

# بررسی نقش اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم در فراهمی عناصر غذایی کم مصرف در خاک

ندا مرادی<sup>۱</sup>

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

n.moradi@scu.ac.ir

دریافت: آبان ۱۳۹۷ و پذیرش: دی ۱۳۹۸

## چکیده

فراهمی عناصر غذایی کم مصرف در خاک و جذب آنها توسط گیاهان به ویژگی‌های خاک (مانند مواد آلی، کربنات کلسیم و pH) و برهمکنش‌های بین ریشه‌های گیاه و ریزجانداران خاک بستگی دارد. زیست‌فراهمی عناصر کم مصرف آهن (Fe)، منگنز (Mn)، مس (Cu) و روی (Zn) در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل کمبود مواد آلی، pH بالا و رسوب توسط کربنات‌ها، اندک می‌باشد. یکی از محدودیت‌های عمده تغذیه گیاهان در خاک‌های آهکی، زیست‌فراهمی اندک عناصر غذایی کم مصرف می‌باشد. نتایج مطالعات نشان داده که در شرایط کمبود عناصر غذایی، اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم مانند اسید سیتریک، اسید اگزالیک و اسید مالیک توسط ریشه گیاهان آزاد شده و سبب افزایش حلالیت عناصر کم مصرف می‌شوند. اسیدهای آلی ترشح شده در ریزوسفر گیاهان، در افزایش تحرک و زیست‌فراهمی عناصر غذایی کم مصرف در خاک و به دنبال آن افزایش جذب آنها توسط گیاهان موثر شناخته شده‌اند. افزون بر این، اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم در سمیت زدایی فلزات سنگین و بهبود فعالیت میکروبی خاک موثر هستند. بنابراین مطالعه حاضر به بررسی تاثیر اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم در افزایش زیست‌فراهمی عناصر کم مصرف شامل آهن، منگنز، مس و روی می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: ترشحات ریشه، حلالیت، خاک آهکی، عناصر کم مصرف، ریزوسفر

اسید (EDTA) در افزایش زیست‌فراهمی فلزات موثر بوده است، اما به دلیل پایداری محیطی EDTA و احتمال آبتیوی فلزات، استفاده از آن با چالش‌هایی روبرو است. این در حالی است که اسیدهای آلی به سرعت در خاک تجزیه می‌شوند و خطر آبتیوی نیز ندارند (ناسیمتو و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج مطالعات نشان داده اسیدهای با وزن مولکولی کم مانند اسید سیتریک<sup>۱</sup>، اسید اگزالیک<sup>۲</sup> و اسید مالیک<sup>۳</sup> کمپلکس‌هایی را با یون‌های فلزی تشکیل داده و حلالیت عناصر غذایی کم مصرف را در خاک افزایش دهند (رنگل، ۲۰۱۵؛ کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵؛ بوشر و همکاران، ۲۰۱۶).

آنیون اسیدهای آلی مانند سیتریک، مالیک و اگزالیک در بسیاری از فرآیندهای ریشه شرکت می‌کنند که این فرآیندها شامل سهولت جذب عناصر غذایی، سمیت‌زدایی فلزی، هوازگی کانی‌ها و جذب عوامل بیماری می‌باشد. البته تا زمانی که ساز و کار رهاسازی اسیدهای آلی و سرنوشت این ترکیبات در خاک کاملاً درک نشود، ارزیابی اسیدهای آلی در فرآیندهای ذکر شده میسر نخواهد بود (مرادی و همکاران، ۲۰۱۲)؛ بنابراین در این مطالعه اهمیت اسیدهای آلی در خاک و نقش و تاثیر آن‌ها بر حلالیت عناصر غذایی کم مصرف و جذب و واجذب آن‌ها در خاک آهکی و همچنین جذب نقش این ترکیبات در جذب عناصر کم مصرف توسط گیاهان، بررسی شده است.

### عناصر غذایی کم مصرف و اهمیت آن‌ها در تغذیه گیاهان

عناصر غذایی کم مصرف برای رشد و نمو گیاهان ضروری هستند و گیاهان در مقادیری کم‌تر از عناصر غذایی پر مصرف به آن‌ها نیاز دارند (کومار و همکاران، ۲۰۱۶). عناصر غذایی ضروری کم مصرف که در رشد گیاهان و فعالیت‌های متابولیکی آن‌ها موثرند به دو شکل کاتیون و آنیون در خاک وجود دارند. کاتیون‌ها

آهن، منگنز، مس و روی از جمله عناصر غذایی کم مصرف ضروری برای رشد و نمو گیاهان می‌باشند. این عناصر نقش مهمی در تغذیه گیاهان و بسیاری از فرآیندهای گیاهی دارند (کومار و همکاران، ۲۰۱۶). تحرک و فراهمی عناصر کم مصرف در خاک به ویژگی‌های خاک از جمله pH، مواد آلی، مقدار کربنات کلسیم، کانی‌های رس و اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزات بستگی دارد (میلائو و همکاران، ۲۰۱۰).

بخش زیادی از خاک‌های ایران آهکی هستند. واکنش کربنات کلسیم در خاک‌های آهکی با تولید یون هیدروکسید (OH<sup>-</sup>) و مصرف یون هیدروژن (H<sup>+</sup>) سبب افزایش pH خاک در حد ۷/۵ تا ۸/۵ می‌گردد (رنگل، ۲۰۱۵). در pH های بالا حلالیت عناصر آهن، منگنز، مس و روی در خاک کاهش می‌یابد؛ بنابراین شکل قابل دسترس این عناصر برای گیاهان فراهم نمی‌باشد. به دلیل فراهمی اندک این عناصر در خاک‌های آهکی، کمبود این عناصر در گیاهان سبب ایجاد مشکلات تغذیه‌ای شده است (رنگل، ۲۰۱۵). کمبود این عناصر غذایی در گیاهان و بویژه غلات سبب کمبود این عناصر غذایی در تغذیه جوامع بشری شده است و امروزه جمعیت زیادی از مردم جهان از کمبود عناصر غذایی کم مصرف به‌ویژه آهن و روی رنج می‌برند (رنگل، ۲۰۱۵).

نتایج مطالعات مختلف نشان داده که هنگام کمبود عناصر غذایی کم مصرف در خاک، ریشه‌های گیاهان اسیدهای آلی ترشح می‌کنند (کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵). پژوهش‌گران بیان کرده‌اند که اسیدهای آلی نقش مهمی در انحلال عناصر کم مصرف برای رشد گیاه ایفا می‌کنند (رنگل، ۲۰۱۵؛ بوشر و همکاران، ۲۰۱۶؛ ما و همکاران، ۲۰۱۶). ترشحات ریشه‌ای، نگه‌داری فلزات توسط مواد آلی خاک، اکسیدها و رس‌ها را تعدیل کرده و رهاسازی آن‌ها را افزایش می‌دهند (چن و همکاران، ۲۰۰۳). اگر چه نتایج مطالعات مختلف نشان داده که کاربرد کلات کننده‌ها مانند اتیلن دی آمین تترا استیک

2. Citric acid  
2. Oxalic acid  
3. Malic acid

آنیون‌های اسید آلی با زنجیره کوتاه، اسیدهای آمینه و ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم باشد (رنگل، ۲۰۱۵).

