

شبیه‌سازی آزادسازی روی تحت تاثیر تلقیح میکروبی و سطوح شوری در یک خاک غیر استریل آهکی با استفاده از مدل‌های سینتیکی

حمید رضا بوستانی^{۱*} - مصطفی چرم^۲ - عبدالامیر معزی^۳ - نجف علی کریمیان^۴ - نعیمه عنایتی ضمیر^۵ - مهدی زارعی^۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۴

چکیده

آزادسازی روی از خاک در اثر فعالیت‌های بیولوژیکی یکی از عوامل مهم کنترل‌کننده قابلیت استفاده زیستی روی است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تاثیر تلقیح باکتری‌های محرک رشد و قارچ میکوریز بر سینتیک آزادسازی روی در خاک آهکی با سطوح مختلف شوری در کشت ذرت بود. آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. فاکتور اول شامل سطوح شوری خاک (۰، ۱۵ و ۳۰ میلی‌اکی والان نمک در کیلوگرم خاک از منابع کلرید سدیم، کلسیم و منیزیم به ترتیب به صورت ترکیبی ۱:۲:۳) و فاکتور دوم تلقیح میکروبی (بدون تلقیح، تلقیح با قارچ، تلقیح با باکتری، تلقیح همزمان باکتری و قارچ) بود. کاربرد همه تیمارهای میکروبی میزان آزادسازی اولیه روی را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. به ترتیب بیشترین و کمترین آزادسازی اولیه روی در تیمار قارچ-باکتری و باکتری مشاهده شد. همچنین با کاربرد همه تیمارهای میکروبی سرعت رهاسازی روی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت و کمترین کاهش در تیمار قارچ مشاهده شد. به طور کلی افزایش سطوح شوری سبب افزایش آزادسازی اولیه روی و کاهش سرعت آزادسازی روی شد. همچنین شکل محلول و تبادلپذیری بیشترین تاثیر را در کنترل آزادسازی روی داشت. نتایج نشان داد که مدل‌های الوویج ساده شده، سرعت دو ثابت و پخشیدگی پارابولیک توصیف خوبی را از آزادسازی روی نشان دادند. بر اساس بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد، برترین مدل، الوویج ساده شده تعیین شد، بنابراین به نظر می‌رسد که مکانیسم اصلی کنترل‌کننده آزادسازی روی، در خاک مورد آزمایش پدیده پخشیدگی باشد.

واژه‌های کلیدی: باکتری محرک رشد گیاه، پخشیدگی، معادله الوویج، شکل محلول و تبادلپذیری، قارچ میکوریز

مقدمه

زیستی است که رشد و تولید محصولات را در مناطق خشک و نیمه خشک محدود می‌سازد. مقدار کل زمین‌های فاریاب در کشور ما حدود ۷ میلیون هکتار است که ۵۰ درصد آن با مشکل آب و یا خاک شور مواجه هستند (۴). پهاش بالا و غلظت زیاد کلسیم مسئول اصلی کمبود روی در اکثر خاک‌های شور می‌باشند (۲). بنابراین در خاک‌های آهکی و شور قابلیت زیست فراهمی روی پایین است. غنی‌سازی زیستی^۷ یک روش زیستی است که سبب افزایش غلظت و جذب بیشتر عناصر غذایی (خصوصاً روی و آهن) شده و رشد بهتر گیاهان را در پی دارد و به دلیل هزینه پایین و کارایی بالا در سطح گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (۳۵). یکی از روش‌های زیستی جهت کاهش کمبود عناصر کم مصرف استفاده از باکتری‌های محرک رشد و همزیستی قارچ میکوریز آرباسکولار می‌باشد.

روی یکی از مهم‌ترین عناصر معدنی برای گیاهان و انسان‌هاست که بسیاری از فعالیت‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی را در موجودات زنده کنترل می‌کند. کمبود روی در بسیاری از خاک‌های کشاورزی دنیا گزارش شده است که سبب کاهش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی شده است (۳). کمبود روی به طور گسترده در خاک‌هایی با پهاش بالا، میزان کم ماده آلی، آهکی و شور و سدیمی گزارش شده است (۳۷). شوری نیز یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی غیر

۱- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز
۲، ۳ و ۵- به ترتیب دانشیاران و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴ و ۶- استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
* - نویسنده مسئول: (Email: hamidboostani@gmail.com)

خاک تحت کشت تمشک شد. آن ها بیان کردند که افزایش قابلیت استفاده عناصر کم مصرف در اثر کاربرد باکتری می تواند در اثر کاهش پ هاش محلول ریزوسفر در نتیجه تولید اسیدهای آلی و معدنی شدن کمپلکس های آلی باشد. حبشی و ابوزید (۱۶) نشان دادند که قابلیت استفاده روی تحت تاثیر کاربرد قارچ میکوریز آرباسکولار نسبت به تیمار های فاقد قارچ به طور معنی داری افزایش یافت. همچنین گزارش ها در مورد اثر شوری بر قابلیت استفاده روی به چند تحقیق محدود می شود (۳۸، ۳۴ و ۳۶) درحالی که مطالعه اثرات شوری بر سینتیک آزادسازی روی در خاک های تحت کشت گیاه بسیار محدود است. روپا و همکاران (۴۲) گزارش کردند که افزایش غلظت نمک میزان آزادسازی روی را افزایش داد و افزایش در نتیجه رقابت یون ها برای اشغال سطوح تبادل می باشد. معادلات سینتیکی مختلفی از جمله مرتبه صفر، اول، دوم، سوم، الوویچ، تابع توانی (سرعت دو ثابت) و پخشیدگی پارابولیک جهت توصیف سینتیک فرایندهای شیمیایی خاک از جمله سینتیک رهاسازی استفاده شده اند (۴۹). ریحانی تبار و گیلکس (۴۰) روند آزادسازی روی را در خاک های آهکی مطالعه کرده و دریافتند که معادله سرعت دو ثابتی بهترین معادله جهت توصیف روند آزادسازی روی در خاک های آهکی می باشد. بارانی مطلق و غلامی (۵) الگوی رهاسازی روی را توسط عصاره گیر DTPA در ۱۵ خاک آهکی ایران مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که بهترین مدل توصیف کننده آزاد سازی روی مرتبه اول بود. با توجه به مطالب فوق و محدود بودن پژوهش ها در زمینه سینتیک آزادسازی روی تحت تاثیر کاربرد تیمارهای میکروبی و شوری، آزمایش حاضر با اهداف زیر انجام شد: الف) اثر کاربرد باکتری های محرک رشد، قارچ میکوریز آرباسکولار و شوری بر الگوی رهاسازی روی و تعیین بهترین مدل سینتیکی توصیف کننده آزادسازی روی در یک خاک آهکی پس از برداشت ذرت (ب) تعیین اثرات باکتری، قارچ و شوری بر سرعت و میزان آزادسازی روی با استفاده از مقایسه ثابت های معادلات سینتیکی برتر (ج) تعیین شکل های شیمیایی موثر روی در آزادسازی این عنصر با استفاده از رگرسیون گام به گام بین شکل های شیمیایی روی و ثابت های مدل های سینتیکی برتر

مواد و روش ها

خاک مورد آزمایش

جهت انجام این آزمایش مقدار مناسبی خاک از افق سطحی (۳۰-۰ سانتی متری) از منطقه شمال خوزستان (صافی آباد دزفول) تحت کشت ذرت) که دارای قابلیت هدایت الکتریکی و میزان ماده آلی پایینی بودند، برداشته شد. پس از هواخشک کردن و عبور از الک ۲ میلی متری برخی ویژگی های شیمیایی و فیزیکی خاک از جمله

