نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر - دی ۱۳۹۲، ص. ۱۰۲۲-۱۰۰۹

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No. 5, Nov.-Dec. 2013, p. 1009-1022

# اثر فرا ریشه لوبیا قرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) بر قابلیت استفاده و شکل‌های مس در تعدادی از خاک‌های آهکی ایران

حمیدرضا متقیان[۱*] - علیرضا حسین‌پور[۲]

تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۱۲/۲۷
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۸/۵

## چکیده

تغییر در فعالیت‌های ریزجانداران و ویژگی‌های شیمیایی در خاک فرا ریشه می‌تواند بر قابلیت استفاده و جزءبندی مس مؤثر باشد. این تحقیق با هدف بررسی اثر فرا ریشه لوبیا بر قابلیت استفاده و جزءبندی مس در ۱۰ خاک آهکی ایران با استفاده از ریزوباکس در گلخانه انجام شد. کل کربن آلی، کربن آلی محلول، کربن زیست توده میکروبی، pH، مس قابل استفاده (با استفاده از ۷ روش عصاره‌گیری شیمیایی) و شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه و توده تعیین شدند. نتایج نشان داد که کل کربن آلی، کربن آلی محلول و کربن زیست توده میکروبی در خاک‌های فرا ریشه لوبیا افزایش معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) و pH کاهش معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) یافتند. مقدار مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی در خاک‌های فرا ریشه کمتر از خاک‌های توده بود. در خاک‌های فرا ریشه میانگین مس پیوندشده با ماده‌آلی ۱۵/۷ درصد افزایش یافت، درحالی‌که میانگین مس پیوندشده با کربنات‌ها، مس تبادلی، مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و مس باقیمانده به‌ترتیب ۱۹/۵، ۱۹/۶، ۱۴/۷ و ۴/۷ درصد نسبت به خاک‌های توده کاهش یافتند. مس تتمه در خاک‌های فرا ریشه و توده با مس عصاره‌گیری شده با روش‌های DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ همبستگی معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) داشت. در خاک‌های فرا ریشه و توده، همبستگی بین غلظت مس در لوبیا و مس عصاره‌گیری شده با روش‌های DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ معنی‌دار ($p<۰/۰۵$) بود. عملکرد و جذب مس در لوبیا با مس پیوندشده با ماده‌آلی و همچنین غلظت مس در لوبیا با مس تتمه در خاک‌های فرا ریشه همبستگی معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که قابلیت استفاده و شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه متفاوت از خاک‌های توده بودند. بنابراین در بررسی مس قابل استفاده گیاه لوبیا پس از رشد گیاه، استفاده از خاک فرا ریشه توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** فرا ریشه، لوبیا، جزءبندی، مس، عصاره‌گیرهای شیمیایی

## مقدمه

فرا ریشه (ریزوسفر) به عنوان ناحیه در برگیرنده ریشه‌های فعال مؤثر بر خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک در نظر گرفته می‌شود (۱۲). در فرا ریشه تغییراتی مانند اسیدی‌شدن، افزایش مقدار مواد آلی در هر دو فاز مایع و جامد، هوادیدگی و تغییر در کانی‌ها و تغییر در فعالیت و زیست توده ریزجانداران اتفاق می‌افتد (۱۶). بنابراین ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک فرا ریشه متفاوت از توده خاک هستند. این ویژگی‌های متفاوت، بر جذب عناصر بوسیله گیاهان مؤثر بوده و به‌دلیل مجاورت خاک در این ناحیه با ریشه پدید آمده‌اند (۳۱).

عنصر مس در گیاه نقش‌های متعددی از جمله شرکت در ساختمان ترکیبات مختلف (پلاستوسیانین، پراکسیداز، لاکاز، اسکوربیک اسید اکسیداز، مس-روی دیسموتاز، سیتوکروم‌اکسیداز و فنولاز)، چوبی‌شدن و تشکیل دانه گرده دارد (۱). کمبود مس در خاک‌های آلی و خاک‌های شنی که بطور معمول مقدار مس کل کمی دارند و در خاک‌های اسیدی و خاک‌های آهکی که مس قابلیت استفاده کمی دارند، عمومیت بیشتری دارد. روش‌های عصاره‌گیری یک و چند مرحله‌ای برای برآورد مس قابل استفاده در خاک‌ها استفاده می‌شوند (۱۸). روش‌های عصاره‌گیری یک مرحله‌ای مانند عصاره‌گیرهای حاوی کلات‌کننده DTPA برای ارزیابی قابلیت استفاده مس برای گیاه مورد استفاده قرار گرفته‌اند و مس عصاره‌گیری شده با DTPA با غلظت مس در گیاهان همبستگی معنی‌داری داشته

۱ و ۲- به‌ترتیب داش‌آموخته دکتری و استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد
(* - نویسنده مسئول: Email: hrm_61@yahoo.com)

است (۳ و ۱۰). جداسازی شکل‌های یک عنصر فرآیندی است که منجر به شناسایی و تعیین توزیع عناصر در اجزاء مختلف در خاک می‌شود. مس می‌تواند با اجزاء خاک پیوند داده و ایجاد اجزاء مختلف مانند مس محلول و تبادلی، پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و کربنات‌ها، پیوندشده یا جذب شده با ماده آلی و پیوندشده با کانی‌های رسی کند (۴). شکل‌های مس دارای قابلیت نگهداری و آزادسازی متفاوت هستند که اهمیت زیادی بر مقدار مس قابل استفاده گیاه دارند (۲۳).

فعالیت‌های ریشه می‌تواند منجربه تغییر در خصوصیات خاک فرا ریشه و در نتیجه تغییر در شکل‌های عناصر در این محیط شوند (۲۱). مقدار عناصر کم‌نیاز پیوندشده با کربنات‌ها و یا اکسیدها می‌توانند در شرایط احیایی و یا اسیدی ناشی از تغییر در pH یا پتانسیل اکسید و احیا در فرا ریشه تغییر کرده و منجر به تغییر در قابلیت استفاده این عناصر در خاک فرا ریشه شود (۳۲). همچنین عناصر کم‌نیاز کاتیونی از طریق ایجاد کلات با فیتوسایدروفورها و اسیدهای آلی آزادشده از ریشه گیاه و ریزجانداران در محلول خاک افزایش می‌یابند (۱۹). بنابراین ویژگی‌های متفاوت خاک فرا ریشه می‌توانند منجر به تغییر در شکل‌های مس و قابلیت استفاده آن شوند.

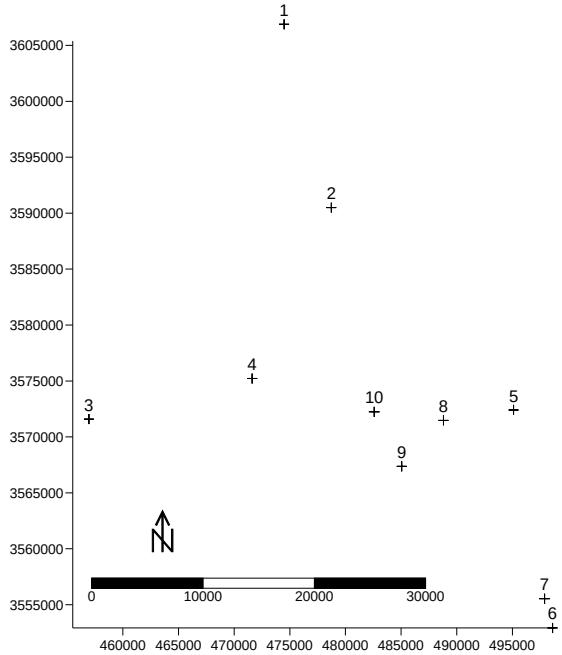
برخی از محققان به بررسی اثر فرا ریشه بر قابلیت استفاده مس پرداختند (۲، ۴۳ و ۴۶). تاالو و همکاران (۴۳) به بررسی شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه ذرت و با استفاده از ریزوباکس پرداختند. نتایج آنها حاکی از تغییر در اجزاء مس در فرا ریشه نسبت به توده خاک بود. چینو و همکاران (۱۲) گزارش کردند که مس محلول در نزدیک ریشه افزایش یافت در حالی‌که مقدار کل مس تغییر زیادی نداشت. وانگ و همکاران (۴۶) با استفاده از ریزوباکس، شکل‌های مس در ریزوسفر گندم را بررسی و گزارش کردند که در خاک ریزوسفری مس محلول، مس تبادلی و مس پیوندشده با کربنات‌ها و مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز نسبت به خاک توده کاهش یافت، درحالی‌که مقدار مس پیوندشده با ماده‌آلی در خاک ریزوسفری افزایش یافت. آنها علّت کاهش در مقدار مس محلول، مس تبادلی و مس پیوندشده با کربنات‌ها را تغییر pH و ایجاد کمپلکس مس تبادلی و محلول در آب با ترکیبات آلی خروجی از ریشه در ناحیه ریزوسفر بیان کردند. همچنین کاهش مقدار مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز را به‌دلیل احیاء اکسیدهای فلزی به وسیله اسیدهای آلی خروجی از ریشه گیاه و علّت افزایش مس پیوندشده با ماده آلی را به‌دلیل افزایش ترکیبات آلی ترشح شده در فرا ریشه بیان کردند. نتایج آنها نشان داد که شکل‌های مس با غلظت مس در بخش هوایی گندم همبستگی معنی‌داری نداشتند و بین مس محلول در آب، مس تبادلی و مس پیوندشده با کربنات‌ها، مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و مس پیوندشده با ماده آلی و غلظت مس در ریشه گندم همبستگی معنی‌داری (ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۵۲ و ۰/۴۹) وجود داشت. کاتانی و همکاران (۱۰) به بررسی قابلیت استفاده مس در خاک آلوده‌شده به قارچ‌کش تحت کشت گیاه ذرت و با استفاده از ریزوباکس پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مقدار مس عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA در فرا ریشه ذرت کاهش یافت. ایشان مقدار کربن آلی محلول را در خاک فرا ریشه سه برابر توده خاک گزارش کردند. متقیان و همکاران (۲) به بررسی اثر فرا ریشه گندم بر مقدار مس قابل استفاده و شکل‌های آن در ۱۰ نمونه خاک آهکی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از ریزوباکس پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مقدار مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف شیمیایی در خاک‌های فرا ریشه گندم بیشتر از خاک‌های توده بود. همچنین، مس تبادلی و مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز در خاک‌های فرا ریشه کاهش یافته و در مقابل مس پیوندشده با ماده‌آلی و شکل تتمه افزایش یافت. آنها کاهش مس قابل استفاده را به‌دلیل تغییر در ویژگی‌های بیولوژیکی و شیمیایی و شکل‌های مس در خاک فرا ریشه نسبت به خاک توده بیان کردند.

