

تغییر ویژگی‌های آزادشدن مس در ریزوسفر گندم (*Triticum aestivum. L*) تعدادی از خاک‌های آهکی

حمیدرضا متقیان^{۱*}، علیرضا حسین پور^۲

۱. دانشجوی دکتری خاک‌شناسی، دانشگاه شهرکرد

۲. استاد گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۱۱/۲۹)

چکیده

ریزوسفر ناحیه‌ای کوچک با خصوصیات شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی متفاوت از توده خاک است. اطلاعات درباره اثر ریزوسفر بر آزادشدن مس کم است. در این تحقیق سرعت آزادشدن مس در ریزوسفر گندم^۱ در ده خاک آهکی، با استفاده از ریشه‌دان (رایزوباکس)، در شرایط گل‌خانه بررسی شد. سینتیک آزادسازی مس از طریق عصاره‌گیری خاک با استفاده از DTPA-TEA در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس به مدت ۱ تا ۵۰۴ ساعت مطالعه شد. همچنین مقدار مس قابل استفاده با عصاره‌گیرهای شیمیایی (DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیج ۳) برآورد شد. نتایج نشان داد مقدار مس قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری کمتر از خاک‌های غیرریزوسفری است. همچنین مقدار مس جمع‌ی آزادشده در خاک‌های ریزوسفر به صورت معناداری ($P < 0.05$) کمتر از خاک‌های غیرریزوسفری بود. مس آزادشده از خاک‌های ریزوسفری در دامنه ۴/۸۸ تا ۱۰/۶۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و در خاک‌های غیرریزوسفری در دامنه ۶/۳۸ تا ۱۲/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. نتایج نشان داد معادله‌های انتشار پارابولیکی مرتبه اول و تابع توانی توانایی توصیف سرعت آزادشدن مس در خاک‌های ریزوسفر و غیرریزوسفر را دارند. همچنین سرعت آزادشدن مس در خاک ریزوسفری کمتر از خاک غیرریزوسفری بود. در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری ویژگی‌های آزادشدن مس با مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی همبستگی معناداری ($P < 0.05$) داشتند. همچنین ضریب سرعت (R) در معادله انتشار پارابولیکی در خاک ریزوسفری همبستگی معناداری ($P < 0.05$) با غلظت مس در بخش هوایی گندم داشت. نتایج نشان داد ویژگی‌های آزادشدن مس در خاک ریزوسفری متفاوت از خاک‌های غیرریزوسفری است.

کلیدواژگان

ریزوسفر، سینتیک آزادسازی مس، عصاره‌گیر، گندم.

* نویسنده مسئول : hrm_61@yahoo.com

مقدمه

مس از عناصر غذایی ضروری برای گیاهان و حیوانات است. نقش اصلی این عنصر در گیاه فعال کردن آنزیم‌های واکنش اکسایش - کاهش است (Khoshgoftarmansh, 2007). کمبود مس در خاک‌های آلی و خاک‌های شنی، که به‌طور معمول مقدار مس کل کمی دارند، و در خاک‌های اسیدی و خاک‌های آهکی، که مس قابل استفاده کمی دارد، مشاهده می‌شود. پژوهش انجام‌شده در تعدادی از مزارع گندم نشان می‌دهد حدود ۲۴ درصد از خاک‌های زیر کشت گندم آبی مورد مطالعه در ایران دچار کمبود مس‌اند (Balali et al, 1999).

ریزوسفر ناحیه دربرگیرنده ریشه‌های فعال مؤثر بر خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی خاک در نظر گرفته می‌شود (Chen et al, 2006). بنابراین، خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی خاک ریزوسفری متفاوت از خاک غیرریزوسفری است (Wang et al, 2002). خصوصیات متفاوت خاک ریزوسفری می‌تواند بر شکل‌های شیمیایی عناصر و قابلیت استفاده آنها مؤثر باشد (Dessureault-Rompere et al, 2008). گیاهان توانایی تغییر قابلیت استفاده عناصر را از طریق ترشحات ریشه یا تغییر pH در ریزوسفر دارند (Wang et al, 2002). Szmigielska et al. (1996) گزارش کردند که ریشه‌های گیاه به‌صورت پیوسته ترکیباتی مانند قندها، اسیدهای آمینه، اسیدهای آلی با وزن ملکولی کم، و ویتامین‌ها را آزاد می‌کنند که ریزجانداران می‌توانند از آنها استفاده کنند و خصوصیات خاک ریزوسفری را تغییر دهند.

عصاره‌گیرهای شیمیایی برای ارزیابی مس در فاز جامد استفاده شده‌اند. عصاره‌گیری یک مرحله‌ای روشی ساده برای برآورد مقدار قابل استفاده عناصر

است (Young et al, 2006). معمولاً برای برآورد مقدار مس قابل استفاده از کلات‌کننده‌های DTPA و EDTA استفاده می‌شود (Lindsay and Cox, 1985). این کی‌لیت‌کننده‌ها با مس کمپلکس ایجاد می‌کنند و غلظت مس را در محلول خاک کاهش می‌دهند. بنابراین، جذب مس به‌وسیله ریشه‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند (Dang et al, 1994). با این حال، مقدار مس آزادشده با زمان و در طول دوره رشد گیاه تغییر می‌کند. بنابراین، بررسی تغییرات مقدار مس با زمان در برآورد مقدار قابل استفاده این عنصر برای گیاه مفید است. آزاد شدن مس از سطوح تبادل، مواد آلی، کانی‌ها، و سایر ترکیبات حد واسط به درون محلول خاک کنترل‌کننده تحرک و قابلیت استفاده مس برای گیاه است (Singh et al, 1994). سرعت آزاد شدن مس جذب‌شده از خاک عاملی بسیار مهم در تأمین پیوسته عناصر غذایی است (Dang et al, 1994). بررسی سرعت آزاد شدن مس در خاک‌ها و کانی‌های رسی را محققان مختلف بررسی کرده‌اند (Khater and Zaghoul, 2002; Covelo et al, 2006; Reyhanitabar and Karimian, 2008; Ghasemi Fasaei et al, 2007). در مطالعات محدودی در ایران سینتیک آزاد شدن مس بررسی شده است (Reyhanitabar and Karimian, 2008; Ghasemi Fasaei et al, 2007). با وجود این، مطالعه سینتیک آزاد شدن مس در خاک ریزوسفری انجام نشده است. Ghasemi Fasaei et al (2007) سینتیک آزاد شدن مس از خاک‌های آهکی جنوب ایران را بررسی کردند. آنان گزارش کردند معادله‌های تابع توانی و الوویچ ساده بهترین مدل‌های توصیف‌کننده آزاد شدن مس‌اند. Reyhanitabar and Karimian (2010) در مطالعه‌ای روی دوازده نمونه خاک آهکی جمع‌آوری‌شده از استان‌های قزوین و تهران سینتیک آزاد شدن مس را با استفاده از DTPA-TEA به مدت ۱۹۲ ساعت بررسی

کشت گل خانه‌ای

در این تحقیق برای کشت گندم از ریشه‌دان^۱ (Wang et al, 2002; Motaghian et al, 2012) استفاده شد. ریشه‌دان‌های مورد استفاده ۲۰۰ میلی‌متر طول، ۱۳۰ میلی‌متر عرض، و ۲۰۰ میلی‌متر ارتفاع داشتند و شامل سه بخش بودند. بخش مرکزی یا ناحیه ریزوسفری، با ۳۰ میلی‌متر عرض، با استفاده از پارچه نایلونی متخلخل (مش ۳۰۰) از دو بخش غیرریزوسفری، با ۵۰ میلی‌متر عرض، جدا شد (شکل ۱). مقدار ۴/۵ کیلوگرم خاک در سه تکرار به هر ریشه‌دان منتقل شد. به هر ریشه‌دان ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره به صورت تقسیط در سه مرحله، 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 ریشه‌دان اضافه شد. قبل از کشت، بذره‌های گندم^۲ رقم بک‌گراس روشن، با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم (۳٪)، استریل شدند. سپس درون آب مقطر قرار گرفتند و در کاغذ صافی جوانه زدند. سه بذر در ناحیه مرکزی هر ریشه‌دان کشت شد. در طول مدت رشد مراقبت‌های لازم انجام و سعی شد 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 هشت هفته پس از جوانه‌زدن برداشت شدند. ریشه‌دان‌ها باز شد و خاک بخش مرکزی (خاک ریزوسفری) با استفاده از الک از ریشه‌ها جدا و در نهایت ریشه‌های باقی‌مانده در خاک ریزوسفری با انبرک برداشته شدند. همچنین دو ناحیه

کردند. ایشان گزارش کردند که معادله تابع توانی بهترین مدل توصیف‌کننده سرعت آزادشدن مس در همه خاک‌های مورد مطالعه است. مطالعه سینتیک آزادشدن مس در خاک‌ها، به خصوص ریزوسفر، به منزله محیطی که ریشه گیاه به صورت مستقیم در تماس با خاک است و به دلیل همین تماس ویژگی‌های شیمیایی خاک ریزوسفری از خاک غیرریزوسفری متفاوت است، می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره توانایی خاک‌ها در تأمین مس قابل استفاده در اختیار قرار دهد. هدف این تحقیق بررسی اثر ریزوسفر بر ویژگی‌های آزادشدن مس و بررسی ارتباط این ویژگی‌ها با مقدار مس قابل استفاده بود.