باکتری های محرک رشد گیاه^۱، ریزجاندارانی هستند که اثرات سودمندی برای گیاهان از طریق کلونیزه کردن ریشه های آن ها دارند (۵۵). این باکتری ها از راه های گوناگون مانند تولید هورمون ها (اکسین، سیتوکینین، و جبرلین)، افزایش رهاسازی عناصر غذایی، تولید آنزیم ACC دی آمیناز، افزایش حلالیت فسفر، تثبیت نیتروژن اتمسفری، افزایش حلالیت آهن از طریق تولید سیدروفور، انحلال ترکیبات نامحلول روی که تبعاً سبب افزایش جذب عناصر غذایی شده و همچنین جلوگیری از اثرات زیان آور تنش های محیطی (خشکی و شوری) سبب افزایش رشد گیاه می شوند (۲۹). هم چنین همزیستی قارچ میکوریز آرباسکولار سبب افزایش جذب عناصر فسفر، روی و مس در گیاهان مختلف می شود (۴۶). علت جذب بهتر عناصر غذایی کم مصرف توسط قارچ میکوریز آرباسکولار به اسیدی شدن محیط ریزوسفر از طریق تولید اسیدهای آلی مختلف (۹)، توسعه میسلیم های قارچ در فضای خاک و تغییرات بیوشیمیایی خاک (۴۶) مرتبط می باشد. قارچ های میکوریز با افزایش مقدار آنزیم های فسفاتاز و دهیدروژناز (۵۳)، افزایش محتوای کربن آلی خاک (۲۱) و ترشح گلیکوپروتئین ها خصوصاً گلو مالین (۵۴) به افزایش قابلیت استفاده روی و جذب بهتر آن توسط گیاه کمک می کنند. استراون و اسپارکس (۴۸) بیان کردند که سه مکانیسم اصلی کنترل کننده قابلیت استفاده زیستی عناصر در خاک است که شامل الف) خارج شدن عناصر از محلول خاک توسط پدیده جذب سطحی (ب) آزاد شدن عناصر از فاز جامد به محلول خاک (ج) فرایند رسوب و انحلال. برای جذب روی توسط گیاه نیاز است که روی از نقاط جذب سطحی شده در سطوح ذرات خاک و یا از طریق حل شدن کانی های حاوی روی، آزاد شود (۵۲). بنابراین سرعت آزادسازی روی به محلول خاک عامل بسیار مهمی در تنظیم عرضه روی جهت استفاده گیاهان است. عصاره گیر DTPA به طور معمول جهت تخمین روی قابل استفاده در خاک های آهکی به کار می رود (۲۴) اما این روش فقط در دسترس بودن روی را برای گیاه مشخص می کند درحالی که مقدار روی آزاد شده با زمان و طی دوره رشد گیاه تغییر می کند (۴۳)، بنابراین بررسی تغییرات مقدار روی با زمان در برآورد مقدار قابل استفاده آن برای گیاه مفید است، بخصوص برای خاک های آهکی ایران که دارای مقدار قابل توجهی روی هستند لیکن مقدار روی در محلول خاک ناچیز است (۲۶). تحقیقاتی هر چند محدود درباره اثرات کاربرد باکتری های محرک رشد و قارچ میکوریز بر میزان قابلیت استفاده روی با استفاده از عصاره گیر DTPA انجام شده است درحالی که توجهی بر سینتیک رهاسازی روی در طول زمان تحت تاثیر کاربرد این ریزجانداران زنده نشده است. به طور مثال اورهان و همکاران (۳۳) دریافتند که کاربرد باکتری محرک رشد در خاک سبب افزایش روی قابل استفاده در

به روش عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (۳۲)، نینروژن کل به روش کلدال (۷) و تعیین غلظت آهن، منگنز، مس و روی عصاره‌گیری شده با DTPA (۲۳) به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۱)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع، پهاش به وسیله الکتروُد شیشه‌ای (۵۱)، کربن آلی به روش اکسایش با اسید کرومیک و سپس تیتره کردن با فروآمونیم سولفات (۳۱)، پتاسیم قابل جذب توسط استات آمونیوم (۱۸)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید (۲۵)، فسفر قابل استفاده

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کشت

Table 1- selected physical and chemical properties of soil before cultivation

بافت خاک	لومی رسی سیلتی
Soil texture	Silty clay loam
قابلیت هدایت الکتریکی	2
EC (dSm ⁻¹)	
پهاش (عصاره اشباع)	7.8
PH (Saturated extract)	
کربن آلی	0.7
OC (%)	
کربنات کلسیم معادل	43.2
CCE (%)	
نینروژن کل	0.06
TN (%)	
Available- P (mg kg ⁻¹)	12
Available- K (mg kg ⁻¹)	104
DTPA-Fe (mg kg ⁻¹)	13.2
DTPA-Mn (mg kg ⁻¹)	9.4
DTPA-Cu (mg kg ⁻¹)	2.6
DTPA-Zn (mg kg ⁻¹)	0.5

پتاسیم و سوپرفسفات و نیمی از نینروژن مورد نیاز را از منبع اوره بر اساس نتایج آزمون خاک، به خاک‌ها افزوده شدند. نوبت دوم نینروژن، در آخر هفته چهارم رشد گیاه به خاک گلدان‌ها افزوده شد. برای اعمال تیمارهای میکروبی، در گلدان‌های مربوط به تیمارهای قارچی قبل از کشت، مقداری از خاک سطحی (۱ الی ۵ سانتی‌متری) را برداشته و به آن مقدار ۵۰ گرم از مایه تلقیحی قارچی (متوسط کلونیزاسیون ریشه ۷۵ درصد و تعداد اسپور در هر گرم بستره ۱۰ عدد) افزوده و با خاک مخلوط شد. تیمارهای فاقد قارچ نیز به همان اندازه از زادمایه قارچی سترون شده (اتوکلاو شده در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ دقیقه) دریافت کردند. جهت تلقیح بذر با باکتری مورد نظر در هر حفره کاشت بذر، به ازای هر بذر یک گرم مایه تلقیح جامد و پودری حاوی ۱۰^۸ سلول باکتری زنده و فعال، استفاده گردید. قبل از تلقیح، بذور را به مدت ۳۰ ثانیه با الکل ۹۶ درصد و سپس به مدت ۱/۵ تا ۲ دقیقه در محلول وایتکس ۱۰ درصد ضد عفونی سطحی کرده و با آب مقطر استریل ۷ تا ۸ مرتبه شستشو داده شد. پس از اعمال تیمارهای میکروبی، کشت گیاه به تعداد ۷ بذر رقم سینگل گراس ۷۰۴ (مبین) در عمق حدود ۲ سانتی‌متری انجام شد. در هفته سوم رشد گیاه در هر گلدان فقط دو بوته نگهداری شد. در طول دوره رشد، رطوبت گلدان‌ها روزانه بصورت وزنی با استفاده از آب مقطر (بدون

اعمال تیمارها و شرح آزمایش

آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. فاکتور اول شامل تلقیح میکروبی در چهار سطح (تلقیح با باکتری‌های محرک رشد (B)، تلقیح با قارچ میکوریز آرباسکولار (F)، تلقیح همزمان باکتری‌های محرک رشد و قارچ میکوریز (B+F) و بدون تلقیح (C)) و فاکتور دوم شامل شوری (S) در سه سطح (S₁ ۱۵، S₂ ۳۰ و S₃ میلی‌اکی‌والان نمک در کیلوگرم خاک) از منابع کلرید سدیم (NaCl)، کلرید کلسیم (CaCl₂, 2H₂O) و کلرید منیزیم (MgCl₂, 6H₂O) به ترتیب به صورت ترکیبی ۱:۲:۳ (نسبت اکی‌والانی) بود. سویه‌های میکروبی مورد استفاده در این آزمایش شامل باکتری‌های محرک رشد سودوموناس (ترکیبی از گونه‌های *Putida strain 41P* و *P. fluorescens strain 167, 187*) و قارچ میکوریز آرباسکولار (*Glumisintraradices*) بود. باکتری‌های محرک رشد از بانک میکروبی موسسه تحقیقات خاک و آب تهران و قارچ میکوریز نیز از بخش بیولوژی گروه علوم خاک دانشگاه شیراز تهیه شد. در آغاز نمونه‌های هفت کیلوگرمی از خاک هوا خشک عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متری، به گلدان‌های پلاستیکی انتقال داده شد. بعد از این مرحله عناصر پتاسیم و فسفر را به صورت کامل از منبع سولفات

کاغذ صافی واتمن ۴۲، صاف شدند و مقدار روی موجود در محلول صاف شده، توسط دستگاه جذب اتمی تعیین شد.

اندازه‌گیری شکل‌های شیمیایی روی

جهت تعیین نقش شکل‌های شیمیایی روی در آزادسازی این عنصر، شکل‌های شیمیایی روی در خاک به روش عصاره‌گیری دنباله‌ای سینگ و همکاران (۴۴) تعیین شد. این روش، روی را به شکل‌های محلول + تبادلی (WEX)، کربناتی (Car)، آلی (OM)، اکسیدهای منگنز (MnOx)، اکسیدهای آهن بی‌شکل (AFeOx)، اکسیدهای آهن بلورین (CFeOx) و باقی‌مانده (Res) جدا می‌کند. شکل باقی‌مانده روی از طریق تفاوت بین میزان کل روی خاک با جمع شکل‌های دیگر محاسبه شد (۱۹). غلظت روی کل در خاک در عصاره بدست آمده از ۲ گرم خاک که به مدت یک شب توسط ۲۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۴ نرمال در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد هضم شده، اندازه‌گیری شد (۴۵). بعد از عصاره‌گیری روی در هر مرحله، غلظت روی به وسیله دستگاه جذب اتمی قرائت شد. لازم به ذکر است که استانداردهای روی در محلول‌هایی که از نظر ترکیب و غلظت مشابه عصاره‌گیرهای هر مرحله است، تهیه شد.

ایجاد زهاب) در حدود ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه نگه داشته شدند. پس از تنک کردن گیاهان و در پایان هفته سوم رشد، جهت اجتناب از شوک اسمزی ناشی از شوری، مقادیر نمک در هر یک از تیمارها به تدریج و به مدت یک هفته به آب آبیاری (آب مقطر) افزوده شد تا در نهایت نمک مصرفی به اندازه تیمار مورد نظر برسد. به منظور کنترل سطوح شوری در طول آزمایش از گلدان‌های تخریبی (فاقد گیاه) استفاده گردید. دامنه اندازه گیری شده قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در تیمارهای شوری S_0 ، S_1 و S_2 در طول فصل رشد گیاه به ترتیب برابر با $۱/۹-۲/۲$ ، $۴/۶-۵/۵$ و $۷/۸-۸/۶$ دسی‌زیمنس بر متر بود.