ترشحات ریشه و ریزجانداران می‌تواند بر شکل‌های مس و قابلیت استفاده و جذب آن به وسیله گیاه مؤثر باشند. این تحقیق با هدف تعیین قابلیت استفاده و شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه لوبیا و توده، بررسی همبستگی بین شکل‌های مس و مس عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیرهای مختلف شیمیایی و بررسی همبستگی پاسخ‌های لوبیا با شکل‌های مس و مس عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیرهای مختلف شیمیایی انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

این پژوهش با استفاده از ۱۰ نمونه خاک سطحی (۳۰ cm - ۰) اراضی زراعی دشت شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری که از نظر مس قابل استفاده، درصد رس و درصد کربنات کلسیم معادل تغییرات زیادی داشتند، انجام شد (شکل ۱). بر اساس رده‌بندی آمریکایی خاک‌های مورد مطالعه در زیر گروه‌های calcixerepts Typic و Typic haploxerepts قرار دارند. بافت خاک به‌روش هیدرومتر (۱۵)، pH خاک در سوسپانسون دو به یک آب به خاک (۴۵)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره دو به یک آب به خاک (۳۸)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون (۲۸)، گنجایش تبادل کاتیونی به‌روش استات سدیم در pH برابر با ۷ (۴۲)، ماده‌آلی به‌روش اکسیداسیون تر (۳۶) تعیین شدند. مقدار کل و قابل استفاده مس به‌ترتیب با استفاده از هضم با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۱) و DTPA-TEA (۲۷) تعیین شد.




**شکل ۱- نقاط نمونه‌برداری (شماره نمونه‌های خاک در بالای نشانه آورده شده است)**

**کشت گلخانه‌ای**

در این تحقیق برای کشت لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) از ریزوباکس (۲ و ۴۶) استفاده شد. ریزوباکس‌های مورد استفاده دارای طول ۲۰۰ میلی‌متر، عرض ۱۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر شامل سه بخش بودند. بخش مرکزی یا ناحیه فرا ریشه (دارای عرض ۳۰ میلی‌متر) که با استفاده از پارچه نایلونی (دارای مش ۳۰۰) از دو بخش غیر فرا ریشه (دارای عرض ۵۰ میلی‌متر) جدا شده بود (۲).

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی بر روی ۱۰ نمونه خاک و در سه تکرار انجام شد. مقدار ۴/۵ کیلوگرم خاک به هر ریزوباکس منتقل شد. در نهایت ۳۰ ریزوباکس آماده گردید. به هر ریزوباکس، ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره، 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 و درصورت نیاز، قبل از کشت اضافه شد. بذرهای لوبیا قرمز (رقم صیاد) با استفاده از هیپوکلریت سدیم ۳ درصد استریل و پس از ۲۴ ساعت قرارگیری در آب مقطر، با استفاده از مایه تلقیح رایزوبیوم تلقیح شدند. سپس ۳ بذر در هر گلدان کشت و در طول مدت رشد مراقبت‌های لازم انجام و سعی شد رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه ثابت بماند. دمای گلخانه در روز ۱۸ تا ۲۰ درجه سلسیوس و در شب ۱۵ تا ۱۸ درجه سلسیوس بود. بخش هوایی گیاهان ۸ هفته پس از جوانه‌زدن برداشت شد. ریزوباکس‌ها باز شده و خاک بخش مرکزی (خاک فرا ریشه) با استفاده از الک کردن از ریشه‌ها جدا و در نهایت ریشه‌های باقیمانده در خاک فرا ریشه با استفاده از انبرک برداشته شدند. همچنین دو ناحیه غیرفرا ریشه با هم مخلوط شده و هر دو نمونه (خاک فرا ریشه و توده) برای آزمایش‌های بعدی آماده شدند. بخش‌های هوایی با آب مقطر شسته و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون تهویه‌دار خشک و سپس وزن خشک اندام هوایی تعیین شد. مس موجود در اندام‌های هوایی با روش خاکستر خشک عصاره‌گیری (۹) و سپس با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل جی بی سی، ۹۳۲) اندازه گیری شد. مقدار کل مس جذب شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۲ و ۳).

۰/۰۰۱× عملکرد خشک (گرم در گلدان) × غلظت مس (میلی‌گرم در کیلوگرم) = مس جذب‌شده (میلی‌گرم در گلدان)

**مس قابل استفاده و شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه و توده**

برای تعیین مس قابل استفاده در خاک‌های فرا ریشه و توده از روش‌های DTPA-TEA (۲۷)، AB-DTPA (۴۰)، مهلیچ ۱ (۳۳)، مهلیچ ۲ (۳۴)، مهلیچ ۳ (۳۵)، ۰/۱ HCl نرمال (۴۷) و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار (۲۰) استفاده شد. همچنین برای تعیین مس تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها، پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و پیوند شده با ماده آلی از روش تسیر و همکاران (۴۴) و برای تعیین شکل تتمه از اسید نیتریک ۴ مولار (۴۱) استفاده شد (جدول ۱). مس کل در خاک‌های فرا ریشه و توده با استفاده از اسید نیتریک ۴ مولار (۴۱) تعیین شد.

جدول ۱- خلاصه روش عصاره‌گیری تسیر برای تعیین شکل‌های مس (٤٤)

| جزء | مرحله | روش عصاره‌گیری | دما (سلسیوس) | زمان (ساعت) |
|---|---|---|---|---|
| تبادلی | ۱ | ۱ گرم خاک + ۸ میلی‌لیتر $MgCl_2$ ۱ مولار (pH =۷) | دمای اتاق | ۲ |
| پیوندشده با کربنات‌ها | ۲ | ۸ میلی‌لیتر $CH_3COONa$ ۱ مولار (pH=۵) | دمای اتاق | ۶ |
| پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز | ۳ | ۲۰ میلی‌لیتر $NH_2OH.HCl$ ۰/۰۴ مولار (در اسید استیک ٪۲۵) | ۹۶±۳ | ۶ |
| | | ۵ میلی‌لیتر $HNO_3$ ۰/۰۲ مولار + ۸ میلی‌لیتر $H_2O_2$ ٪۳۰ (pH=۲) | ۸۵±۲ | ۵ |
| پیوندشده با ماده‌آلی | ۴ | + ۵ میلی‌لیتر $NH_4OAC$ ۳/۲ مولار (در اسید نیتریک ٪۲۰) | دمای اتاق | ۰/۵ |
| تتمه * | ۵ | ۷ میلی‌لیتر $HNO_3$ ۴ نرمال | ۸۰±۲ | ۱۶ |

*- بخش تتمه با استفاده از روش عصاره‌گیری اسپوزیتو و همکاران (۴۱) اندازه‌گیری شد.

## خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های فرا ریشه و توده

مقدار کل کربن آلی (TOC) خاک‌های فرا ریشه و توده با استفاده از روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری شد (۳۶). برای اندازه‌گیری مقدار کربن آلی محلول (DOC) از عصاره ۱ به ۲ خاک تازه به آب مقطر استفاده شد (۱۳). سوسپانسیون حاصله در دمای اتاق به مدت ۲ ساعت تکان داده شد و سپس ۵ دقیقه سانتریفیوژ و محلول صاف رویی با استفاده از فیلتر پلاستیکی دارای قطر ۰/۴۵ میکرومتر جدا شد. مقدار کربن آلی محلول با استفاده از روش اکسیداسیون تر برآورد شد (۳۶). کربن زیست توده میکروبی (MBC) در خاک‌های فرا ریشه و توده با استفاده از روش تدخین با کلروفورم و خواباندن اندازه‌گیری شد (۲۲). همچنین pH خاک در سوسپانسون دو به یک آب به خاک (۴۵) اندازه‌گیری شد.

## تجزیه و تحلیل آماری

برای تعیین معنی‌دار بودن تفاوت بین خصوصیات خاک‌های فرا ریشه و توده از آزمون t-test (نمونه‌های جفت‌شده) استفاده شد. ضرایب همبستگی بین شکل‌های مس و مقدار مس عصاره‌گیری شده با استفاده از ۷ روش شیمیایی، بین مقدار مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش‌های شیمیایی و شاخص‌های گیاه لوبیا و بین شکل‌های مس و شاخص‌های گیاه در سطح احتمال ۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17.0 تعیین شدند.

## نتایج و بحث

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که خصوصیات خاک‌ها از دامنه تغییرات وسیعی برخوردار هستند. دامنه تغییرات رس ۲۵ تا ۵۵ با متوسط ۴۴ درصد و سیلت دارای دامنه ۳۳ تا ۵۵ با متوسط ۴۳ درصد است. خاک‌های مورد مطالعه دارای pH قلیایی و قابلیت هدایت الکتریکی و مقدار کربن آلی پایین هستند. تغییرات pH ۷/۵ تا ۸/۱ و قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر است. دامنه تغییرات کربن آلی و کربنات کلسیم معادل خاک‌ها به ترتیب ۰/۳۰ تا ۱/۱۹ و ۱۱/۳ تا ۴۱/۰ درصد است. دامنه تغییرات گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۱/۵ تا ۲۲/۵ سانتی‌مول بار در کیلوگرم خاک است. مقدار مس قابل استفاده در دامنه ۰/۵۴تا ۱/۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است. مقدار کل مس خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۱۵ تا ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است.

## خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های فرا ریشه و توده

مقادیر کربن آلی کل، کربن آلی محلول و کربن زیست توده میکروبی در خاک‌های فرا ریشه و توده در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که ویژگی‌های خاک فرا ریشه بدون توجه به نوع خاک‌ها با ویژگی خاک توده متفاوت بود. میانگین کل کربن آلی، کربن آلی محلول و کربن زیست توده میکروبی در خاک‌های فرا ریشه افزایش معنی‌داری ($p<0/01$) نسبت به خاک‌های توده یافتند. درحالی‌که میانگین pH کاهش معنی‌داری ($p<0/01$) در خاک‌های فرا ریشه نسبت به خاک‌های توده یافت. در خاک‌های فرا ریشه، میانگین کل کربن آلی ۰/۸۴ درصد، میانگین کربن آلی محلول ۷۳ میلی‌گرم کربن در لیتر، میانگین کربن زیست توده میکروبی ۳۵۶ میلی‌گرم کربن در کیلوگرم و میانگین pH ۷/۵ بود. درحالی‌که در خاک‌های توده، میانگین کل کربن آلی ۰/۷۷ درصد، میانگین کربن آلی محلول ۵۶ میلی‌گرم کربن در لیتر، میانگین کربن زیست توده میکروبی ۲۱۶ میلی‌گرم کربن در کیلوگرم و میانگین pH ۷/۹ بود. متقیان و همکاران (۲) در تحقیقی به بررسی اثر فرا ریشه گندم بر کل کربن آلی، کربن آلی محلول و کربن زیست توده میکروبی پرداختند.

**جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه**

| شماره خاک | رس | سیلت | کربنات کلسیم معادل (٪) | کربن آلی | pH | قابلیت هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$) | گنجایش تبادل کاتیونی ($cmol_c\ kg^{-1}$) | مس قابل استفاده ($mg\ kg^{-1}$) | مس کل ($mg\ kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۵۵ | ۴۰ | ۲۸/۷ | ۰/۷۲ | ۷/۸ | ۰/۱۳ | ۲۰/۹ | ۱/۱۸ | ۲۴ |
| ۲ | ۵۳ | ۴۴ | ۳۵/۶ | ۰/۳۰ | ۸/۱ | ۰/۱۳ | ۱۹/۳ | ۱/۵۰ | ۲۳ |
| ۳ | ۴۹ | ۳۹ | ۲۹/۴ | ۰/۵۱ | ۷/۹ | ۰/۱۲ | ۲۲/۵ | ۰/۸۶ | ۱۹ |
| ۴ | ۴۶ | ۴۲ | ۲۶/۴ | ۰/۷۱ | ۷/۸ | ۰/۱۴ | ۲۱/۶ | ۱/۱۲ | ۱۸ |
| ۵ | ۴۱ | ۴۲ | ۳۲/۲ | ۰/۵۴ | ۸/۱ | ۰/۱۳ | ۱۶/۰ | ۱/۰۷ | ۱۸ |
| ۶ | ۳۷ | ۴۴ | ۳۲/۵ | ۰/۸۰ | ۷/۶ | ۰/۱۶ | ۱۵/۶ | ۰/۸۵ | ۱۷ |
| ۷ | ۲۵ | ۳۳ | ۴۱/۰ | ۰/۴۷ | ۷/۷ | ۰/۲۱ | ۱۱/۵ | ۰/۵۴ | ۱۵ |
| ۸ | ۳۸ | ۵۵ | ۲۳/۱ | ۱/۱۹ | ۸/۱ | ۰/۲۴ | ۱۷/۹ | ۱/۳۰ | ۲۱ |
| ۹ | ۴۸ | ۴۶ | ۱۱/۳ | ۱/۱۶ | ۷/۸ | ۰/۲۵ | ۱۸/۵ | ۰/۸۹ | ۲۱ |
| ۱۰ | ۴۹ | ۴۶ | ۱۴/۸ | ۰/۹۷ | ۷/۹ | ۰/۲۳ | ۱۷/۹ | ۱/۴۱ | ۲۵ |

نتایج آنها نشان داد که میانگین کل کربن آلی، کربن آلی محلول و کربن زیست توده میکروبی در خاک‌های فرا ریشه افزایش معنی‌داری ($p<0/01$) نسبت به خاک‌های توده داشتند. ریشه گیاه مقادیر قابل توجهی ترکیبات آلی شامل ترکیبات محلول در آب (قندها، اسیدهای آلی و اسیدهای آمینه) و ترکیبات غیرمحلول در آب (سلول‌های دیواره، ترکیبات پوسته ریشه و موسیلاژ) آزاد می‌کند. بسیاری از این ترکیبات به وسیله ریزجانداران به سرعت تجزیه می‌شوند، اما آزادسازی پیوسته ترکیبات آلی منجر به افزایش ماده آلی در فرا ریشه می‌شود (۲۹). لینچ و ویپس (۳۰) گزارش کردند که کربن آلی در محیط فرا ریشه به دلیل ترشحات ریشه افزایش یافته و بر همین اساس کربن زیست توده میکروبی افزایش می‌یابد. لی و همکاران (۲۵) در مطالعه فرا ریشه گیاه لوبیا مشاهده کردند که pH در فرا ریشه لوبیا ۱/۶۶ واحد نسبت به خاک کشت‌نشده (شاهد) کاهش یافت. هینسینگر و همکاران (۱۹) گزارش کردند که لگوم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن اغلب به‌دلیل جذب بیشتر کاتیون نسبت به آنیون، محیط فرا ریشه خود را اسیدی می‌کنند.