#### اسیدهای آلی

اسیدهای آلی از نظر شیمیایی ترکیبات کربنی هستند که ویژگی اصلی آن‌ها دارا بودن حداقل یک گروه کربوکسیل ( $R-COOH$ ) می‌باشد و به دلیل نقش اصلی که در متابولیسم سلولی دارند، در تمام ارگانیسم‌های زنده یافت می‌شوند (مارچنز، ۱۹۹۵). اگرچه این تعریف شامل تعداد زیادی از ترکیبات با ساختارهای متنوع می‌شود، اما اغلب اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم حائز اهمیت هستند (کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵).

در خاک‌ها ریشه گیاهان، قارچ‌ها و همچنین باکتری‌ها، اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم، شامل مونوکربوکسیلیک اسید (مانند اسید استیک)، دی کربوکسیلیک اسید (مانند اسید اگزالیک و اسید مالیک) و همچنین تری کربوکسیلیک اسید (مانند اسید سیتریک و اسیدتارتاریک)، تولید می‌کنند (کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین منشأ دیگر تولید اسیدهای آلی در خاک، تجزیه مواد آلی در خاک می‌باشد (بوشر و همکاران، ۲۰۱۶).

معمولاً محدوده وسیعی از غلظت اسیدهای آلی در محلول خاک‌ها وجود دارند. برای مثال در محلول خاک‌های هوازی این مقدار ۰/۱ تا ۵۰ میکرومولار گزارش شده است (ساندنس و همکاران، ۱۹۹۵). به‌طور کلی در بیش‌تر مطالعاتی که اسیدهای آلی از خاک‌های مختلف با پوشش‌های گیاهی گوناگون استخراج شده‌اند غلظت آنها در محلول خاک کم‌تر از ۵۰ میکرومولار گزارش شده است (استرویل، ۲۰۰۱). نتایج مطالعات نشان داده که غلظت اسیدهای مونوکربوکسیلیک (فرمیک، استیک، پروپونیک، بوتیریک، لاکتیک و والریک) در محلول خاک نسبت به اسیدهای دی و تری کربوکسیلیک مثل اگزالیک، مالیک و سیتریک بیش‌تر است (ساندنس و همکاران، ۱۹۹۵).

شامل آهن، منگنز، مس و روی و آنیون‌ها شامل بور و مولیبدن و کلر می‌باشند (کومار و همکاران، ۲۰۱۶). عناصر کم‌مصرف آهن، منگنز، مس و روی از اجزای تشکیل دهنده بسیاری از آنزیم‌ها و پروتئین‌ها در گیاهان بوده و در فعال‌سازی بسیاری از آنزیم‌های گیاهی موثرند (رنگل، ۲۰۱۵). این عناصر همچنین نقش بسیار مهمی در فرآیندهای گیاهی مانند فتوسنتز و تنفس، تعادل تغذیه‌ای گیاهان و عملکرد فیزیولوژیکی گیاهان دارند. کمبود هر یک از این عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک می‌تواند مانع رشد گیاهان شود، حتی اگر سایر عناصر غذایی ضروری پرمصرف و کم مصرف در مقدار کافی وجود داشته باشند (کومار و همکاران، ۲۰۱۶).

#### ترشحات آزاد شده از ریشه گیاهان در ریزوسفر

ریزوسفر منطقه‌ای از خاک در پیرامون ریشه‌ی گیاه است که تحت تاثیر فعالیت‌های ریشه قرار دارد. در این منطقه حساس، گیاهان بیشترین واکنش را نسبت به محیط خود نشان می‌دهند. در شرایطی که گیاه دارای رشد و نمو معمولی باشد، مقادیر فراوانی از مواد آلی و معدنی بین ریشه و خاک تبادل می‌یابند که به طور اجتناب-ناپذیری منجر به تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ریزوسفر می‌شود (بوشر و همکاران، ۲۰۱۶). گیاهان به طور متوسط ۳۰-۶۰ درصد از کربن حاصل از فتوسنتز خود را به‌صورت ترکیبات آلی مختلف در ریزوسفر خود آزاد می‌کنند. بخشی از این ترکیبات اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم هستند (بوشر و همکاران، ۲۰۱۶). ترشحات ریشه گیاهان شامل ترکیبات آلی متنوع (آنیون‌های کربوکسیلاتی، کربوهیدرات‌ها، فنول‌ها، اسیدهای آمینه) و یون‌های غیرآلی (پروتون‌ها، فسفات و غیره) شیمی و بیولوژی ریزوسفر را تغییر داده و فراهمی عناصر غذایی کم‌مصرف را افزایش می‌دهند (رنگل، ۲۰۱۵). افزایش فراهمی عناصر کم‌مصرف ممکن است در اثر اسیدی شدن خاک ریزوسفر انحلال و تحرک

## تغییرات و پایداری اسیدهای آلی در خاک

اسیدهای آلی بیشترین ذخایر کربن موجود در خاک هستند و زمانی که در خاک آزاد می‌شوند به سرعت توسط ریزجانداران خاک جذب و یا تجزیه می‌شوند افزون بر این جذب بر روی سطوح جامد خاک نیز می‌تواند نیمه عمر و سایر رفتارهای آن‌ها را در خاک را تغییر دهد؛ بنابراین اهمیت آن‌ها به ویژگی‌های فاز جامد خاک، فعالیت میکروبی در ریزوسفر، ویژگی‌های شیمیایی اسیدهای آلی و ترکیب سایر ترشحات آزاد شده از ریشه بستگی دارد (اوبورگر و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از مسایل مهم در ارتباط با استفاده از اسیدهای آلی در خاک، تجزیه این ترکیبات توسط ریزجانداران خاک است. به طور کلی ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم به آسانی تجزیه می‌شوند و در نتیجه نیمه عمر کوتاهی بین ۰/۱ تا ۲۶ ساعت دارند (ون هس و همکاران، ۲۰۰۸). پایداری و نیمه عمر اسیدهای آلی مختلف در خاک‌های با ویژگی‌های مختلف نیز متفاوت است. برای مثال ون هس و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند اسید اگزالیک نسبت به سایر اسیدهای آلی پایداری بیشتری در خاک‌های آهکی دارد و با سرعت کم‌تری تجزیه می‌شود. همچنین فوجی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند اسید اگزالیک نسبت به اسید سیتریک مدت زمان بیشتری باقی می‌ماند و اسید سیتریک سریع‌تر توسط ریزجانداران خاک تجزیه می‌شود.

## مکانیسم آزاد شدن اسیدهای آلی توسط ریشه گیاهان

رها سازی اسیدهای آلی از ریشه به عنوان راهکاری عمومی برای انحلال فلزات از خاک‌هایی با فاز معدنی بسیار نامحلول پیشنهاد شده است (کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵). عموماً ریشه گیاهان اسیدهای آلی بسیاری ترشح می‌کنند که در طول زنجیره با هم تفاوت دارند (جونز و همکاران، ۱۹۹۴). در حالی که برخی از این اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک و اسید مالیک در تولید انرژی به عنوان واسطه‌ی چرخه تری‌کربوکسیل شرکت دارند و سایر آنها مانند، اسید اگزالیک در سلول‌ها برای

تعادل بار الکتریکی و یا حفظ و نگهداری پتانسیل اسمزی حضور دارند (جونز، ۱۹۹۸).

