



## بررسی نقش اسیدهای آلی در جذب فسفر و روی به وسیله‌ی گیاه ذرت در خاک‌های آهکی با استفاده از رادیوایزوتوپ‌های $^{32}\text{P}$ و $^{65}\text{Zn}$

ساره نظامی\*<sup>۱</sup>، محمدجعفر ملکوتی<sup>۱</sup>، علی بهرامی سامانی<sup>۲</sup>، کامبیز بازرگان<sup>۳</sup>، محمد فنادی مراغه<sup>۲</sup>  
۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۳۳۶-۱۴۱۱۵، تهران - ایران  
۲. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران  
۳. مؤسسه‌ی تحقیقات خاک و آب، صندوق پستی: ۳۱۱-۳۱۷۵۸، کرج - ایران

**چکیده:** به منظور بررسی اثر اسیدهای آلی اگزالیک و سیتریک بر میزان جذب فسفر و روی به وسیله‌ی گیاه ذرت، آزمایشی با استفاده از منابع کودی پتاسیم فسفات و روی سولفات پرتوزا در ریزوم و شرایط گل‌خانه‌ای انجام شد. برای ردیابی عناصر مذکور در گیاه و انتقال آن‌ها به اندام‌های هوایی، رادیوایزوتوپ‌های  $^{32}\text{P}$  و  $^{65}\text{Zn}$  در رآکتور تحقیقاتی تهران تولید شد. پس از طی دوره‌ی رشد گیاه در ریزوم (چهار هفته) و انجام تیمارها، برداشت انجام شد. پس از عملیات هضم و عصاره‌گیری ذرت، میزان فعالیت  $^{32}\text{P}$  و  $^{65}\text{Zn}$  در نمونه‌ها با استفاده از، به ترتیب، دستگاه شمارگر سوسوزن مایع و سیستم طیف‌سنجی گاما مجهز به آشکارساز HPGc اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اسیدهای آلی در آزادسازی فسفر از خاک و جذب آن به وسیله‌ی گیاه نقش مؤثری داشته، ولی بر جذب روی تأثیر معنی‌داری نداشتند. بیش‌ترین مقدار  $^{32}\text{P}$  جذب شده در اندام‌های هوایی ذرت در تیمار اگزالیک اسید ۱۰ میلی‌مولار و بیش‌ترین مقدار  $^{65}\text{Zn}$  جذب شده در اندام هوایی در تیمار آب مقطر مشاهده شد. به علاوه به نظر می‌رسد که غلظت‌های بیش از ۱۰ میلی‌مولار اسیدهای آلی برای استخراج عناصر از خاک و جذب آن‌ها به وسیله‌ی گیاه لازم باشد.

**کلیدواژه‌ها:** ذرت (*Zea mays L.*)، اسیدهای آلی،  $^{32}\text{P}$ ،  $^{65}\text{Zn}$ ، خاک آهکی، جذب

## Investigation of the Role of Organic Acids on the Phosphorus and Zinc Uptake by Corn in Calcareous Soils by Using $^{32}\text{P}$ and $^{65}\text{Zn}$ Radioisotopes

S. Nezami<sup>1\*</sup>, M.J. Malakouti<sup>1</sup>, A. Bahrami Samani<sup>2</sup>, K. Bazargan<sup>3</sup>, M. Ghannadi Maragheh<sup>2</sup>  
1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, P.O.Box: 14115-336, Tehran – Iran  
2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran  
3. Soil and Water Research Institute, P.O.Box: 31785-311, Karaj – Iran

**Abstract:** To investigate the effect of oxalic and citric organic acids on the uptake of Phosphorus and Zinc by corn (*Zea mays L.*), an experiment was conducted by the use of radioactive potassium phosphate and zinc sulfate fertilizers in microcosm and greenhouse condition. For tracing and translocation of these elements to aerial parts of the corn,  $^{32}\text{P}$  and  $^{65}\text{Zn}$  were produced in Tehran Research Reactor (TRR). After season of plant growth and administration of treatments in microcosm (4 weeks), plants were harvested, digested, extracted and activity of the  $^{32}\text{P}$  and  $^{65}\text{Zn}$  in the samples was measured by a Liquid Scintillation Counter (LSC) and a HPGc Gamma Spectrometry System (GSS), respectively. The results revealed that organic acids had significant effects on the P releasing from the soil and its uptake by the plant but had no effect on the Zn uptake. The highest uptake of  $^{32}\text{P}$  and  $^{65}\text{Zn}$  in the aerial parts of corn was observed in oxalic acid of 10mM concentration and blank (water), respectively. Furthermore, it seems that organic acid concentrations of more than 10mM is necessary for extracting elements from soil and following uptake by plants.

**Keywords:** Corn (*Zea mays L.*), Organic Acids,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , Calcareous Soil, Uptake