**جدول ۳- برخی از خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های فرا ریشه و توده***

| شماره خاک | pH | | کربن آلی (٪) | | کربن آلی محلول ($mg\ C\ L^{-1}$) | | کربن زیست توده میکروبی ($mg\ C\ kg^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | فرا ریشه | توده | فرا ریشه | توده | فرا ریشه | توده | فرا ریشه | توده |
| ۱ | ۷/۵ | ۷/۸ | ۰/۸۳ | ۰/۷۵ | ۶۹ | ۵۱ | ۵۱۶ | ۲۵۸ |
| ۲ | ۷/۵ | ۷/۸ | ۰/۴۱ | ۰/۳۵ | ۵۷ | ۴۴ | ۳۳۰ | ۱۶۵ |
| ۳ | ۷/۴ | ۷/۸ | ۰/۵۹ | ۰/۵۵ | ۵۴ | ۳۸ | ۲۲۷ | ۱۴۴ |
| ۴ | ۷/۵ | ۷/۸ | ۰/۸۱ | ۰/۷۲ | ۸۷ | ۷۴ | ۴۲۳ | ۲۳۷ |
| ۵ | ۷/۵ | ۷/۹ | ۰/۵۳ | ۰/۴۷ | ۵۷ | ۴۲ | ۲۷۸ | ۲۰۶ |
| ۶ | ۷/۶ | ۷/۹ | ۰/۹۰ | ۰/۸۶ | ۵۳ | ۳۹ | ۲۶۸ | ۱۹۶ |
| ۷ | ۷/۵ | ۷/۹ | ۰/۵۷ | ۰/۵۲ | ۵۷ | ۴۲ | ۲۴۸ | ۱۷۵ |
| ۸ | ۷/۸ | ۸/۲ | ۱/۳۳ | ۱/۲۵ | ۹۸ | ۷۶ | ۴۲۳ | ۲۱۷ |
| ۹ | ۷/۶ | ۷/۸ | ۱/۲۶ | ۱/۱۹ | ۱۰۰ | ۸۰ | ۵۰۵ | ۳۳۰ |
| ۱۰ | ۷/۵ | ۷/۷ | ۱/۱۳ | ۱/۰۷ | ۹۴ | ۷۵ | ۳۴۰ | ۲۲۷ |
| میانگین | ۷/۵ b | ۷/۹ a | ۰/۸۴ a | ۰/۷۷ b | ۷۳ a | ۵۶b | ۳۵۶ a | ۲۱۶ b |

*- حروف متفاوت برای هر خصوصیت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در سطح احتمال ۱ درصد بر اساس آزمون t-test هستند.

در خاک‌های فرا ریشه، کربن آلی محلول با کربن زیست توده میکروبی ضریب همبستگی معنی‌داری (*۰/۷۱) داشت. همبستگی کربن آلی کل و کربن زیست توده میکروبی معنی‌دار نبود. همچنین، همبستگی معنی‌داری (**۰/۸۶) بین کربن آلی محلول و کربن آلی کل بدست آمد. در خاک‌های توده، بین کربن آلی محلول و کربن زیست توده میکروبی ضریب همبستگی معنی‌داری بدست آمد (*۰/۷۱ =r). همبستگی کربن آلی و کربن زیست توده میکروبی معنی‌دار نبود. همچنین همبستگی معنی‌داری (**۰/۷۹) بین کربن آلی محلول و کربن آلی کل بدست آمد. نتایج مشابهی توسط متقیان و همکاران (۲) در مطالعه اثر فرا ریشه گندم بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک گزارش شده است.

### مس قابل استفاده در خاک‌های فرا ریشه و توده

مقادیر مس قابل استفاده در خاک‌های فرا ریشه و توده در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی در خاک‌های فرا ریشه به‌صورت معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) کمتر از خاک‌های توده است. در خاک‌های ریزوسفر، مس عصاره‌گیری شده با روش‌های مهلیچ ۳ در دامنه ۳/۵۰ (خاک‌های ۶ و ۷) تا ۴/۲۸ (خاک ۱۰) با میانگین ۳/۵۳، AB-DTPA در دامنه ۲/۶۷ (خاک ۵) تا ۴/۸۸ (خاک ۸) با میانگین ۳/۶۶، DTPA-TEA در دامنه ۱/۸۱ (خاک ۳) تا ۳/۳۵ (خاک ۱۰) با میانگین ۲/۴۶، مهلیچ ۲ در دامنه ۰/۲۷ (خاک ۹) تا ۰/۶۱ (خاک ۱) با میانگین ۰/۴۸، HCl ۰/۱ مولار در دامنه ۰/۲۱ (خاک ۱) تا ۰/۳۰ (خاک‌های ۴ و ۵) با میانگین ۰/۲۶، مهلیچ ۱ در دامنه ۰/۱۰ (خاک ۱) تا ۰/۲۶ (خاک ۷) با میانگین ۰/۱۹ و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در دامنه ۰/۱۱ (خاک ۵) تا ۰/۲۴ (خاک‌های ۲ و ۸) با میانگین ۰/۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

در خاک توده، مس عصاره‌گیری شده با روش‌های مهلیچ ۳ در دامنه ۳/۱۵ (خاک ۵) تا ۴/۸۷ (خاک ۱۰) با میانگین ۳/۹۳، AB-DTPA در دامنه ۲/۸۱ (خاک ۵) تا ۵/۰۹ (خاک ۱) با میانگین ۳/۸۸، DTPA-TEA در دامنه ۲/۰۰ (خاک ۳) تا ۳/۶۷ (خاک ۱۰) با میانگین ۲/۸۴، مهلیچ ۲ در دامنه ۰/۴۲ (خاک‌های ۳ و ۹) تا ۰/۷۴ (خاک‌های ۱ و ۲) با میانگین ۰/۵۸، HCl ۰/۱ مولار در دامنه ۰/۲۲ (خاک ۱۰) تا ۰/۴۲ (خاک ۸) با میانگین ۰/۳۲، مهلیچ ۱ در دامنه ۰/۱۲ (خاک ۱) تا ۰/۲۷ (خاک‌های ۵ و ۷) با میانگین ۰/۲۱ و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در دامنه ۰/۱۳ (خاک ۵) تا ۰/۲۷ (خاک‌های ۲ و ۸) با میانگین ۰/۱۹ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۴).

میانگین مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش‌های DTPA-TEA، AB-DTPA، مهلیچ ۱، مهلیچ ۲، مهلیچ ۳، HCl ۰/۱ مولار در خاک‌های ریزوسفر نسبت به خاک‌های توده به‌ترتیب ۱۳/۴، ۵/۷، ۹/۴، ۱۷/۲، ۱۰/۱، ۱۷/۳ و ۱۸/۳ درصد کاهش یافتند.

در پژوهش‌های زیادی کاهش مقدار مس قابل استفاده در خاک فرا ریشه گزارش شده است. متقیان و همکاران (۲) گزارش کردند که مقدار مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف شیمیایی از قبیل DTPA-TEA، AB-DTPA، مهلیچ ۱، مهلیچ ۲، مهلیچ ۳، HCl ۰/۱ نرمال و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های فرا ریشه گیاه گندم کمتر از خاک‌های توده بود. چری و همکاران (۱۱) گزارش کردند که مس عصاره‌گیری شده با EDTA، DTPA و کلرید کلسیم در خاک فرا ریشه کاهش پیدا کرد. کاهش مقدار مس قابل استفاده در فرا ریشه می‌تواند به دلیل کمپلکس مس با ترکیبات آلی باشد (۶). برخی از ترکیبات DOC تمایل زیادی برای پیوند با مس دارند (۳۷). گروه‌های عامل هیدروکسیل و کربوکسیل ترکیبات DOC با مس پیوند داده و منجر به تبدیل به شکل غیر قابل استفاده می‌شوند (۸). تاالو و همکاران (۴۳) گزارش کردند که تغییر مقدار DOC در فرا ریشه ذرت در دوره رشد شبیه به تغییر جزء تبادلی مس بود. کاتانی و همکاران (۱۰) گزارش کردند که DOC در خاک فرا ریشه ذرت سه برابر توده خاک بود. آنها گزارش کردند DOC جابه‌جایی عناصر کم‌نیاز را در خاک‌ها از طریق تشکیل کمپلکس‌های آلی افزایش می‌دهد، امّا مس با DOC تشکیل کمپلکس قوی می‌دهد. بنابراین، با ایجاد کمپلکس‌های آلی مس با ترکیبات کربن آلی محلول، قابلیت استفاده آن برای گیاه کاهش می‌یابد. همچنین، محققین زیادی (۲، ۷، ۴۳ و ۴۶) شرایط بیولوژیکی و شیمیایی متفاوت فرا ریشه نسبت به توده خاک را باعث تغییر در شکل‌های عناصر در خاک و در نتیجه کاهش در قابلیت استفاده عناصر برای گیاه گزارش کرده‌اند.

### شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه و توده

مقادیر اجزاء مس در خاک‌های فرا ریشه و توده در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که در خاک‌های فرا ریشه و توده، بیشترین مقادیر مس به‌ترتیب در شکل‌های تتمه، پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، پیوندشده با ماده آلی، پیوندشده با کربنات‌ها و مس تبادلی بود. باکرسی‌اوقلو و همکاران (۵) گزارش کردند که شکل‌های تتمه و مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز بیشترین مقدار بود. خانلری و جلالی (۲۴) مشاهده کردند که بیشترین مقدار مس در خاک‌های آهکی غرب ایران در بخش تتمه قرار گرفته بود. نتایج جدول ۵ نشان داد که تفاوت میانگین اجزاء مس در خاک‌های فرا ریشه نسبت به خاک‌های توده معنی‌دار ($p<۰/۰۵$) بود. مس تبادلی و مس پیوندشده با کربنات‌ها، مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و مس باقیمانده در خاک‌های فرا ریشه کاهش یافته و در مقابل مس پیوندشده با ماده‌آلی افزایش یافته بود. متقیان و همکاران (۲) گزارش کردند که در خاک فرا ریشه گندم مس تبادلی و مس پیوندشده با کربنات‌ها و مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز کاهش و در مقابل مس پیوندشده با ماده آلی و جزء تتمه افزایش یافت.