ترشح اسیدهای آلی از ریشه مربوط به افزایش فعالیت آنزیم‌های PEP کربوکسیلاز، مالات دهیدروژناز و سیترات سنتتاز می‌باشد. این آنزیم‌ها نقش اساسی در تولید اسیدهای آلی دارند. با کاهش فعالیت پیرووات کیناز و افزایش فعالیت آنزیم PEP کربوکسیلاز، مسیر کربن به سمت تولید اسیدهای آلی می‌رود (بوشر و همکاران، ۲۰۱۶).

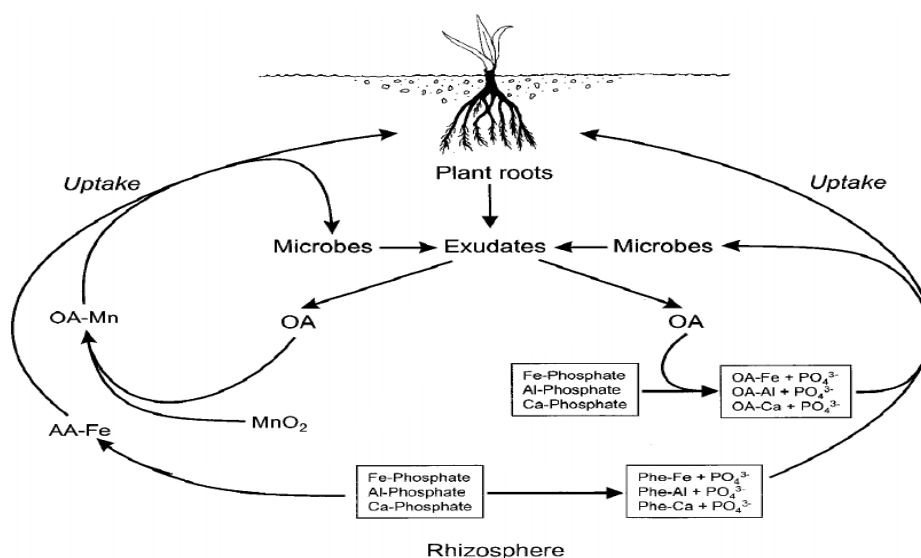
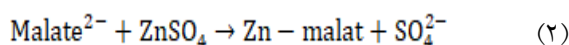
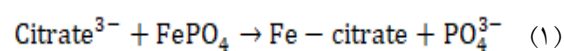
همواره ترشح اسیدهای آلی در ریزوسفر انجام می‌شود، چرا که غلظت اسیدهای آزاد در سیتوزول بسیار بیش‌تر از محلول خاک است (جونز و داراه، ۱۹۹۶). افزون بر این شیب بار الکتریکی چشم‌گیری در غشا پلاسمایی وجود دارد که ناشی از فعالیت ATP به عنوان نیروی محرکه پمپ پروتونی ( $H^+$ -ATP) و توان نفوذپذیری  $K^+$  سیتوزول است. هنگام پمپاژ یون هیدروژن به وسیله  $H^+$ -ATP) به درون آپوپلاست، اختلاف بار ایجاد شده که سبب خارج شدن اسیدهای آلی به خارج از سلول‌ها و به داخل محلول خاک شده و در نهایت جذب کاتیون‌ها از محلول خاک را افزایش می‌دهد (سامونلز و همکاران، ۱۹۹۲). نتایج بررسی‌ها نشان داده گیاهانی که در خاک‌های آهکی رشد می‌کنند نسبت به گیاهانی که در خاک‌های با pH کم‌تر رشد می‌کنند، مقدار اسیدهای آلی بیشتری ترشح می‌کنند (استروم و همکاران، ۲۰۰۵). نتایج مطالعات همچنین نشان داده گیاهانی که در خاک‌های آهکی رشد می‌کنند، بیش‌تر اسیدهایی با دو یا سه گروه کربوکسیل (سیترات، اگزالات و مالات) ترشح می‌کنند که این اسیدهای آلی توانایی بالایی در افزایش حلالیت عناصر کم مصرف دارند (استروم و همکاران، ۲۰۰۵).

## نقش اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه گیاهان

اسیدهای آلی معمولاً در ریزوسفر آزاد می‌شوند و ترشح آنها از ریشه‌های گیاه عمدتاً در واکنش به کمبود عناصر غذایی و تنش یون‌های معدنی است (جونز،

کمبود عناصر غذایی کم مصرف سبب تجمع اسیدهای آلی در بافت‌های ریشه و همچنین افزایش ترشح  $H^+$  می‌شود (کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵). دگریس و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند اسید سیتریک ترشح شده توسط ریشه سبب افزایش و جذب روی از خاک و ورود آن به فاز محلول شده و با تشکیل کمپلکس با روی سبب افزایش تحرک آن در خاک می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش کردند که ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه گیاهان اسفناج (*Spinacia oleracea L.*) و گوجه‌فرنگی (*Salanum lycopersicum L.*) تحرک مس را در خاک‌های آهکی افزایش می‌دهد.

(۲۰۰۱). یکی از ویژگی‌های خاک‌های آهکی فراهمی اندک عناصر غذایی کم مصرف می‌باشد (مارچنر، ۱۹۹۵). نتایج پژوهش‌ها نشان داده اسیدهای آلی آزاد شده از ریشه مانند اسید سیتریک و اسید مالیک می‌توانند با عناصر کم مصرف در خاک کمپلکس‌های قوی تشکیل داده و فراهمی این عناصر را افزایش دهند (دوکارا و فیلیپس، ۲۰۰۲؛ خادمی و همکاران، ۲۰۰۹). این اسیدها می‌توانند کلات‌های پایداری با کاتیون‌های چند ظرفیتی تشکیل دهند (رابطه ۱) و یا جایگزین آنیون‌ها در خاک گردند (رابطه ۲) (مارشنر، ۱۹۹۵).



شکل ۱- تاثیر اسیدهای آلی (OA) ترشح شده از ریشه بر فراهمی عناصر غذایی و جذب آن‌ها توسط گیاهان و ریزجانداران در ریزوسفر (دوکارا و فیلیپس، ۲۰۰۲)

برای یون‌های فلزی آزاد در محلول و فلزات جذب سطحی شده بر روی سطح ذرات خاک هستند. این گروه‌های عاملی توانایی تشکیل کمپلکس درون کره‌ای و برون کره‌ای با فلزات را دارند (ووانا و همکاران، ۲۰۱۰). گروه‌های کربوکسیل در اسیدهای آلی بار منفی ایجاد می‌کنند. بدین ترتیب که دی‌پروتونه شدن این گروه‌های عاملی در pHهای محدوده خاک‌های قلیایی و آهکی سبب به وجود آمدن بارهای منفی میشود؛ بنابراین این گروه‌های عاملی می‌توانند با کاتیون‌های فلزی کمپلکس تشکیل دهند

نتایج مطالعات مختلف نشان داده که درجه کمپلکس شدن اسیدهای آلی با فلزات محلول خاک به نوع اسید آلی واکنش دهنده و تعداد گروه‌های کربوکسیل آن، نوع فلز و pH محلول خاک بستگی دارد (بوشر و همکاران، ۲۰۱۶). اسیدهای آلی با یک گروه کربوکسیل از جمله لاکتات و استات و فرمات توانایی اندکی در تشکیل کمپلکس‌های فلزی دارند (بوشر و همکاران، ۲۰۱۶). به‌طور کلی گروه‌های عاملی اسیدهای آلی، مانند گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل، مهم‌ترین مکان‌های پیوندی

سرعت بخشیدن ترشح اسیدهای آلی توسط گیاه میزبان سبب بهبود فراهمی آهن، مس و روی، افزایش چشم‌گیر زیست‌توده اندام هوایی و همچنین افزایش تجمع این عناصر در گیاه تاج‌ریزی (*Solanum nigrum* L.) شدند.