اندازه‌گیری آزادسازی روی در خاک‌های تیمار شده

پس از ۱۰ هفته گیاهان برداشت شده و پس از جدا کردن ریشه‌ها و عبور خاک از الک دو میلی متری، ۱۰ گرم خاک از هر تیمار توزین شد. مقدار ۲۰ میلی‌لیتر عصاره گیر DTPA به آن‌ها افزوده و سپس نمونه‌های خاک برای زمان‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت در دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد توسط شیکر (۳۰۰ دور در دقیقه) تکان داده شدند. نمونه‌های تکان خورده برای مدت ۱۰ دقیقه در ۳۰۰۰ دور، سانتریفیوژ و بلافاصله محلول زلال رویی خاک‌ها توسط

جدول ۲- مدل‌های سینتیکی به کار گرفته شده در این آزمایش (۱۷ و ۲۷)

Table 2- applied kinetic models in this experiment (17, 27)

مدل‌های سینتیکی Kinetic models	معادله Equation
مرتبه صفر Zero order	$q_t = q_0 - k_0 t$
مرتبه اول First order	$\ln q_t = \ln q_0 - k_1 t$
مرتبه دوم Second order	$1/q_t = 1/q_0 - k_2 t$
مرتبه سوم Third order	$1/q_t^2 = 1/q_0^2 - k_3 t$
پخشیدگی پارابولیک Parabolic diffusion	$q_t = q_0 + k_p t^{0.5}$
سرعت دو ثابت Two-constant rate	$q_t = a t^b$
الووچ ساده شده Simple Elovich	$q_t = a_e + 1/\beta \ln t$

* q_t مقدار روی آزاد شده از خاک توسط دی‌تی‌پی (mg Zn kg⁻¹) بعد از زمان t (h). q_0 مقدار روی آزاد شده از خاک توسط دی‌تی‌پی (mg Zn kg⁻¹) در $t=0$. k_0 ثابت معادله مرتبه صفر (mg Zn kg⁻¹ h⁻¹). k_1 ثابت معادله مرتبه یک (h⁻¹). k_2 ثابت معادله مرتبه دو (mg Zn kg⁻¹ h⁻²). k_3 ثابت معادله مرتبه سه (mg Zn kg⁻¹ h⁻³). k_p ثابت سرعت پخشیدگی روی (mg Zn kg⁻¹ h^{-0.5}). a ، ثابت سرعت آزادسازی اولیه روی (mg Zn kg⁻¹ h^{-b}). ضریب سرعت آزادسازی $1/\beta$ ، ثابت آزادسازی روی (mg Zn kg⁻¹ h⁻¹). a_e ، میزان آزادسازی اولیه روی (mg Zn kg⁻¹)

* q_t : the amount of released Zn by DTPA (mg Zn kg⁻¹) after time t (h), q_0 : the amount of released Zn by DTPA (mg Zn kg⁻¹) at $t=0$, k_0 : constant of zero order equation (mg Zn kg⁻¹ h⁻¹), k_1 : constant of first order equation (h⁻¹), k_2 : constant of second order equation (mg Zn kg⁻¹ h⁻²), k_3 : constant of third order equation (mg Zn kg⁻¹ h⁻³), k_p : diffusion release rate constant (mg Zn kg⁻¹ h^{-0.5}), a: initial release rate constant (mg Zn kg⁻¹ h^{-b}), b: release rate coefficient, $1/\beta$: Zn release rate constant (mg Zn kg⁻¹ h⁻¹), a_e : the amount of initial release of Zn (mg Zn kg⁻¹).

برازش معادله‌های سینتیکی

معادله‌های سینتیکی مورد استفاده در این آزمایش ۷ معادله می‌باشد که شامل معادله مرتبه صفر، مرتبه یک، مرتبه دو، مرتبه سه، سرعت دو ثابت، پخشیدگی پارابولیک و معادله الوویچ ساده شده می‌باشند (جدول ۲). نتایج هر تیمار با این مدل‌های سینتیکی برازش داده شد. کاراترین مدل‌های سینتیکی جهت توصیف آزادسازی روی با توجه به بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین خطای استاندارد (SE) انتخاب شدند (۸). سپس اثر تیمارهای اعمال شده بر میزان آزادسازی و تاثیر آن‌ها بر ضرایب مدل‌های سینتیکی برتر، بررسی شد. همچنین از طریق رگرسیون گام به گام بین ضرائب معادلات سینتیکی برتر و شکل‌های شیمیایی روی، نقش شکل‌های شیمیایی در آزادسازی روی بررسی شد. خطای استاندارد برآورد از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SEE = [\sum (Zn - Zn^*)^2 / n - 2]^{0.5}$$

در این معادله Zn و Zn^* به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده روی در زمان t و n تعداد مشاهدات است (۵۰).

تجزیه آماری

تجزیه‌های آماری داده‌ها، به وسیله برنامه‌های کامپیوتری Excell و Mstatc انجام و میانگین‌های مربوط به اثرهای اصلی هر

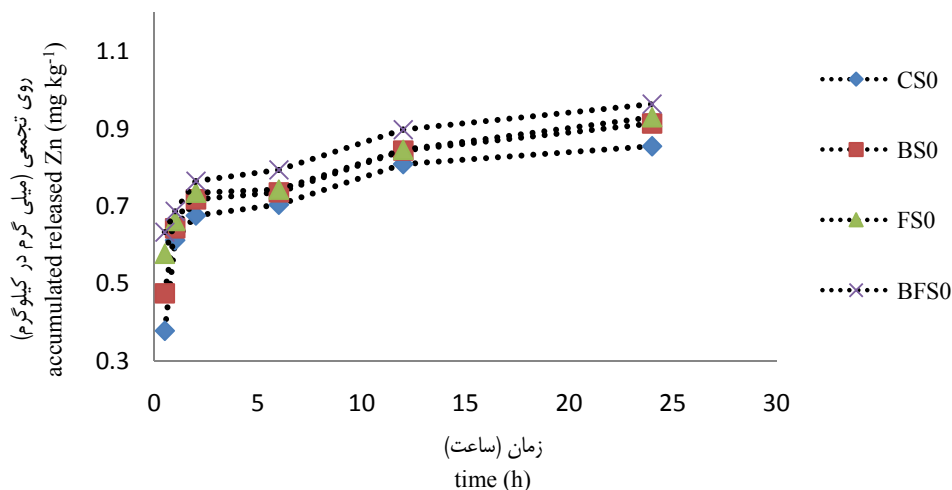
یک از عامل‌ها با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد مقایسه شد. تعیین معادلات رگرسیونی مربوط به آزادسازی روی، با برنامه کامپیوتری SPSS14.0 انجام شد.

نتایج و بحث

جدول ۱ برخی از ویژگی‌های خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بافت خاک لومی رسی سیلتی بوده و دارای پهاش خنثی تا کمی قلیایی، آهکی، شوری پایین، مقدار ماده آلی کم و اکثر عناصر غذایی کم مصرف بجز روی، در حد مناسبی وجود دارد.

بررسی الگوی آزادسازی روی

بررسی الگوی آزادسازی روی نشان داد که در همه تیمارهای کاربردی اعم از تیمار شوری و کاربرد ریزجانداران میکروبی، الگوی رهاسازی روی یکسان بود، به طوری که در ابتدا دارای یک شیب تند و در ادامه با یک شیب بسیار ملایم ادامه یافت و تنها، تفاوت در میزان و آهنگ آزادسازی روی، توسط تیمارهای مختلف کاربردی بود که آن را در قسمت‌های بعد مورد ارزیابی قرار خواهیم داد. برای نمونه الگوی رهاسازی روی در سطح S_0 در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- الگوی آزاد شدن روی تحت تاثیر فعاليت میکروبی در سطح شوری S_0 (بدون اعمال شوری)
figure 1- Zinc release pattern as affected by microbial inoculation at S_0 salinity (without salinity application)

C: تیمار شاهد (control); B: باکتری (bacteria); F: قارچ

تلقیح میکروبی محاسبه شده است. همان‌طور که مشخص است به صورت میانگین حدود ۸۳ درصد روی در همان مدت زمان ۲ ساعت

در جدول (۳) نسبت روی آزاد شده در زمان ۲ ساعت به ۲۴ ساعت توسط عصاره‌گیر DTPA در تیمارهای مختلف کاربرد شوری و

مکان‌هایی با انرژی پیوند بیشتر و دیگر منابع شکل‌های عناصر که با شکل تبدلی در ارتباط هستند، می‌باشد (۲۰). ریحانی‌تبار و همکاران (۴۱) با بررسی خصوصیات جذب سطحی روی در تعدادی از خاک‌های آهکی ایران، بیان کردند که بهترین مدلی که می‌تواند جذب سطحی روی را در این خاک‌ها توجیه کند، مدل دو سطح لانگمویر است. بنابراین آزاد شدن روی نیز از این خاک‌ها از دو سطح با انرژی جذب متفاوت صورت می‌پذیرد. همچنین قاسمی فسایی و همکاران (۱۲) با بررسی سینتیک آزاد شدن مس در تعدادی از خاک‌های آهکی ایران گزارش کردند که دو مکانیسم مختلف آزادسازی مس را در این خاک‌ها کنترل می‌کرد. آن‌ها بیان کردند که در ابتدا مس از خاکدانه‌های درشت یا سطوح خارجی خاکدانه‌های ریز با سرعت زیاد آزاد شده و به دنبال آن با انتشار از سطوح داخلی خاکدانه‌های ریز و درشت به صورت کندتری ادامه می‌یابد.