**جدول ٤- مقادیر مس عصاره‌گیری شده (میلی‌گرم در کیلوگرم) با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف***

| شماره خاک | DTPA-TEA | AB-DTPA | مهلیچ ۱ | مهلیچ ۲ | مهلیچ ۳ | HCl | کلرید کلسیم |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | خاک‌های فرا ریشه | | | | |
| ۱ | ۲/۸۸ | ۴/۷۰ | ۰/۱۰ | ۰/۶۱ | ۴/۰۱ | ۰/۲۱ | ۰/۱۶ |
| ۲ | ۲/۶۱ | ۴/۲۷ | ۰/۱۲ | ۰/۶۰ | ۳/۷۹ | ۰/۲۷ | ۰/۲۴ |
| ۳ | ۱/۸۱ | ۳/۱۵ | ۰/۲۱ | ۰/۳۷ | ۳/۱۰ | ۰/۲۴ | ۰/۱۲ |
| ۴ | ۲/۱۷ | ۳/۴۱ | ۰/۲۲ | ۰/۴۵ | ۳/۵۳ | ۰/۳۰ | ۰/۱۶ |
| ۵ | ۲/۲۷ | ۲/۶۷ | ۰/۲۳ | ۰/۵۰ | ۳/۰۴ | ۰/۳۰ | ۰/۱۱ |
| ۶ | ۲/۰۶ | ۲/۹۱ | ۰/۲۵ | ۰/۵۳ | ۳/۰۰ | ۰/۲۹ | ۰/۱۴ |
| ۷ | ۲/۱۷ | ۲/۸۸ | ۰/۲۶ | ۰/۴۳ | ۳/۰۰ | ۰/۲۹ | ۰/۱۴ |
| ۸ | ۳/۰۰ | ۴/۸۸ | ۰/۱۸ | ۰/۵۴ | ۳/۸۵ | ۰/۲۶ | ۰/۲۴ |
| ۹ | ۲/۲۹ | ۳/۴۵ | ۰/۱۵ | ۰/۲۷ | ۳/۷۰ | ۰/۲۳ | ۰/۱۳ |
| ۱۰ | ۳/۳۵ | ۴/۳۲ | ۰/۱۶ | ۰/۵۵ | ۴/۲۸ | ۰/۲۲ | ۰/۱۳ |
| میانگین | ۲/۴۶b | ۳/۶۶b | ۰/۱۹b | ۰/۴۸b | ۳/۵۳b | ۰/۲۶b | ۰/۱۶b |
| | | | خاک‌های توده | | | | |
| ۱ | ۳/۶۶ | ۵/۰۹ | ۰/۱۲ | ۰/۷۴ | ۴/۸۰ | ۰/۲۹ | ۰/۱۷ |
| ۲ | ۲/۹۸ | ۴/۲۵ | ۰/۱۵ | ۰/۷۴ | ۴/۱۳ | ۰/۳۶ | ۰/۲۷ |
| ۳ | ۲/۰۰ | ۳/۴۱ | ۰/۲۲ | ۰/۴۲ | ۳/۵۰ | ۰/۳۳ | ۰/۱۵ |
| ۴ | ۲/۶۷ | ۳/۸۱ | ۰/۲۵ | ۰/۵۵ | ۳/۷۳ | ۰/۳۰ | ۰/۲۴ |
| ۵ | ۲/۵۳ | ۲/۸۱ | ۰/۲۷ | ۰/۵۷ | ۳/۱۵ | ۰/۳۴ | ۰/۱۳ |
| ۶ | ۲/۴۴ | ۳/۲۶ | ۰/۲۶ | ۰/۵۷ | ۳/۱۷ | ۰/۳۱ | ۰/۱۵ |
| ۷ | ۲/۳۳ | ۳/۲۸ | ۰/۲۷ | ۰/۵۶ | ۳/۷۷ | ۰/۳۲ | ۰/۱۹ |
| ۸ | ۳/۵۲ | ۴/۹۶ | ۰/۲۲ | ۰/۶۶ | ۴/۱۹ | ۰/۴۲ | ۰/۲۷ |
| ۹ | ۲/۶۰ | ۳/۵۰ | ۰/۱۵ | ۰/۴۲ | ۳/۹۶ | ۰/۲۷ | ۰/۱۸ |
| ۱۰ | ۳/۶۷ | ۴/۴۵ | ۰/۲۱ | ۰/۶۲ | ۴/۸۷ | ۰/۲۲ | ۰/۱۹ |
| میانگین | ۲/۸۴a | ۵/۰۹ | ۰/۲۱a | ۰/۵۸a | ۳/۹۳a | ۰/۳۲a | ۰/۱۹a |

*- حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین هر عصاره‌گیر در خاک‌های فرا ریشه و توده بر اساس آزمون t-test در سطح احتمال ۱ درصد هستند.

میانگین مس تبادلی و مس پیوندشده با کربنات‌ها، مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و تتمه به‌ترتیب ۰/۲۴ (۲/۹۶ درصد از مس کل)، ۰/۱۷ (۰/۸۰ درصد از مس کل)، ۱/۴۷ (۱۰/۳۹ درصد از مس کل) و ۱۷/۴ (۸۳/۸۹ درصد از مس کل) میلی‌گرم در کیلوگرم در خاک‌های فرا ریشه بود. درحالی‌که میانگین این شکل‌ها در خاک‌های توده به‌ترتیب ۰/۷۶ (۳/۴۹ درصد از مس کل)، ۰/۲۱ (۰/۹۵ درصد از مس کل)، ۱/۷۲ (۷/۸۷ درصد از مس کل) و ۱۸/۲ (۸۳/۳۹ درصد از مس کل) میلی‌گرم در کیلوگرم بود. همچنین میانگین مس پیوندشده با ماده آلی در خاک‌های فرا ریشه ۱/۰۹ (۵/۲۷ درصد از مس کل) میلی‌گرم در کیلوگرم بود درحالی‌که میانگین این شکل‌ها در خاک‌های توده ۰/۹۴ (۴/۳۱ درصد از مس کل) میلی‌گرم در کیلوگرم بود (شکل ۲).

میانگین مس پیوندشده با ماده‌آلی ۱۵/۷ درصد افزایش درحالی‌که میانگین مس پیوندشده با کربنات‌ها ۱۹/۵ درصد، مس تبادلی ۱۹/۶ درصد، مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز ۱۴/۷ درصد و مس باقیمانده ۴/۷ درصد در خاک‌های فرا ریشه نسبت به خاک‌های توده کاهش یافتند. نتایج جدول ۵ نشان داد که مس کل در خاک‌های فرا ریشه نسبت به خاک‌های توده کاهش معنی‌داری یافت. میانگین مس کل در خاک‌های توده ۲۱/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود، درحالی‌که در خاک‌های فرا ریشه مقدار ۲۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم داشت.

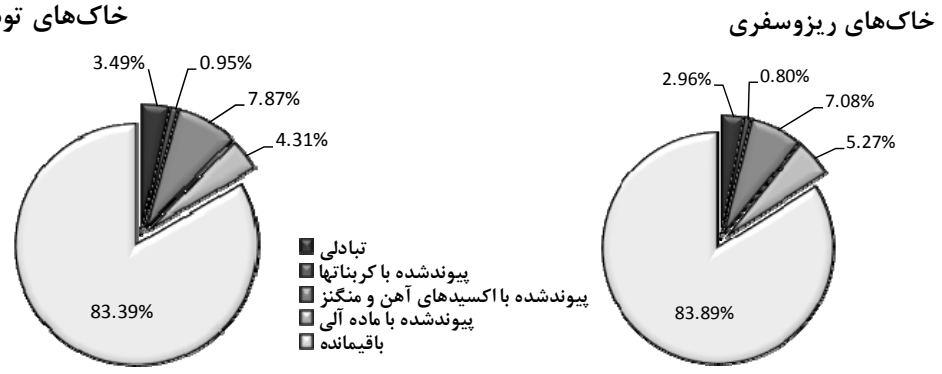
کاهش مقدار مس تبادلی به وسیله وانگ و همکاران (۴۶) و متقیان و همکاران (۲) گزارش شده است. علاوه بر این شکل‌های محلول و تبادلی می‌توانند با ترکیبات آلی ترشح شده از ریشه‌ها پیوند دهند (۳۲). بنابراین این شکل‌ها در خاک‌های فرا ریشه لوبیا کاهش پیدا کردند. تااو و همکاران (۴۳) انتقال مس پیوندشده با کربنات‌ها به مس تبادلی را علت کاهش این شکل در خاک فرا ریشه بیان کردند. وانگ و همکاران (۴۶) گزارش کردند که درصد مس تبادلی و مس پیوندشده با موادآلی در خاک فرا ریشه به‌ترتیب ۹/۸۱ و ۱۰/۴۲ درصد افزایش یافتند. درحالی‌که درصد مس پیوندشده با کربنات‌ها و مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز به‌ترتیب ۲/۹۶ و ۱/۸۲ درصد

کاهش یافتند. ایشان علّت را افزایش ترکیبات آلی و کاهش pH در فرا ریشه بیان کردند. گودو و ریسناور (۱۷) گزارش کردند که کاهش شکل پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز می‌تواند به دلیل احیای اکسیدهای آهن به وسیله اسیدهای آلی آزاد شده از ریشه باشد. مس آزادشده از اکسیدهای آهن و منگنز می‌تواند در خاک فرا ریشه در بخش پیوندشده با ماده‌آلی قرار گیرد.