\*email: s.nezami@modares.ac.ir



## ۱. مقدمه

قسمت اعظم خاک‌های ایران را خاک‌های آهکی تشکیل می‌دهند. واکنش کربنات کلسیم در خاک‌های آهکی با تولید یون هیدروکسید ( $\text{OH}^-$ ) و مصرف یون هیدرونیوم ( $\text{H}^+$ ) سبب افزایش pH خاک در حد ۷/۵ تا ۸/۳ می‌شود. بدیهی است با افزایش pH انحلال‌پذیری عناصر خوراکی کم‌مصرف از قبیل ( $\text{Fe}$ ،  $\text{Zn}$ ،  $\text{Mn}$  و  $\text{Cu}$  ...) و هم‌چنین فسفر کاهش می‌یابد. فسفر یکی از مهم‌ترین عناصر مورد نیاز گیاه به شمار می‌رود. این عنصر در کلیه فرایندهای زیست‌شیمیایی، ترکیب‌های انرژی‌زا، سازوکار انتقال انرژی و تولید اسیدهای نوکلئیک دخالت دارد. از جملهی دیگر عناصر مهم در رشد گیاه در خاک‌های آهکی، عنصر روی است. این عنصر در بسیاری از فرایندهای گیاهی نظیر تولید پروتئین، فعال‌سازی آنزیم‌های مختلف، تولید اکسین و مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده نقش دارد [۱]. تثبیت فسفر و روی بر سطح کانی‌های خاک و رسوب آن‌ها به صورت ترکیب‌های نامحلول از مهم‌ترین محدودیت‌های تولید محصول در خاک‌های آهکی است [۱، ۲]. ترشح اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین به وسیلهی برخی از رقم‌های گیاهی یکی از مهم‌ترین سازوکارها در افزایش دسترس‌پذیری این عناصر است [۳، ۴، ۵، ۶]. اسیدهای آلی ترشح شده در خاک می‌توانند دسترس‌پذیری فسفر را هم به شکل غیرمستقیم از طریق افزایش رشد ریزجانداران و متعاقباً افزایش معدنی شدن و هم مستقیماً از طریق کاهش pH ریزوسفر، تغییر تعادل‌های شیمیایی در محلول خاک و انحلال ترکیب‌های نامحلول فسفر، تغییرات خصوصیت‌های سطحی ذرات خاک، رقابت با فسفر در جذب روی سطوح و ایجاد کمپلکس و کلات با کاتیون‌های رسوب‌دهندهی فسفر افزایش دهند [۳، ۷]. هم‌چنین از طریق کاهش pH ریزوسفر و ایجاد کمپلکس با عنصر روی نیز در افزایش دسترس‌پذیری این عنصر نقش دارند [۴]. اسیدهای آلی مانند سیتریک اسید و اگزالیک اسید در شرایط کمبود عناصر، نسبت به بقیه اسیدها به مقدار نسبتاً زیادی از ریشهی گیاهان آزاد شده و در افزایش انحلال‌پذیری عناصر خوراکی مانند  $\text{P}$ ،  $\text{Zn}$ ،  $\text{Fe}$ ،  $\text{Mn}$  و  $\text{Cu}$  در ریزوسفر شرکت می‌نمایند [۸]. امروزه استفاده از نتایج حاصل از پژوهش‌های فن‌آوری‌های هسته‌ای در بخش‌های مختلف کشاورزی، به دلیل اثرات آن در افزایش تولیدات کشاورزی، بهبود کیفیت محصولات، تأمین امنیت غذایی و کاهش هزینه‌ها بسیار رواج یافته است. فسفر دارای دو رادیوایزوتوپ  $^{32}\text{P}$  و  $^{33}\text{P}$

است. از این دو رادیوایزوتوپ  $^{32}\text{P}$  با نیم-عمر حدود ۱۴ روز و  $^{33}\text{P}$  با نیم-عمر تقریبی ۲۵ روز-می‌توان در نشان‌دار کردن کودهای تجارتي فسفر (مثل سوپرفسفات‌ها) در طی فرایند ساخت آن‌ها در کارخانه استفاده کرد. هم‌چنین با استفاده از آن‌ها می‌توان محلول‌های نشان‌دار با غلظت مشخص برای استفاده در گل‌خانه و مطالعه‌های میدانی تولید نمود. تنها ایزوتوپ ردیاب مناسب برای عنصر روی نیز  $^{65}\text{Zn}$  است. از این رادیوایزوتوپ به دلیل نیم-عمر نسبتاً طولانی برابر ۲۴۵ روز می‌توان برای مطالعه‌های بلندمدت کمپلکس‌ها در محلول خاک، بررسی فراهمی روی از منبع خاک و کود و تحرک آن در سیستم خاک و گیاه استفاده نمود [۹]. پرتوهای گاما به انرژی ۱/۱۱۵ MeV امکان آشکارسازی آن با سیستم‌های طیف‌سنجی گاما را فراهم می‌کند.

استروم و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از  $^{33}\text{P}$ ، نقش اسیدهای آلی اگزالیک و سیتریک در افزایش جذب فسفر به وسیلهی گیاه ذرت در یک خاک آهکی را مطالعه و به این نتیجه رسیدند که اگر چه اگزالات منجر به افزایش دو برابری تجمع  $^{33}\text{P}$  در ساقه‌ی ذرت شد، اما سترات در تجمع این عنصر در ساقه نسبت به شاهد که فقط آب مقطر بود تأثیر چشم‌گیری نداشت [۱۰]. هافلند و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که کمبود هر دو عنصر فسفر و روی سبب افزایش معنی‌دار ترشح اسیدهای آلی به وسیلهی نوع‌های مختلف برنج در محلول غذایی می‌شود. نتایج آن‌ها هم‌چنین نشان داد که از میان اسیدهای آلی آشکار شده و آنیون‌های آن‌ها، اگزالات به طور کمی اهمیت بیشتری داشت. اما سترات در افزایش تحرک روی و فسفر بسیار مؤثر بود [۴]. در مطالعه‌ی دیگری با  $^{33}\text{P}$  در خاک‌های اسیدی، پالومو و همکاران (۲۰۰۶) به این نتیجه رسیدند که کارایی اسیدهای آلی و آنیون‌های آن‌ها در تحرک فسفر در ریزوسفر و جذب آن توسط گیاه به تعدادی از عامل‌های خاک و خصوصیت‌های جذب سطحی فسفر و اسیدهای آلی بستگی دارد. عامل‌های دیگری از قبیل فعالیت میکروبی، مقدار آب، pH و دسترس‌پذیری کاتیون‌های کمپلکس‌کننده از قبیل کلسیم و آلومینیم نیز مهم هستند. هم‌چنین مقدار و نوع اسیدهای آلی آزاد شده و شکل یونی آن‌ها در دسترس‌پذیری فسفر خاک بسیار مهم هستند. علاوه بر این‌ها به نظر می‌رسد که وضعیت فسفر ذاتی گیاه نیز یک عامل کلیدی در کسب فسفر بعد از آزادسازی اسیدهای آلی باشد [۵]. خادمی و همکاران (۲۰۰۹) در آزمایش دیگری با  $^{33}\text{P}$  به این نتیجه رسیدند که در نبود ریزجانداران در ریزوسفر، آنیون‌های اگزالات و سترات به



## ۲. روش انجام آزمایش

این مطالعه در مجموعه گل‌خانه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس به صورت طرح کاملاً تصادفی در ۵ تکرار انجام شد.