مواد و روش‌ها

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

این تحقیق با استفاده از ده نمونه خاک لایه سطحی (۰ - ۳۰ cm) استان چهارمحال و بختیاری، که از نظر مس قابل استفاده و درصد رس و درصد کربنات کلسیم معادل تغییرات زیادی داشتند، انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، pH خاک در سوسپانسیون دو به یک آب به خاک (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره دو به یک آب به خاک (Rhoades, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (Loeppert and Suarez, 1996)، گنجایش تبادل کاتیونی به روش استات سدیم در pH برابر با ۷ (Sumner and Miller, 1996)، ماده آلی به روش اکسیداسیون مرطوب (Nelson and Sommers, 1996) تعیین شدند. مقدار کل مس با استفاده از هضم با اسید نیتریک ۴ مولار (Sposito et al, 1982) تعیین شد.

1. Rhizobox .

2. Triticum aestivum L.

برآورد شد (Nelson and Sommers, 1996). کربن بیوماس میکروبی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری با استفاده از روش تدخین با کلروفرم و خواباندن اندازه‌گیری شد (Jenkinson and Powlson, 1976).

مس قابل استفاده

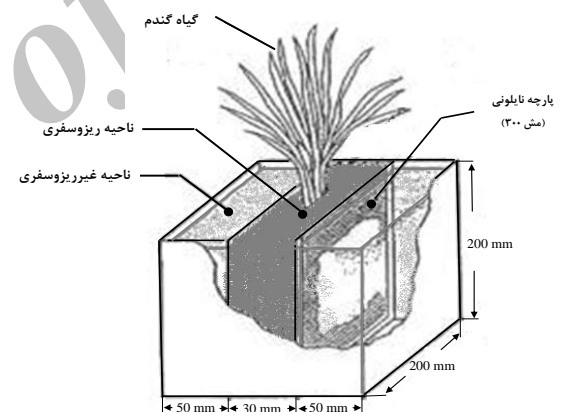
مس قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری، با استفاده از روش‌های عصاره‌گیری AB-DTPA-TEA (Lindsay and Norvell, 1978) و مهلیچ DTPA (Soltanpour and Schwab, 1977) و مهلیچ (Mehlich, 1984) اندازه‌گیری شد.

سینتیک آزاد شدن مس

برای مطالعه سرعت آزاد شدن مس در نمونه‌های خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری، ۲ گرم خاک با ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره‌گیر AB-DTPA-TEA در لوله‌های سانتریفیوژ به صورت جداگانه ریخته شد. نمونه‌ها در دستگاه انکوباتور در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس قرار داده شدند. ۱۵ دقیقه قبل از قراردادن نمونه‌ها در انکوباتور و ۱۵ دقیقه قبل از پایان هر دوره نمونه‌ها به وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند. خاک‌ها در زمان‌های ۱، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۳۳۶، ۵۰۴ ساعت پس از اضافه کردن محلول‌ها عصاره‌گیری شدند. بدین منظور سوسپانسیون به مدت ۵ دقیقه با دستگاه سانتریفیوژ با ۳۰۰۰ دور در دقیقه صاف، محلول رویی جدا، ۲۰ میلی‌لیتر از محلول عصاره‌گیر دوباره اضافه، و پس از ۱۵ دقیقه تکان دادن به وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی نمونه‌ها به انکوباتور منتقل شدند.

مس موجود در محلول عصاره‌گیری شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل جی‌بی‌سی، ۹۳۲) اندازه‌گیری شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، معادلات سرعت مرتبه صفر، مرتبه اول، تابع‌نمایی، انتشار

غیرریزوسفری با هم مخلوط و هر دو نمونه (خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری) برای آزمایش‌های بعدی آماده شدند. بخشی از خاک‌ها در دمای ۴ درجه سلسیوس برای تعیین مقدار کربن آلی محلول (DOC) و کربن بیوماس میکروبی (MBC) نگهداری و بقیه برای آزمایش‌های بعدی هواخشک شدند. بخش‌های هوایی گندم با آب مقطر شسته شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آن تهویه‌دار خشک شد و مقدار مس در اندام هوایی با روش خشک‌سوزانی عصاره‌گیری (Campbell and Plank, 1998) و مس در عصاره گیاهی با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل جی‌بی‌سی، ۹۳۲) تعیین شد.



شکل ۱. طرحی از ریشه‌دان مورد استفاده در این تحقیق

در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری مقدار کربن آلی محلول و کربن بیوماس میکروبی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری DOC از عصاره ۱ به ۲ خاک تازه به آب مقطر استفاده شد (Corre et al, 1999). سپس سوسپانسیون در دمای اتاق به مدت دو ساعت تکان داده شد و پس از پنج دقیقه سانتریفیوژ 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

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum(Cu - Cu^*)^2}{n-2}}$$

زیر محاسبه گردید:

در این معادله Cu و Cu* به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورده شده مس در زمان t و n تعداد مشاهدات هستند.

پارابولیکی و الویچ ساده (جدول ۱) بر داده‌های تجمعی آزاد شدن مس برآزش و براساس ضریب تشخیص و خطای استاندارد برآورد بهترین مدل‌ها برای توصیف آزاد شدن مس محاسبه و ضرایب این معادلات تعیین شدند. خطای استاندارد برآورد (SEE) از رابطه

جدول ۱. معادلات سینتیکی استفاده شده

منبع	مدل	معادله
Martin and Sparks (1983)	$(Cu_0 - Cu_t) = a - K_0 \times t$	واکنش مرتبه صفر
Martin and Sparks (1983)	$\ln(Cu_0 - Cu_t) = a - K_1 \times t$	واکنش مرتبه اول
Havlin et al. (1985)	$Cu_t = a + Rt^{0.5}$	انتشار پارابولیکی
Havlin et al. (1985)	$\ln Cu_t = \ln a + b \ln t$	تابع توانی
Havlin et al. (1985)	$Cu_t = a + 1/\beta \ln t$	الویچ ساده

Cu₀: مقدار مس آزاد شده (mg kg⁻¹) بعد از ۵۰۴ ساعت، Cu_t: مقدار مس آزاد شده (mg kg⁻¹) در زمان t و K₀, K₁, R, a, b و 1/β ضرایب معادله‌ها هستند.

تجزیه و تحلیل آماری

برای تعیین معنادار بودن تفاوت بین مقدار مس آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری از آزمون تی نمونه‌های جفت شده استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون (R) بین ویژگی‌های آزاد شدن مس با مس استخراج شده با عصاره گیرهای شیمیایی و غلظت مس در بخش هوایی گندم در سطح احتمال ۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17.0 تعیین شد.