**جدول ۵- مقادیر شکل‌های مختلف مس (میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک‌های فرا ریشه و توده***

| شماره خاک | تبادلی | پیوندشده با کربنات‌ها | پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز | پیوندشده با ماده‌آلی | باقیمانده | کل |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | خاک‌های فرا ریشه | | | |
| ۱ | ۰/۸۳ | ۰/۱۶ | ۲/۲۹ | ۱/۰۰ | ۲۲/۱ | ۲۴/۵ |
| ۲ | ۰/۹۴ | ۰/۱۶ | ۱/۹۳ | ۰/۷۷ | ۲۱/۲ | ۲۳/۶ |
| ۳ | ۰/۵۶ | ۰/۱۷ | ۱/۵۴ | ۰/۷۳ | ۱۶/۹ | ۱۹/۲ |
| ۴ | ۰/۴۶ | ۰/۱۸ | ۱/۶۵ | ۰/۸۶ | ۱۶/۰ | ۲۰/۱ |
| ۵ | ۰/۴۵ | ۰/۱۸ | ۱/۸۴ | ۰/۷۱ | ۱۴/۱ | ۱۸/۴ |
| ۶ | ۰/۴۷ | ۰/۱۳ | ۱/۲۱ | ۱/۱۵ | ۱۴/۱ | ۱۷/۹ |
| ۷ | ۰/۶۵ | ۰/۲۵ | ۰/۹۰ | ۱/۰۶ | ۱۳/۴ | ۱۵/۴ |
| ۸ | ۰/۸۷ | ۰/۲۰ | ۱/۲۹ | ۲/۰۳ | ۱۷/۸ | ۲۱/۲ |
| ۹ | ۰/۴۱ | ۰/۱۶ | ۰/۷۰ | ۱/۲۹ | ۱۸/۴ | ۲۱/۰ |
| ۱۰ | ۰/۴۹ | ۰/۱۴ | ۱/۳۳ | ۱/۳۱ | ۲۰/۰ | ۲۳/۸ |
| میانگین | ۰/۶۱b | ۰/۱۷ b | ۱/۴۷ b | ۱/۰۹ a | ۱۷/۴b | ۲۰/۵ b |
| | | | خاک‌های توده | | | |
| ۱ | ۰/۶۰ | ۰/۲۳ | ۲/۵۱ | ۰/۸۶ | ۲۴/۱ | ۲۵/۸ |
| ۲ | ۰/۶۳ | ۰/۲۹ | ۲/۷۸ | ۰/۷۵ | ۲۱/۳ | ۲۵/۱ |
| ۳ | ۰/۴۹ | ۰/۲۰ | ۱/۶۸ | ۰/۵۶ | ۱۷/۷ | ۱۹/۷ |
| ۴ | ۰/۴۵ | ۰/۲۱ | ۱/۹۰ | ۰/۷۶ | ۱۶/۷ | ۲۰/۶ |
| ۵ | ۰/۴۱ | ۰/۲۵ | ۱/۸۷ | ۰/۶۷ | ۱۶/۰ | ۱۹/۷ |
| ۶ | ۰/۴۳ | ۰/۱۶ | ۱/۴۲ | ۰/۹۹ | ۱۴/۶ | ۱۸/۲ |
| ۷ | ۰/۶۲ | ۰/۲۹ | ۱/۱۴ | ۰/۹۸ | ۱۴/۳ | ۱۵/۸ |
| ۸ | ۰/۶۳ | ۰/۳۵ | ۱/۵۲ | ۱/۶۰ | ۱۸/۱ | ۲۲/۱ |
| ۹ | ۰/۳۳ | ۰/۳۲ | ۰/۸۴ | ۱/۰۹ | ۱۹/۱ | ۲۲/۱ |
| ۱۰ | ۰/۲۴ | ۰/۳۴ | ۱/۵۷ | ۱/۱۶ | ۲۰/۵ | ۲۴/۲ |
| میانگین | ۰/۴۸a | ۰/۲۶a | ۱/۷۲a | ۰/۹۴b | ۱۸/۲a | ۲۱/۳ a |

*- حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین هر جزء در خاک‌های فرا ریشه و توده در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون t-test هستند.




**شکل ۲- درصد شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه و توده**

### همبستگی بین شکل‌های مس و مقدار مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی

همبستگی بین مقادیر شکل‌های مس و مس عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیرهای شیمیایی در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که در خاک‌های فرا ریشه، مس تبادلی با مس عصاره‌گیری شده با AB-DTPA و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار همبستگی معنی‌داری ($p< ۰/۰۵$) داشت. همبستگی بین مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز با مس عصاره‌گیری شده با مهلیچ ۲ معنی‌دار ($p< ۰/۰۵$) بود. مس تتمه با مس عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ معنی‌دار ($p< ۰/۰۵$) بود. همچنین، همبستگی منفی و معنی‌داری بین مس تتمه و مس عصاره‌گیری شده با استفاده از مهلیچ ۱ و HCl ۰/۱ مولار بدست آمد. در خاک‌های توده، مس تبادلی با مس عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA، مهلیچ ۲ و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار همبستگی معنی‌داری ($p< ۰/۰۵$) داشت. همبستگی بین مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز با مس عصاره‌گیری شده با مهلیچ ۲ معنی‌دار ($p< ۰/۰۵$) بود. بخش تتمه با مس عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ همبستگی معنی‌داری ($p< ۰/۰۵$) داشت. همچنین همبستگی منفی و معنی‌داری بین مس تتمه و مس عصاره‌گیری شده با استفاده از مهلیچ ۱ بدست آمد. مس پیوندشده با کربنات‌ها و مس پیوندشده با ماده‌آلی با هیچ یک از عصاره‌گیرهای شیمیایی مورد استفاده همبستگی معنی‌داری نداشتند.

### همبستگی بین مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی و شکل‌های مس با شاخص‌های لوبیا

شاخص‌های گیاه لوبیا در خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۷ نشان داده شده است. همبستگی بین مقادیر مس عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیرهای مختلف شیمیایی و شاخص‌های لوبیا در خاک‌های فرا ریشه و توده در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که در خاک‌های فرا ریشه، غلظت مس در بخش هوایی همبستگی معنی‌داری با مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش‌های DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ داشت. همچنین، همبستگی بین جذب روی در بخش هوایی لوبیا با مس عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA و مهلیچ ۳ معنی‌دار بود. در خاک‌های توده، همبستگی غلظت مس در بخش هوایی لوبیا با مس عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ معنی‌دار بود. نتایج بررسی همبستگی نشان داد که شاخص جذب مس در بخش هوایی همبستگی معنی‌داری با مس عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA داشت.

**جدول ٦- ضرایب همبستگی (r) بین مقادیر شکل‌های مس و مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش‌های مختلف شیمیایی**

