰/۰۲	۰/۷۶	۰/۶۳	۰/۳۹	۰/۵۵	۰/۴۰
۲	۱/۷۰	۴۶/۳۸	۱/۶۶	۴۷/۳۹	۰/۶۴	۰/۳۰	۰/۷۰	۰/۲۹	−۰/۰۹	۰/۸۸	−۰/۰۵	۰/۸۷	۰/۵۵	۰/۴۱	۰/۵۴	۰/۴۲
۳	۱/۵۹	۴۶/۳۰	۱/۵۲	۴۳/۹۲	۰/۵۱	۰/۲۷	۰/۴۹	۰/۲۴	−۰/۱۵	۰/۷۸	−۰/۱۲	۰/۷۱	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۴۵
۴	۱/۹۵	۴۷/۲۹	۱/۷۱	۴۸/۰۹	۰/۶۶	۰/۳۷	۰/۷۵	۰/۳۱	−۰/۱۵	۱/۰۵	−۰/۰۲	۰/۹۰	۰/۷۱	۰/۴۰	۰/۶۴	۰/۴۰
۵	۱/۷۶	۴۶/۵۲	۱/۶۵	۴۷/۷۷	۰/۸۵	۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۹۴	−۰/۱۳	۰/۸۲	۰/۶۸	۰/۴۰	۰/۵۲	۰/۴۱
۶	۱/۷۷	۴۹/۲۶	۱/۷۲	۴۸/۱۸	۰/۹۴	۰/۳۳	۰/۸۰	۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۹۶	۰/۰۳	۰/۹۰	۰/۷۶	۰/۳۸	۰/۶۶	۰/۳۹
۷	۱/۸۵	۵۴/۲۷	۱/۷۸	۴۹/۷۹	۰/۹۷	۰/۳۷	۰/۷۷	۰/۳۲	۰/۰۷	۱/۰۸	۰/۰۱	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۳۷	۰/۷۳	۰/۳۸
۸	۲/۰۰	۴۶/۱۳	۱/۹۰	۴۹/۳۶	۰/۷۷	۰/۳۹	۰/۸۴	۰/۳۷	−۰/۰۷	۱/۱۰	−۰/۰۱	۱/۰۵	۰/۸۳	۰/۳۸	۰/۸۰	۰/۳۸
۹	۲/۳۳	۵۵/۸۰	۲/۰۸	۵۰/۹۵	۱/۲۰	۰/۵۳	۱/۰۳	۰/۴۱	۰/۲۳	۱/۴۷	۰/۲۴	۱/۱۳	۱/۵۰	۰/۳۲	۱/۱۷	۰/۳۲
۱۰	۱/۹۷	۵۵/۰۸	۱/۹۴	۵۱/۸۲	۰/۶۲	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۴۰	−۰/۲۴	۱/۱۲	−۰/۲۲	۱/۰۰	۰/۶۷	۰/۴۲	۰/۵۷	۰/۴۳

۸. همبستگی ویژگی‌های آزادشدن روی در خاک‌های ریزوسفری با روی قابل استفاده

ویژگی‌های آزادشدن		DTPA-TEA		AB-DTPA		مهلیچ ۳	
		ریزوسفر	توده	ریزوسفر	توده	ریزوسفر	توده
مرتبه اول	A	۰/۸۸**	۰/۸۴**	۰/۸۸**	۰/۸۹**	۰/۷۳*	۰/۷۶*
	K1	۰/۵۹ ns	۰/۶۰ ns	۰/۴۷ ns	۰/۶۱ ns	۰/۳۰ ns	۰/۵۷ ns
انتشار پارابولیک	A	۰/۷۷**	۰/۷۸**	۰/۶۷*	۰/۷۸**	۰/۴۷ ns	۰/۷۹**
	R	۰/۹۳**	۰/۷۷**	۰/۸۸**	۰/۸۴**	۰/۷۱*	۰/۷۳*
الوویچ ساده	A	۰/۶۰ ns	۰/۸۰**	۰/۴۷ ns	۰/۷۰*	۰/۲۷ ns	۰/۷۱*
	1/β	۰/۹۲**	۰/۸۵**	۰/۸۸**	۰/۹۴**	۰/۷۱*	۰/۸۴**
تابع توانی	A	۰/۹۹**	۰/۹۹**	۰/۹۰**	۰/۹۶**	۰/۶۸*	۰/۸۷**
	B	−۰/۹۰**	−۰/۹۴**	−۰/۸۳**	−۰/۸۷**	−۰/۶۸*	۰/۸۲**
	a×b	۰/۹۹**	۰/۹۹**	۰/۹۲**	۰/۹۳**	۰/۶۸*	۰/۸۵**
روی آزادشده		۰/۹۵**	۰/۹۲**	۰/۹۲**	۰/۹۶**	۰/۷۵*	۰/۸۵**