ابتدایی آزاد شده است. از سوی دیگر همبستگی مثبت و معنی‌داری (۰/۷۶**) بین روی قابل استفاده گیاه (آزاد شده در ۲ ساعت) با مقدار کل روی آزاد شده در ۲۴ ساعت وجود داشت که می‌تواند بیانگر نگرده داشته شدن بخش عمده روی در مکان‌های سطحی با انرژی کم و یا فاز جامد با حلالیت نسبتاً بالا باشد (۲). بنابراین آزاد شدن روی از خاک در ابتدا سریع (۲ ساعت) و سپس با آهنگ کندتری ادامه یافت که به نظر می‌رسد که احتمالاً آزادسازی روی توسط دو مکانیسم متفاوت صورت می‌پذیرد. فرایند دو مرحله‌ای رهاسازی (سریع و متعاقب آن کند) به وجود مکان‌هایی با انرژی متفاوت نسبت داده شده است (۲۲). آزادسازی سریع اولیه عناصر سنگین از خاک بیان کننده آزاد شدن این عناصر از شکل‌های محلول در آب و همچنین از مکان‌های جذبی که انرژی پیوند کمی دارند (مانند شکل تبدلی) است و آزاد شدن کند در ادامه آن بیان کننده آزاد شدن این عناصر از

جدول ۳- میزان روی آزاد شده (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در ۲ ساعت، ۲۴ ساعت و نسبت آن‌ها

Table 3- The amount of release Zn (mg kg⁻¹) at 2 hours, 24 hours and their ratio

تیمارها treatments	مقدار روی آزاد شده در ۲ ساعت The amount of released Zn at 2 hours	مقدار روی آزاد شده در ۲۴ ساعت The amount of released Zn at 24 hours	نسبت روی آزاد شده در ۲ ساعت به ۲۴ ساعت The ratio of released Zn at 2 hours to released Zn at 24 hours
CS ₀	0.676	0.855	0.79
CS ₁	0.718	0.904	0.80
CS ₂	0.791	0.908	0.87
BS ₀	0.713	0.914	0.78
BS ₁	0.763	0.957	0.80
BS ₂	0.812	0.926	0.87
FS ₀	0.735	0.930	0.79
FS ₁	0.773	0.939	0.82
FS ₂	0.829	0.944	0.88
BFS ₀	0.765	0.964	0.79
BFS ₁	0.842	0.973	0.86
BFS ₂	0.868	0.981	0.89
میانگین Mean	-----	-----	0.83

که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش مرتبه واکنش از مرتبه صفر به سه، در معادلات سینتیکی مرتبه‌ای مقدار ضریب تبیین کاهش و مقدار خطای استاندارد افزایش یافته است. این مطلب بیانگر این است که افزایش مرتبه واکنش کارایی معادلات مرتبه‌ای را در توصیف آزادسازی روی کاهش می‌دهد. بنابراین چون در این آزمایش معادلات مرتبه‌ای توصیف خوبی را از آزادسازی روی نداشتند، آن‌ها را کنار گذاشته و بیش از این در مورد آن‌ها بحث نخواهیم کرد. به ترتیب معادلات سینتیکی الوویج ساده شده، سرعت دوئالته و بخشیدگی پارابولیک دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین مقدار خطای استاندارد برآورد بودند و برآورد خوبی از آزادسازی روی از خاک در این آزمایش داشتند. ریحانی‌تبار و گیلکس (۴۰) انطباق داده‌های آزادسازی روی را به هر دو مدل بخشیدگی پارابولیک و

برازش داده‌های حاصل از آزادسازی روی بر مدل‌های سینتیکی

داده‌های آزادسازی روی مربوط به دوره زمانی نیم تا بیست و چهار ساعت را به مدل‌های سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، مرتبه سوم، بخشیدگی پارابولیک، تابع توانی (سرعت دوئالته) و الوویج ساده شده جهت توصیف سینتیک آزادسازی روی در خاک‌های شاهد و تیمار شده برازش داده شد. ارزیابی مدل‌ها با توجه به مقدار ضریب تبیین (R²) و خطای استاندارد برآورد (SE) انجام شد. معادلاتی که دارای بیشترین مقدار R² و کمترین مقدار SE بودند، به عنوان بهترین مدل توصیف کننده آزادسازی روی انتخاب شدند (۱۷). جدول (۴) میانگین و دامنه ضریب تبیین و خطای استاندارد برآورد معادلات سینتیکی به کار گرفته شده در این آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور

دانگ و همکاران (۱۰) معادلات مناسب جهت توصیف آزادسازی روی در خاک را مدل‌های سرعت دوتابته، پخشیدگی پارابولیک و الوویج ساده شده دانستند. غلامی و همکاران (۱۴) با بررسی سینتیک آزادسازی روی در خاک‌های مختلف استان گلستان با استفاده از عصاره گیر DTPA، بهترین مدل‌های توصیف کننده آزادسازی روی را سرعت دوتابته و الوویج ساده شده معرفی کردند. ریحانی تبار و کریمیان (۳۹) برترین مدل‌های سینتیک توصیف کننده آزادسازی مس را در برخی خاک‌های آهکی ایران سرعت دوتابته و الوویج ساده شده معرفی کردند. در مطالعه‌ای دیگر قاسمی‌فسایی و همکاران (۱۳) مدل‌های الوویج ساده شده، سرعت دوتابته و پخشیدگی پارابولیک را مدل‌های مناسبی جهت توصیف آزادسازی منگنز در برخی خاک‌های آهکی ایران دانستند. زاهدی‌فر و همکاران (۵۶) سینتیک آزادسازی روی را در تعدادی از خاک‌های آهکی جنوب ایران مورد بررسی قرار دادند و بر اساس کمترین خطای استاندارد (SE) و بیشترین ضریب تبیین (R^2) مدل الوویج ساده شده سرعت دوتابته را بهترین مدل جهت برآورد آزادسازی روی پیشنهاد کردند.

الوویج را بیانگر کنترل احتمالی آزادسازی روی از خاک توسط پدیده پخشیدگی یا دیفیوژن می‌دانند. اهارونی و همکاران (۱) گزارش کردند که انطباق داده‌های آزادسازی به معادله الوویج بیانگر کنترل آزادسازی عناصر توسط پدیده پخشیدگی ناهمگن (heterogeneous diffusion) است. هاولین و همکاران (۱۷) عقیده دارند که انطباق داده‌های آزمایشی آزادسازی یک عنصر به هر دو مدل سرعت دوتابته و پخشیدگی پارابولیک نشان دهنده حضور بیش از یک مکانیسم جهت کنترل آزادسازی آن عنصر است. چون در این آزمایش هر دو مدل توصیف خوبی را از آزادسازی روی داشتند، بنابراین همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، احتمال حضور دو مکانیسم مختلف جهت کنترل آزادسازی روی، قوت می‌گیرد. مدل برتر در بین این سه مدل انتخابی، مدل الوویج ساده شده بود که دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۲) و کمترین مقدار خطای استاندارد برآورد (۰/۰۳۸) بود. با توجه به مطالب بالا به نظر می‌رسد که در این آزمایش، به احتمال قوی پدیده پخشیدگی یا انتشار از دو سطح با انرژی جذب متفاوت آزادسازی روی را از خاک کنترل می‌کند به این صورت که در ابتدا مکانیسم انتشار سریع از سطوح با انرژی جذب پایین انجام شده و در ادامه انتشار کند از سطوح داخلی با انرژی پیوند بالا غالب خواهد بود.

جدول ۴- میانگین و دامنه ضریب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) معادلات سینتیک به کار رفته در آزمایش

Table 4- The mean and the range of determination coefficient (R^2) and standard error of estimate (SE) of applied kinetic models

معادلات سینتیک Kinetic equations	ضریب تبیین R^2		خطای استاندارد SE	
	دامنه Range	میانگین Mean	دامنه Range	میانگین Mean
Zero order	0.57-0.86	0.70	0.043-0.12	0.077
First order	0.49-0.82	0.63	0.062-0.23	0.121
Second order	0.38-0.78	0.57	0.089-0.47	0.195
Third order	0.30-0.73	0.50	0.26-1.96	0.661
Parabolic diffusion	0.74-0.94	0.82	0.028-0.096	0.058
Two-constant rate	0.79-0.98	0.89	0.023-0.14	0.064
Simple Elovich	0.87-0.98	0.92	0.018-0.067	0.038

همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر ثابت q_0 معادله پخشیدگی پارابولیک از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار شوری نشان داد با افزایش سطوح شوری از S_0 به S_2 مقدار ثابت q_0 از ۰/۵۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ۰/۶۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک رسید. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار میکروبی نشان داد که کاربرد همه‌ی تیمارهای میکروبی سبب افزایش معنی‌دار ثابت q_0 نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح میکروبی) شد (جدول ۶). بیشترین مقدار افزایش این ثابت مربوط به تیمار کاربرد توام قارچ و باکتری و کمترین میزان افزایش مربوط به تیمار کاربرد مجزای باکتری بود. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل شوری و

بررسی تاثیر کاربرد تیمارهای میکروبی و شوری بر سینتیک آزادسازی روی با استفاده از ثابت‌های معادله‌های سینتیک

معادله‌های سینتیک پخشیدگی پارابولیک، سرعت دوتابته (تابع توانی) و الوویج ساده شده توانستند توصیف خوبی را از آزادسازی روی از خاک ارائه دهند. در این قسمت با استفاده از مقایسه میانگین ضرایب سینتیک معادلات انتخابی، تاثیر کاربرد تیمارهای میکروبی و شوری بررسی شد. در معادله پخشیدگی پارابولیک دو ثابت K_p و q_0 به ترتیب نشان دهنده مقدار آزادسازی اولیه (در زمان صفر) و آهنگ پخشیدگی روی بود (جدول ۶). اثرات اصلی تیمار شوری و میکروبی و

اثرات اصلی تیمار شوری و میکروبی بر مقدار ثابت K_p در معادله پخشیدگی پارابولیک از نظر آماری در سطح یک درصد معنی دار شد در حالی که اثرات متقابل شوری و میکروبی معنی دار نبود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار شوری نشان داد که با افزایش سطوح شوری به طور معنی داری مقدار ثابت K_p کاهش پیدا کرد.