### ۱.۲ نمونه‌برداری از خاک

خاک مورد آزمایش دارای بافت رسی، روند رطوبتی زیریک و روند حرارتی مزیک از منطقه‌ی آبسرد دماوند نمونه‌برداری شد. منطقه‌ی موردنظر دارای متوسط بارندگی سالانه‌ی ۵۱۸٫۶ میلی‌متر، متوسط دمای سالانه‌ی ۱۲٫۲ درجه سانتی‌گراد، شیب ۲٫۵ درصد، ارتفاع ۱۹۱۷ متر و رده‌بندی خاک Coarse-loamy, mixed, mesic Typic Calcixerepts است. نمونه‌های خاک از افق A (۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) جمع‌آوری شدند و پس از عبور از الک ۵ میلی‌متری تا زمان تجزیه در دمای آزمایشگاه نگه داشته شدند.

### ۲.۲ منبع فسفر و روی پرتوزا

برای تعیین میزان جذب فسفر و روی به وسیله‌ی گیاه، از فسفر و روی پرتوزا استفاده شد. با توجه به مقدار کود فسفات و روی توصیه شده برای گیاه ذرت، مقدار معینی از ترکیب‌های منوپتاسیم فسفات ( $KH_2PO_4$ ) به مدت ۱۱ روز و روی سولفات ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) به مدت ۷ روز در رآکتور تحقیقاتی تهران در معرض پرتودهی نوترونی با شار  $10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$  قرار گرفتند.  $^{32}P$  با فعالیت  $10^{11} \text{ Bq/mol}$  و  $^{65}Zn$  با فعالیت  $10^5 \text{ Bq/mol}$  حاصل شد.

### ۳.۲ آزمایش اول

برای بررسی جذب  $^{32}P$  به وسیله‌ی گیاه، بذره‌های ذرت رقم تک‌رگه‌ای ۷۰۴ به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر خیسانده شده و در کاغذ صافی مرطوب در دمای اتاق قرار گرفتند تا جوانه بزنند. بعد از جوانه زدن، هر گیاه همراه با ریشه اصلی آن در یک ریزبوم قرار گرفت. ریزبوم متشکل از یک لوله‌ی نایلونی (پلی‌اتیلنی) بود که معمولاً ۲۵ سانتی‌متر طول و ۹ میلی‌متر قطر داشت (لوله‌ی ریشه‌ای) و در بالای آن محدوده‌ای با ۵ سانتی‌متر طول و ۳ سانتی‌متر قطر، برای نگه‌داری دانه وجود داشت (شکل ۱). سوراخ‌هایی به قطر ۰٫۵ میلی‌متر در لوله‌ی ریشه‌ای برای هوادهی ایجاد شده و قبل از قرار دادن دانه‌های جوانه زده، لوله‌های ریشه‌ای با خاکی با وزن ظاهری ۱٫۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب پر شدند.

غلظت بیش از ۱ میلی‌مول بر لیتر قادرند دسترس‌پذیری فسفر برای گیاه را افزایش دهند. هم‌چنین افزایش غلظت اگزالات در ریزوسفر نسبت به سیترات به طور معنی‌داری تجمع  $^{32}P$  در ساقه‌ی گیاه را افزایش داد که این امر به دلیل معدنی شدن سریع سیترات به وسیله‌ی ریزجانداران است [۷]. هاکنینگ (۲۰۱۱) نشان داد که اسیدهای آلی و آنیون‌های سیترات، مالونات، اگزالات و تارتارات در افزایش دسترس‌پذیری فسفر تثبیت شده در خاک نقش دارند. هم‌چنین این اسیدهای آلی علاوه بر دسترس‌پذیری کردن فسفر از فاز معدنی، در افزایش دسترس‌پذیری فسفر آلی تثبیت شده بر سطح کانی‌های خاک (فیتات) نیز نقش دارند [۱۱]. گانگ و همکاران (۲۰۱۲) به این نتیجه رسیدند که الگوی تحرک فسفر از طریق افزودن اسیدهای آلی، در مطالعه‌های مختلف متفاوت است. این نتیجه، وابستگی تحرک فسفر خاک به نوع خاک و وضعیت فسفر آن از قبیل مقدار و توزیع اجزای فسفر در خاک را نشان می‌دهد. ترشح اسیدها و آنیون‌های آلی، مقدار فسفر رزین را نیز افزایش داد که احتمالاً به این دلیل است که آنیون‌های آلی بیش از اسیدی شدن ریزوسفر، در انحلال‌پذیری فسفر و افزایش دسترس‌پذیری آن برای رشد گیاه تأثیر دارند [۶]. در مطالعه دیگری ال‌ن سیان (۲۰۱۲) نشان داد که عملکرد هر دو گیاه لوین و کلزا در شرایط کمبود روی کاهش یافت ولی هیچ اسید آلی ترشح نکردند. اما در شرایط کمبود فسفر هر دو آنیون سیترات ترشح کردند [۱۲]. مرادی و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی نقش اسیدهای آلی بر جذب فسفر در خاک‌های آهکی به این نتیجه رسیدند که در حضور اسیدهای آلی، جذب فسفر توسط خاک کاهش می‌یابد. غلظت ۵ میلی‌مول بر لیتر اسیدهای آلی به طور معنی‌داری بیش از غلظت ۲ میلی‌مول بر لیتر منجر به کاهش جذب فسفر در سطح خاک شد [۱۳]. انصاری و همکاران (۱۳۹۱) نیز با استفاده از  $^{65}Zn$  در بررسی نقش باکتری‌های حل‌کننده‌ی ترکیب‌های کم محلول روی در کشت متوالی گندم و ذرت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از مایه‌ی تلقیح باکتری جذب روی توسط گیاهان مورد مطالعه را افزایش داد. این امر به دلیل ترشح اسیدهای آلی به وسیله‌ی این باکتری‌ها بود [۱۴]. هدف مطالعه‌ی حاضر، بررسی اثر دو اسید آلی اگزالیک و سیتریک بر جذب فسفر و روی به وسیله‌ی گیاه ذرت در شرایط خاک‌های آهکی دارای محدودیت از نظر این دو عنصر، با استفاده از شکل‌های پرتوزای فسفر و روی بود.



## ۴.۲ آزمایش دوم

در این بخش تمام شرایط شبیه آزمایش اول بود با این تفاوت که به جای پتاسیم فسفات نشان‌دار، همان مقدار محلول روی سولفات نشان‌دار ( $^{65}\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) به غلظت ۲ میکرو مول بر لیتر در لوله‌ی ریشه‌ای تزریق و مقدار  $^{65}\text{Zn}$  موجود در عصاره‌ی گیاه به وسیله‌ی طیف‌سنجی گاما اندازه‌گیری شد.