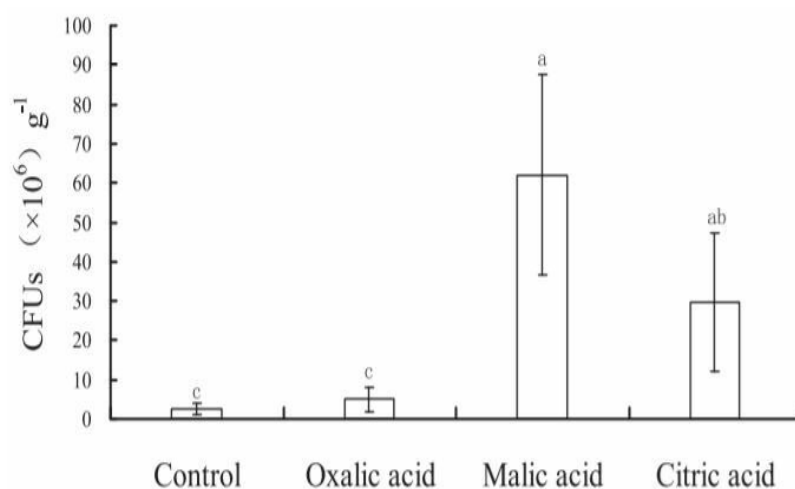
#### تاثیر اسیدهای آلی بر فعالیت ریزجانداران خاک

اسیدهای آلی افزون بر شرکت در بیشتر فرآیندهای خاک از جمله حلالیت عناصر غذایی، در فعالیت ریزجانداران خاک در ریزوسفر نیز موثرند (جونز، ۱۹۹۸). تاثیر اسیدهای آلی بر فعالیت میکروبی به مقدار و نوع اسیدهای آلی رها شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بستگی دارد. افزوده شدن اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم به خاک، به‌عنوان منبع کربن برای ریزجانداران خاک عمل نموده و سبب افزایش رشد و فعالیت میکروبی در خاک می‌شود (مارتین و همکاران، ۲۰۱۶). اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه همچنین یک عامل برای جذب ریزجانداران خاک و افزایش همزیستی آن‌ها با گیاهان در ریزوسفر می‌باشند (بدری و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج پژوهش لینگ و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که افزودن اسیدهای آلی می‌تواند نقش مهمی را به‌عنوان منبع غذایی برای باکتری‌های محرک رشد گیاه ایفا نموده و سبب افزایش فعالیت و جمعیت آن‌ها شوند (شکل ۲).

(آدلیک و همکاران، ۲۰۱۷). هر چه تعداد گروه‌های کربوکسیل اسیدهای آلی بیشتر باشد توانایی آن‌ها در تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های فلزی بیشتر است. به همین دلیل توانایی اسیدهای آلی برای تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های فلزی معمولاً بدین ترتیب است: اسیدهای آلی دارای سه گروه کربوکسیل (مانند اسید سیتریک و اسیدتارتاریک) < اسیدهای آلی دارای دو گروه کربوکسیل (مانند اسید مالیک و اسید فوماریک) < اسیدهای آلی دارای دو گروه کربوکسیل (مانند اسید لاکتیک، اسید فرمیک و اسید استیک) (ووانا و همکاران، ۲۰۱۰؛ آدلیک و همکاران، ۲۰۱۷).

#### اسیدهای آلی ترشح شده توسط ریزجانداران خاک

اسیدهای آلی ترشح شده توسط ریزجانداران خاک نیز در بهبود حلالیت عناصر در خاک موثرند. باکتری‌ها و قارچ‌ها از جمله ریزجانداران خاک هستند که توانایی ترشح اسیدهای آلی را دارند (راجکومار و همکاران، ۲۰۱۲؛ کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵؛ بوش و همکاران، ۲۰۱۶). کلارهولم و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند قارچ‌های میکوریز از جمله ریزجانداران خاک هستند که توانایی بالایی در تولید اسیدهای آلی دارند. چن و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند اسیدهای آلی تولید شده توسط باکتری‌های *Pseudomonas* sp. LK9 با

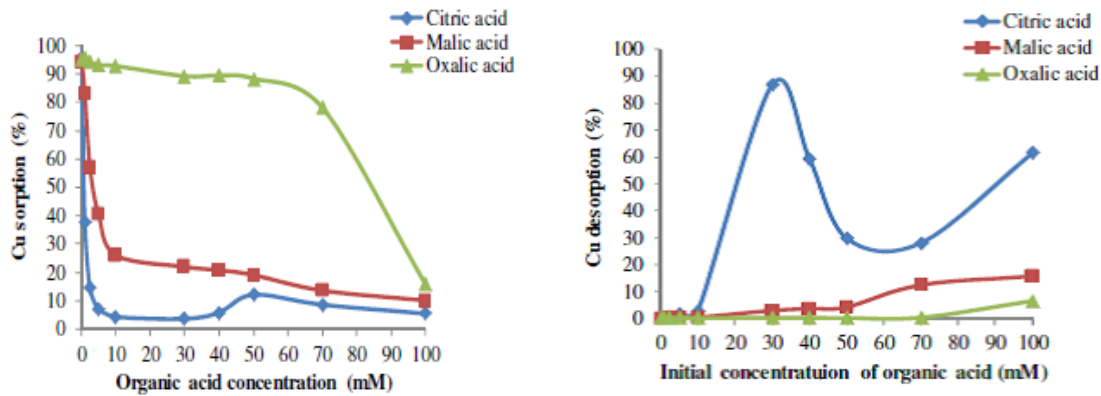


شکل ۲- جمعیت باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه پس از افزودن اسیدهای آلی (لینگ و همکاران، ۲۰۱۱)