میکروبی نشان داد که تاثیر کاربرد تیمارهای میکروبی در افزایش ثابت q_0 نسبت به تیمار شاهد در سطوح مختلف شوری متفاوت بود. برای مثال در سطوح شوری S_0 ، S_1 و S_2 در اثر کاربرد توام قارچ و باکتری مقدار افزایش ثابت q_0 نسبت به تیمار شاهد به ترتیب برابر با ۳۳/۴۷، ۲۷/۴۵ و ۱۴/۶۵ درصد بود (جدول ۶).

جدول ۵- میانگین مربعات ثابت‌های مدل‌های سینتیکی انتخابی تحت تاثیر تلقیح میکروبی و سطوح شوری خاک

Table 5- the mean squares of selected kinetic model constants as affected by microbial inoculation and soil salinity levels

منابع source	درجه آزادی	a	b	q_0	K_p	a_e	$1/\beta$
تیمار شوری salinity	2	0.035 **	0.005 **	0.049 **	0.001 **	0.033 **	0.001 **
تلقیح میکروبی Microbial inoculation	3	0.029 **	0.004 **	0.028 **	0.0001 **	0.025 **	0.001 **
تیمار شوری × تیمار میکروبی Salinity × Microbial inoculation	6	0.001 **	0.001 **	0.002**	0.001 ns	0.001 **	0.00001 **
خطا Error	24	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.000001
ضریب تغییرات CV (%)		1.87	7.98	2.53	9.61	1.71	8.36

** و * ns به ترتیب معنی دار در سطح یک درصد، پنج درصد و غیر معنی دار
 ** , * , ns are significant at 1(%), 5(%) and not significant respectively.

جدول ۶- اثر کاربرد باکتری محرک رشد، قارچ میکوریز و سطوح شوری خاک بر ثابت‌های مدل سینتیکی پخشیدگی پارابولیک

Table 6- Effect of plant growth promoting rhizobacteria, mycorrhizae fungi and salinity levels application on constants of parabolic diffusion kinetic model

	S_0	S_1	S_2	اثرات اصلی Main effects
	q_0 (mg Zn kg ⁻¹)			
C	0.463 l	0.539 j	0.621 f	0.541 D
B	0.518 k	0.552 i	0.673 d	0.581 C
F	0.575 h	0.638 e	0.679 b	0.630 B
B+F	0.618 g	0.678 c	0.712 a	0.670 A
اثرات اصلی Main effects	0.543 C	0.602 B	0.671 A	
	K_p (mg Zn kg ⁻¹ h ^{-0.5})			اثرات اصلی Main effects
C	0.08999 a	0.8026 c	0.06624f	0.07883 A
B	0.08734b	0.08691 b	0.05800k	0.07741 B
F	0.07472e	0.06334 h	0.06157 i	0.06157 D
B+F	0.07628 d	0.06553 g	0.06019 j	0.06727 C
اثرات اصلی Main effects	0.08280 A	0.07396 B	0.06150 C	

*میانگین‌های دارای حروف بزرگ و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر در متن جدول از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی دار نیستند.

*the means followed by same capital and minuscule letters in each columns or rows are not significantly differences statistically (p<0.05).

*در همهی جداول حروف اختصاری C, B, F و B+F به ترتیب نشانگر تیمارهای شاهد، باکتری، قارچ و باکتری + قارچ و حروف اختصاری S_0 ، S_1 و S_2 به ترتیب نشانگر عدم کاربرد نمک، ۱۵ و ۳۰ میلی اکی والان نمک در کیلوگرم خاک می باشد

* C, B, F, B+F, S_0 , S_1 and S_2 letters show control, bacteria, fungi, fungi+bacteria, without salinity application, 15 and 30 meq salt kg⁻¹ soil treatments at all tables respectively.

داد که با کاربرد هر سه تیمار میکروبی مقدار ثابت K_p نسبت به تیمار

همچنین نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار میکروبی نشان

(جدول ۷). بنابراین به طور کلی با افزایش سطوح شوری و کاربرد تیمارهای میکروبی آهنگ آزادسازی اولیه روی افزایش یافت که نتیجه آن افزایش میزان آزادسازی اولیه روی است. اثرات اصلی تیمار شوری و فعالیت میکروبی و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر ثابت b معادله سرعت دو ثابت از نظر آماری در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار شوری نشان داد که با افزایش سطوح شوری مقدار ثابت b به طور معنی داری کاهش یافت. همچنین مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار میکروبی نشان داد که کاربرد هر سه تیمار میکروبی سبب کاهش معنی دار ثابت b نسبت به تیمار شاهد شد به طوری که بیشترین میزان کاهش مربوط به تیمار کاربرد توام قارچ و باکتری و کمترین میزان مربوط به تیمار کاربرد مجزای باکتری بود (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل شوری و میکروبی نشان داد که در سطح شوری S_0 مقدار ثابت b به صورت شاهد < باکتری < قارچ < قارچ-باکتری بود در حالی که در سطح شوری S_1 به صورت شاهد < باکتری < باکتری-قارچ < قارچ بود. همچنین در سطح شوری S_2 تاثیر تیمارهای توام قارچ و باکتری با تیمار کاربرد باکتری مشابه و به طور معنی داری کمتر از تیمار کاربرد قارچ بود. هنگامی که ثابت b در معادله سرعت دو ثابتی زیر ۱ باشد، نشان دهنده این است که با افزایش زمان سرعت آزاد شدن عناصر کاهش می‌یابد (۳۰). بنابراین هر چه مقدار ثابت b کمتر شود یعنی سرعت آزاد شدن روی کاهش می‌یابد. بنابراین به طور کلی با افزایش سطوح شوری و کاربرد تیمارهای میکروبی سرعت آزادسازی روی کاهش یافت.

شاهد کاهش نشان داد، به طوری که بیشترین کاهش مربوط به تیمار کاربرد مجزای قارچ و کمترین کاهش مربوط به تیمار کاربرد مجزای باکتری بود (جدول ۶). بنابراین افزایش سطوح شوری و کاربرد تیمارهای میکروبی سبب کاهش آهنگ پخشیدگی روی شدند. شاید بتوان این طور توجیه کرد که چون در اثر اعمال شوری و تیمارهای میکروبی مقدار آزادسازی اولیه روی افزایش یافته است، بنابراین شیب غلظت روی به سمت محلول خاک کاسته خواهد شد، پس سرعت یا آهنگ پخشیدگی روی با اعمال این تیمارها کاهش می‌یابد. در معادله سرعت دو ثابت (تابع توانی) به ترتیب ثابت‌های a و b نشان دهنده ثابت سرعت آزادسازی اولیه و ضریب سرعت آزادسازی روی هستند (جدول ۷). اثرات اصلی تیمارهای شوری و میکروبی و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر ثابت a معادله سرعت دو ثابتی از نظر آماری در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار شوری نشان داد که با افزایش سطوح شوری مقدار ثابت a به طور معنی داری افزایش یافت. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار میکروبی نشان داد که کاربرد هر سه تیمار میکروبی سبب افزایش معنی دار این ثابت نسبت به تیمار شاهد شد به طوری که بیشترین مقدار افزایش مربوط به تیمار کاربرد توام قارچ و باکتری و کمترین میزان افزایش مربوط به تیمار کاربرد مجزای باکتری بود (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل شوری و میکروبی نشان داد که تاثیر کاربرد ریزجانداران میکروبی در سطوح مختلف شوری بر افزایش ثابت a متفاوت و با افزایش سطوح شوری مقدار افزایش ثابت a در اثر کاربرد ریزجانداران میکروبی کاهش یافت

جدول ۷- اثر کاربرد باکتری محرک رشد، قارچ میکوریز و سطوح شوری خاک بر ثابت‌های مدل سینتیکی سرعت دو ثابت

Table 7- Effect of plant growth promoting rhizobacteria, mycorrhizae fungi and salinity levels application on constants of two-constant rate kinetic model

	S_0	S_1	S_2	اثرات اصلی Main effects
	$a(\text{mg Zn kg}^{-1}\text{h}^{-b})$			
C	0.523 l	0.599 j	0.669 g	0.597 D
B	0.589 k	0.620 i	0.720 d	0.643 C
F	0.644 h	0.697 e	0.728 c	0.690 B
B+F	0.688 f	0.733 b	0.760 a	0.727 A
اثرات اصلی Main effects	0.611 C	0.662 B	0.719 A	
	b			اثرات اصلی Main effects
C	0.173 a	0.137 c	0.106 f	0.139 A
B	0.145 b	0.139 b	0.085j	0.123 B
F	0.110 e	0.088 i	0.090 h	0.09611 C
B+F	0.106 d	0.092 g	0.085 i	0.09456 D
اثرات اصلی Main effects	0.09289 A	0.08431 B	0.07231 C	

*میانگین‌های دارای حروف بزرگ و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر در متن جدول از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی دار نیستند

*the means followed by same capital and minuscule letters in each columns or rows are not significantly differences statistically ($p < 0.05$)

شوری کاهش یافت (جدول ۸). بنابراین به طور کلی با افزایش سطوح شوری و کاربرد تیمارهای میکروبی آهنگ آزادسازی فوری روی افزایش یافت. ثابت a_e در معادله الویچ ساده شده بیانگر آزادسازی عنصر از سطوح خارجی و مکان‌هایی با انرژی جذب پایین می‌باشد (۶).