## ۵.۲ تجزیه و تحلیل آماری

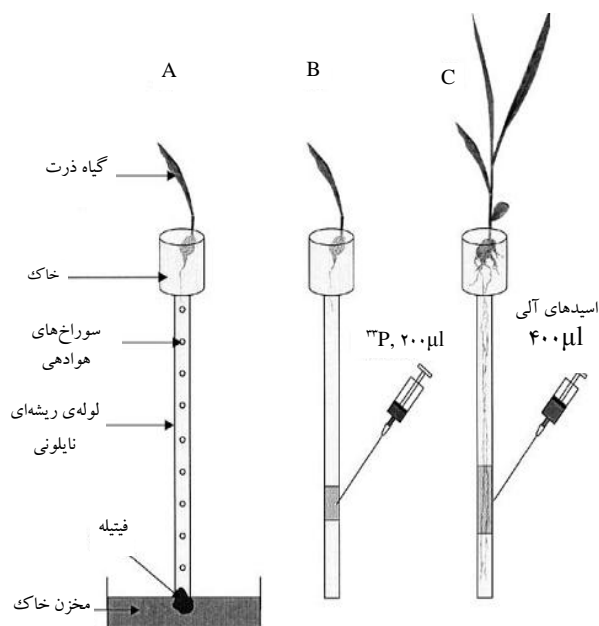
تجزیه و تحلیل نتایج از طریق تحلیل آماری ANOVA به روش بونفرونی برای بررسی سطح‌های اطمینان با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شدند.

## ۳. نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این آزمایش از یک خاک آهکی استفاده شده که دارای کمبود هر دو عنصر فسفر و روی بود، ولی بقیه‌ی عناصر خاک در حد متعادل بودند. اما به علت کم بودن درصد ماده‌ی آلی خاک موردنظر، مقدار نیتروژن مورد نیاز گیاه محاسبه و قبل از کاشت با خاک مخلوط شد.

### ۱.۳ نقش اسیدهای آلی در افزایش جذب $^{32}\text{P}$ به وسیله‌ی گیاه

نتایج تجزیه‌ی واریانس نشان داد که اثر تیمارهای مختلف اسیدهای آلی بر جذب  $^{32}\text{P}$  به وسیله‌ی گیاه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. براساس مقایسه‌ی میانگین‌ها به روش بونفرونی تفاوت‌ها بیش‌تر بین تیمار شاهد (آب مقطر) و تیمارهای اگزالیک اسید ۱۰ میلی‌مولار و سیتریک اسید ۱ و ۱۰ میلی‌مولار مشاهده شد. این تفاوت‌ها حاکی از این بود که این تیمارها در مقایسه با آب مقطر باعث افزایش جذب  $^{32}\text{P}$  به وسیله‌ی گیاه می‌شوند. اما بین تیمار شاهد و اگزالیک اسید ۱ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد وجود نداشت (جدول ۲).



شکل ۱. نمای کلی از یک ریزوم و چگونگی تزریق فسفر پرتوزا و اسیدهای آلی در لوله‌ی ریشه‌ای [۲، ۱۰].

هم‌چنین براساس نتایج تجزیه‌ی خاک، مقدار کود نیتروژنه‌ی مورد نیاز محاسبه شده و قبل از کاشت، با خاک ریزوم مخلوط شد. بعد از کاشت دانه‌ها، ریزوم‌ها در شرایط گل‌خانه‌ای قرار داده شدند. آبیاری ریزوم براساس مقدار آب از دست رفته در طول روز و با اضافه کردن به مخزن حاکی که در پایین آن بود و از طریق یک فیتله که با بخش بالایی ارتباط داشت، انجام شد. زمانی که طول ریشه‌ی اصلی تقریباً ۱۵ سانتی‌متر شد، ۲۰۰ میکرولیتر محلول پتاسیم فسفات نشان‌دار ( $\text{KH}_2^{32}\text{PO}_4$ ) به غلظت ۱۴ میکرو مول بر لیتر در منافذ تعبیه شده در لوله‌ی ریشه‌ای تزریق شد. بعد از این که ریشه‌ها از محدوده‌ی خاک حاوی  $^{32}\text{P}$  پرتوزا عبور کردند (حدود ۳ روز بعد از تزریق  $^{32}\text{P}$ )، مقدار ۴۰۰ میکرولیتر محلول اسیدهای آلی سیتریک (سیترات-H) و اگزالیک (اگزالات-H) با غلظت‌های ۱ و ۱۰ میلی‌مول بر لیتر هر روز طی یک دوره‌ی ۴ روزه در همان مکان تزریق  $^{32}\text{P}$  تزریق شدند. تزریق ۴۰۰ میکرولیتر آب مقطر به عنوان شاهد انجام شد. حدود ۵ روز بعد از تزریق اسیدهای آلی، بخش‌های هوایی گیاه برداشت شده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر و پس از عصاره‌گیری، مقدار  $^{32}\text{P}$  موجود در عصاره‌ی گیاه به وسیله‌ی شمارگر سوسوزن مایع مدل ۱۲۲۰ Quantulus تعیین شد.



## جدول ۱. خصوصیت‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورد مطالعه

مس	منگنز	آهن	روی	پتاسیم	فسفر	بافت	کربن آلی (%)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	کلسیم کربنات (%)	pH
۱,۶۶	۱۴,۵۰	۸,۲۶	۰,۷۰	۴۷۴	۶	رسی	۰,۴۸	۰,۶۵	۱۴,۷۰	۷,۹۰

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف اسیدهای آلی بر مقدار <sup>۳۲</sup>P جذب شده در اندام‌های هوایی ذرت