## تاثیر افزودن اسیدهای آلی در جذب و واجذب عناصر کم‌مصرف در خاک

حضور اسیدهای آلی در خاک جذب عناصر بر روی سطوح ذرات خاک را کاهش داده و فراهمی آن‌ها را برای گیاهان افزایش می‌دهد. تشکیل کمپلکس اسیدهای آلی با فلزات سبب کاهش در غلظت یون فلزی در محلول خاک می‌شود و این باعث می‌شود تعادل شیمیایی جذب - واجذب به سمت واجذب پیش برود (کین و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج مطالعات همچنین نشان داده حضور اسیدهای آلی موجب تغییر در ویژگی‌های سطح خاک و توزیع رقابتی یون فلز بین سطح خاک و لیگاند آلی در محلول و انحلال نسبی کانی‌ها در خاک شود (کین و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج مطالعه کین و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد در حضور اسید مالیک و اسید سیتریک جذب عناصر کم‌مصرف مس و روی توسط ذرات خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. آن‌ها گزارش کردند اسید سیتریک به‌دلیل بار منفی بیشتر، سطح ویژه بالاتر و گروه‌های عاملی بیشتر، توانایی بیشتری در واجذب این عناصر از سطح ذرات خاک داشت. پیری و همکاران (۲۰۱۹) با انجام پژوهشی تاثیر اسید سیتریک در جذب و واجذب روی در یک خاک آهکی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد اسید سیتریک سبب جذب روی توسط ذرات خاک را بیش از ۴۹ درصد کاهش داد. آن‌ها دلیل نتایج خود را افزایش رقابت در مکان‌های تبادل ذرات خاک و همچنین تشکیل کمپلکس محلول روی - اسید سیتریک گزارش کردند. رسولی صدقیانی و همکاران

(۱۳۹۴) بیان کردند حضور اسیدهای آلی در خاک اسیدی و آهکی منجر به کاهش تثبیت آهن شد، که تأثیر اسیدها در تثبیت آهن در خاک آهکی و اسیدی بدین ترتیب بود: اسید سیتریک > اسید اگزالیک > اسید مالیک > شاهد بود. آن‌ها دلیل این نتیجه را به اشغال مکان‌های جذب فلزات در سطوح کانی‌های خاک توسط لیگاندهای آلی نسبت دادند. نجفی و جلالی (۲۰۱۵) با بررسی تاثیر افزودن اسیدهای آلی مختلف در جذب و واجذب مس در خاک‌های آهکی ایران دریافتند افزایش غلظت اسیدسیتریک، اسید مالیک و اسید اگزالیک سبب کاهش pH محلول خاک، کاهش جذب مس توسط ذرات خاک و همچنین افزایش واجذب مس در خاک می‌شود (شکل ۳). همچنین بر اساس نتایج آن‌ها اسید سیتریک و اسید اگزالیک به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تاثیر را در کاهش جذب و افزایش واجذب مس توسط خاک داشتند. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد افزایش غلظت اسید سیتریک به‌کار برده شده تا غلظت ۳۰ میلی مولار سبب کاهش چشم‌گیر جذب مس توسط خاک شد، اما با افزایش غلظت آن از ۳۰ میلی مولار تا ۵۰ میلی مولار جذب مس توسط خاک با شدت کمی افزایش یافت (شکل ۳). اعتمادیان و همکاران (۱۳۹۶) نیز گزارش کردند کاربرد اسیدهای آلی سیتریک، اگزالیک و استیک به دو نوع خاک آهکی، سبب کاهش معنی‌دار pH خاک و افزایش آزادسازی آهن، منگنز، روی و مس در محلول خاک، شد. آن‌ها دلیل اصلی نتایج خود را قدرت کلات کنندگی این اسیدهای آلی گزارش کردند.



شکل ۳- تاثیر افزودن اسیدهای آلی مختلف بر درصد جذب و واجذب مس در خاک (نجفی و جلالی، ۲۰۱۵)

اصلی موثر در افزایش انحلال و فراهمی عناصر کم مصرف در خاک‌های آهکی، در اثر کاربرد اسیدهای آلی هستند. در اثر افزودن اسیدهای آلی به خاک‌های آهکی، pH خاک کاهش یافته و سبب افزایش غلظت عناصر کم مصرف در فاز محلول خاک می‌شود (آدلیک و همکاران، ۲۰۱۷). کلاته کردن و یا تشکیل کمپلکس اسید آلی با عناصر غذایی کم مصرف سبب افزایش فراهمی این عناصر می‌شود، چرا که این ترکیبات در مقایسه با عناصر به شکل کاتیون آزاد، قابلیت دسترسی بیشتری در خاک دارند. اسیدهای آلی همچنین می‌توانند با شکستن پیوندهای بین کاتیون - اکسیژن بر روی ساختارهای کانی‌ها سبب آزاد شدن کاتیون‌های فلزی و افزایش فراهمی آن‌ها در خاک شوند (آدلیک و همکاران، ۲۰۱۷). تاثیر اسیدهای آلی بر فراهمی عناصر غذایی کم مصرف در خاک به نوع اسید آلی بستگی دارد. برای مثال ویو و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند تاثیر اسید مالیک در افزایش فراهمی روی بیش‌تر از اسید سیتریک و اسید اگزالیک بود، در حالی که تاثیر اسید سیتریک در افزایش فراهمی مس بیش‌تر از اسید اگزالیک و اسید مالیک بود (جدول ۱).

### تاثیر افزودن اسیدهای آلی در فراهمی عناصر کم مصرف در خاک

در سال‌های اخیر استفاده از اسیدهای آلی در افزایش فراهمی عناصر کم مصرف برای بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاهان و همچنین افزایش فراهمی فلزات سنگین سمی برای گیاه‌پالایی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان داده که اسیدهای آلی می‌توانند با افزایش غلظت عناصر غذایی کم مصرف در محلول خاک قابلیت دسترسی آن را برای گیاه افزایش دهند (کلارهولم و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۶). محمد و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند افزودن اسید سیتریک به خاک سبب تشکیل کمپلکس قابل جذب اسیدسیتریک- روی شده و افزایش فراهمی مس در خاک شد. سونگ و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که افزودن اسیدهای آلی با راهکارهایی همچون کاهش pH خاک، تشکیل کمپلکس و جلوگیری از جذب عناصر توسط کانی‌های رسی، سبب افزایش چشم‌گیر زیست‌فراهمی عناصر کم مصرف آهن و روی در خاک شد. به‌طور کلی، اسیدی کردن، کلاته کردن و واکنش‌های تبدیلی سه مکانیسم

جدول ۱- تاثیر اسید اگزالیک (OA)، اسید سیتریک (CA) و اسید مالیک (MA) در غلظت فراهم مس و روی در خاک (ویو و همکاران، ۲۰۰۳)

Zn		Cu		تیمارها
Zn کل درصد	mg l <sup>-1</sup>	Cu کل درصد	mg l <sup>-1</sup>	
۱۸/۵	۰/۶ b	۵/۳	۰/۰۱ b	شاهد
۵/۴۹	۲/۸ b	۴۶/۴	۰/۰۵ b	اسید اگزالیک (OA)
۳۲/۰	۳/۰ b	۵۲/۷	۰/۰۹ b	اسید سیتریک (CA)
۴۲/۸	۱۲/۸ a	۴۲/۹	۰/۰۵ b	اسید مالیک (MA)