اثرات اصلی تیمار میکروبی و شوری و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر ثابت $1/\beta$ معادله الویچ ساده شده از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار شوری نشان داد که افزایش سطوح شوری سبب کاهش معنی‌دار ثابت $1/\beta$ که کاربرد هر سه تیمار میکروبی سبب کاهش معنی‌دار ثابت $1/\beta$ نسبت به تیمار شاهد شد به طوری که به ترتیب تیمارهای قارچ، قارچ-باکتری و باکتری بیشترین میزان کاهش را نسبت به تیمار شاهد داشتند. اثرات متقابل شوری و فعالیت میکروبی نشان داد که کاربرد تیمارهای میکروبی بر مقدار ثابت $1/\beta$ در سطوح مختلف شوری متفاوت بود (جدول ۸). بنابراین به طور کلی کاربرد تیمارهای میکروبی و شوری سبب کاهش سرعت آزادسازی روی شد. ثابت $1/\beta$ در معادله الویچ ساده شده نشانگر آزادسازی عنصر از سطوح داخلی و مکان‌هایی با انرژی جذب بالا می‌باشد که توسط پدیده پخشیدگی کنترل می‌شود (۶).

در این آزمایش مقادیر پارامتر b در همه‌ی تیمارهای کاربردی کمتر از ۰/۲۵ بود که نشان دهنده این است که بیش از یک سطح انتشار در آزاد شدن روی از خاک اهمیت دارد (۱۰)، بنابراین تاثیر دو مکانیسم مختلف در کنترل آزادسازی روی در اینجا نیز تایید می‌شود. به نظر می‌رسد که در ابتدا روی از مکان‌های با انرژی جذب کم آزاد شده و سپس توسط یک انتشار کند که شاید مربوط به آزادسازی از مکان‌های اتصال داخلی (Inside Binding Site) به سطوح خارجی و متعاقب آن به محلول خاک باشد، ادامه یابد (۱۰).

در معادله الویچ ساده شده ثابت‌های a_e و $1/\beta$ به ترتیب بیان کننده ثابت آهنگ آزادسازی اولیه یا فوری عنصر و سرعت آزادسازی عنصر از خاک می‌باشد (۲۸) (جدول ۸). اثرات اصلی تیمار شوری و میکروبی و اثرات متقابل آن‌ها بر ثابت a_e معادله الویچ ساده شده از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار شوری نشان داد که این افزایش معادل از S_0 به S_2 سبب افزایش معنی‌دار ثابت a_e شد که این افزایش معادل ۱۶/۹۶ درصد بود. مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمار میکروبی نشان داد که کاربرد هر سه تیمار میکروبی سبب افزایش معنی‌دار ثابت a_e نسبت به تیمار شاهد شد به طوری که بیشترین مقدار افزایش مربوط به کاربرد تیمار توام باکتری و قارچ و کمترین میزان افزایش مربوط به تیمار کاربرد مجزای باکتری بود. تاثیر کاربرد تیمارهای میکروبی در افزایش ثابت a_e در سطوح مختلف شوری متفاوت و با افزایش سطوح

جدول ۸- اثر کاربرد باکتری محرک رشد، قارچ میکوریز و سطوح شوری خاک بر ثابت های مدل سینتیکی الویچ ساده شده

Table 8- Effect of plant growth promoting rhizobacteria, mycorrhizae fungi and salinity levels application on constants of simple Elovich kinetic model				
	S_0	S_1	S_2	اثرات اصلی Main effects
a_e (mg Zn kg ⁻¹)				
C	0.541 l	0.610 j	0.677 g	0.609 D
B	0.597 k	0.630 i	0.724 d	0.650 C
F	0.647 h	0.699 e	0.732 c	0.692 B
B+F	0.690 f	0.736 b	0.764 a	0.730 A
اثرات اصلی Main effects	0.619 C	0.669 B	0.724 A	
$1/\beta$ (mg Zn kg ⁻¹ h ⁻¹)				
C	0.1057 a	0.09294 c	0.07902 f	0.09254 A
B	0.09984 b	0.09942 b	0.06751 j	0.08880 B
F	0.08193 e	0.06972 i	0.07230 h	0.07467 D
B+F	0.08449 d	0.07537g	0.07043 i	0.07666C
اثرات اصلی Main effects	0.09289 A	0.08431 B	0.07231 C	

*میانگین های دارای حروف بزرگ و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر در متن جدول از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیستند

*the means followed by same capital and minuscule letters in each columns or rows are not significantly differences statistically (p<0.05)

شیمیایی روی در مقدار و آهنگ آزادسازی روی مورد بررسی قرار

با استفاده از معادله‌های رگرسیون گام به گام تاثیر شکل‌های

دو تابتة نیز رابطه منفی معنی داری با شکل محلول و تبادل روی داشت. نتایج بالا نشان می دهد که هر چه میزان شکل محلول و تبادل روی بیشتر باشد، مقدار آزاد سازی اولیه روی بیشتر شده، در نتیجه از آهنگ آزاد سازی روی در طول زمان کاسته می شود. با توجه به نتایج رگرسیون قدم به قدم بین شکل های شیمیایی روی و ثابت های معادلات سینتیکی انتخابی، می توان گفت که در این شرایط شکل های شیمیایی محلول + تبادل، اکسید منگنز و آلی کنترل کننده سینتیک آزاد سازی روی از خاک تحت تاثیر کاربرد ریزجانداران میکروبی و شوری هستند. از آنجا که شکل محلول و تبادل نقش موثری را در کنترل آزاد سازی روی داشت و نتایج نشان داد که حدود ۸۰ درصد روی آزاد شده در همان ۲ ساعت اول و باقی مانده روی طی مدت زمانی حدود ۲۲ ساعت از خاک آزاد شد، می توان نتیجه گرفت که در مدت زمان آزاد سازی سریع روی از خاک (۲ ساعت اول)، روی از شکل محلول و تبادل که با انرژی کمتری در خاک نگهداری می شود آزاد شده و سپس نقش این شکل روی در آزاد سازی روی کم رنگ شده و احتمالاً آزاد سازی روی می تواند توسط شکل های مانند روی کربناتی و متصل به اکسیدها کنترل شود که یا با انرژی بیشتری در خاک نگهداری می شوند و با به نسبت دارای حلالیت کمتری هستند.

گرفت (جدول ۹). در معادلات سینتیکی سرعت دو تابتة و الوویج ساده شده، که در این معادلات ضریب های a و a_e آهنگ آزاد سازی اولیه روی را نشان می دهد، هر دو ثابت با شکل های محلول + تبادل و اکسید منگنز روی رابطه مثبت و با شکل آلی روی رابطه منفی معنی داری در سطح یک درصد داشتند. همچنین در معادله پخشیدگی پارابولیک ثابت q_0 که نشانگر مقدار آزاد سازی اولیه روی است با شکل محلول و تبادل روی، رابطه مثبت معنی دار و با شکل آلی رابطه منفی معنی داری داشت. این موضوع بیان کننده این است که با افزایش شکل محلول و تبادل مقدار آزاد سازی اولیه روی افزایش می یابد. از آنجا که کاربرد تیمارهای شوری و میکروبی سبب افزایش معنی دار شکل محلول و تبادل شدند و این شکل روی با انرژی کمی در خاک نگهداری می شود و به راحتی آزاد می شود، بنابراین می تواند دلیل مناسبی برای توجیه افزایش مقدار آزاد سازی اولیه روی در اثر کاربرد تیمارهای شوری و میکروبی باشد. احتمالاً دلیل رابطه منفی شکل آلی روی با مقدار آزاد سازی اولیه روی می تواند کاهش شکل آلی در اثر افزایش سطوح شوری باشد. همچنین ثابت های $1/\beta$ و K_p در معادله الوویج ساده شده و پخشیدگی پارابولیک رابطه منفی معنی داری در سطح یک درصد با شکل محلول + تبادل و رابطه مثبت معنی داری را با شکل آلی روی نشان دادند. همچنین پارامتر b در معادله سرعت