دامنه‌ی اطمینان ۹۹ درصد برای میانگین		سطح معنی‌داری	خطای استاندارد	تفاوت میانگین (I-J)	گروه J	گروه I
حد بالا	حد پایین					
-۴,۱۴۰۲	-۸,۲۴۰۸	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	-۶,۱۹۰۵۲**	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار
-۰,۲۲۱۴	-۴,۳۲۱۹	۰,۰۰۴	۰,۵۳۲۶۰	-۲,۲۷۱۶۶**	سیتریک اسید ۱ میلی مولار	
-۱,۵۳۱۵	-۵,۶۳۲۰	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	-۳,۵۸۱۷۶**	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
۳,۵۱۵۹	-۰,۵۸۴۷	۰,۱۲۳	۰,۵۳۲۶۰	۱,۴۶۵۵۹	شاهد (آب مقطر)	
۸,۲۴۰۸	۴,۱۴۰۲	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	۶,۱۹۰۵۲**	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار
۵,۹۶۹۱	۱,۸۶۸۶	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	۳,۹۱۸۸۶**	سیتریک اسید ۱ میلی مولار	
۴,۶۵۹۰	۰,۵۵۸۵	۰,۰۰۱	۰,۵۳۲۶۰	۲,۶۰۸۷۶**	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
۹,۷۰۶۴	۵,۶۰۵۸	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	۷,۶۵۶۱۱**	شاهد (آب مقطر)	
۴,۳۲۱۹	۰,۲۲۱۴	۰,۰۰۴	۰,۵۳۲۶۰	۲,۲۷۱۶۶**	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	سیتریک اسید ۱ میلی مولار
-۱,۸۶۸۶	-۵,۹۶۹۱	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	-۳,۹۱۸۸۶**	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	
۰,۷۴۰۲	-۳,۳۶۰۴	۰,۲۳۱	۰,۵۳۲۶۰	-۱,۳۱۰۱۰	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
۵,۷۸۷۵	۱,۶۸۷۰	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	۳,۷۳۷۲۵**	شاهد (آب مقطر)	
۵,۶۳۲۰	۱,۵۳۱۵	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	۳,۵۸۱۷۶**	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار
-۰,۵۵۸۵	-۴,۶۵۹۰	۰,۰۰۱	۰,۵۳۲۶۰	-۲,۶۰۸۷۶**	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	
۳,۳۶۰۴	-۰,۷۴۰۲	۰,۲۳۱	۰,۵۳۲۶۰	۱,۳۱۰۱۰	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
۷,۰۹۷۶	۲,۹۹۷۱	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	۵,۰۴۷۳۵**	شاهد (آب مقطر)	
۰,۵۸۴۷	-۳,۵۱۵۹	۰,۱۲۳	۰,۵۳۲۶۰	-۱,۴۶۵۵۹	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	شاهد
-۵,۶۰۵۸	-۹,۷۰۶۴	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	-۷,۶۵۶۱۱**	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	
-۱,۶۸۷۰	-۵,۷۸۷۵	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	-۳,۷۳۷۲۵**	سیتریک اسید ۱ میلی مولار	
-۲,۹۹۷۱	-۷,۰۹۷۶	۰,۰۰۰	۰,۵۳۲۶۰	۵,۰۴۷۳۵**	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	

\*\* تفاوت میانگین معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

نتایج این مطالعه نشان داد که اسیدهای آلی توانسته‌اند دسترس‌پذیری فسفر خاک و نیز جذب آن به وسیله گیاه ذرت را افزایش دهند. براساس نتایج به دست آمده از مطالعه‌های مختلف، اسیدهای آلی قادرند فسفر دسترس‌پذیر در خاک‌های آهکی را از طریق کاهش pH خاک، انحلال کربنات کلسیم، رقابت با فسفر در جذب روی سطح کانی‌ها، رسوب کلسیم و آزادسازی فسفر از کلسیم فسفات و هم‌چنین به شکل غیرمستقیم از طریق افزایش رشد ریزجاندارها و متعاقباً افزایش معدنی شدن

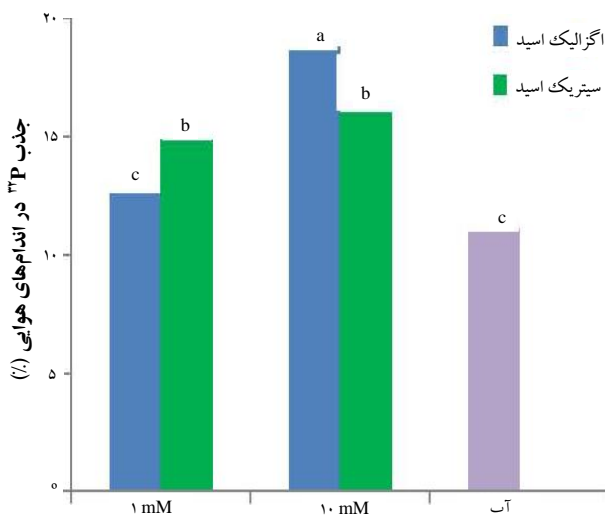
هم‌چنین براساس نتایج به دست آمده، مقدار فسفر جذب شده در اندام هوایی گیاه در غلظت ۱۰ میلی‌مول بر لیتر اگزالیک اسید به طور معنی‌داری ۱/۵ برابر غلظت ۱ میلی‌مول بر لیتر اگزالیک اسید و تقریباً ۲ برابر آب مقطر بود. در مقایسه با غلظت ۱۰ میلی‌مول بر لیتر اگزالیک اسید، غلظت‌های ۱ و ۱۰ میلی‌مول بر لیتر سیتریک اسید باعث جذب کم‌تر فسفر در گیاه شدند (شکل ۲). این نتایج با نتایج خادمی و همکاران (۲۰۰۹) و استروم و همکاران (۲۰۰۲) هم‌خوانی داشت [۷، ۱۰].



دسترس می‌کند [۳، ۱۰، ۱۸]. دلیل دیگری که ممکن است مطرح شود این است که براساس مطالعه‌ی گانگ و همکاران (۲۰۱۲) اسیدهای آلی و آنیون‌های آن‌ها (اگزالات و سیترات) تنها مقدار فسفر رزین را در خاک افزایش می‌دهند و در آزادسازی دیگر اجزای فسفر از خاک تأثیری ندارند [۶، ۱۸]. بنابراین ممکن است که در خاک موردنظر،  $^{32}P$  افزوده شده از فاز محلول و تبدلی نیز به سایر فازها وارد شده است که در نتیجه‌ی آن اسیدهای آلی نتوانسته‌اند در آزادسازی آن از خاک و جذب بعدی آن به وسیله‌ی گیاه مؤثر باشند. تجمع بیش‌تر فسفر در گیاه در غلظت‌های بالاتر اسیدهای آلی و در حضور اگزالیك اسید نیز وابستگی تحرک فسفر به نوع و غلظت اسیدهای آلی را نشان می‌دهد. هم‌چنین تفاوت در خصوصیت‌های خاک و شرایط آزمایش نیز از عامل‌هایی هستند که بر نتایج به دست آمده تأثیرگذار خواهند بود [۷، ۶، ۲۰].