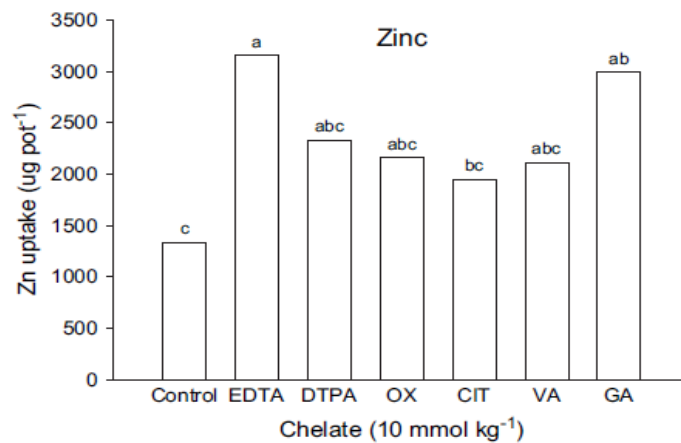


همکاران (۲۰۰۶) نشان داد کلات‌کننده‌های EDTA، DTPA و اسیدهای آلی مختلف (اسید سیتریک، اسید اگزالیک، اسید وانیلیک و اسید گالیک) سبب افزایش جذب روی توسط گیاه خردل هندی شدند (شکل ۴). سانچز رودریگز و همکاران (۲۰۱۴) با انجام پژوهشی تاثیر کاربرد اسیدهای آلی به صورت ترکیبی از اسید سیتریک، اسید اگزالیک و اسید مالیک در زیست‌فراهمی آهن در خاک و جذب آن توسط گیاه نخود را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزودن اسیدهای آلی به خاک، کلروز ناشی از کمبود آهن در گیاه نخود کاهش یافت که این نتایج به دلیل افزایش جذب آهن و افزایش غلظت کلروفیل برگ بود. در مطالعه دوارتی و همکاران (۲۰۱۱) افزودن اسید سیتریک و اسید مالیک سبب افزایش جذب روی در اندام‌های هوایی گیاه *Spartina maritima* و افزودن اسید استیک سبب کاهش جذب روی در گیاه شد (شکل ۵). نتایج آن‌ها همچنین نشان داد کاربرد اسید سیتریک جذب روی در ریشه گیاه را افزایش داد، اما کاربرد اسید مالیک سبب کاهش غلظت روی در ریشه گیاه *Spartina maritima* شد (شکل ۵). آگنلو و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند افزودن اسید سیتریک به یک خاک آهکی با کاهش pH خاک و کاهش جذب مس و روی توسط ذرات خاک سبب افزایش فراهمی آن‌ها و به دنبال آن افزایش جذب و تجمع آن‌ها در یونجه شد. حسنی و همکاران (۱۳۹۶) با بررسی تاثیر اسید سیتریک بر رشد ذرت و جذب عناصر غذایی توسط آن، گزارش کردند کاربرد اسید سیتریک، سبب افزایش غلظت آهن و روی در ریشه و اندام هوایی و همچنین افزایش وزن تر و خشک گیاه شد.

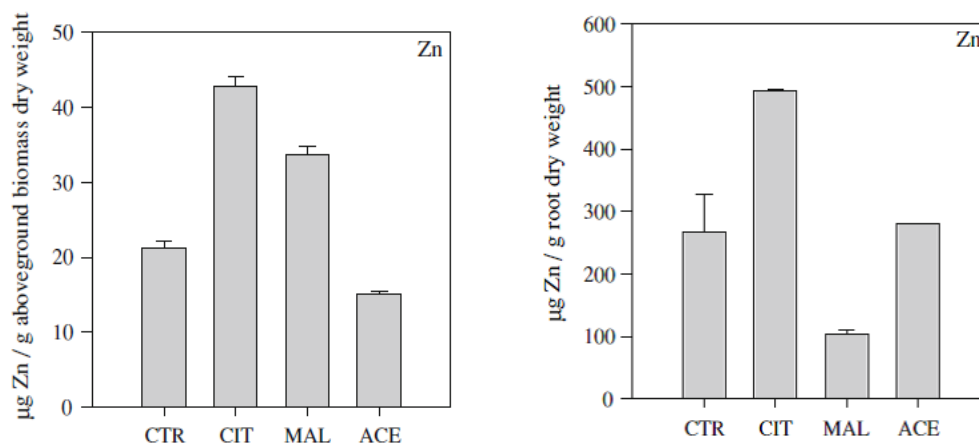
یکی از اثرات اسیدهای آلی در افزایش فراهمی در عناصر در خاک‌های آهکی تاثیر آن‌ها در pH خاک می‌باشد. نتایج مطالعه استروم و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد افزودن اسیدهای آلی سیتریک و اگزالیک به یک خاک آهکی، سبب کاهش pH عصاره‌های استخراج شده از خاک، به اندازه ۰/۷۷ تا ۱/۷۷ واحد شد. آن‌ها گزارش کردند که هر چه تعداد گروه کربوکسیل بیشتر باشد، pH خاک بیشتر کاهش یافته و بازیابی آن به حالت اولیه نیز بیشتر طول می‌کشد. در پژوهش پالومو و همکاران (۲۰۰۶) افزودن اسید سیتریک به خاک سبب کاهش pH عصاره‌های خاک (۱/۵ تا ۲ واحد) شد و افزایش معنی‌دار فراهمی مس و روی در خاک شد.

#### تاثیر افزودن اسیدهای آلی به خاک در جذب عناصر غذایی توسط گیاهان و تغذیه آن‌ها

پس از جذب یون‌های عناصر توسط ریشه، دو مسیر موازی برای حرکت مواد از پارانشیم پوست ریشه به سوی استوانه مرکزی وجود دارند: ۱) عبور از فضای بین سلولی یا آپوپلاست (دیواره‌های سلولی و فضاهای میان سلولی) و ۲) عبور از سیتوپلاسم یک سلول به سلول دیگر از طریق شبکه پلاسمودسما (مسیر سیم‌پلاستی) (ناسیمنتو و همکاران، ۲۰۰۴). انتقال از مسیر آپوپلاستی سریع‌تر از مسیر سیم‌پلاستی است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده که اسیدهای آلی به عنوان عوامل کلات کننده فلزات از طریق مسیر انتقال آپوپلاستی در گیاه انتقال داده می‌شوند. در واقع کلات کننده‌ها مسیر انتقال فلزات در گیاه را از مسیر سیم‌پلاستی به آپوپلاستی تغییر داده و بدین ترتیب سبب سهولت انتقال فلزات در گیاه می‌شوند (ناسیمنتو و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج پژوهش ناسیمنتو و



شکل ۴- تاثیر کلات کننده‌های EDTA، DTPA، اسید اگزالیک (OX)، اسید سیتریک (CIT)، اسید وانیلیک (VA) و اسید گالیک (GA) در افزایش جذب روی توسط خردل هندی (ناسیمنتو و همکاران، ۲۰۰۴)



شکل ۵- غلظت روی در ریشه و اندام هوایی گیاه *Spartina maritima* پس از افزودن اسیدهای آلی (CTR شاهد، CIT اسید سیتریک، MAL اسید مالیک و ACE اسید استیک) (دوارتی و همکاران، ۲۰۱۱)

عناصر در گیاهان) توسط گیاهان مختلف، می‌توان به بهبود جذب عناصر غذایی توسط گیاهان امیدوار بود. در مطالعات مربوط به کاربرد غلظت‌های مختلف اسیدهای آلی در فراهمی عناصر غذایی کم مصرف باید به حد سمیت عناصر توجه داشت و لازم است محدوده کاربرد آنها برای رسیدن به حد مطلوب این عناصر در گیاهان مختلف شناسایی گردد.