جدول ۹- معادلات رگرسیون گام به گام بین شکل های شیمیایی روی با ضرایب معادلات سینتیکی برتر تحت تاثیر تلقیح میکروبی و سطوح شوری خاک

Table 9- Stepwise linear regression between Zn chemical fractions and constants of selected kinetic models as affected by microbial inoculation and soil salinity levels

مدل سینتیکی Kinetic model	معادله رگرسیون خطی قدم به قدم Stepwise linear regression	ضریب تبیین R ²
Two-constant rate	$a = 0.256 (WEx) - 0.259 (OM) + 0.048 (MnOx) + 0.600$	0.85**
	$b = -0.124 (WEx) + 0.110 (OM) + 0.125$	0.70**
Simple Elovich	$a_e = 244 (WEx) - 0.264 (OM) + 0.0418 (MnOx) + 0.621$	0.85**
	$1/\beta = -0.049 (WEx) + 0.071 (OM) + 0.072$	0.56**
Parabolic diffusion	$q_0 = 0.347 (WEx) - 0.297 (OM) + 0.568$	0.80**
	$K_p = -0.0397 (WEx) + 0.0766 (OM) + 0.0533$	0.54**

** و * ns به ترتیب معنی دار در سطح یک درصد، پنج درصد و غیر معنی دار، WEx، روی محلول و تبادل؛ OM، شکل روی متصل به مواد آلی؛ MnOx، شکل روی متصل به اکسید منگنز
** , * , ns are significant at 1(%), 5(%) and not significant respectively. WEx: Zn-water soluble, OM: Zn-organic matter, MnOx: Zn-manganese oxide

کاهش و مقدار SE افزایش یافت، بنابراین مدل های سینتیکی مرتبه ای توصیف خوبی را از آزاد سازی روی نداشتند. مدل های سینتیکی الوویج ساده شده، تابع توانی (سرعت دو تابتة) و پخشیدگی پارابولیک توصیف خوبی را از آزاد سازی روی نشان دادند. مدل برتر در توصیف آزاد سازی روی مدل الوویج ساده شده بود که دارای کمترین میانگین خطای استاندارد برآورد (SE) و بیشترین ضریب تبیین (R²)

نتیجه گیری کلی

الگوی آزاد شدن روی در همه تیمارهای کاربردی یکسان و به این صورت بود که در ابتدا سرعت آزاد شدن تند (در ۲ ساعت اول) و سپس توسط یک آهنگ کندتر ادامه یافت که احتمالاً نشان دهنده تاثیر دو سطح جذب با انرژی متفاوت در آزاد سازی روی می باشد. با افزایش مرتبه واکنش در مدل های سینتیکی مرتبه ای، مقدار R²

آزادسازی اولیه روی مربوط به تیمارهای قارچ-باکتری، قارچ، باکتری و شاهد بود درحالی که سرعت آزادسازی روی در تیمار کاربرد قارچ کمترین بود. به طور کلی افزایش سطوح شوری سبب افزایش آزادسازی اولیه روی و کاهش سرعت آزادسازی روی شد. رگرسیون گام به گام (stepwise) بین ثابت‌های مدل‌های سینتیکی انتخابی و شکل‌های شیمیایی روی در خاک نشان داد شکل محلول + تبادلی و آلی نقش موثری را در کنترل آهنگ آزادسازی روی داشتند.

بود، بنابراین به نظر می‌رسد که مکانیسم اصلی کنترل کننده آزادسازی روی در خاک مورد آزمایش پدیده پخشیدگی یا دیفیوژن (Diffusion) باشد. مقایسه میانگین ثابت‌های مدل‌های سینتیکی انتخاب شده نشان داد که کاربرد تیمار میکروبی سبب افزایش ثابت آهنگ آزادسازی اولیه روی و در نتیجه افزایش میزان آزادسازی اولیه روی نسبت به تیمار شاهد شد درحالی که سرعت آزادسازی روی در طول زمان نسبت به تیمار شاهد کمتر بود. به ترتیب بیشترین میزان

منابع

- 1-Aharoni C., Sparks D.L., Levinson S., and Revina I. 1991. Kinetics of soil chemical reactions: Relationship between empirical equations and diffusion models. *Soil Science Society of American Journal*, 55: 1307-1312.
- 2-Alloway B.J. 2004. Zinc in soils and crop nutrition. *International Zinc Association (IZA)*. <http://www.Zinc-crop.org>, pp: 128
- 3-Alloway B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environment and Geochemical Health*, 31: 537-548.
- 4-Banai M.G., Moemeni A., Baybordi M., and Malakouti M.G. 2004. Iranian soil, new developments in the diagnosis and management. Sana publication, Tehran, Iran. (In Persian)
- 5-Baranimotlagh M., and Gholami M. 2013. Time dependent zinc desorption in some calcareous soils of Iran. *Pedosphere*, 23(2): 185-193.
- 6-Bedrossian S., and Singh B. 2004. Kinetics of potassium release from vertisols from northern NSW. In: *Super Soil : Australian New Zealand Soils Conference, December 2004*. Sydney, University of Sydney, Australia.
- 7-Bremner J.M. 1996. Nitrogen- Total. P. 1085- 1122. In: D. L. Sparks. et al., (eds) *Methods of Soil Analysis*. Part III. 3rd ed, Am. Soc. Argon., Madison, WH.
- 8-Chien S., and Clayton W.R. 1980. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44:265-286.
- 9-Dodd J.C., Burton C.C., and Jeffries P. 1987. Phosphatase activity associated with the roots and the rhizosphere of plants infected with vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. *New Physiology*, 107: 163-172.
- 10-Dang Y.P., Dalal R.C., Edwards D.G., and Tiller K.G. 1994. Kinetics of zinc desorption from Vertisols. *Soil Science Society of American Journal*, 58: 1392-1399.
- 11-Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis, hydrometer method. P. 404-408. In A. Klute et al(eds). *Methods of soil analysis*. 2 nd ed. Part 1. America Society of Agronomy, Madison. WI.
- 12-Ghasemi Fasaee R., Tavajjoh M., Oloma V., Molazem B., Maftoun M., Ronaghi A., Karimian N., and Adhami E. 2007. Copper release characteristics in selected soils from southern and northern Iran. *Australian Journal of Soil Research*, 45: 459-464.
- 13-Ghasemi-phasaei R., Maftoun N., Olama V., Molazem B. and Tavajjoh M. 2009. Manganese release characteristics of highly calcareous soils. *Communication in Soil Science and Plant Anal.*, 40(7-8): 1171-1182.
- 14-Gholami A., Shahsavandi S., and Nezarat S. 2009. The effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on germination, seedling growth and yield of maze. *Proceeding of World Academy of Science. Engineering and Technology*, 37: 2070-3740.
- 15-Gholami M., Baranimotlagh M., Dardipour A., and Olamai M. 2011. Simulation of Zinc releases kinetics from different soils of Golestan province using DTPA extractant. *Soil and Water Protection Research*, 18(2):123-139. (in Persian with English abstract)
- 16-Habashy N.R., and Abo-Zied M.M.A. 2005. Impact of Cd-Pb polluted water on growth and elemental composition of onion plants growth on a calcareous soil inoculated with mycorrhiza. *Egyptian Journal of Applied Science*, 20: 586-594.
- 17-Havlin J.L., Westfall D.G., and Olsen S.R. 1985. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. *Soil Science Society of American Journal*, 49: 371-376.
- 18-Helmke P.H., and Spark D.L. 1996. Potassium. p: 551-574. In Sparks D.L., et al. *Methods of Soil Analysis*. SSA, Inc. ASA, Inc. Madison, WI
- 19-Kamali, S., Ronaghi, A., and Karimian, N. 2011. Soil Zinc Transformations as Affected by Applied Zinc and Organic Materials. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 42(9): 1038-1049
- 20-Kandpal G., Srivastava P.C., and Ram B. 2005. Kinetics of desorption of heavy metals from polluted soils: influence of soil type and metal source. *Water Air Soil Pollution*, 161: 353-363.
- 21-Kim T.W., and Lei X.G. 2005. An improved method for a rapid determination of phytase activity in animal feed.