**۲.۳ نقش اسیدهای آلی در افزایش جذب  $^{65}Zn$  به وسیله‌ی گیاه**  
نتایج تحلیل واریانس نشان داد که اثر اسیدهای آلی بر جذب  $^{65}Zn$  به وسیله‌ی گیاه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. مقایسه‌ی میانگین‌ها به روش بونفرونی نشان داد که تیمار شاهد (آب مقطر) تنها با تیمارهای سیتریک اسید ۱ و ۱۰ میلی‌مولار که کم‌ترین مقدارهای جذب را داشتند، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد داشت (جدول ۳). اما بین تیمار شاهد و تیمار اگزالیك اسید ۱ میلی‌مولار تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بود.

به طور کلی در این آزمایش بیش‌ترین مقدار روی جذب شده (۱٫۲۷ درصد) به وسیله‌ی گیاه در تیمار شاهد (آب مقطر) دیده شد. سپس تیمارهای اگزالیك اسید ۱۰ و ۱ میلی‌مولار، به ترتیب، با مقادیر ۱٫۲۲ و ۰٫۹ بیش‌ترین درصد جذب را داشتند و از نظر آماری نیز تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد در سطح احتمال ۱ درصد از خود نشان ندادند (شکل ۳). بین غلظت‌های مختلف اسیدهای آلی نیز از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. این نتایج نشان داد که اسیدهای آلی تأثیر چندانی در افزایش جذب  $^{65}Zn$  به وسیله‌ی گیاه نداشته‌اند.



شکل ۲. اثر اسیدهای آلی اگزالیك و سیتریك ۱ و ۱۰ میلی‌مولار بر جذب  $^{32}P$  در اندام‌های هوایی گیاه ذرت.

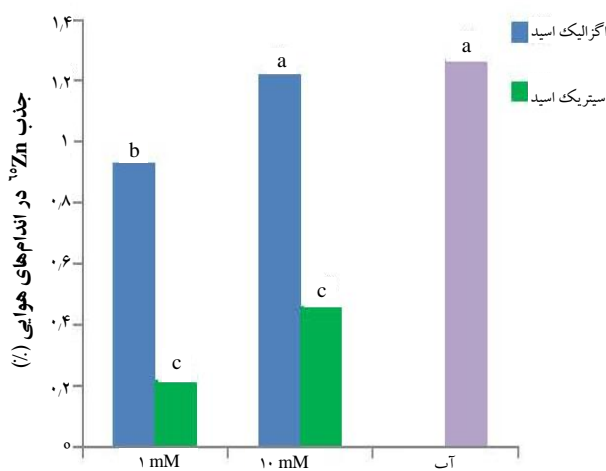
افزایش دهند [۳، ۴، ۵، ۶، ۱۶]. بیش‌تر مطالعه‌های انجام شده در زمینه‌ی نقش اسیدهای آلی در دسترس‌پذیری عناصر، در محیط هیدروپونیک و یا در اتاقک رشد تحت شرایط کنترل شده انجام شده‌اند. اما مطالعه‌ی حاضر در خاک و در شرایط گل‌خانه که به شرایط مزرعه نزدیک‌تر است، انجام شد [۷، ۳، ۵، ۱۷]. به نظر می‌رسد که در مطالعه‌ی حاضر جذب بیش‌تر فسفر به وسیله‌ی گیاه در تیمار اگزالیك اسید به این دلیل است که اگزالیك اسید بیش‌تر با کلسیم تشکیل کمپلکس می‌دهد، در حالی که سیتریک اسید بیش‌تر با آهن و آلومینیم کمپلکس تشکیل می‌دهد. از آنجایی که خاک مورد مطالعه نیز آهنکی بود، در نتیجه اگزالات در این شرایط نسبت به سیترات، فسفر بیش‌تری از خاک آزاد کرده و مقدار جذب آن نیز به وسیله‌ی گیاه از محلول خاک را افزایش می‌دهد [۲، ۳]. این نتیجه با نتایج عصاره‌های استخراج شده به وسیله‌ی اسیدهای آلی در آزمایش دیگری بر روی همین خاک نیز تا حدودی تأیید شده است، چون براساس نتایج فسفر اندازه‌گیری شده در عصاره‌های استخراج شده از خاک، سیترات نتوانست مقدار فسفر چشم‌گیری از خاک حتی در غلظت ۱۰ میلی‌مول بر لیتر استخراج کند. هم‌چنین جذب کم‌تر فسفر به وسیله‌ی گیاه در حضور سیترات به این دلیل است که جذب سطحی سیترات در خاک و معدنی شدن آن به وسیله‌ی ریزجانداران بسیار سریع بوده و این امر سبب تخلیه‌ی سریع سیترات از خاک شده و آن را برای تحرک فسفر خاک غیرقابل