یافته‌ها و بحث

خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه

برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهد خصوصیات خاک‌ها دامنه تغییرات وسیعی دارند. دامنه تغییرات رس ۲۵۰ تا ۵۴۷ گرم در کیلوگرم (متوسط ۴۴ گرم در کیلوگرم) و سیلت ۳۳ تا ۵۵ گرم در کیلوگرم (متوسط ۴۳ گرم در کیلوگرم) بود. خاک‌های مورد مطالعه دارای pH قلیایی و قابلیت

هدایت الکتریکی (EC) و مقدار کربن آلی پایین‌اند. تغییرات pH ۷/۵ تا ۸/۱ و قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. دامنه تغییرات کربن آلی و کربنات کلسیم معادل خاک‌ها، به ترتیب، ۳/۰۴ تا ۱۱/۸۶ و ۱۱۳ تا ۴۱۰ گرم در کیلوگرم بود. دامنه تغییرات گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۱/۵ تا ۲۲/۵ سانتی‌مول بار در کیلوگرم خاک بود. همچنین مقدار کل مس خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۱۵ تا ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

مقدار کربن آلی محلول و کربن بیوماس میکروبی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری در جدول ۳ آمده است.

نتایج این جدول نشان می‌دهد میانگین کربن آلی محلول و کربن بیوماس میکروبی در خاک ریزوسفری افزایش معناداری (P ≤ ۰/۰۱) نسبت به خاک‌های غیرریزوسفری دارد. در خاک ریزوسفری کربن آلی محلول در دامنه ۳۲ تا ۱۰۴ با میانگین ۶۵

میلی گرم کربن در لیتر و کربن بیوماس میکروبی دامنه ۱۱۹ تا ۲۷۸ با میانگین ۱۹۲ میلی گرم کربن در کیلوگرم بود.

میلی گرم کربن در لیتر و کربن بیوماس میکروبی دامنه ۱۳۹ تا ۴۳ با میانگین ۲۷۹ میلی گرم کربن در کیلوگرم بود. درحالی که در خاک‌های غیرریزوسفیری کربن آلی محلول در دامنه ۲۱ تا ۷۶ با میانگین ۴۸

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	رس	سیلت	کربنات کلسیم معادل (g kg ⁻¹)	کربن آلی	pH	EC (dS m ⁻¹)	گنجایش تبادل کاتیونی (cmol _c kg ⁻¹)	مس کل (mg kg ⁻¹)
۲	۵۳۱	۴۴۲	۳۵۶	۳/۰۴	۸/۱	۰/۱۳	۱۹/۳	۲۳
۳	۴۸۷	۳۸۶	۲۹۴	۵/۱۰	۷/۹	۰/۱۲	۲۲/۵	۱۹
۴	۴۶۱	۴۲۴	۲۶۴	۷/۱۱	۷/۸	۰/۱۴	۲۱/۶	۱۸
۵	۴۱۱	۴۱۶	۳۲۲	۵/۳۹	۸/۱	۰/۱۳	۱۶/۰	۱۸
۶	۳۷۱	۴۳۹	۳۲۵	۸/۰۴	۷/۶	۰/۱۶	۱۵/۶	۱۷
۷	۲۵۰	۳۳۴	۴۱۰	۴/۷۱	۷/۷	۰/۲۱	۱۱/۵	۱۵
۸	۳۷۶	۵۴۶	۲۳۱	۱۱/۸۶	۸/۱	۰/۲۴	۱۷/۹	۲۱
۹	۴۸۳	۴۶۱	۱۱۳	۱۱/۶۲	۷/۸	۰/۲۵	۱۸/۵	۲۱
۱۰	۴۸۶	۴۶۴	۱۴۸	۹/۷۰	۷/۹	۰/۲۳	۱۷/۹	۲۵

جدول ۳. کربن آلی محلول و کربن بیوماس میکروبی در خاک‌های ریزوسفیری و غیرریزوسفیری

شماره خاک	کربن آلی محلول (mg C L ⁻¹)		کربن بیوماس میکروبی (mg C kg ⁻¹)	
	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر
۱	۶۲	۴۳	۴۳۶	۱۷۲
۲	۳۵	۲۴	۲۲۵	۱۵۲
۳	۳۲	۲۶	۱۶۷	۱۱۹
۴	۸۲	۷۳	۳۲۷	۲۲۸
۵	۴۷	۲۱	۲۴۵	۱۸۸
۶	۴۶	۳۶	۱۳۹	۱۲۹
۷	۴۷	۳۹	۲۰۸	۱۲۹
۸	۹۹	۷۱	۳۶۶	۱۷۸
۹	۱۰۴	۷۶	۳۹۶	۲۸۷
۱۰	۹۳	۷۴	۲۸۷	۲۳۸
میانگین*	۶۵ a	۴۸ b	۲۷۹ a	۱۹۲ b

* حروف لاتین متفاوت برای هر خصوصیت نشان‌دهنده تفاوت معنادار میانگین‌ها در سطح احتمال ۱ درصد هستند.

و DTPA-TEA، به ترتیب، ۴/۶۸-۸/۹۵ و ۳/۳۹-۵/۸۱ و ۱/۰۸-۲/۱۶ میلی گرم در کیلوگرم در خاک‌های ریزوسفری بود؛ درحالی‌که دامنهٔ مس عصاره‌گیری‌شده با استفاده از این عصاره‌گیرها در خاک غیرریزوسفری، به ترتیب، ۵/۴۹-۱۰/۰۴ و ۳/۴۹-۶/۵۸ و ۱/۵۶-۳/۰۹ میلی گرم در کیلوگرم بود. در خاک‌های ریزوسفری میانگین مس عصاره‌گیری‌شده با روش‌های AB-DTPA و مهلیچ ۳ و DTPA-TEA، به ترتیب، ۶/۷۰ و ۴/۶۷ و ۱/۷۷ میلی گرم در کیلوگرم بود؛ درحالی‌که میانگین مس عصاره‌گیری‌شده با استفاده از این عصاره‌گیرها در خاک‌های غیرریزوسفری، به ترتیب، ۷/۶۶ و ۵/۱۴ و ۲/۲۱ میلی گرم در کیلوگرم بود.

Bernal و همکاران (۱۹۹۴)، Dessureault-Rompre و همکاران (۲۰۰۸)، Tao و همکاران (۲۰۰۳)، و Motaghian و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که روابط پیچیدهٔ ریشه و خاک می‌تواند منجر به تغییر خصوصیات خاک ریزوسفری و در نتیجه تغییر شکل‌های شیمیایی عناصر در این محیط شود.

در خاک‌های غیرریزوسفری، بین کربن آلی محلول و کربن بیوماس میکروبی ضریب همبستگی معناداری به‌دست آمد ($r = 0.77^{**}$). در خاک‌های ریزوسفری کربن آلی محلول با کربن بیوماس میکروبی ضریب همبستگی معناداری ($r = 0.73^{**}$) داشت. Lynch and Lynch (۱۹۹۰) گزارش کردند که کربن آلی محلول در محیط ریزوسفر، به‌دلیل ترشحات ریشه، افزایش می‌یابد و بر همین اساس کربن بیوماس میکروبی زیاد می‌شود.

مس قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری غیرریزوسفری

مقادیر مس قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری در جدول ۴ آمده است. مس عصاره‌گیری‌شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی در خاک‌های ریزوسفری به‌صورت معنادار ($P < 0.01$) کمتر از خاک‌های غیرریزوسفری است. دامنهٔ مس عصاره‌گیری‌شده با روش‌های AB-DTPA و مهلیچ ۳

جدول ۴. مقادیر مس عصاره‌گیری‌شده (میلی گرم در کیلوگرم) با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف در خاک‌های ریزوسفر و غیرریزوسفر