- Journal of Animal Science, 83: 1062–1067
- 22-Lehmann R.G., and Harter R.D. 1984. Assessment of copper-soil bond strength by desorption kinetics. Soil Science Society of American Journal, 48: 769-772.
- 23-Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of American Journal, 42: 421-428.
- 24-Lindsay W.L., and Cox F.R. 1985. Micronutrient soil testing for the tropics. Fertilizer Research 7, 169–200.
- 25-Loeppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and Gypsum. p: 437-474. In Sparks D.L., et al. Methods of Soil Analysis. SSSA, Inc. ASA, Inc. Madison, WI.
- 26-Maftoun M., and Karimian N. 1989. Relative efficiency of two zinc sources for maize (*Zea mays* L.) in two calcareous soils from an arid area of Iran. Agronomy, 9: 771–775.
- 27-Martin H.W., and Sparks D.L. 1983. Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils. Soil Science Society of American Journal, 47: 883–887.
- 28-Mengel K., Rahmtullah H. and Dou H. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-driven soils. Soil Science, 163: 805-813.
- 29-Mehboob I., Naveed M., and Zahir Z.A. 2009. Rhizobial Association with Non-Legumes: Mechanisms and Applications. Critical Reviews in Plant Science, 28: 432–456.
- 30-Motaghian H.R. and Hosseinpour A. 2013. Characteristics Change of copper release in wheat rhizosphere of some calcareous soils. Soil and Water Research, 44(1): 107-122. (in Persian with English abstract)
- 31-Nelson D.W. and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. P. In D. L. Sparks et al., (eds). Methods of soil analysis. Part III. 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
- 32-Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Cric. 939. U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- 33-Orhan E., Estiken A., Ercisli S., Taran M., and Sahin, F. 2006. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient contents in organically growing raspberry. Scientia Horticulture, 11: 38-43.
- 34-Page A.L., Changeand A.C., and Adriano D.C. 1996. Deficiencies and Toxicities of Trace Elements. In: "Agricultural salinity assessment and management" No. 71 (Ed.) Tanji, K. K., pp. 138-160. Amer. Soc. Civil Eng., New York
- 35-Poletti S., Gruissen W., and Sautter C. 2004. The nutritional fortification of cereals. Current Opinion Biotechnology, 15: 162–165
- 36-Qadir M., Qureshi R.H., and Ahmed N. 1997. Nutrient Availability in a Calcareous Saline-sodic Soil during Vegetative Bioremediation. Arid Soil Research, 11: 343-352.
- 37-Rattan R.K., and Sharma P.D. 2004. Main micronutrients available and their method of use. Proceedings IFA International Symposium on Micronutrients, 1-10.
- 38-Ravikovitch S., Margolin M., and Navrot J. 1968. Zinc Availability in Calcareous Soils: I. Comparison of Chemical Extraction Methods for Estimation of Plant Availability Zinc. Soil Science, 105: 57-61.
- 39-Reyhanitabar A., and Karimian N. 2008. Kinetics of copper desorption of selected calcareous soils from Iran. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science, 4(3): 287-293.
- 40-Reyhanitabar A., and Gilkes R.J. 2010. Kinetics of DTPA extraction of zinc from calcareous soils. Geoderma, 154: 289-293.
- 41-Reyhanitabar A., Ardalan M., Gilkes R.J. and Savaghebi J. 2010. Zinc sorption characteristics of some selected calcareous soils of Iran. Journal of Agricultural Science and Technology, 12: 99-110.
- 42-Rupa T.R., Tomar K.P., Damidar Reddy, D., and Subba Rao, A. 2000. Time-dependent zinc desorption in soils. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 31: 2547-2563.
- 43-Sinha M.K., Dhillon S.K., and Dhillon K.S. 1977. Zinc chelate reaction in alkaline soils. Australian Journal of Soil Research, 15: 103–113.
- 44-Singh, J.P., Karwarsa, S.P.S., and Singh, M. 1988. Distribution and forms of copper, iron, manganese, and zinc in calcareous soils of India. Soil Science, 146: 359-366.
- 45-Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cd and Pb solid phases. Soil Science Society of American Journal, 46: 260-264.
- 46-Subramanian K.S., Bharathi C., and Jegan R.A. 2008. Response of maize to mycorrhizal colonization at varying levels of zinc and phosphorus. Biology and Fertility of soil, 8: 317-328
- 47-Subramanian K.S., Charest C., Dwyer L.M., and Hamilton R.I. 1997. Effects of mycorrhizas on leaf water potential, sugar and P contents during and after recovery of maize. Canadian Journal of Botany, 75: 1582-1591.
- 48-Strawn D.G., and Sparks D.L. 2000. Effect of soil organic matter on the kinetics and mechanisms of Pb(II) sorption and desorption in soil. Soil Science Society of American Journal, 64:144-156.
- 49-Sparks D.L. 1989. Kinetics of soil chemical processes. Academic Press. San Diego. California. USA.
- 50-Steel R.G.D., and Torrie J.H. 1960. Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill, New York.
- 51-Thomas G.W. 1996. Soil and Soil acidity. Pp:475-490. In: D. L. Sparks et al., (eds). Methods of Soil Analysis. Part III. 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.

- 52-Uygun V., and Rimmer D.L. 2000. Reaction of zinc with iron coated calcite surface at alkaline pH. *Europ. Journal of Soil Science*, 51, 511–516.
- 53-Wamberg C., Christensen S.I., Jakobsen A.K., Muller I., and Sorensen S.J. 2003. The mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) affects microbial activity in the rhizosphere of pea plants (*Pisum sativum*). *Soil Biology and Biochemistry*, 35: 1349–1357
- 54-Wright S.F., and Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.
- 55-Yildirim E., Turan M., and Donmez M.F. 2008. Mitigation of salt stress in radish (*Raphanus Sativus* L.) by plant growth promoting rhizobacteria. *Roumanian Society of Biological Science*, 13 (5): 3933-3943.
- 56-Zahedifar M., Karimian N., and Yasrebi, J. 2012. Influence of applied zinc and organic matter on zinc desorption kinetics in calcareous soils, *Archive of Agronomy and Soil Science*, 58:2, 169-178.

Simulation of Zinc Release Affected by Microbial Inoculation and Salinity Levels in a non-sterile Calcareous Soil Using kinetic Models

H. R. Boostani^{1*} – M. Chorom² – A. Moezzi² – N. Karimian³ – N. Enayatizamir² – M. Zarei³

Received: 23-11-2014

Accepted: 04-01-2016

Introduction: Zinc (Zn) is an important nutrient element for humans and plants that controls many biochemical and physiological functions of living organisms. Zinc deficiency is common in high pH, low organic matter, carbonatic, saline and sodic soils. Salinity is a major abiotic environmental stresses that limits growth and production in arid and semi-arid regions of the world. Bioavailability of Zn is low in calcareous and saline soils having high levels of pH and calcium. Desorption of Zinc (Zn) from soil as influenced by biological activities is one of the important factors that control Zn bioavailability. Few reports on the effects of salinity on the availability and desorption kinetics of Zn are available. Rupa *et al.* (2000) reported that increasing the salt concentration led to increase Zn desorption from soil due to ion competition on soil exchangeable sites. Different kinetic equations have been used to describe the release kinetics of nutrients. Reyhanitabar and Gilkes (2010) found that the power function model was the best equation to describe the release of Zn from some calcareous soil of Iran, whereas Baranimotlagh and Gholami (2013) stated that the best model for describing Zn desorption from 15 calcareous soils of Iran was the first-order equation. less attention has been paid to kinetics of Zn release by DTPA extractant over time by inoculation of plant growth promoting rhizobacteria and mycorrhizae fungi in combination with soil salinity. The objective of this study was to evaluate the effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizae fungi (MF) inoculation on release kinetic of Zn in a calcareous soil at different salinity levels after in cornplantation

Materials and Methods: A composite sample of bulk soil from the surface horizon (0-30 cm) of a calcareous soil from southern part of Iran was collected, air dried, passed through 2 mm sieve, and thoroughly mixed. Routine soil analysis was performed to determine some physical and chemical properties. The experiment was conducted in the greenhouse of agriculture college of Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. A factorial experiment as a completely randomized design with three replications was conducted in greenhouse conditions. The first factor consisted of salinity levels (0, 15 and 30 $\text{cmol}_{\text{c}} \text{kg}^{-1}$ salt supplied as a 3:2:1 Na:Ca:Mg chloride salts) and the second factor was microbial inoculation (without inoculation, fungi, bacteria, bacteria + fungi). Soil samples were extracted using DTPA extractant for periods of 0.5, 1, 2, 6, 12 and 24 hours. Cumulative Zn released (q) as a function of time (T) was evaluated using seven different kinetic models. A relatively high values of coefficient of determination (r^2) and low values of standard error of estimate (SEE) were used as criteria for the selection of the best fitted models. Statistical analysis of data was done using MSTATC package (Mstatc, 1991). Comparison between means was performed using Duncan's multiple range test (DMRT) at the significant level of $P < 0.05$. Also, charts were drawn by excel computer package.

Results and Discussion: Investigation of Zn release patterns showed that the control and all treated soils had a uniform pattern of Zn release. Overall, Zn release patterns were generally characterized by an initial fast reaction at first two hours, followed by slower continuing reaction. It seems likely that the release of zinc is controlled by two different mechanisms. Two-step process of releases (rapid and subsequent slow) is attributed to the existence of places with different energy. The use of all microbial treatments increased the initial release of Zn compared to control. The most and the least Zn initial release observed in fungi-bacterial and bacterial treatment respectively. By application of all microbial treatments, Zn release rate declined compared to control and the lowest decrease observed in fungal treatment. In general, Zn initial release was increased and Zn desorption rate was decreased by increasing of salinity levels. Also, soluble and exchangeable forms of Zn had the highest influence on Zn release control.

1- Assistant Professor of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran

(*- Corresponding Author Email: Hamidboostani@gmail.com)

2, 3, 5-Associate Professors and Assistant professor of Soil Science, College of Agriculture, Shahid Chamran University, Ahvaz, Respectively

4 And 6- Professor and Associate Professor of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University

Conclusions: Results showed that simplified Elovich, two constant rate and parabolic diffusion kinetics models showed good description of the Zn release. Based on the highest correlation coefficient and the lowest mean standard error of the estimate, simplified elovich determined as the best kinetic model. So it seems that the main mechanism controlling the Zn release in the tested soil is diffusion phenomena.

Keywords: Diffusion, Elovich Equation, Mycorrhizae Fungi, PGPR, Water and Soluble Form