#### پیشنهادات ترویجی

بسیاری از خاکهای ایران دارای آهک بالایی هستند. pH خاک‌های آهکی عمدتاً توسط مقادیر کربنات کلسیم موجود در پروفیل خاک کنترل شده و در محدوده ۷/۵-۸/۵ می‌باشد. واکنش کربنات کلسیم در خاک‌های

#### نتیجه گیری

با توجه به نتایج مطالعات انجام شده اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم به‌ویژه اسید سیتریک، اسید اگزالیک و اسید مالیک که از کلات کننده‌های سازگار با محیط زیست می‌باشند، می‌توانند با راهکارهای مختلف در افزایش فراهمی عناصر غذایی کم مصرف و بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاهان در خاک‌های آهکی موثر باشند؛ بنابراین بررسی تاثیر کاربرد غلظت‌های مختلف اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم بر حلالیت و تغییر توزیع شکل‌های عناصر کم مصرف در خاک، می‌تواند سبب افزایش فراهمی عناصر کم مصرف در خاکهای آهکی شود. در نتیجه با تعیین غلظت‌های بهینه این اسیدها در بهبود جذب عناصر غذایی کم مصرف (جهت رسیدن به حد مناسب غلظت

محدودیت‌های اولیه رشد در این قبیل خاک‌ها می‌باشند) قابل جذب نمایند. نتایج مطالعات نشان داده است که در خاک‌های آهکی، اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم می‌تواند به عنوان عامل موثری برای بهبود جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان باشند. اسیدهای آلی مانند سیترات، اگزالات و ملات در بسیاری از فرآیندهای ریشه نیز شرکت می‌کنند که این فرآیندها شامل استخراج عناصر غذایی، سمیت زدایی فلزی، هوازگی مینرالی و جذب پاتوژن‌ها می‌باشد. با این حال، کاربرد اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک در کشاورزی با وجود اثرات مثبت آن در خاکهای آهکی ایران و همچنین قیمت مناسب آنها، هنوز در کشور ایران رایج نمی‌باشد؛ بنابراین باتلاش و مدیریت می‌توان کاربرد اسیدهای آلی ارزان قیمت مانند اسید سیتریک را به‌عنوان بخشی از برنامه تغذیه گیاهان در نظر گرفت.

آهکی منجر به افزایش pH خاک می‌شود، به‌ویژه در مناطقی که مقدار بارندگی کم باشد، این واکنشها در افق سطحی خاک‌های آهکی حلالیت و جذب عناصر کم مصرف خاک را محدود نموده و در نهایت سبب کاهش عملکرد گیاهان می‌شود. بنابراین حلالیت و فراهمی کم عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک‌های آهکی و همچنین هزینه بالای کودهای شیمیایی، سبب شده تا مطالعه در زمینه استفاده از اسیدهای آلی (به‌عنوان کلات‌کننده‌های سازگار با محیط زیست) در افزایش فراهمی این عناصر و بهبود تغذیه گیاهان مورد توجه پژوهش‌گران قرار گیرد. بطورکلی رهاسازی اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم از ریشه سبب افزایش عناصر غذایی کم مصرف در خاک می‌شود. از اینرو گیاهانی که در خاک‌های آهکی رشد می‌یابند، لازم است که از مکانیسم‌های مختلفی استفاده نمایند تا بتوانند فسفر و آهن و سایر عناصر کم محلول را (که از

#### فهرست منابع

۱. اعتمادیان، م.، حسنی، ا.، نورزاده حداد، م.، حنیفه‌ئی، م. ۱۳۹۶. تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر آزادسازی عناصر غذایی در خاکهای آهکی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۵): ۷۳-۹۱.
۲. حسنی، ا.، اعتمادیان، م.، نورزاده حداد، م.، حنیفه‌ئی، م. ۱۳۹۷. تأثیر کاربرد برخی اسیدهای آلی بر ویژگی‌های رشدی و غلظت عناصر غذایی ذرت علوفه‌ای. آب و خاک. ۳۲(۵): ۵۴۷-۵۵۸.
۳. رسولی صدقیانی، م.ح.، دره‌قایدی، ب.، خداوردیلو، ح.، مرادی، ن. ۱۳۹۴. تاثیر اسیدهای آلی بر جذب و تثبیت آهن در خاک‌های آهکی و اسیدی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. ۱۵(۱): ۲۱۵-۲۲۸.
4. Adeleke, R., C. Nwangburuka and B. Oboirien, 2017. Origins, roles and fate of organic acids in soils: A review. South African Journal of Botany, 108: 393-406.
5. Agnello, A. C., D. Huguenot, E. D. Hullebusch and G. Esposito. 2016. Citric acid- and Tween 80-assisted phytoremediation of a co-contaminated soil: alfalfa (*Medicago sativa* L.) performance and remediation potential. Environmental Science and Pollution Research. 334: 151-159.
6. Badri, D. V., J. M. Chaparro, R. F. Zhang, Q. R. Shen, and J. M. Vivanco. 2013. Application of Natural Blends of Phytochemicals Derived from the Root Exudates of *Arabidopsis* to the Soil Reveal That Phenolic-related Compounds Predominantly Modulate the Soil Microbiome. Journal of Biological Chemistry. 288: 4502-4512.
7. Bowsher, A. W., R. Ali, S. A. Harding, C. J. Tsai and L. A. Donovan. 2016. Evolutionary divergences in root exudate composition among ecologically-contrasting helianthus species. Plos one. 11(1): 0148280.
8. Chen, L., S. L. Luo, X. J. Li, Y. Wan, J. L. Chen, and C. B. Liu. 2014. Interaction of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and functional endophyte *Pseudomonas* sp. Lk9 on soil heavy metals uptake. Soil Biology and Biochemistry. 68: 300-308.