شمارهٔ خاک	DTPA-TEA		AB-DTPA		مهلیچ ۳	
	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر
۱	۲/۱۶b	۲/۷۳a	۸/۹۵ b	۱۰/۰۴a	۵/۸۱ b	۶/۵۸a
۲	۱/۲۴b	۱/۹۰a	۶/۱۳ b	۷/۱۰ a	۴/۴۷ b	۵/۲۱ a
۳	۱/۰۸b	۱/۵۶a	۵/۰۲ b	۶/۳۹ a	۳/۶۳ b	۳/۸۴ a
۴	۱/۶۷a	۱/۷۴a	۶/۸۴ b	۷/۸۴ a	۵/۴۳ b	۵/۸۱ a
۵	۱/۴۸b	۱/۷۱a	۵/۶۰ b	۵/۷۹ a	۴/۴۲ b	۴/۴۹ a
۶	۱/۳۵b	۲/۱۵a	۵/۴۹ b	۷/۱۹ a	۳/۸۰ b	۴/۷۵ a
۷	۱/۲۷b	۱/۶۷a	۴/۶۸ b	۵/۴۹ a	۳/۳۹ a	۳/۴۹ a
۸	۲/۸۵b	۲/۹۹a	۸/۸۸ b	۹/۵۴ a	۵/۳۹ b	۵/۶۷ a
۹	۲/۰۰b	۲/۵۶a	۷/۲۴ b	۸/۰۱ a	۴/۶۴ b	۵/۱۱ a
۱۰	۲/۵۶ b	۳/۰۹a	۸/۱۳b	۹/۲۳ a	۵/۷۱ b	۶/۴۷ a
میانگین*	۱/۷۷ B	۲/۲۱ A	۶/۷۰ B	۷/۶۶ A	۴/۶۷ B	۵/۱۴ A

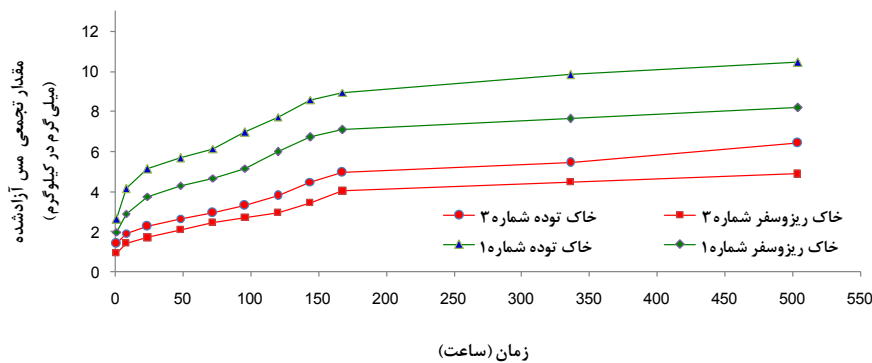
* حروف لاتین متفاوت در هر ستون نشان‌دهندهٔ تفاوت معنادار میانگین هر عصاره‌گیر در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری در سطح احتمال ۱ درصد است.

سینتیک آزاد شدن مس

نمودار مقدار تجمعی مس آزاد شده در مقابل زمان به عنوان نمونه برای خاک‌های ریزوسفر و غیر ریزوسفر خاک‌های شماره ۱ و ۳ در شکل ۲ آمده است. مقدار مس تجمعی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری به صورت معنادار ($P < 0.05$) کمتر از خاک‌های غیر ریزوسفری بود (جدول ۵). مقدار مس آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری در دامنه ۴/۸۸ (خاک شماره ۳) تا ۱۰/۶۶ (خاک شماره ۱۰) میلی گرم در کیلوگرم و در خاک‌های غیر ریزوسفری در دامنه ۶/۳۸ (خاک شماره ۵) تا ۱۲/۰۸ (خاک شماره ۱۰) میلی گرم در کیلوگرم بود.

خاک‌های ریزوسفری و غیر ریزوسفری شماره ۱۰ بیشترین مقدار مس عصاره‌گیری شده را داشتند. خاک شماره ۱۰ بیشترین مقدار مس کل را بین

خاک‌های مورد مطالعه داشت. همچنین این خاک (پس از خاک شماره ۹) کمترین کربنات کلسیم معادل (۱۴/۸٪) را بین خاک‌های مورد مطالعه داشت. در خاک‌های مورد مطالعه همبستگی بین مقدار مس آزاد شده پس از ۵۰۴ ساعت با کربنات کلسیم معادل (*۰/۷۵- در خاک ریزوسفری و *۰/۷۴- در خاک غیر ریزوسفری) و با کربن آلی (*۰/۷۶ در خاک ریزوسفری و *۰/۷۲ در خاک غیر ریزوسفری) معنادار بود (جدول ۶). همچنین در خاک‌های مورد مطالعه همبستگی بین مقدار مس آزاد شده با مقدار کل مس (*۰/۷۲ در خاک‌های ریزوسفری و *۰/۷۷ در خاک‌های غیر ریزوسفری) معنادار بود (جدول ۶). همبستگی مثبت و معنادار بین مس آزاد شده با DTPA با کربن آلی خاک را Brummer و همکاران (۱۹۸۳) گزارش کردند.



شکل ۲. مقدار مس آزاد شده در خاک‌های ریزوسفر و غیر ریزوسفر شماره ۱ و ۳

اکسیدهای آهن به واسطه ایجاد کی لیت با آهن منجر به تغییر خصوصیات سطحی (سطح ویژه، حفرات، بار، شکل سطح) اکسیدهای آهن می‌شود (Liu and Huang, 1999). تغییر خصوصیات اکسیدهای آهن، که از شکل‌های شیمیایی پیونددهنده با مس در خاک‌ها است، می‌تواند به تغییر آزاد شدن مس در ریزوسفر منجر شود.

بین خاک‌های مورد مطالعه علت کاهش مس عصاره‌گیری شده در خاک ریزوسفری می‌تواند تغییر جزءبندی مس در خاک ریزوسفری و بر همین اساس تغییر در قابلیت استفاده آن باشد (Wang et al, 2002). غلظت اسید سیتریک در ریزوسفر در دامنه 10^{-5} تا 10^{-3} مولار است (Robert and Berthelin, 1986). وجود لیگاندهای سیترات طی تشکیل

جدول ۵. مقدار تجمعی مس آزاد شده (میلی گرم در کیلوگرم) در خاک‌های ریزوسفر و غیر ریزوسفر

شماره خاک	ریزوسفر	غیر ریزوسفر
۱	۸/۱۸ b	۱۰/۴۴a
۲	۷/۱۵ b	۷/۷۷ a
۳	۴/۸۸ b	۶/۴۲ a
۴	۷/۰۲ b	۷/۴۵ a
۵	۵/۸۰ b	۶/۳۸ a
۶	۵/۸۴ b	۷/۷۴ a
۷	۶/۰۱ b	۷/۰۸ a
۸	۹/۹۳ b	۱۰/۳۲ a
۹	۹/۰۴ b	۱۰/۲۶ a
۱۰	۱۰/۶۶ b	۱۲/۰۸ a
میانگین	۷/۴۶ B	۸/۵۹ A

میانگین‌های دارای حروف لاتین متفاوت تفاوت معناداری در سطح احتمال ۵ درصد دارند.

جدول ۶. همبستگی بین مقدار مس آزاد شده پس از ۵۰۴ ساعت در خاک‌های ریزوسفر و غیر ریزوسفر با خصوصیات خاک

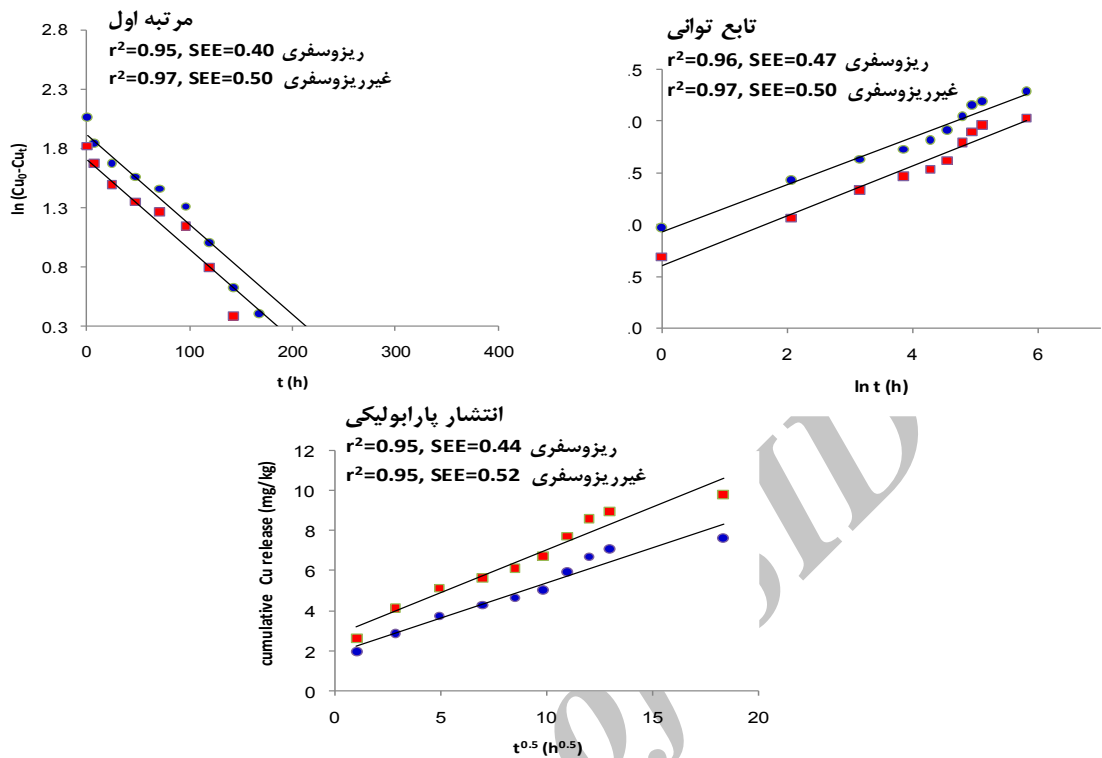
خاک	رس	سیلت	کربنات کلسیم معادل آلی	کربن آلی	مس کل
غیر ریزوسفر	۰/۳۴ ns	۰/۵۵ ns	۰/۷۴ *	۰/۷۲ *	۰/۷۷ *
ریزوسفر	۰/۲۷ ns	۰/۶۸ *	۰/۷۵ *	۰/۷۶ *	۰/۷۲ *