**جدول ۳.** مقایسه‌ی میانگین اثر تیمارهای مختلف اسیدهای آلی بر مقدار  $^{65}\text{Zn}$  جذب شده در اندام‌های هوایی ذرت

دامنه‌ی اطمینان ۹۹ درصد برای میانگین		سطح معنی داری	خطای استاندارد	تفاوت میانگین (I-J)	گروه J	گروه I
حد بالا	حد پایین					
۰,۰۷۶۸	-۰,۶۵۶۸	۰,۰۶۴	۰,۹۵۲۹	-۰,۲۹۰۰۰	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار
۱,۰۷۶۸	۰,۳۴۳۲	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	۰,۷۱۰۰۰**	سیتریک اسید ۱ میلی مولار	
۰,۸۳۶۸	۰,۱۰۳۲	۰,۰۰۱	۰,۹۵۲۹	۰,۴۷۰۰۰**	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
۰,۰۲۶۸	-۰,۷۰۶۸	۰,۰۱۹	۰,۹۵۲۹	-۰,۳۴۰۰۰	شاهد (آب مقطر)	
۰,۶۵۶۸	-۰,۰۷۶۸	۰,۰۶۴	۰,۹۵۲۹	۰,۲۹۰۰۰	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار
۱,۳۶۶۸	۰,۶۳۳۲	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	۱,۰۰۰۰۰**	سیتریک اسید ۱ میلی مولار	
۱,۱۲۶۸	۰,۳۹۳۲	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	۰,۷۶۰۰۰**	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
۰,۳۱۶۸	-۰,۴۱۶۸	۱,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	-۰,۰۵۰۰۰**	شاهد (آب مقطر)	
-۰,۳۴۳۲	۱,۰۷۶۸	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	-۰,۷۱۰۰۰**	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	سیتریک اسید ۱ میلی مولار
-۰,۶۳۳۲	۱,۳۶۶۸	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	-۱,۰۰۰۰۰**	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	
۰,۱۲۶۸	-۰,۶۰۶۸	۰,۲۰۴	۰,۹۵۲۹	-۰,۳۴۰۰۰	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
-۰,۶۸۳۲	-۱,۴۱۶۸	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	-۱,۰۵۰۰۰**	شاهد (آب مقطر)	
-۰,۱۰۳۲	-۰,۸۳۶۸	۰,۰۰۱	۰,۹۵۲۹	-۰,۴۷۰۰۰**	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار
-۰,۳۹۳۲	-۱,۱۲۶۸	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	-۰,۷۶۰۰۰**	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	
۰,۶۰۶۸	-۰,۱۲۶۸	۰,۲۰۴	۰,۹۵۲۹	-۰,۲۴۰۰۰	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	
-۰,۴۴۳۲	-۱,۱۷۶۸	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	۰,۸۱۰۰۰**	شاهد (آب مقطر)	
۰,۷۰۶۸	-۰,۰۲۶۸	۰,۰۱۹	۰,۹۵۲۹	۰,۳۴۰۰۰	اگزالیک اسید ۱ میلی مولار	شاهد
۰,۴۱۶۸	-۰,۳۱۶۸	۱,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	۰,۰۵۰۰۰	اگزالیک اسید ۱۰ میلی مولار	
۱,۴۱۶۸	۰,۶۸۳۲	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	۱,۰۵۰۰۰**	سیتریک اسید ۱ میلی مولار	
۱,۱۷۶۸	۰,۴۴۳۲	۰,۰۰۰	۰,۹۵۲۹	۰,۸۱۰۰۰**	سیتریک اسید ۱۰ میلی مولار	

\*\* تفاوت میانگین معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد.

حاضر نشان داد که غلظت‌های ۱ و ۱۰ میلی مول بر لیتر اسیدهای آلی تأثیر چندانی بر جذب  $^{65}\text{Zn}$  به وسیله گیاه نداشتند و بیشترین مقدار جذب  $^{65}\text{Zn}$  در تیمار آب مقطر دیده شد. تاکنون مطالعه‌ای در ارتباط با نقش اسیدهای آلی بر جذب  $^{65}\text{Zn}$  به وسیله گیاه در محیط ریزوم انجام نشده است. ولی با توجه به نتایج یانگ لیانگ و همکاران (۲۰۰۲) اسیدهای آلی اثر چندانی بر آزادسازی روی از خاک نداشتند و اسید سیتریک نسبت به اسید مالیک مقدار روی بیشتری از خاک استخراج کرد [۲۲]. استایانو و دونچوا (۲۰۰۲) نشان دادند که تشکیل کمپلکس عنصر روی با آنیون‌های اسید آلی در ریشه سبب کاهش انتقال این عنصر به بخش‌های هوایی و در نتیجه کاهش غلظت روی در ساقه و برگ‌های گیاه نخود می‌شود. البته گیاه از این ساز و کار در شرایط سمیت روی استفاده کرده است [۲۳]. نتایج خادمی (۲۰۰۶) نیز نشان داد که اسیدهای آلی نتوانستند روی را از خاک استخراج کنند و مقدار روی استخراج شده به وسیله آن‌ها کم‌تر از آب مقطر بود [۲]. هم‌چنین الن سیان (۲۰۱۲) به این نتیجه رسید که گیاهان مورد مطالعه در شرایط کمبود روی هیچ‌گونه

**شکل ۳.** اثر اسیدهای آلی اگزالیک و سیتریک ۱ و ۱۰ میلی مولار بر جذب  $^{65}\text{Zn}$  در اندام‌های هوایی گیاه ذرت.

براساس پژوهش‌های انجام شده یکی از راه‌های افزایش انحلال‌پذیری روی و دسترس‌پذیری آن برای گیاه، ترشح اسیدهای آلی به وسیله برخی گونه‌های گیاهی است. اسیدهای آلی از طریق کاهش pH و تشکیل کمپلکس با عنصر روی در دسترس‌پذیری آن نقش دارند [۲، ۴، ۱۲، ۲۱]. نتیجه‌ی مطالعه