**، * و ns معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

همبستگی بین ویژگی‌های آزاد شدن روی با روی قابل استفاده و پاسخ گیاه

همبستگی بین ضرایب معادلات سینتیک استفاده شده در توصیف آزاد شدن روی و مقدار روی آزاد شده در طول زمان ۵۰۴ ساعت با مقدار روی عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد، در خاک‌های ریزوسفری، ویژگی‌های آزاد شدن روی (به غیر از ضریب سرعت در معادله مرتبه اول و ضریب a در معادله الوویچ ساده) با روی قابل استفاده همبستگی معنی‌داری (p<۰/۰۵) داشتند. در خاک‌های توده نیز ویژگی‌های آزاد شدن روی (به غیر از ضریب سرعت در معادله مرتبه اول) با روی قابل استفاده همبستگی معنی‌داری داشتند.

بررسی همبستگی ضرایب سرعت آزاد شدن روی با ویژگی‌های خاک نشان داد که در خاک‌های ریزوسفر همبستگی معنی‌داری (P<۰/۰۵) بین کربنات کلسیم و ضریب a در معادله مرتبه اول (۰/۶۹−)، ضریب 1/β در معادله الوویچ ساده (۰/۶۹−) و ضریب b در معادله انتشار پارابولیک (۰/۶۹−)، همچنین در خاک‌های توده بین کربنات کلسیم و ضریب a در معادله مرتبه اول (۰/۶۹−) و ضریب b در معادله انتشار پارابولیک (۰/۶۹−) همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ وجود داشت. همبستگی معنی‌داری (P<۰/۰۵) بین کربن آلی با ضریب a در معادله مرتبه اول (در خاک ریزوسفری r =۰/۶۹ و در خاک توده r =۰/۶۹)، ضریب 1/β در معادله الوویچ ساده (در خاک ریزوسفری r =۰/۷۰)، ضریب b در معادله انتشار پارابولیک (در خاک ریزوسفری r =۰/۷۰ و در خاک توده r =۰/۷۴)، ضریب a در معادله تابع توانی (در خاک ریزوسفری r =۰/۶۴ و در خاک توده r =۰/۶۰) و ضریب a×b (در خاک ریزوسفری r =۰/۶۵ و در خاک توده r =۰/۷۰) به‌دست آمد.

بهترین روش ارزیابی کارایی معادلات مورد استفاده در توصیف آزاد شدن روی، بررسی همبستگی بین پاسخ گیاه با ویژگی‌های آزادشدن روی در خاک‌های ریزوسفری و توده می‌باشد. نتایج عملکرد، غلظت و جذب روی در گندم کشت شده در خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۹ نشان داده شده است. همبستگی بین ضرایب معادلات سینتیک استفاده شده در توصیف آزاد شدن روی و مقدار روی آزاد شده در طول ۵۰۴ ساعت با عملکرد، غلظت و جذب روی در گندم در جدول ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که نتایج این جدول نشان می‌دهد بین غلظت روی در گیاه گندم با ویژگی‌های آزاد شدن

جدول ۹. پاسخ گیاه گندم در خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	غلظت (میلی‌گرم در کیلوگرم)	عملکرد (گرم در گلدان)	جذب (میلی‌گرم در گلدان)
۱	۱۴/۲۰	۴/۱۹	۰/۰۶
۲	۱۷/۸۵	۶/۷۵	۰/۱۲
۳	۱۶/۴۰	۵/۷۷	۰/۰۹
۴	۳۹/۶۵	۶/۰۲	۰/۲۴
۵	۱۸/۲۵	۵/۸۲	۰/۱۱
۶	۲۴/۸۷	۴/۳۱	۰/۱۱
۷	۲۳/۸۳	۴/۳۴	۰/۱۰
۸	۲۰/۲۵	۶/۸۶	۰/۱۴
۹	۲۸/۳۰	۸/۷۲	۰/۲۵
۱۰	۱۷/۲۰	۶/۱۵	۰/۱۱

جدول ۱۰. همبستگی ویژگی‌های آزاد شدن روی در خاک‌های ریزوسفری و توده با پاسخ‌های گندم