** معنادار در سطح احتمال ۱ درصد
* معنادار در سطح احتمال ۵ درصد
n غیر معنادار

کیلوگرم) را داشت (جدول ۷). همچنین معادله مرتبه اول با ضریب تشخیص و خطای استاندارد برآورد، به ترتیب، ۰/۹۵ و ۰/۳۵ میلی گرم در کیلوگرم و معادله تابع توانی با ضریب تشخیص و خطای استاندارد برآورد، به ترتیب، ۰/۹۵ و ۰/۴۷ میلی گرم در کیلوگرم توانایی توصیف سرعت آزاد شدن مس را در خاک‌های ریزوسفری داشتند.

در خاک غیر ریزوسفری معادله انتشار پارابولیکی دارای ضریب تشخیص (۰/۹۶) و کمترین خطای استاندارد برآورد (۰/۳۷ میلی گرم در کیلوگرم) بود. همچنین معادله مرتبه اول با ضریب تشخیص برابر با ۰/۹۵ و خطای استاندارد برآورد ۰/۳۸ میلی گرم در کیلوگرم و معادله تابع توانی با ضریب تشخیص ۰/۹۵ و خطای استاندارد برآورد ۰/۵۲ میلی گرم در کیلوگرم توانایی توصیف آزاد شدن مس را داشتند (جدول ۷). Khater and Zaghoul (۲۰۰۲) گزارش کردند که معادله‌های تابع توانی و انتشار پارابولیکی و مرتبه اول بهترین مدل‌های توصیف کننده سرعت و مکانیسم آزاد شدن مس‌اند.

نتایج برازش معادله‌های سینتیکی بر داده‌های تجمعی آزاد شدن مس در خاک‌های ریزوسفری و غیر ریزوسفری در جدول ۷ آمده است. مقایسه ضریب تشخیص (r^2) و خطای استاندارد برآورد (SEE) نشان داد معادله‌های تابع توانی و انتشار پارابولیکی و مرتبه اول بیشترین ضریب تشخیص و کمترین خطای استاندارد برآورد را دارند و می‌توانند سرعت آزاد شدن مس را توصیف کنند. برازش معادله‌های تابع توانی و انتشار پارابولیکی و مرتبه اول بر داده‌های تجمعی آزاد شدن مس در ریزوسفری و غیر ریزوسفری خاک شماره ۱ در شکل ۳ آمده است. در خاک ریزوسفری معادله انتشار پارابولیکی در توصیف سرعت آزاد شدن مس بیشترین ضریب تشخیص و حداقل خطای استاندارد برآورد (به ترتیب، ۰/۹۵ و ۰/۳۴ میلی گرم در



شکل ۳. مقدار مس تجمعی آزاد شده در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری

جدول ۷. ضریب تشخیص (r^2) و خطای استاندارد برآورد (SEE) معادلات مختلف مورد استفاده در توصیف مس آزاد شده در خاک‌های

ریزوسفری و غیرریزوسفری

شماره خاک	مرتبۀ صفر				مرتبۀ اول				انتشار پارابولی				الویج ساده				تابع توانی		
	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	SEE	r^2	
۱	۰/۱۸۰	۰/۱۸۸	۰/۱۸۰	۰/۱۰۸	۰/۱۹۵	۰/۴۰	۰/۹۷	۰/۵۰	۰/۹۵	۰/۴۴	۰/۹۵	۰/۵۲	۰/۸۷	۰/۱۷۲	۰/۸۹	۰/۸۰	۰/۴۷	۰/۹۷	۰/۵۰
۲	۰/۱۸۲	۰/۱۷۷	۰/۱۸۱	۰/۸۱	۰/۹۵	۰/۳۹	۰/۹۱	۰/۴۱	۰/۹۵	۰/۳۹	۰/۹۵	۰/۴۳	۰/۸۳	۰/۱۷۵	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۴۸	۰/۹۴	۰/۵۳
۳	۰/۱۸۷	۰/۴۵	۰/۱۸۶	۰/۵۳	۰/۹۷	۰/۱۸	۰/۹۴	۰/۲۸	۰/۹۷	۰/۲۲	۰/۹۵	۰/۳۱	۰/۸۱	۰/۵۲	۰/۷۸	۰/۶۶	۰/۳۴	۰/۹۱	۰/۴۸
۴	۰/۱۹۸	۰/۹۵	۰/۱۹۸	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۲۲	۰/۹۸	۰/۲۴	۰/۹۸	۰/۲۲	۰/۹۷	۰/۲۸	۰/۸۴	۰/۵۸	۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۴۱	۰/۹۵	۰/۴۴
۵	۰/۱۷۹	۰/۵۸	۰/۱۷۹	۰/۵۴	۰/۹۲	۰/۳۵	۰/۹۵	۰/۲۶	۰/۹۶	۰/۳۷	۰/۹۷	۰/۲۴	۰/۸۸	۰/۵۸	۰/۸۴	۰/۵۴	۰/۴۳	۰/۹۴	۰/۳۷
۶	۰/۱۸۶	۰/۵۲	۰/۱۸۵	۰/۷۲	۰/۹۶	۰/۲۷	۰/۹۵	۰/۳۱	۰/۹۶	۰/۲۸	۰/۹۶	۰/۳۷	۰/۸۱	۰/۶۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۴۳	۰/۹۴	۰/۵۴
۷	۰/۱۸۵	۰/۵۹	۰/۱۸۶	۰/۶۳	۰/۹۵	۰/۲۶	۰/۹۶	۰/۲۷	۰/۹۶	۰/۳۱	۰/۹۶	۰/۳۱	۰/۸۱	۰/۶۷	۰/۸۲	۰/۷۱	۰/۴۵	۰/۹۴	۰/۴۹
۸	۰/۱۷۹	۱/۳۶	۰/۱۷۹	۱/۲۱	۰/۹۲	۰/۵۱	۰/۹۳	۰/۵۵	۰/۹۱	۰/۴۸	۰/۹۵	۰/۵۲	۰/۸۸	۱/۱۸	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۵۳	۰/۹۶	۰/۵۵
۹	۰/۱۸۰	۱/۰۱	۰/۱۸۰	۱/۰۱	۰/۹۴	۰/۴۳	۰/۹۴	۰/۴۴	۰/۹۵	۰/۳۷	۰/۹۵	۰/۴۳	۰/۸۷	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۵۰	۰/۹۵	۰/۶۲
۱۰	۰/۱۸۳	۱/۰۶	۰/۱۸۱	۱/۲۳	۰/۹۵	۰/۴۸	۰/۹۵	۰/۵۲	۰/۹۶	۰/۴۰	۰/۹۶	۰/۴۶	۰/۸۵	۱/۰۰	۰/۸۷	۱/۰۱	۰/۶۵	۰/۹۶	۰/۶۳
میانگین	۰/۱۸۴	۰/۱۸۲	۰/۱۸۴	۰/۱۸۸	۰/۹۵	۰/۳۵	۰/۹۵	۰/۳۸	۰/۹۵	۰/۳۴	۰/۹۶	۰/۳۷	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۸۴	۰/۷۷	۰/۴۷	۰/۹۵	۰/۵۲

SEE برحسب $mg\ kg^{-1}$ و کلیه ضرایب تشخیص (r^2) در سطح احتمال ۵ درصد معنادارند.