## مرجع‌ها

1. M.J. Malakouti, P. Keshavarz, N.A. Karimian, A comprehensive approach towards identification of nutrients deficiencies & optimal fertilization for sustainable agriculture, Tarbiat Modares University Press, Tehran, Iran (1387).
  2. Z. Khademi, Organic acids behaviour in calcareous soils. Ph.D. desertation of soil science. School of agriculture and forest sciences, University of Wales, Bangor, Gwynedd (2006).
  3. L. Strom, A.G. Owen, D.L. Godbold, D.L. Jones, Organic acid behaviour in a calcareous soil: sorption and biodegradation rates, Soil Biology & Biochemistry Journal, 33 (2001) 2125-2133.
  4. E. Hoffland, C. Wei, M. Wissuwa, Organic anion exudation by lowland rice (*Oryza sativa* L.) at zinc and phosphorus deficiency, Plant & Soil Journal, 283 (2006) 155-162.
  5. L. Palomo, N. Classen, D.L. Jones, Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate, Soil Biology and Biochemistry Journal, 38 (2006) 683- 692.
  6. X. Gang, S. Hongbo, X. Rongfu, Y. Nie, Y. Pei, Z. Sun, M.S.A. Blackwell, The role of root-released organic acids and anions in phosphorus transformations in a sandy loam soil from Yantai, China. African Journal of Microbiology Research, 6(3) (2012) 674- 679.
  7. Z. Khademi, D.L. Jones, M.J. Malakouti, F. Asadi, M. Ardebili, Organic acid mediated nutrient extraction efficiency in three calcareous soils, Australian Journal of Soil Research, 47 (2009) 213-220.
  8. Z. Khademi, M.J. Malakouti, D.L. Jones, Effects of the root organic acids on the uptake of minerals in rhizosphere, Journal of Water and Soil Sciences, 21 (1386) 179-189.
  9. M.A. Mousavi Shelmani, B. Naserian Kheabani, H. Ahari Mostafavi, M. Heidarieh, A. Majd Abadi, Nuclear Agriculture, Nuclear Sciences and Technology Research Institute Press, Tehran, Iran (1388).
- اسید آلی ترشح نمی‌کنند اما در شرایط کمبود فسفر، گیاهان آنیون سیترات ترشح می‌کنند. با توجه به نتایج مطالعه‌های مختلف و مطالعه‌ی حاضر به نظر می‌رسد که اسیدهای آلی تأثیر چندانی بر آزادسازی روی از خاک و جذب آن به وسیله‌ی گیاه ندارند [۱۲]. از آنجایی که این اسیدها از طریق کاهش pH و انحلال‌پذیری رسوب‌ها در آزادسازی این عنصر در خاک‌های آهکی نقش دارند و مهم‌ترین عاملی که در انحلال‌پذیری روی تأثیر دارد، pH است، احتمالاً این اسیدها نتوانسته‌اند در کاهش pH مؤثر باشند. این امر با نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری pH در عصاره‌های به دست آمده از خاک مورد مطالعه توسط اسیدهای آلی تأیید می‌شود. حتی در غلظت‌های ۱۰ میلی‌مول بر لیتر اسیدهای آلی، pH تعادلی عصاره‌های خاک تغییر چندانی نداشته و در برخی موارد نسبت به pH اولیه خاک نیز افزایش داشته است. دسورثولت رمپری و همکاران (۲۰۰۸) مشاهده کردند که ترشح اسید سیتریک تأثیری بر روی تغییر یا کاهش pH ریزوسفر نداشت [۲۱].
- ### ۴. نتیجه‌گیری
- بر اساس نتایج، اسیدهای آلی تنها بر جذب فسفر و انتقال آن به اندام‌های هوایی گیاه تأثیر داشتند و تأثیر آن‌ها بر جذب روی معنی‌دار نبود. بیش‌ترین درصد استخراج  $^{32}\text{P}$  در تیمار اگزالیک اسید ۱۰ میلی‌مولار و بیش‌ترین درصد استخراج  $^{65}\text{Zn}$  در تیمار آب مقطر مشاهده شد. با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که غلظت‌های بیش از ۱۰ میلی‌مول بر لیتر اسیدهای آلی برای جذب فسفر و روی از خاک‌های آهکی مورد نیاز است. تفاوت در مقدار و نوع اسیدهای آلی، در خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی و زیست‌شناختی خاک‌ها نیز از جمله‌ی عوامل مهمی هستند که بر نتایج به دست آمده بسیار تأثیرگذار هستند. برای بررسی این عوامل انجام آزمایش‌های میدانی بیش‌تر توصیه می‌شود.
- ### تقدیر و تشکر
- بدین وسیله از همکاری صمیمانه‌ی آقایان بهرام سلیمی، مهدی یعقوبی، میثم خانی‌زاده و معین مفتاحی سپاس‌گزاری و قدردانی می‌شود.





10. L. Strom, A.G. Owen, D.L. Godbold, D.L. Jones, Organic acids mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. *Soil Biology & Biochemistry Journal*, 34 (2002) 703-710.
11. P.J. Hocking, Organic acids exuded from roots in phosphorus uptake and aluminum tolerance of plants in acid soils, *Advances in Agronomy Journal*, 74 (2011) 63-67.
12. B.A. Elen Siane, Citrate root exudation under Zn and P deficiency, *Journal of Trop Soils*, 7 (3) (2012) 219-225.
13. N. Moradi, M.H. Rasouli Sadaghiani, A. Sepehr, B. Abdollahi, Effect of low molecular weight organic acids on phosphorus sorption in calcareous soils, *Journal of Soil and Water Research*, 42 (2) (1390) 233-239.
14. M. Ansari, M.J. Malakouti, K. Khavazi, A. Bahrami Samani, Study on the role of zinc solubilizing bacteria in continuance cultivation of wheat and corn by using <sup>65</sup>Zn, *Journal of Nuclear and Technology Science*, 61(3) (1391) 34-39.
15. T.S. Gahoonia, F. Asmar, H. Giese, G. Gissel-Nielsen, N.E. Nielsen, Root organic acids and phosphorus uptake of two barely cultivars in laboratory and field experiments, *European Journal of Agronomy*, 12 (2000) 281-289.
16. M.H. Long, K.J. McGlathery, C. Zieman, P.J. Berg, The role of organic acid exudates in liberating phosphorus from seagrass-vegetated carbonate sediments, *Journal of Limnol. Oceanogr*, 53(6) (2008) 2616-2626.
17. F.S. Zhang, J. Ma, Y.P. Cao, Phosphorus deficiency enhances root exudation of low molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (*Raphanus sativus* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants, *Journal of Plant and Soil*, 196 (1997) 261-264.
18. S. Radersma, P.F. Grierson, Phosphorus mobilization in agroforestry: Organic anions, phosphatase activity and phosphorus fractions in the rhizosphere, *Journal of Plant and Soil*, 259 (2004) 209-219.
19. L. Strom, A.G. Owen, D.L. Godbold, D.L. Jones, Organic acid behaviour in a calcareous soil implications for rhizosphere nutrient cycling, *Soil Biology & Biochemistry Journal*, 37 (2005) 2046-2054.
20. D.L. Jones, Organic acids in the rhizosphere, A critical review, *Plant and Soil Journal*, 205 (1998) 25-44.
21. J. Dessureault-Romppe, B. Nowack, M.L. Tercier-Waeber, J. Luster, Metal solubility and speciation in the rhizosphere of lupinus albus cluster roots, *Journal of Environ. Sci. Technol*, 42 (2008) 7146-7151.
22. C. Yong-Liang, G. Yu-Qiang, H. Shi-jie, Z. Chung-jing, Z. Yu-mei, C. Guo-ling, Effect of root organic acids on the activation of nutrients in the rhizosphere soil, *Journal of Forestry Research*, 13 (2) (2002) 115-118.
23. Z. Stayanova, S. Doncheva, The effect of zinc supply and succinate treatment on plant growth and mineral uptake in pea plant, *Braz. J. Plant Physiol*, 14 (2) (2002) 111-116.