ویژگی‌های آزاد شدن		غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم)		عملکرد (گرم در گلدان)		جذب روی (میلی‌گرم در گلدان)	
		ریزوسفر	توده	ریزوسفر	توده	ریزوسفر	توده
مرتبه اول	a	۰/۵۵ ns	۰/۳۲ ns	۰/۷۲*	۰/۶۴*	۰/۷۹**	۰/۵۷ ns
	k1	۰/۱۸ ns	۰/۳۴ ns	۰/۲۱ ns	۰/۴۴ ns	۰/۲۷ ns	۰/۴۵ ns
انتشار پارابولیک	a	۰/۲۲ ns	۰/۵۱ ns	۰/۱۲ ns	۰/۳۳ ns	۰/۲۸ ns	۰/۵۹ ns
	R	۰/۴۸ ns	۰/۲۸ ns	۰/۶۹*	۰/۶۰ ns	۰/۷۵*	۰/۵۲ ns
الوویچ ساده	a	۰/۱۰ ns	۰/۴۴ ns	۰/۱۸ ns	۰/۳۳ ns	۰/۱۱ ns	۰/۵۶ ns
	1/β	۰/۴۸ ns	۰/۳۹ ns	۰/۶۶*	۰/۶۲ ns	۰/۷۳*	۰/۶۱ ns
تابع توانی	a	۰/۴۲ ns	۰/۴۲ ns	۰/۵۶ ns	۰/۵۵ ns	۰/۶۵*	۰/۶۳*
	b	−۰/۳۹ ns	−۰/۴۳ ns	−۰/۳۰ ns	−۰/۳۸ ns	−۰/۵۰ ns	−۰/۵۷ ns
	a×b	۰/۴۴ ns	۰/۴۴ ns	۰/۵۶ ns	۰/۵۸ ns	۰/۶۷*	۰/۶۵*
روی آزادشده		۰/۵۱ ns	۰/۳۷ ns	۰/۷۱×	۰/۶۶*	۰/۷۷**	۰/۶۴*

**، * و ns معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

روی در خاک‌های ریزوسفری و توده همبستگی معنی‌داری وجود نداشت. در خاک‌های ریزوسفری ضریب a معادله مرتبه اول، ضریب R معادله انتشار پارابولیک، ضریب 1/β در معادله الوویچ ساده و مقدار روی آزاد شده در ۵۰۴ ساعت با عملکرد گیاه و جذب کل روی همبستگی معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشتند. همچنین، در این خاک‌ها، ضرایب a و a×b در معادله تابع توانی با جذب کل روی همبستگی معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشتند. در خاک‌های توده، عملکرد با ضریب a معادله مرتبه اول و روی آزاد شده در ۵۰۴ ساعت همبستگی معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشتند. همچنین، جذب کل روی با ضرایب a و a×b تابع توانی و روی آزاد شده در ۵۰۴ ساعت همبستگی معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشتند. وجود همبستگی بین پاسخ‌های گیاه با برخی ضرایب سرعت آزاد شدن روی می‌تواند به‌دلیل توانایی این مدل‌ها و ضرایب آنها در بیان روی قابل استفاده گیاه گندم در

خاک‌های مورد مطالعه باشد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در خاک ریزوسفری، علاوه بر افزایش مقدار ضرایب همبستگی معنی‌دار، تعداد ضرایب همبستگی معنی‌دار بیشتری بین ویژگی‌های آزاد شدن روی و پاسخ‌های گندم در خاک ریزوسفری، نسبت به خاک توده، به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار روی قابل استفاده، مقدار روی تجمعی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و سرعت آزاد شدن روی در خاک‌های ریزوسفری بیشتر از خاک‌های توده بود. نتایج نشان داد که معادلات تابع توانی، انتشار پارابولیک و مرتبه اول توانایی بالایی در توصیف سرعت آزاد شدن روی دارند. بررسی همبستگی بین شاخص‌های گندم با ویژگی‌های آزاد شدن روی نشان داد که در خاک‌های ریزوسفری، ضرایب همبستگی معنی‌دار بیشتری نسبت به خاک‌های توده به‌دست آمد. اطلاعات به‌دست آمده از مدل‌های ریاضی در توصیف آزاد شدن روی و برآورد ظرفیت تأمین روی در خاک‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین عملکرد و جذب روی در گندم با برخی ویژگی‌های آزاد شدن روی در خاک ریزوسفری و توده به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، به‌منظور بررسی ارتباط ویژگی‌های آزاد شدن روی با شاخص‌های گیاه، از خاک ریزوسفری استفاده شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود که اثر ریزوسفر بر تغییر اجزای روی بررسی شود.

منابع مورد استفاده

۱. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶. مبانی تغذیه گیاه. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۴۶۲ صفحه.

۲. متقیان، ح. ر.، ع. ر. حسین‌پور، ف. رئیسی و ج. محمدی. ۱۳۹۱. اثر ریزوسفر گندم (*Triticum aestivum* L.) بر قابلیت استفاده و شکل‌های روی در تعدادی از خاک‌های آهکی. آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی) ۱۸(۶۷): ۱۳۷-۱۴۹.

۳. ملکوتی، م. ج.، پ. کشاورز و ن. ع. کریمیان. ۱۳۷۸. روش جامع تشخیص و توصیه بهینه کودی برای کشاورزی پایدار. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۷۵۵ صفحه.