9. Chen, Y. L., Y. Q. Guo, Sh. J. Han, C. J. Zou, Y. M. Zhou and G. L. Cheng. 2002. Effect of root derived organic acids on the activation of nutrients in the rhizosphere soil. *Journal of Forest Research*. 13(2): 115-118.
10. Chen, Y. X., Q. Lin, Y. M. Luo, Y. F. He, S. J. Zhen, Y. L. Yu, G. M. Tian and M. H. Wong 2003. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere*. 50: 807-811.
11. Chen, Z., F. Liu, T. Bu, Y. Liu and J. Zhu. 2016. Effects of organic acids on dissolution of Fe and Mn from weathering coal gangue. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 35(3): 316–328.
12. Clarholm, M., U. Skjellberg, A. and Rosling. 2015. Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter -The unbutton model. *Soil Biology and Biochemistry*. 84: 168-176.
13. Dakora, F. D., and D. A. Phillips. 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. In *Food Security in Nutrient-Stressed Environments: Exploiting Plants' Genetic Capabilities* (pp. 201-213). Springer, Dordrecht.
14. Degryse, F., V. K. Verma and E. Smolders. 2008. Mobilization of Cu and Zn by root exudates of dicotyledonous plants in resin buffered solutions and in soil. *Plant and Soil*. 306: 69–84.
15. Duarte, B., J. Freitas and I. Cacador 2011. The role of organic acids in assisted phytoremediation processes of salt marsh sediments. *Hydrobiologia*. 764:169-177.
16. Fujii, K., M. Aoki and K. Kitayama. 2012. Biodegradation of low molecular weight organic acids in rhizosphere from a tropical montane rain forest. *Soil Biology and Biochemistry*. 47: 142-148.
17. Jones D. L. 1998. Organic acids in the rhizosphere – A critical review, *Plant and Soil Journal*. 205: 25-44.
18. Jones, D. L. 2001. Function and mechanism of organic anion Exudation from plant roots. *Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 52: 527-560.
19. Jones, D. L. and Darrah, P. R. 1994. Role of root derived organic-acid in the mobilization of nutrient from the rhizosphere. *Plant and Soil*. 166: 247-257.
20. Khademi, Z., D. L. Jones M. J. Malakouti Asadi F. and Ardebili, M. 2009. Organic acid mediated nutrient extraction efficiency in three calcareous soils. *Australian Journal of Soil Research*. 47: 213-220.
21. Kumar, V., M. Kumar, N. Shrivastava, S. Sandeep Bisht, S. Sharma and A. Ajit Varma. 2016. Interaction among rhizospheric microbes, soil, and plant roots: Influence on micronutrient uptake and bioavailability. Springer International Publishing Switzerland. K.R. Hakeem, M.S. Akhtar (eds.), *Plant, Soil and Microbes*. pp: 169-185.
22. Ling, N., W. Raza, J. H. Ma, Q.W. Huang and Q.R. Shen. 2011. Identification and role of organic acids in watermelon root exudates for recruiting *Paenibacillus polymyxa* SQR-21 in the rhizosphere. *European Journal of Soil Biology*. 47: 374–379.
23. Ma, Y., R. S. Oliveira, H. Freitas and C. Zhang. 2016. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: relevance for phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*. 7: 918.
24. Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. (2nd ed.). Academic Press, London.
25. Martin, B. C., S. J. George, C. A. Price, S. Shahsavari, A. S. Ball, M. Tibbett and M. H. Ryan. 2016. Citrate and malonate increase microbial activity and alter microbial community composition in uncontaminated and diesel-contaminated soil microcosms. *Soil*. 2: 487–498.
26. Millaleo, R., M. Reyes-Díaz, A.G. Ivanov, M. L. Mora and M. Alberdi. 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 10(4): 476 – 494.
27. Moradi, N., M.H. Rasouli-Sadaghiani, E. Sepehr, B. Abdolahi Mandoulakani. 2012. Effects of low-molecular-weight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 36: 459-468.

28. Muhammad, D., F. Chen, J. Zhao, G. Zhang and F. Wu. 2009. Comparison of EDTA- and citric acid-enhanced phytoextraction of heavy metals in artificially metal contaminated soil by *Typha angustifolia*. *International Journal of Phytoremediation*. 11: 558-574.
29. Najafi, S. and M. Jalali, 2015. Effects of organic acids on cadmium and copper sorption and desorption by two calcareous soils. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187: 585-595.
30. Nascimento, C. W. A., Amarasiriwardena D. and B. Xing, 2006. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil. *Environmental Pollution*. 140: 114-123.
31. Oburger, E, G. J. D. Kirk, W. W. Wenzel, M. Puschenreiter and D. L. Jones. 2009. Interactive effects of organic acids in the rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*. 41(3): 449-457.
32. Palomo, L., N. Classen and D. L. Jones. 2006. Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate. *Soil Biology and Biochemistry*. 38: 683-692.
33. Piri, M., E. Seppehr, and Z. Rengel, Z. 2019. Citric acid decreased and humic acid increased Zn sorption in soils. *Geoderma*, 341: 39-45.
34. Qin, F., X. Q. Shan and B. Wei. 2004. Effects of low-molecular-weight organic acids and residence time on desorption of Cu, Cd, and Pb from soils. *Chemosphere*. 57: 253-263.
35. Rajkumar, M., S. Sandhya, M. N. V. Prasad and H. Freitas. 2012. Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology*. 30: 1562-1574.
36. Rengel, Z. 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of soil science and plant nutrition*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 15(2): 397-409.
37. Samuels, A. L., M. Fernando and A. D. Glass. 1992. Immunoflorescent localization of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase in barley roots and effects of K nutrition. *Plant Physiology*. 99: 1509-1514.
38. Sanchez-Rodríguez, A. R., M. C. Del Campillo, J. Torrent and D. L. Jones. 2014. Organic acids alleviate iron chlorosis in chickpea grown on two p-fertilized soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 14(2): 292-303.
39. Sandnes, A., D. E. Toril, and W. Gro. 2005. Organic acids in root exudates and soil solution of Norway spruce and silver birch. *Soil Biology and Biochemistry*. 37: 259-269.
40. Song, J., D. Markewitz, Y. Liu, X. Liu and X. Cui. 2016. The Alleviation of Nutrient Deficiency Symptoms in Changbai Larch (*Larix olgensis*) Seedlings by the Application of Exogenous Organic Acids. *Forests*. 7(10): 1-15.
41. Strobel, W. 2001. Influence of vegetation on low molecular-weight carboxylic acids in soil solution. A review. *Geoderma*. 99: 169-198.
42. Strom, L., A. G. Owenb, D. L. Godboldb and D. L. Jonesb, 2005. Organic acid behaviour in a calcareous soil implications for rhizosphere nutrient cycling. *Soil Biology and Biochemistry*. 37: 2046-2054.
43. Van Hees, P. A. W., Johansson, E. and D. L. Jones. 2008. Dynamics of simple carbon compounds in two forest soils as revealed by soil solution concentrations and biodegradation kinetics. *Plant and Soil*. 310:11-23.
44. Vesely, T., P. Tlustos and J. Szakova, 2011. Organic salts enhanced soil risk elements leaching and bioaccumulation in *Pistia stratiotes*. *Plant, Soil and Environment*. 57(4): 166-172.
45. Wu, L. H., Y. M., Luo, P. Christie and M. H. Wong. 2003. Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of a heavy metal polluted soil. *Chemosphere*. 50: 819-822.
46. Wuana, R.A., F. E. Okieimen and J. A. Imborvungu. 2010. Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 7(3): 485-496.

## The Role of Low Molecular Weight Organic Acids in Micronutrient Bioavailability in Soil

**N. Moradi**<sup>1</sup>

Assistant Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.  
n.moradi@scu.ac.ir

**Received: December 2018, Accepted: January 2020**

### **Abstract**

Bioavailability of micronutrients in soils and their uptake by plants depend on soil properties (e.g., pH and carbonate content) and the interactions between plant roots and soil microorganisms. The low bioavailability of iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), and zinc (Zn), as a major factor limiting plant nutrition, in calcareous soils is due to the low organic content, high pH levels, and precipitation by carbonates in such soils. Study has shown that, under nutrient deficiency conditions, plant roots release low-molecular-weight organic acids (LMWOA) such as citric, oxalic, and malic acids to increase the solubility of micronutrients like Fe, Mn, Cu, and Zn in the rhizosphere. The LMWOAs exuded into the rhizosphere are known to enhance the mobility and bioavailability of such micronutrients and their uptake by plants. In addition, LMWOAs are involved in metal detoxification and improvement of microbial activity in soils. The present study investigates the role LMWOAs play in the bioavailability of such micronutrients as Fe, Mn, Cu, and Zn.

**Keywords:** Root exudates, Solubility, Calcareous soil, Micronutrients, Rhizosphere

---

<sup>1</sup> - Corresponding author: Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.