| عصاره‌گیر | تبادلی | پیوندشده با کربنات‌ها | پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز | پیوندشده با ماده‌آلی | باقیمانده |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | خاک‌های فرا ریشه | | |
| DTPA-TEA | ۰/۴۲ ns | ۰/۰۶ ns | ۰/۲۰ ns | ۰/۵۵ ns | ۰/۶۶* |
| AB-DTPA | ۰/۷۰* | ۰/۰۵ ns | ۰/۳۴ ns | ۰/۵۴ ns | ۰/۸۳** |
| مهلیچ ۱ | -۰/۵۱ns | ۰/۱۶ ns | -۰/۴۲ ns | -۰/۱۱ ns | -۰/۹۷** |
| مهلیچ ۲ | ۰/۶۱ ns | -۰/۱۴ ns | ۰/۶۷* | ۰/۰۶ ns | ۰/۳۹ ns |
| مهلیچ ۳ | ۰/۳۷ ns | -۰/۱۴ ns | ۰/۲۲ ns | ۰/۴۲ ns | ۰/۸۶** |
| HCl | /۲۰ ns | ۰/۳۰ ns | -۰/۱۰ ns | -۰/۲۵ ns | -۰/۷۹** |
| کلرید کلسیم | ۰/۸۵** | ۰/۲۸ ns | ۰/۲۷ ns | ۰/۳۷ ns | ۰/۴۵ ns |
| | | | خاک‌های توده | | |
| DTPA-TEA | ۰/۵۷ ns | ۰/۰۳ ns | ۰/۳۶ ns | ۰/۵۶ ns | ۰/۷۱* |
| AB-DTPA | ۰/۸۳** | ۰/۱۶ ns | ۰/۴۴ ns | ۰/۵۰ ns | ۰/۷۶* |
| مهلیچ ۱ | -۰/۴۱ns | ۰/۱۷ ns | -۰/۴۳ ns | -۰/۰۳ ns | -۰/۹۲* |
| مهلیچ ۲ | ۰/۶۵* | ۰/۳۶ ns | ۰/۷۴* | ۰/۲۰ ns | ۰/۵۴ ns |
| مهلیچ ۳ | ۰/۶۲ ns | ۰/۰۶ ns | ۰/۲۷ ns | ۰/۴۱ ns | ۰/۸۲** |
| HCl | ۰/۳۴ ns | ۰/۴۶ ns | ۰/۲۱ ns | ۰/۱۸ ns | -۰/۲۰ns |
| کلرید کلسیم | ۰/۷۲* | ۰/۲۰ ns | ۰/۳۱ ns | ۰/۴۲ ns | ۰/۲۷ ns |

**- معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *- معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns غیرمعنی‌دار

**جدول ۷- شاخص‌های گیاه لوبیا قرمز رقم صیاد در خاک‌های مورد مطالعه**

| شماره خاک | غلظت مس (میلی‌گرم در کیلوگرم) | عملکرد (گرم در ریزوباکس) | جذب مس (میلی‌گرم در ریزوباکس) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۲/۷۵ | ۸/۰۵ | ۰/۱۰ |
| ۲ | ۹/۷۷ | ۱۰/۳۲ | ۰/۱۰ |
| ۳ | ۸/۱۰ | ۵/۹۱ | ۰/۰۵ |
| ۴ | ۱۰/۲۰ | ۹/۷۰ | ۰/۱۰ |
| ۵ | ۹/۹۰ | ۸/۳۰ | ۰/۰۸ |
| ۶ | ۸/۱۳ | ۱۰/۳۰ | ۰/۰۸ |
| ۷ | ۹/۵۰ | ۸/۶۳ | ۰/۰۸ |
| ۸ | ۱۰/۷۰ | ۱۰/۹۱ | ۰/۱۲ |
| ۹ | ۱۰/۱۳ | ۱۲/۱۴ | ۰/۱۲ |
| ۱۰ | ۱۰/۱۵ | ۱۰/۴۳ | ۰/۱۱ |

**جدول ۸- ضرایب همبستگی (r) بین مقادیر مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی و شاخص‌های گیاه لوبیا**

| شاخص | DTPA-TEA | AB-DTPA | مهلیچ ۱ | مهلیچ ۲ | مهلیچ ۳ | HCl | کلرید کلسیم |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | خاک‌های فرا ریشه | | | |
| غلظت | ۰/۶۵* | ۰/۶۸* | -۰/۶۷* | ۰/۳۸ ns | ۰/۶۷* | -۰/۴۸ns | ۰/۲۹ ns |
| عملکرد | ۰/۴۰ ns | ۰/۳۰ ns | ۰/۲۴ ns | -۰/۰۳ns | ۰/۴۴ ns | ۰/۰۳ ns | ۰/۳۴ ns |
| جذب | ۰/۶۵* | ۰/۶۰ ns | -۰/۵۵ns | ۰/۱۳ ns | ۰/۷۱* | -۰/۳۰ns | ۰/۴۲ ns |
| | | | | خاک‌های توده | | | |
| غلظت | ۰/۷۷** | ۰/۷۱* | -۰/۵۹ns | ۰/۵۹ ns | ۰/۷۱* | -۰/۰۷ns | ۰/۲۷ ns |
| عملکرد | ۰/۳۷ ns | ۰/۲۱ ns | -۰/۲۰ns | ۰/۱۱ ns | ۰/۲۳ ns | -۰/۰۸ns | ۰/۴۸ ns |
| جذب | ۰/۶۸* | ۰/۵۴ ns | -۰/۴۷ ns | ۰/۳۶ ns | ۰/۵۶ ns | ۰/۰۷ ns | ۰/۵۴ ns |

**- معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *- معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns غیرمعنی‌دار

ضرایب همبستگی بین شاخص‌های لوبیا و شکل‌های مس در خاک‌های فرا ریشه و توده در جدول ۹ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که در خاک‌های فرا ریشه، همبستگی بین عملکرد و جذب در بخش هوایی با مس پیوندشده با ماده‌آلی و همچنین غلظت مس در بخش هوایی با مس تتمه معنی‌دار بود. درحالی‌که بین شکل‌های مس و شاخص‌های گیاه لوبیا در خاک‌های توده همبستگی معنی‌داری بدست نیامد.

**جدول ۹- ضرایب همبستگی (r) بین مقادیر اجزاء مختلف مس و شاخص‌های گیاه لوبیا**

| شاخص | تبادلی | پیوندشده با کربنات‌ها | پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز | پیوندشده با ماده‌آلی | باقیمانده |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | خاک‌های فرا ریشه | | |
| غلظت | ۰/۳۱ ns | ۰/۲۹ ns | ۰/۳۸ ns | ۰/۲۷ ns | ۰/۷۰* |
| عملکرد | ۰/۱۰ ns | -۰/۳۰ns | -۰/۳۰ ns | ۰/۶۶* | ۰/۰۶ ns |
| جذب | ۰/۱۸ ns | -۰/۱۰ ns | -۰/۱۰ ns | ۰/۶۷* | ۰/۴۲ ns |
| | | | خاک‌های توده | | |
| غلظت | ۰/۴۳ ns | ۰/۲۳ ns | ۰/۴۵ ns | ۰/۲۴ ns | ۰/۶۱ ns |
| عملکرد | -۰/۰۳ ns | -۰/۲۳ ns | -۰/۴۷ ns | ۰/۵۸ ns | ۰/۱۷ ns |
| جذب | ۰/۲۰ ns | -۰/۰۲ ns | -۰/۱۶ ns | ۰/۶۱ ns | ۰/۴۶ ns |

**- معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *- معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns غیرمعنی‌دار

در پژوهش‌های انجام شده شکل‌های مختلفی به‌عنوان شکل یا شکل‌های قابل استفاده گیاه گزارش شده‌اند. لیانگ و همکاران (۲۶) گزارش کردند که غلظت مس در لوبیا با مقدار مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و مقدار کل مس همبستگی معنی‌داری (ضرایب همبستگی به‌ترتیب $^{*}$۰/۸۸ و $^{*}$۰/۷۲) داشت و همچنین شاخص جذب مس با مقدار مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و مقدار کل مس همبستگی معنی‌داری (ضرایب همبستگی به‌ترتیب $^{*}$۰/۹۲ و $^{*}$۰/۸۳) داشت. اسید فولویک توانایی پیوند با عنصر مس را داشته و منجر به افزایش قابلیت استفاده مس می‌شود (۴۵). درحالی‌که اجزاء ماده‌آلی با وزن ملکولی زیاد، مقدار کمی از عناصر پیوندشده را با سرعت کم آزاد می‌کنند (۱۴). متقیان و همکاران (۲) بیان کردند که مس تبادلی، مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، مس پیوندشده با ماده آلی و جزء تتمه در تأمین مس قابل استفاده گندم دارای اهمیت بودند. همچنین، آنها گزارش کردند که اهمیت مس پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و مس تتمه در تأمین مس قابل استفاده گندم از سایر شکل‌های مس بیشتر بود.

محلول و کربن زیست توده میکروبی در خاک‌های فرا ریشه نسبت به خاک توده افزایش معنی‌داری یافتند. درحالی‌که pH در خاک‌های فرا ریشه کاهش معنی‌داری یافت. مس عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای شیمیایی در خاک‌های فرا ریشه کمتر از خاک‌های توده بود. همچنین، همه شکل‌های مس به جز مس پیوندشده با ماده‌آلی در خاک فرا ریشه نسبت به خاک توده کاهش معنی‌داری یافتند. در خاک‌های فرا ریشه و توده، مس تتمه با مس عصاره‌گیری شده با روش‌های DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ همبستگی معنی‌داری داشت. همبستگی بین غلظت مس و مس عصاره‌گیری شده با روش‌های DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ در خاک‌های فرا ریشه و توده معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که عملکرد و جذب مس با مس پیوندشده با ماده‌آلی و غلظت مس با مس تتمه در خاک‌های فرا ریشه همبستگی معنی‌داری داشتند. نتایج این مطالعه نشان داد که به دلیل تغییرات در مس قابل استفاده در خاک‌های فرا ریشه، توجه و استفاده از خاک فرا ریشه بویژه در مطالعات پس از کشت گیاه، ضروری است.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان دادند که کل کربن آلی، کربن آلی

## منابع


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

۲- متقیان ح.ر.، حسین‌پور ع.ر.، محمدی ج. و رئیسی ف. ۱۳۹۱. تغییر در قابلیت استفاده و اجزاء مس در ریزوسفر لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) در تعدادی از خاک‌های آهکی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶(۶):۱۵۰۴-۱۴۹۲.