کاهش مقدار ضریب b نشان‌دهنده افزایش سرعت آزادشدن عنصر در خاک‌هاست (Dang et al, 1994). بنابراین، سرعت آزادشدن مس از خاک ریزوسفری بیشتر از خاک غیرریزوسفری بود که می‌تواند به دلیل تغییر شکل‌های شیمیایی مس در خاک ریزوسفری نسبت به غیرریزوسفری باشد. Dang و همکاران او (۱۹۹۴) 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 آزادشدن روی اهمیت دارد. در اکثر خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری مورد مطالعه ضریب b در تابع توانی کمتر از $۰/۲۵$ بود؛ بنابراین بیش از یک سطح انتشار آزادشدن مس را کنترل می‌کند. آزادشدن مس از خاک‌دانه‌های درشت یا سطوح بیرونی خاک‌دانه‌های ریز و به دنبال آن انتشار از سطوح داخلی خاک‌دانه‌های ریز و درشت انجام می‌شود (Ghasemi Fasaie et al, 2007). همچنین انرژی آزادشدن مس به صورت نمایی افزایش می‌یابد یا به صورت تابع نمایی مس به وسیله DTPA از سطوح جامد آزاد می‌شود و به درون محلول انتشار می‌یابد (Dang et al, 1994). همچنین آزادشدن مس از شکل‌های مختلف آن نیز می‌تواند باعث تغییر در مقدار مس آزاد شود.

همبستگی بین ویژگی‌های آزادشدن مس با مس

قابل استفاده و خصوصیات خاک‌ها

همبستگی بین ضرایب معادله‌های سینتیکی استفاده‌شده در توصیف آزادشدن مس و مقدار مس آزادشده در طول زمان ۵۰۴ ساعت با مقدار مس عصاره‌گیری‌شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی در جدول ۹ آمده است.

ضرایب سرعت معادلات سینتیکی مورد استفاده در توصیف مس آزادشده در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری در جدول ۸ آمده است. در خاک‌های ریزوسفری ضریب R در معادله انتشار پارابولیکی ضریب پخشیدگی مس و دارای دامنه $۰/۲۲$ (خاک شماره ۳ و ۵) تا $۰/۴۵ \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1/2}$ (خاک شماره ۱۰) بود. ضریب K_1 در معادله مرتبه اول شیب خط و ضریب سرعت آزادشدن مس و دارای دامنه $۱۰^{-۴} \times ۵۳/۵۱$ (خاک شماره ۵) تا $۱۰^{-۴} \times ۸۲/۰۲$ (خاک شماره ۲) بود. ضریب b در معادله تابع توانی نشان‌دهنده سرعت آزادشدن مس بود. این ضریب در خاک‌های ریزوسفری دارای دامنه $۰/۲۲$ (خاک شماره ۵) تا $۰/۲۸ \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (خاک شماره ۳) بود. تفاوت بین مقادیر b نشان‌دهنده تفاوت توانایی خاک‌ها در تأمین مس بود. در مقابل در خاک‌های غیرریزوسفری ضریب R دارای دامنه $۰/۲۵$ (خاک شماره ۳) تا $۰/۵۰ \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1/2}$ (خاک شماره ۱۰) بود. ضریب K_1 در معادله مرتبه اول شیب خط و ضریب سرعت آزادشدن مس است و دارای دامنه $۱۰^{-۴} \times ۵۱/۰۶$ (خاک شماره ۳) تا $۱۰^{-۴} \times ۷۱/۵۰$ (خاک شماره ۱۰) بود. ضریب b در تابع توانی دارای دامنه $۰/۲۱$ (خاک شماره ۵) تا $۰/۲۶ \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (خاک شماره ۶) بود.

همان‌طور که جدول ۸ نشان می‌دهد ضریب b در معادله تابع توانی در همه خاک‌ها کمتر از ۱ بود و نشان‌دهنده این است که سرعت آزادشدن مس با زمان کاهش می‌یابد. Reyhanitabar and Gilkes (۲۰۱۰) بیان کردند که ضریب a در معادله تابع توانی نشان‌دهنده تعداد سطوحی است که امکان آزادشدن 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

جدول ۸. ضرایب سرعت معادلات سینتیکی مورد استفاده در توصیف مس آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری

شماره خاک	مرتبه اول				انتشار پارابولیکی				تابع توانی		
	ریزوسفر		غیرریزوسفر		ریزوسفر		غیرریزوسفر		ریزوسفر	غیرریزوسفر	
	$K_1 \times 10^{-4}$	A	$K_1 \times 10^{-4}$	A	R	a	R	a	b	a	
۱	۷۵/۹۳	۱/۹۲	۷۵/۹۳	۱/۷۱	۰/۴۳	۲/۷۷	۰/۳۵	۱/۹۳	۲/۵۲	۰/۲۳	
۲	۸۲/۰۲	۱/۶۷	۸۲/۰۲	۱/۶۶	۰/۳۳	۱/۵۵	۰/۳۳	۱/۳۷	۱/۵۸	۰/۲۵	
۳	۶۶/۶۳	۱/۵۴	۶۶/۶۳	۱/۳۴	۰/۲۴	۱/۰۹	۰/۲۲	۰/۷۱	۱/۲۲	۰/۲۴	
۴	۶۷/۰۷	۱/۶۹	۶۷/۰۷	۱/۶۴	۰/۳۰	۱/۵۱	۰/۲۹	۱/۴۶	۱/۵۵	۰/۲۴	
۵	۵۳/۵۱	۱/۴۴	۵۳/۵۱	۱/۲۹	۰/۲۴	۱/۴۸	۰/۲۲	۱/۵۱	۱/۴۷	۰/۲۱	
۶	۷۳/۸۶	۱/۷۵	۷۳/۸۶	۱/۴۶	۰/۳۳	۱/۲۷	۰/۲۵	۱/۱۸	۱/۴۱	۰/۲۶	
۷	۷۸/۲۲	۱/۶۵	۷۸/۲۲	۱/۵۵	۰/۳۰	۱/۳۴	۰/۲۷	۰/۹۶	۱/۴۲	۰/۲۴	
۸	۷۲/۳۶	۱/۸۷	۷۲/۳۶	۱/۸۳	۰/۴۲	۲/۷۳	۰/۴۱	۲/۶۵	۲/۵۵	۰/۲۲	
۹	۷۶/۹۶	۱/۹۴	۷۶/۹۶	۱/۸۳	۰/۴۳	۲/۳۳	۰/۴۰	۱/۹۶	۲/۲۹	۰/۲۳	
۱۰	۷۲/۵۳	۲/۰۸	۷۲/۵۳	۲/۰۰	۰/۵۰	۲/۹۳	۰/۴۵	۲/۳۴	۲/۷۹	۰/۲۳	