4. Bernal, M.P. and S.P. McGrath 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 Soil 166: 83-92.

5. Brummer, G., K.G. Tiller, U. Herms and P.M. Clayton 1983. Adsorption desorption and/or precipitation dissolution processes of zinc in soils. Geoderma 31: 337-354.

6. Campbell, C.R. and C.O. Plank. 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. PP. 37-50. *In*: Kalra, Y.P. (Ed.), Handbook of Reference Methods for Plant Analysis, CRC Press, Taylor & Francis Group.

7. Corre, M.D., R.R. Schnabel and J.A. Shaffer. 1999. Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season and warm-season grasses in the northeastern US. Soil Biol. Biochem. 31: 1531-1539.

8. Dang, Y.P., D.G. Edwards and K.G. Tiller. 1994. Kinetics of zinc desorption from Vertisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1392-1399.

0. Dessureault-Rompre, J., B. Nowack, R. Schulin, M.L. Tercier-Waeber and J. Luster. 2008. Metal solubility and speciation in the rhizosphere of *Lupinus albus* cluster roots. Environ. Sci. Technol. 42: 7146-7151.

10. Dinkelaker, B., V. Römheld and H. Marschner. 1989. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.). Plant Cell Environ. 12: 285-292.

11. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 404-407. *In:* Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd edition, ASA and SSSA, Madison, WI.

12. Havlin, J.L., D.G. Westfall and S.R. Olsen. 1985. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 371-376.

13. Jenkinson, D.S. and D.S. Powlson. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. I. Fumigation with chloroform. Soil Biol. Biochem. 8: 209-213.

14. Kim, K.R., G. Owens and S.L. Kwon. 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.

15. Kuo, S. and D.S. Mikkelsen. 1980. Kinetics of zinc desorption from soils. Plant Soil 56: 355-364.

16. Lindsay, W.L. and F.R. Cox. 1985. Micronutrient soil testing for the tropics. Fertilizer Res. 7: 169-200.
17. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
18. Loeppert, R.H. and D.L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. PP. 437-474. *In:* Sparks, D.L. (Ed). Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison, WI.
19. Lombi, E., W.W. Wenzel, G.R. Gobran and D.C. Adriano. 2001. Dependency of phytoavailability of metals on indigenous and induced rhizosphere processes: A review. PP. 3-24. *In:* Gobran, G.R. et al. (Eds.), Trace Elements in the Rhizosphere. CRC Press, LLC.
20. Lynch, J.M. and J.M. Whipps.1990. Substrate flow in the rhizosphere. Plant Soil 129: 1-10.
21. Martin, H.W. and D.L. Sparks. 1983. Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 883-887.
22. Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15: 1409-1416.
23. Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 961-1010. *In:* Sparks, D.L. (Ed), Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison, WI.
24. Reyhanitabar, A. and R.J. Gilkes. 2010. Kinetics of DTPA extraction of zinc from calcareous soils. Geoderma 154: 289-293.
25. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. PP. 417-435. *In:* Sparks, D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison, WI.
26. Shan, X.Q., J. Lian and B. Wen. 2002. Effect of organic acids on adsorption and desorption of rare earth elements. Chemosphere 47: 701-710.
27. Soltanpour, P.N. and A.P. Schwab. 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 8(3): 195-207.
28. Sparks, D.L. 1986. Kinetics of reactions in pure and mixed systems. PP. 83-145. *In:* Sparks D.L. (Ed.), Soil Physical Chemistry, CRC Press, Boca Raton, FL.
29. Sposito, G., L.J. Lund and A. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge. I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 260-264.
30. Sumner, M.E. and P.M. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. PP. 1201-1230. *In:* Sparks, D.L. (Ed), Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison, WI.
31. Szmigielska, A.M., K.C.J. van Rees, C. Cieslinski and P.M. Huang. 1996. Low molecular weight dicarboxylic acids in rhizosphere soil of durum wheat. J. Agric. Food Chem. 44: 1036-1040.
32. Tao, S., Y.J. Chen, F.L. Xu, J. Cao and B.G. Li. 2003. Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil. Environ. Pollut. 122: 447-454.
33. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP. 475-490. *In:* Sparks, D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison, WI.
34. Uygur, V. and D.L. Rimmer. 2000. Reaction of zinc with iron coated calcite surface at alkaline pH. Eur. J. Soil Sci. 51: 511-516.
35. Wang, Z., X.Q. Shan and S. Zhang. 2002. Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils. Chemosphere 46(8): 1163-1171.
36. Young, S.D., H. Zhang, A.M. Tye, A. Maxted, C. Thums and I. Thornton. 2006. Characterizing the availability of metals in contaminated soils. I. The solid phase: Sequential extraction and isotopic dilution. Soil Use Manage. 21: 450-458.