۳- متقیان ح.ر.، حسین‌پور ع.ر.، محمدی ج.، رئیسی ف. ۱۳۹۲. ارزیابی چند عصاره‌گیر جهت تعیین مس قابل استفاده گندم (*Triticum aestivum* L. در خاک‌های تیمارشده و تیمارنشده با لجن فاضلاب، مجله علوم و فنون پژوهش‌های گلخانه‌ای، (در دست چاپ). مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای (در دست چاپ).

4- Mada I., Gudenschwager O., Carrasco M.A., Castillo G., Ascar L., and Richter P. 2009. Copper and zinc bioavailabilities to ryegrass (*Lolium perenne* L.) and subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) grown in biosolid treated Chilean soils. J. Environ. Manage., 90: 2665–2671.

5- Bakircioglu D., Bakircioglu Kurtulus Y., and Ibar H. 2011.Investigation of trace elements in agricultural soils by BCR sequential extraction method and its transfer to wheat plants. Environ Monit Assess., 175:303–314.

6- Bernal M.P., and McGrath S.P. 1994. Effects of pH and heavy metal concentrations in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *Alyssum murale* and *Raphanus sativus* L. Plant Soil, 166: 83–92.

7- 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.

8- 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.

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

10- Cattani I., Fragoulis G., Boccelli R., and Capri E. 2006. Copper bioavailability in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.) grown in two Italian soils. Chemosphere, 64:1972-1979.

11- Cherrey A., Chaignon V., and Hinsinger P. 1999. Bioavailability of copper in the rhizosphere of rape and ryegrass cropped in vineyard soils. p. 196–197. *In* W.W. Wenzel et al. (ed) Proceedings of Extended Abstracts of 5th

International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Vienna, Austria.
12- Chino M., Goto S., Youssef R., and Miah Y. 1999. Behaviour of micronutrients in the rhizosphere. p. 180–181. *In* W.W. Wenzel et al. (ed) Proceedings of Extended Abstracts of 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Vienna, Austria.
13- 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.
14- Filgueiras A.V., Lavilla I., and Bendicho C. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. J. Environ. Monit., 4: 823-857.
15- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. p. 404-407. *In* Klute A. (ed) Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd edition. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
16- Gobran G.R., Clegg S., and Courchesne., F. 1998. Rhizospheric processes influencing the biogeochemistry of forest ecosystems. Biogeochem, 42: 107-120.
17- Godo G.H., and Reisenauer H.M. 1980. Plant effect on soil manganese availability. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 993-995.
18- Guan T.X., He H.B., Zhang X.D., and Bai Z. 2011. Cu fractions, mobility and bioavailability in soil-wheat system after Cu-enriched livestock manure applications. Chemosphere, 82: 215–222.
19- Hinsinger P., Plassard C., Tang C., and Jaillard B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. Plant Soil, 248: 43-59.
20- Hoyt P.B. and Nyborg M. 1971. Toxic metals in acid soil: 2. Estimation of plant available manganese. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35:141-144.
21- Jefferey J.J., and Uren N.C. 1983. Copper and zinc species in the soil solution and the effects of soil pH. Aust. J. Soil Res., 21: 479–488.
22- 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.
23- Kabala C., and Singh R.R. 2001. Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter. J. Environ. Qual., 30: 485--492.
24- Khanlari Z.V., and Jalali M. 2008. Concentrations and chemical speciation of five heavy metals (Zn, Cd, Ni, Cu, and Pb) in selected agricultural calcareous soils of Hamadan Province, western Iran. Archives of Agronomy and Soil Science, 54: 19-32.
25- Li H., Shen J. , Zhang F.M. , Clairotte J.J. , LeCadre E. , and Hinsinger P. 2008. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. Plant Soil, 312:139-150.
26- Liang J., Stewart J.W.B., and Karamanos, R.E. 1991. Distribution and plant availability of soil copper fractions in Saskatchewan. Can. J. Soil Sci., 7l: 89-99.
27- 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.
28- Loeppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and gypsum. p 437-474. *In* D.L. Sparks (ed) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
29- Lombi E., Wenzel W.W., Gobran G.R., and Adriano D.C. 2001. Dependency of phytoavailability of metals on indigenous and induced rhizosphere processes: a review. p. 3-24. *In* G.R Gobran et al. Trace Elements in the Rhizosphere. CRC Press LLC.
30- Lynch J.M., and Whipps J.M. 1990. Substrate flow in the rhizosphere. Plant Soil, 129: 1–10.
31- Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed. Academic Press, London.
32- Marschner H., and Romheld V. 1996. Root-induced changes in the availability of micronutrients in the rhizosphere. *In* Y. Waisel (ed) Plant Roots, The Hidden Half, 2th ed. Marcel Dekker, NY.
33- Mehlich A. 1953. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and $NH_4$. North Carolina Soil Testing Div. Mimeo, Raleigh.
34- Mehlich A. 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sodium, manganese and zinc. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 9: 477-492.
35- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 15: 1409-1416.
36- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Carbon, organic carbon, and organic matter. p. 961-1010. *In* D.L. Sparks, (ed) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
37- Philippe H. 1999. Bioavailability of trace elements as related to root induced chemical changes in the rhizosphere. p. 152-153. *In* W.W. Wenzel et al. (ed) Proceedings of Extended Abstracts of 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Vienna, Austria.
38- Rhoades J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. p. 417-435. *In* D.L. Sparks (ed) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
39- Sadovnikova L., Otabbong E., Iakimenko O., Nilsson, I., Persson J., and Orlov D. 1996. Dynamic transformation of sewage sludge and farmyard manure components, 2-Copper, lead and cadmium forms in incubated soils. Agric.

Ecosyst. Environ., 58:127-132.
40- 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.
41- Sposito G.L., Lund J., and Chang, A.C. 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., 46:260-265.
42- Sumner M.E., and Miller P.M. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. p. 1201-1230. *In* D.L. Sparks (ed) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
43- 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.
44- Tessier A., Campbell P.G.C., and Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem., 51: 844- 851.
45- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475-490. *In* D.L. Sparks (ed) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
46- 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.
47- Wollan E., and Beckett P.H.T. 1979. Changes in the extractability of heavy metals on the interaction of sewage sludge with soil. Environ. Pollut., 20:215-30.

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No. 5, Nov.-Dec. 2013, p. 1009-1022

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر - دی ۱۳۹۲، ص. ۱۰۲۲-۱۰۰۹

# Effect of the Red Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Rhizosphere on the Bioavailability and Fractions of Copper in some Calcareous Soils

**H.R. Motaghian[1*]- A. Hosseinpour[2]**

Received: 17-03-2013
Accepted: 27-10-2013

## Abstract

Change in microorganism activity and chemical properties can be affect on availability and fractionation of Copper (Cu). This research was conducted to investigate the availability and fractionation of Cu in the bean rhizosphere and bulk soils in 10 calcareous soils using rhizobox at greenhouse. Total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), pH, available Cu (by using 7 chemical extractants) and Cu-fractions were determined in the rhizosphere and bulk soils. The results indicated that in the bean rhizosphere soils, TOC, DOC and MBC increased significantly ($p<0.01$), whereas pH decreased significantly ($P<0.01$). Copper extracted using several chemical extractants in the rhizosphere were significantly ($p<0.05$) lower than in the bulk soils. In the rhizosphere soils, Cu associated with organic matter increased 15.7%, whereas Cu associated with carbonates, exchangeable Cu, Cu associated with manganese-iron oxides, and residual Cu decreased 19.5, 19.6, 14.7, and 4.7 respectively. The results indicated that correlation between residual Cu with extracted Cu using DTPA-TEA, AB-DTPA and Mehlich 3 were significant ($p<0.05$) in both the rhizosphere and bulk soils. Correlation between concentration of Cu in bean and extracted Cu using DTPA-TEA, AB-DTPA and Mehlich 3 were significant ($p<0.05$) in both the rhizosphere and bulk soils. The result showed that significant correlation ($p<0.05$) were found between yield and uptake indices and Cu associated with organic matter and between concentration of Cu with residual Cu in the bean rhizosphere. The results of this research illustrated that availability of Zn and its fractions in the rhizosphere soils was different from the bulk soils. Therefore, the rhizosphere soil would be recommended in the study on availability of Cu after planting.

**Keywords:** Bean, Rhizosphere, Copper, Fractionation, Chamical extractants

1 , 2- Former PhD Student and Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Respectively
(*-Corresponding Author Email: hrm_61@yahoo.com)