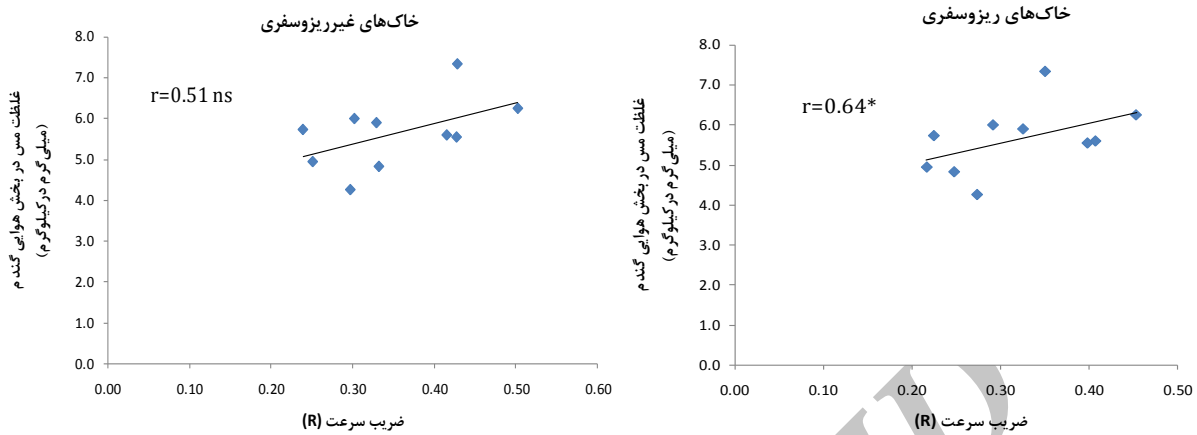
جدول ۹. همبستگی ویژگی‌های آزاد شدن مس در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری با مس قابل استفاده

مرتبه اول	انتشار پارابولیکی	تابع توانی	DTPA-TEA		AB-DTPA		مهلج ۳
			ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	
a	۰/۹۱**	۰/۹۱**	۰/۸۰**	۰/۸۲**	۰/۷۷**	۰/۷۳**	۰/۷۰*
K ₁	۰/۷۴*	۰/۷۴*	۰/۱۰ ns	۰/۷۵*	۰/۱۶ ns	۰/۷۰*	۰/۱۰ ns
a	۰/۹۵**	۰/۹۵**	۰/۹۷**	۰/۸۹**	۰/۹۱**	۰/۸۰**	۰/۸۱**
R	۰/۹۵**	۰/۹۵**	۰/۸۶**	۰/۸۵**	۰/۸۲**	۰/۷۶*	۰/۷۱*
a	۰/۹۶**	۰/۹۶**	۰/۹۷**	۰/۸۸**	۰/۹۰**	۰/۷۹**	۰/۸۲**
b	۰/۲۷ ns	۰/۲۷ ns	۰/۵۲ ns	۰/۲۲ ns	۰/۴۶ ns	۰/۲۲ ns	۰/۵۵ ns
a×b	۰/۹۸**	۰/۹۸**	۰/۹۴**	۰/۸۹**	۰/۸۹**	۰/۸۰**	۰/۷۹**
مس آزاد شده	۰/۹۸**	۰/۹۸**	۰/۹۳**	۰/۸۷**	۰/۸۶**	۰/۷۸**	۰/۷۸**

** معنادار در سطح احتمال ۱ درصد * معنادار در سطح احتمال ۵ درصد ns غیرمعنادار

استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی همبستگی معناداری (P<۰/۰۵) دارند. در مقابل در خاک‌های غیرریزوسفری ویژگی‌های آزاد شدن مس (به غیر از ضریب b در معادله‌های تابع توانی) با مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی همبستگی معناداری (P<۰/۰۵) دارند.

همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد در خاک‌های ریزوسفری ویژگی‌های آزاد شدن مس (به غیر از ضرایب سرعت در معادله‌های مرتبه اول و تابع توانی) با مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی همبستگی معناداری (P<۰/۰۵) دارند. در مقابل در خاک‌های غیرریزوسفری ویژگی‌های آزاد شدن مس (به غیر از ضریب b در معادله‌های تابع توانی) با مس عصاره‌گیری شده با



شکل ۴. رابطه ضریب سرعت (R) معادله انتشار پارابولیکی و غلظت مس در بخش هوایی گندم

جدول ۱۰. همبستگی ویژگی‌های آزادشدن مس در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری با خصوصیات خاک

مرتبه اول	a	رس		سیلت		کربنات کلسیم معادل		کربن آلی		مس کل	
		ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر
مرتبه اول	a	۰/۲۹ ns	۰/۲۷ ns	۰/۴۶ ns	۰/۵۳ ns	۰/۷۱ *	۰/۶۸ *	۰/۷۲ *	۰/۶۵ *	۰/۶۷ *	۰/۶۹ *
	K ₁	۰/۱۳ ns	۰/۰۸ ns	۰/۱۹ ns	۰/۰۱ ns	۰/۳۶ ns	۰/۰۰ ns	۰/۴۸ ns	۰/۰۴ ns	۰/۵۰ ns	۰/۲۹ ns
انتشار پارابولیکی	a	۰/۳۴ ns	۰/۲۲ ns	۰/۵۶ ns	۰/۷۸ *	۰/۶۸ *	۰/۶۸ *	۰/۷۰ *	۰/۷۸ *	۰/۷۷ *	۰/۶۵ *
	R	۰/۳۲ ns	۰/۲۹ ns	۰/۵۱ ns	۰/۶۰ ns	۰/۷۱ *	۰/۷۳ *	۰/۷۱ *	۰/۶۹ *	۰/۷۵ *	۰/۷۴ *
تابع توانی	a	۰/۳۳ ns	۰/۲۲ ns	۰/۵۷ ns	۰/۷۷ *	۰/۷۱ *	۰/۶۹ *	۰/۷۳ *	۰/۷۷ *	۰/۷۷ *	۰/۶۶ *
	b	۰/۱۱ ns	۰/۰۴ ns	۰/۲۸ ns	۰/۵۶ ns	۰/۳۰ ns	۰/۲۰ ns	۰/۲۷ ns	۰/۴۱ ns	۰/۲۴ ns	۰/۱۰ ns
	a×b	۰/۳۴ ns	۰/۲۷ ns	۰/۵۵ ns	۰/۷۱ *	۰/۷۱ *	۰/۷۲ *	۰/۷۲ *	۰/۷۶ *	۰/۷۸ *	۰/۷۲ *

ns غیرمعنادار

* معنادار در سطح احتمال ۵ درصد

** معنادار در سطح احتمال ۱ درصد

استفاده‌شده در توصیف آزادشدن مس با خصوصیات خاک در جدول ۱۰ آمده است. در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری ویژگی‌های آزادشدن مس (به غیر از ضرایب سرعت در معادله‌های مرتبه اول و تابع توانی) با کربنات کلسیم معادل و کربن آلی و مس کل همبستگی معناداری ($P < 0/05$) داشتند. همچنین همبستگی معناداری بین ضریب a در معادله انتشار پارابولیکی و ضرایب a و a×b در معادله توانی به دست آمد.

بین ویژگی‌های آزادشدن مس فقط ضریب سرعت در معادله انتشار پارابولیکی دارای همبستگی معنادار با غلظت مس در بخش هوایی گندم در خاک ریزوسفری بود ($r = 0/64^*$) (شکل ۴). بهترین روش ارزیابی کارایی معادله‌های مورد استفاده در توصیف آزادشدن مس می‌تواند بررسی همبستگی بین مس عصاره‌گیری‌شده با استفاده از روش‌های معمول عصاره‌گیری با ویژگی‌های آزادشدن مس در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری باشد.

همبستگی بین ضرایب معادله‌های سینتیکی

نتیجه گیری

ریزوسفری کمتر از خاک غیرریزوسفری بود. در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری ویژگی‌های آزاد شدن مس با مس استخراج شده با عصاره‌گیرهای شیمیایی همبستگی معناداری داشت. همچنین ضریب R در معادله انتشار پارابولیکی دارای همبستگی معناداری با غلظت مس در گیاه گندم در خاک ریزوسفری بود؛ در حالی که هیچ‌یک از ویژگی‌های آزاد شدن مس با غلظت مس همبستگی معناداری نداشتند. اطلاعات به دست آمده از مدل‌های ریاضی در توصیف مکانیسم آزاد شدن مس و برآورد ظرفیت تأمین مس در خاک‌ها می‌تواند استفاده شود. براساس نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده به منظور بررسی ارتباط ویژگی‌های آزاد شدن مس با شاخص‌های گیاه از خاک ریزوسفری استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود اثر ریزوسفر بر تغییر شکل‌های مس بررسی شود.

نتایج این تحقیق نشان داد مس استخراج شده با عصاره‌گیرهای AB-DTPA و DTPA-TEA و مهلیج ۳ در خاک‌های ریزوسفری به صورت معناداری کمتر از خاک‌های غیرریزوسفری بود. همچنین مقدار مس تجمعی آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری به صورت معناداری کمتر از خاک‌های غیرریزوسفری بود. مقدار مس آزاد شده در خاک‌های ریزوسفری در دامنه ۴/۸۸ تا ۱۰/۶۶ میلی گرم در کیلوگرم و در خاک‌های غیرریزوسفری در دامنه ۶/۳۸ تا ۱۲/۰۸ میلی گرم در کیلوگرم بود. نتایج نشان داد معادله انتشار پارابولیکی بهترین مدل توصیف کننده سرعت آزاد شدن مس در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری است. همچنین معادله‌های مرتبه اول و تابع توانی توانایی بیان مکانیسم و سرعت آزاد شدن مس را در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری داشتند. سرعت آزاد شدن مس در خاک

REFERENCES

- Balali, M. Malakouti, M. J. Mashayekhi, H. and Khademi, Z. (1999). Effect of micronutrients on increase of yield and determination their critical level in soils of Iran under wheat planting, *Journal of Soil and Water* 12 (6), 111-119 (In Farsi).
- Bernal, M. P. McGrath, S. P. Miller, A. J. and Baker, A. J. M. (1994). Comparison of the chemical changes in the rhizosphere of the nickel hyperaccumulator *Alyssum murale* with the non-accumulator *Raphanus sativus*, *Plant Soil*, 164, 251-259.
- Bhattacharyya, P. Chakraborty, A. Chakrabarti, K. Tripathy, S. and Powell, M. A. (2006). Copper and zinc uptake by rice and accumulation in soil amended with municipal solid waste compost, *Environ. Geol*, 49, 1064-1070.
- Brummer, G. Tiller, K. G. Herms, U. and Clayton, P. M. (1983). Adsorption desorption and/or precipitation dissolution processes of zinc in soils, *Geoderma*, 31, 337-354.
- Campbell, C. R. and Plank, C. O. (1998). Preparation of plant tissue for laboratory analysis, In: Kalra, Y. P. (Ed), *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 37-50.
- Chen, Y. M. Wang, M. K. and Huang, P. M. (2006). Catechin transformation as influenced by aluminum, *J. Agric, Food Chem*, 54, 212-218.
- Cherrey, A. Chaignon, V. and Hinsinger, P. (1999). Bioavailability of copper in the rhizosphere of rape and ryegrass cropped in vineyard soils, In: Wenzel, W. W. Adriano, D. C. Alloway, B. Doner, H.

- E. Keller, C. Lepp, N. W. Mench, M. Naidu, R. and Pierzynski, G. M. (Eds), Proceedings of Extended Abstracts of 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Vienna, Austria, 196-197.
- Corre, M. D. Schnabel, R. R. and Shaffer, J. A. (1999). Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season and warm-season grasses in the northeastern US, *Soil Biol, Biochem*, 31, 1531-1539.
- Covelo, E. F. Vega, F. A. and Andrade, M. L. (2006). Competitive sorption and desorption of heavy metals, individual soil components, *J. Hazardous Materials*, 140, 308-315.
- Dang, Y. P. Dalal, Edwards, D. G. and Tiller, K. G. (1994). Kinetics of zinc desorption from Vertisols, *Soil Sci, Soc, Am, J.* 58, 1392-1399.
- Dessureault-Romppe, J. Nowack, B. Schulin, R. Tercier-Waeber, M. L. and Luster, J. (2008). Metal solubility and speciation in the rhizosphere of *Lupinus albus* cluster roots, *Environ, Sci, Technol*, 42, 7146-7151.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis, In: Klute, A. (Ed) *Methods of Soil Analysis, Part 1*, 2nd edition, Agron, Monogr, 9, ASA and SSSA, Madison, WI, 404-407.
- Ghasemi Fasaei, 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 J. Soil Res*, 45, 459-464.
- Havlin, J. L. Westfall, D. G. and Olsen, S. R. (1985). Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils, *Soil Sci, Soc, Am, J.* 49, 371-376.
- Jenkinson, D. S. and Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil, I. Fumigation with chloroform, *Soil Biol, Biochem*, 8, 209-213.
- Khater, A. H. and Zaghoul, A. M. (2002). Copper and zinc desorption kinetics from soil: Effect of pH, paper presented at the 17th World Conference on Soil Science, Thailand, Symposium, No. 47, August 1-9.
- Khoshgoftarmanesh, A. H. (2007). Principles of plant nutrition, Isfahan University of Technology (In Farsi).
- Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper, *Soil Sci, Soc, Am, J.* 42, 421-428.
- Lindsay, W. L. and Cox, F. R. (1985). Micronutrient soil testing for the tropics, *Fertilizer Research*, 7: 169-200.
- Liu, C. and Huang, P. M. (1999). Atomic force microscopy and surface characteristics of iron oxides formed in citrate solutions, *Soil Sci, Soc, Am, J.* 63, 65-72.
- Loeppert, R. H. and Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum, In: Sparks, D. L. (Ed), *Methods of Soil Analysis*, SSSA, Madison, 437-474.
- Lynch, J. M. and Whipps, J. M. (1990). Substrate flow in the rhizosphere, *Plant Soil*, 129, 1-10.
- Martin, H. W. and Sparks, D. L. (1983). Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils, *Soil Sci, Soc, Am, J.* 47, 883-887.
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant, *Commun, Soil Sci, Plant Anal*, 15, 1409-1416.
- Motaghian, H. R. Hosseinpour, A. R. Mohammadi, J. and Raeisi, F. (2012). Change in bioavailability and fractions of copper in the rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.) in some calcareous soils, *Journal of Water and Soil* (In press).
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1996). Carbon, organic carbon, and organic matter, In: Sparks, D. L. (Ed), *Methods of Soil Analysis*, SSSA, Madison, 961-1010.
- Philippe, H. (1999). Bioavailability of trace elements as related to root induced chemical changes in the rhizosphere, In: Wenzel, W., Adriano, D. C. Alloway, B. Doner, H. E. Keller, C. Lepp, N. W. Mench, M. Naidu, R. Pierzynski, G. M. (Eds), Proceedings of Extended Abstracts of 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Vienna, Austria, 152-153.

- Reyhanitabar A. and Karimian, N. (2008). Kinetics of Copper Desorption of Selected Calcareous Soils from Iran, *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*, 4 (3), 287-293.
- Reyhanitabar, A. and Gilkes, R. J. (2010). Kinetics of DTPA extraction of zinc from calcareous soils, *Geoderma*, 154, 289-293.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids, In: Sparks D. L. (ed), *Methods of Soil Analysis*, SSSA, Madison, 417-435.
- Robert M. and Berthelin J. (1986). Role of biological and biochemical factors in soil mineral weathering, In: Huang P. M. and Schnitzer M. (Ed), *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*, SSSA Spec. Pub. no. 17, SSSA, Madison, Wis, 453-496.
- Singh, R. R. Prasad, B. and Choudhary, S. N. (1994). Desorption of copper in calcareous soils, *J. Indian Soc. Soil Sci*, 42, 555-558.
- Soltanpour, P. N. and Schwab, A. P. (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.
- Sposito, G. Lund, L. J. and Chang, A. (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.
- Sumner M. E. and Miller P. M. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficient, In: Sparks DL (ed), *Methods of Soil Analysis*, Soil Science Society of America Journal, Madison, 1201-1230.
- Szmigielska, A. M. Van Rees, K. C. J. Cieslinski, C. and Huang, P. M. (1996). Low molecular weight dicarboxylic acids in rhizosphere soil of durum wheat, *J. Agric, Food Chem*, 44, 1036-1040.
- Tao, S. Chen, Y. J. Xu, F. L. Cao, J. and Li, B. G. (2003). Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil, *Environ, Pollut*, 122, 447-454.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity, In: Sparks D. L. (Ed), *Methods of Soil Analysis*, Soil Science Society of America Journal, Madison, 475-490.
- Wang, Z. Shan, X. Q. and Zhang, S. (2002). Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils, *Chemosphere*, 46 (8), 1163-1171.
- Young, S. D. Zhang, H. Tye, A. M. Maxted, A. Thums, C. and Thornton, I. (2006). Characterizing the availability of metals in contaminated soils, I. The solid phase: sequential extraction and isotopic dilution, *Soil Use Manage*, 21, 45